

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Lidiane La Picirelli de Souza

Avaliação do ciclo de vida do sistema  
veículo/combustível no Brasil

Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências Engenharia de Energia.

**Área de Concentração:** Energia, Sociedade e Meio Ambiente

**Orientador:** Electo Eduardo Silva Lora

**Co-orientador:** José Carlos Escobar Palacio

Novembro de 2015

Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Lidiane La Picirelli de Souza

**Avaliação do ciclo de vida do sistema  
veículo/combustível no Brasil**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 27 de novembro de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora (Orientador)  
Prof. Dr. José Carlos Escobar Palacio (Co-orientador)  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Luiza Grillo Renó  
Prof. Dr. Arnaldo Martín Martínez Reyes  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristina Aparecida Vilas Boas Sales Oliveira



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
 Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

## ANEXO I

### FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Título da Dissertação: "Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema Veículo/Combustível no Brasil".

Autor: Lidiane La Picirelli de Souza

#### JULGAMENTO

Examinadores	Nota Individual (0 a 10)	Rubrica
1º	9,0	<i>[assinatura]</i>
2º	9,0	José Carlos Escobar Palácio
3ª	9,0	Maria Luiza Grillo Renó
4º	9,0	Arnaldo Martínez
5ª	9,0	Cristina Ap. V. Sales Oliveira
Nota Final da Banca**:	9,0	(sem pontos)

#### Observações:

- (1) O Trabalho será considerado **Aprovado** se a média das notas atribuídas pela Banca for maior ou igual a 7 (sete).
- (2) O Trabalho será considerado **Reprovado** se a média das notas atribuídas pela Banca for menor que 6 (seis), neste caso o aluno será desligado do programa.
- (3) O Trabalho será considerado **Insuficiente** se a média das notas atribuídas pela Banca for igual ou superior a 6 (seis) e abaixo de 7 (sete). Neste caso consultar o artigo 27º da Norma dos Cursos de Mestrado Acadêmico da UNIFEI.
- (4)\*\* Quando a banca ocorrer por vídeo ou web conferência, a Nota Final deve ser a média simples das notas atribuídas por todos os examinadores, inclusive do examinador que participa de forma remota.

Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

#### Observações:

Itajubá, 27 de novembro de 2015.

*[assinatura]*  
 Prof. Dr. Elceto Eduardo Silva Lora  
 1º Examinador (Orientador) – UNIFEI

*[assinatura]*  
 Prof. Dr. José Carlos Escobar Palácio  
 2º Examinador (Co-orientador) – UNIFEI

*[assinatura]*  
 Prof.ª Dr.ª Maria Luiza Grillo Renó  
 3ª Examinadora - UNIFEI

*[assinatura]*  
 Prof. Dr. Arnaldo Martín Martínez Reyes  
 4º Examinador – PNP/UNIFEI

*[assinatura]*  
 Prof.ª Dr.ª Cristina Aparecida Vilas Boas de Sales Oliveira  
 5ª Examinadora – SECTES/FAPEMIG

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha família.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por ter me dado ao longo de toda jornada acadêmica saúde, coragem, força, ânimo, perseverança e, acima de tudo, a sabedoria necessária para chegar até aqui.

À minha família, pelo estímulo, apoio e confiança, e em especial a minha Mãe Ruth, que está sempre presente em meu coração e me dá força e coragem para sempre seguir em frente, ao meu Pai Odair, e irmãos Wellinton e Wesley.

Ao professor Dr. Electo Eduardo Silva Lora por ter me aceito como aluna, pela preciosa orientação, atenção, amizade e paciência.

Ao professor Dr. José Carlos Escobar pela orientação e amizade, e por todas as sugestões que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca avaliadora prof. Dr. Arnaldo e Dr. Maria Luiza e Dr. Cristina pelas sugestões, correções, contribuições, não somente ao final deste trabalho, e sim durante toda a etapa de estudo.

Ao Felipe, por todo carinho, paciência, amor, amizade, atenção ao longo desses anos tão especiais.

À toda equipe do Nest, pela amizade, agradável convívio, e em especial á Milena, Mateus, German, que sem a ajuda de vocês com certeza o caminho teria sido muito mais difícil.

Aos meus amigos de uma vida inteira, Aline, Erika, Renata, Fernanda, Ju e Carol, que sempre me apoiaram e fizeram meus dias mais alegres e divertidos.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

**SUMÁRIO**

<b>SUMÁRIO</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XII</b>
<b>ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>XIV</b>
<b>SIMBOLOS E ELEMENTOS QUÍMICOS</b>	<b>XVI</b>
<b>RESUMO</b>	<b>18</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>20</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVOS	25
1.1.1 Objetivo Geral	25
1.1.2 Objetivos Específicos	25
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>27</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1 O ETANOL	27
2.1.1 Cadeia Produtiva do Etanol de Cana-de-açúcar e Uso Final	28
2.1.1.1 Etapa agrícola	28
2.1.1.3 Processo industrial	29
2.1.1.4 Distribuição	31
2.1.1.5 Uso final	31
2.2 GASOLINA	32
2.2.1 Cadeia produtiva da gasolina e uso final	32
2.2.1.1 Exploração do petróleo	32
2.2.1.2 Transporte e armazenagem	33
2.2.1.3 Etapa industrial: refino	33
2.2.1.4 Distribuição	34
2.2.1.5 Uso Final	35
2.3 MATRIZ ENERGÉTICA	35
2.3.1 Energia Elétrica	37

2.3.1.1	Geração de energia elétrica -----	39
2.3.1.2	Transmissão -----	42
2.3.1.3	Distribuição -----	43
2.4	VEÍCULOS CONVENCIONAIS -----	43
2.4.1	Cadeia produtiva do automóvel -----	43
2.4.1.1	Extração de materiais -----	43
2.4.1.2	Processamento de material / manufatura -----	45
2.4.2	Uso final -----	45
2.4.3	Fim de vida -----	46
2.5	VEÍCULO ELÉTRICO (EV), HÍBRIDO (HEV), HÍBRIDO PLUG-IN (PHEV) -----	46
2.5.1	Principais componentes de BEV, HEV e PHEV -----	48
2.5.1.1	Sistema de armazenamento de energia -----	48
2.5.1.2	Motor elétrico -----	49
2.6	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA -----	50
2.6.1	Metodologia da análise do ciclo de vida -----	51
2.6.1.1	Definição do objetivo e escopo -----	52
2.6.1.2	Análise do inventário -----	54
2.6.1.3	Avaliação do impacto do ciclo de vida -----	56
2.6.1.4	Interpretação dos resultados -----	59
2.7	ESTUDOS PRECEDENTES -----	60
<b>CAPÍTULO 3</b> _____		<b>69</b>
<b>METODOLOGIA</b> _____		<b>69</b>
3.1	OBJETIVO e ESCOPO DO ESTUDO -----	69
3.1.1	Função do sistema -----	70
3.1.2	Unidade Funcional -----	70
3.1.3	Fluxo de referência -----	70
3.1.4	Identificação dos limites do estudo -----	72
3.1.4.1	Fronteiras do sistema para o Cenário 1: ICEVg -----	73
3.1.4.2	Fronteiras do sistema para o Cenário 2: ICEVe -----	74
3.1.4.3	Fronteiras do sistema para o Cenário 3: ICEVf -----	74
3.1.4.4	Fronteiras do sistema para o Cenário 4: PHEV -----	76
3.1.4.5	Fronteiras do sistema para o Cenário 5: BEV -----	77
3.1.5	Fronteiras do sistema para o segundo nível de profundidade (subsistemas) -----	78
3.1.5.1	Fronteiras da Gasolina -----	78

3.1.5.2 Fronteiras do Etanol -----	80
3.1.5.3 Fronteiras da Eletricidade -----	83
3.1.5.4 Fronteiras do Automóvel -----	84
3.1.5.5 Fronteiras da Bateria -----	86
<b>CAPÍTULO 4 -----</b>	<b>87</b>
<b>ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA -----</b>	<b>87</b>
4.1 Preparação para a coleta de dados -----	87
4.2 COLETA de dados -----	88
4.2.2 INVENTÁRIO DA GASOLINA -----	88
4.2.2.1 Exploração da matéria prima: petróleo -----	88
Petróleo Nacional -----	89
Petróleo Importado -----	90
4.2.2.2 Transporte da matéria prima -----	90
4.2.2.3 Produção da gasolina -----	92
4.2.2.4 Distribuição da gasolina -----	93
4.2.2.5 Uso Final -----	94
4.2.2 INVENTÁRIO DO ETANOL -----	95
4.2.2.1 Etapa agrícola -----	96
4.2.2.2 Transporte -----	99
4.2.2.3 Processo industrial -----	100
4.2.2.4 Distribuição -----	101
4.2.2.5 Uso Final -----	102
4.2.3 INVENTÁRIO DA ELETRICIDADE -----	102
4.2.3.1 Produção da energia elétrica -----	103
4.2.3.2 Uso da eletricidade em BEV e PHEV -----	105
4.2.4 INVENTÁRIO DO AUTOMÓVEL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA -----	106
4.2.4.1 Fabricação de Materiais e Componentes -----	108
4.2.4.2 Etapa industrial: produção e montagem do veículo -----	109
4.2.4.3 Transporte -----	111
4.2.4.4 Uso Final -----	111
4.2.4.5 Fim de vida -----	111
4.2.5 INVENTÁRIO DA BATERIA DE ÍON DE LÍTIO PARA BEV E PHEV -----	112
4.2.5.1 Caracterização e montagem da bateria -----	113
4.2.5.2 Uso Final -----	117



4.2.5.3 Fim de vida - Reciclagem -----	117
<b>CAPÍTULO 5</b> _____	<b>120</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA</b> _____	<b>120</b>
5.1 Seleção e definição dos métodos e das categorias do impacto -----	120
5.2 RESULTADOS -----	121
5.2.1 Potencial de aquecimento global-----	121
5.2.2 Potencial de acidificação -----	124
5.2.3 Potencial da depleção da camada de ozônio -----	126
5.2.4 Potencial de eutrofização -----	127
5.2.5 Potencial de toxicidade humana -----	129
5.2.6 Potencial de oxidação fotoquímica -----	130
5.2.7 Potencial de depleção abiótica -----	132
5.2.8 Potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis -----	134
5.2.9 Comparação geral entre os veículos -----	135
<b>CAPÍTULO 6</b> _____	<b>138</b>
<b>CONCLUSÕES</b> _____	<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> _____	<b>140</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 – Veículos no Mundo-----	20
Figura 2 – Veículos no Brasil -----	21
Figura 3 – Distribuição da frota de veículos no Brasil -----	22
Figura 4 – Evolução do consumo final de petróleo por setor ( $10^3$ tep)-----	23
Figura 5 – Participação de fontes não renováveis na matriz energética-----	36
Figura 6 – Consumo energético total por setor no Brasil -----	36
Figura 7 – Composição Setorial do Consumo de Derivados do Petróleo no Brasil -----	37
Figura 8 – Oferta interna de energia elétrica por fonte -----	38
Figura 9 – Consumo de energia elétrica final por setor no Brasil-----	39
Figura 10 – Distribuição de materiais do veículo em kg -----	44
Figura 11 – Etapas do Ciclo de Vida-----	50
Figura 12 – Nova estrutura da Norma ISO -----	51
Figura 13 – Fases de uma ACV-----	52
Figura 14 – Impactos da fase de operação do Nissan Leaf-----	62
Figura 15 – Sistema de modelagem baseado em um intervalo de análise -----	63
Figura 16 – Quadro de análise utilizando indicadores ambientais e técnicos para veículos atuais e futuros-----	64
Figura 17 – Idade média da frota de automóveis no Brasil -----	71
Figura 18 – Quilometragem anual média da frota de automóveis no Brasil-----	71
Figura 19 – Evolução da frota circulante de automóveis da Região Metropolitana de São Paulo -----	72
Figura 20 – Fronteira do sistema para o ICEVg -----	73
Figura 21 – Fronteira do sistema para o ICEVe -----	74
Figura 22 – Fronteira do sistema para o ICEVf -----	75
Figura 23 – Fronteira do sistema para o PHEV-----	76

Figura 24 – Fronteira do sistema para o BEV -----	77
Figura 25 – Fronteiras do sistema da gasolina -----	79
Figura 26 – Fronteiras do sistema do etanol -----	82
Figura 27 – Fronteiras do sistema da eletricidade -----	83
Figura 28 – Fronteiras do sistema do automóvel -----	85
Figura 29 – Fronteiras do sistema da bateria -----	86
Figura 30 – Potencial de aquecimento global -----	123
Figura 31 – Potencial de acidificação -----	125
Figura 32 – Depleção da camada de ozônio -----	127
Figura 33 – Potencial de eutrofização -----	128
Figura 34 – Potencial de toxicidade humana -----	130
Figura 35 – Potencial de oxidação fotoquímica -----	132
Figura 36 – Potencial de depleção abiótica -----	133
Figura 37 – Potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis -----	135
Figura 38 – Comparação Geral dos Resultados -----	136

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características dos Principais Tipos de Baterias -----	49
Tabela 2 – Estudos precedentes. -----	66
Tabela 3 – Frota de veículos flexible fuel que opta por cada combustível.-----	75
Tabela 4 – Inventário do ciclo de vida de 1kg de petróleo extraído em alto mar -----	89
Tabela 5 – Inventário do transporte marítimo 1t.km-----	91
Tabela 6 – Inventário da unidade de processo de refino de petróleo -----	92
Tabela 7 – Produção dos derivados para 1 kg petróleo-----	93
Tabela 8 – Distâncias entre os centros de produção ao centro de distribuição-----	93
Tabela 9 – Consumo de energia para bombeio por oleodutos e operações nos terminais -----	94
Tabela 10 – Dados do ICEVg -----	94
Tabela 11 – Dados do ICEVf-----	94
Tabela 12 – Emissão por 1MJ de gasolina -----	95
Tabela 13 – Emissão por 1MJ de etanol -----	95
Tabela 14 – Insumos da etapa agrícola -----	97
Tabela 15 – Transporte dos insumos -----	98
Tabela 16 – Consumo de diesel nos tratos culturais -----	98
Tabela 17 – Poluentes emitidos pelos tratores agrícolas -----	99
Tabela 18 – Emissões para água provenientes do cultivo da cana -----	99
Tabela 19 – Consumo dos veículos pesados -----	99
Tabela 20 – Poluentes emitidos por veículos de carga pesada.-----	100
Tabela 21 – Dados da produção do etanol-----	100
Tabela 22 – Insumos da etapa industrial-----	101
Tabela 23 – Distribuição do etanol -----	101
Tabela 24 – Dados do ICEVe -----	102
Tabela 25 – Emissões do etanol-----	102

Tabela 26 – Eletricidade por fonte de energia -----	103
Tabela 27 – Características dos veículos BEV e PHEV -----	106
Tabela 28 – Materiais para a produção de componentes automotivos -----	109
Tabela 29 – Insumos utilizados na produção de 1 automóvel -----	110
Tabela 30 – Dados para o transporte do veículo ao centro revendedor -----	111
Tabela 31 – Taxa de reciclagem média -----	112
Tabela 32 – Componentes para a produção de 1k de bateria de íon de lítio-----	113
Tabela 33 – Montagem da bateria de íon de lítio-----	114
Tabela 34 – Fase do transporte da reciclagem -----	118
Tabela 35 – Inventário da reciclagem da bateria de íon de lítio-----	119

## Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar condicionado
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEV	Veículo Elétrico à Bateria
ED	Apenas elétrico
eq	Equivalente
EURO	Padrão europeu de emissões
EV	Veículo elétrico
FCHEV	Veículo Elétrico Híbrido à Célula de Hidrogênio
GD	Apenas Gasolina
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
GWP	Potencial de Aquecimento Global
h	Hora
HEV	Veículos Híbridos

**xv**

ICEV	Veículo com Motor de Combustão Interna
ICEVd	Veículo com Motor de Combustão Interna Movido a Diesel
ICEV e	Veículo com Motor de Combustão Interna Movido a Etanol
ICEV f	Veículo flexfuel
ICEV g	Veículo com Motor de Combustão Interna Movido a Gasolina
ICEVglp	Veículo com Motor de Combustão Interna Movido a GLP
kg	Quilograma
km	Quilômetro
l/ha	Litro por hectare
Li-ion	Bateria de Íon de Lítio
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
MCI	Motor de Combustão Interna
MD	Unidade mista
MJ	Mega Joule
m/s	Metro por segundo
MWh	Megawatt hora
Wh/kg	Watt hora por quilograma
Ni-Cd	Bateria de Níquel-Cádmio
Ni-MH	Bateria de Hidreto Metálico
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONS	Operado Nacional do Sistema Elétrico
Pb	Bateria de Chumbo
PHEV	Veículo híbrido “plug-in”
PIB	Produto Interno Bruto
tEP	Tonelada equivalente de petróleo
tc	Tonelada de Cana

xvi

TTW	<i>“Tank –to-well”</i>
v	volt
WTW	<i>“Well-to-Wheel”</i>
WTT	<i>“Well-to-Tank”</i>

## Simbolos e Elementos Químicos

1,4 DB	1,4 Diclorobenzeno
ABS	Copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CFC	Clorofluorcarbono
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CFC-11	Triclorofluormetano
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Bioetanol
CH <sub>4</sub>	Metano
EPDM	Borracha de etileno-propileno-dieno
HC	Hidrocarbonetos
k(OH)	Radical Hidróxido
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
LiFePO <sub>4</sub>	Lítio de fosfato de ferro
MDI	Plástico diisocianato de metileno



**xvii**

MP	Material Particulado
MWh	Megawatt-hora
N	Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Amônia
NMVOC	Copostos Orgânicos Voláteis não-metânicos
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio
P	Fósforo
PA	Poliamida
Pb	Chumbo
PE HD	Alta densidade de plástico de polietileno
PET	Tereftalato de polietileno
PMMA	Poli metil metacrilato
POM	Polioxietileno
PP	Polipropileno
PPE	Éter polifenileno
PVC	Cloreto de polivinilo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Fósforo
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	Íon fosfato
Sb	Antimônio
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre
VOC	Composto orgânico volátil

## RESUMO

SOUZA, L.L.P. (2015), *Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema Veículo/ Combustível no Brasil*, dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá.

As emissões veiculares e o alto consumo de energia vinculado à cadeia de produção e uso de automóveis causam impactos significativos ao meio ambiente. Algumas medidas podem ser implementadas a fim de minimizar os danos causados por essas atividades. O uso eficiente de energia, assim como escolhas por produtos e serviços que liberem menores quantidades de poluentes, são práticas que visam à diminuição dos impactos ao meio ambiente. Existe uma ferramenta de gestão ambiental capaz de quantificar impactos ambientais, analisar produtos, serviços e tecnologias, através da utilização de dados de insumos, energia e emissões ambientais. Esta ferramenta é a Análise do Ciclo de Vida (ACV).

O presente trabalho possui o objetivo de realizar análises comparativas dos seguintes sistemas automotivos: veículo com motor de combustão interna, que utiliza a gasolina como fonte de energia (ICEVg); veículo com motor de combustão interna que utiliza etanol como fonte de energia (ICEVe), Veículo com motor de combustão interna que utiliza gasolina e etanol como fontes de energia (ICEVf); Veículo elétrico movido a eletricidade (BEV); Veículo Híbrido plug-in movido a gasolina e eletricidade (PHEV); através da metodologia da ACV. Logo, será realizada uma revisão abrangente dos diferentes cenários, com o objetivo de quantificar e comparar os impactos ambientais provocados por esses sistemas. Os sistemas que utilizam etanol como parte de seu combustível, possuem maiores impactos ambientais para as categorias: eutrofização, acidificação e oxidação fotoquímica. Os sistemas que utilizam gasolina como parte do combustível, possuem os maiores potenciais de impacto para: depleção abiótica, depleção abiótica de combustíveis fósseis e aquecimento global. Veículos que utilizam a bateria de íon de lítio possuem maiores impactos para a toxicidade humana.

**Palavras chave:** ACV, impacto ambiental, emissões veiculares, combustíveis, automóveis.

## ABSTRACT

Vehicle emissions and high energy consumption linked to the chain of automobile production and use have significant impacts on the environment. Some measures can be implemented to minimize the damage caused by these activities. The efficient uses of energy, as well as choices for products and services that release lower amounts of pollutants, are practices which aim at reducing the impact on the environment. There is an environmental management tool able to quantify environmental impacts and analyze products, services and technologies through the use of data inputs, energy and environmental issues. This tool is the Life Cycle Analysis (LCA).

This work has the objective of carrying out comparative analysis of the following automotive systems: vehicle with internal combustion engine that uses gasoline as an energy source (ICEVg); internal combustion engine vehicle that uses ethanol as an energy source (ICEVe) vehicle with internal combustion engine that uses gasoline and ethanol as energy sources (ICEVf);, electric vehicle powered by electricity (BEV); Hybrid vehicle plug-in gasoline-powered and electric (PHEV); through LCA methodology. Therefore, a comprehensive review will be undertaken of the different scenarios, in order to quantify and compare the environmental impacts caused by these systems. Systems using ethanol as part of its fuel, have larger environmental impacts to the impact categories: eutrophication, acidification and photochemical oxidation. Systems using gasoline as part of the fuel, have a larger potential for impact: abiotic depletion, abiotic depletion of fossil fuels and global warming. Vehicles using lithium-ion battery have major impacts on human toxicity.

**Keywords:** LCA, environmental impact, vehicle emissions, fuel automobiles.

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, a frota mundial de automóveis teve um acréscimo significativo e segundo a Organização Internacional de Fabricantes de Veículos automotores-OICA, entre os anos de 2007 até 2012, esse aumento foi da ordem de 30%, conforme é apresentado na Figura 1. No ano de 2007 a quantidade de veículos no planeta era de aproximadamente 900 milhões, ampliando para cerca de 1,15 bilhões no ano de 2012. Estimativas apontam que esse aumento persistirá por um longo tempo, e espera-se um incremento de até 1,7 milhões de automóveis até o ano de 2035 (IEA, 2012).

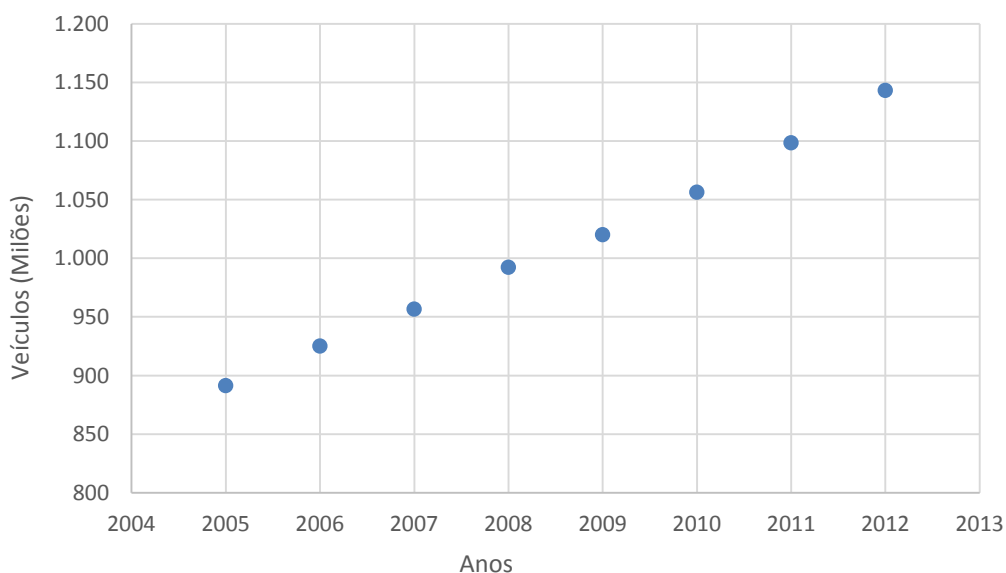


Figura 1 – Veículos no Mundo

Fonte: International Organization of Motor Vehicle Manufacturers- OICA, 2013.

No Brasil essa situação é semelhante, porém com maiores percentuais de crescimento. De acordo com Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores- ANFAVEA, entre os anos de 2005 e 2012, a frota de automóveis no Brasil cresceu cerca de 60%. Conforme a Figura 2, no ano de 2007 a frota de veículos no Brasil era de aproximadamente 23 milhões, expandindo para cerca de 37 milhões no ano de 2012.

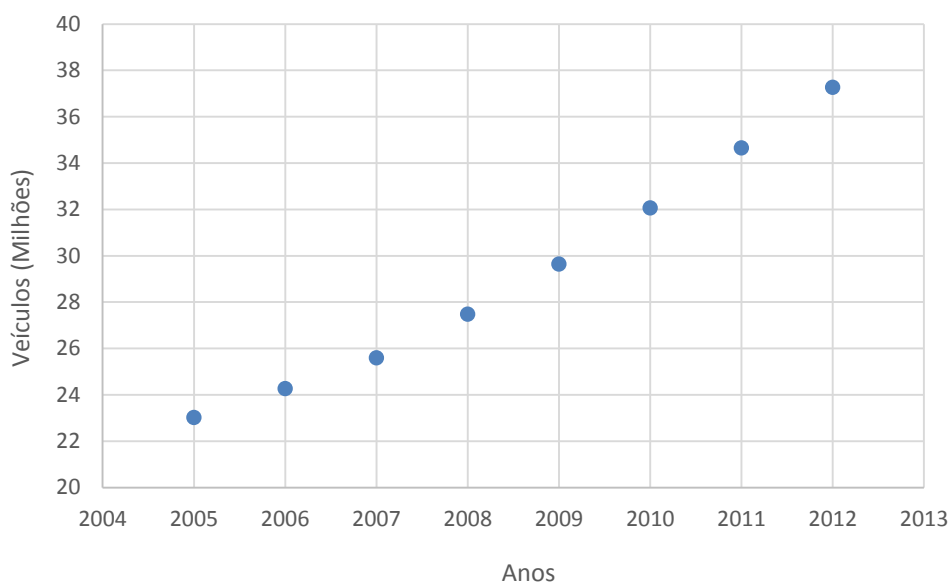


Figura 2 – Veículos no Brasil

Fonte: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores- ANFAVEA, 2013.

Além de aumento significativo da frota de veículos, outro problema no Brasil é a grande concentração de automóveis na Região Sudeste e Sul do país. De acordo com a Figura 3, 33,5% dos automóveis do país estão localizados no estado de São Paulo, seguido pelos estados de Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro. As menores concentrações de veículos estão na Região Norte e Nordeste, e o estado que possui a menor quantidade de automóveis é o Roraima, com menos de 1% do total de todo o país, seguido pelos estados do Amapá e Acre.

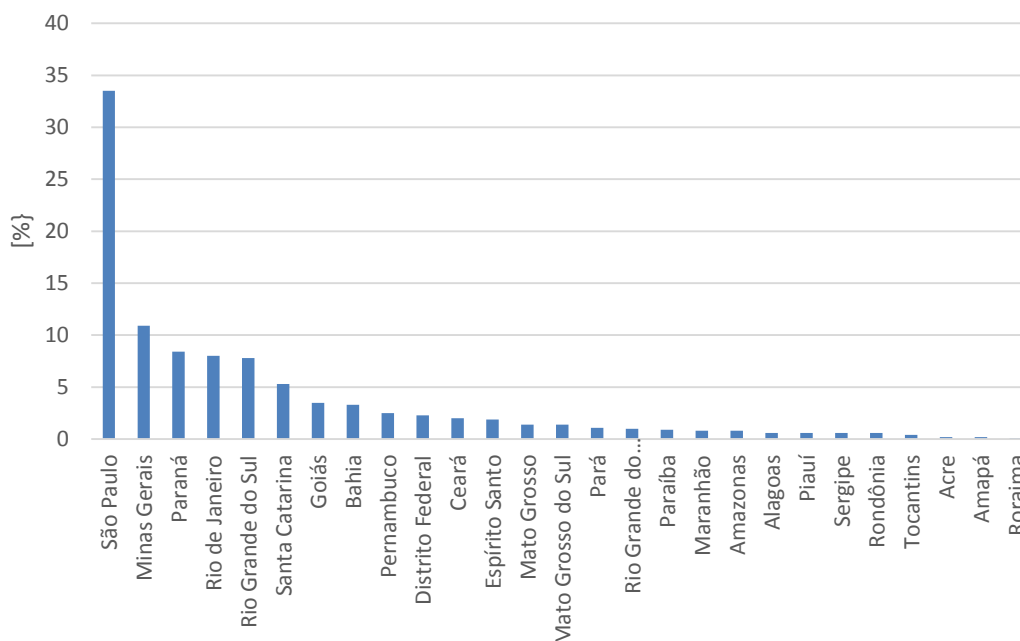


Figura 3 – Distribuição da frota de veículos no Brasil

Fonte: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores- ANFAVEA, 2013.

Diante do crescimento da frota de veículos outros problemas se intensificaram, como por exemplo, o aumento de cargas ambientais e consumo energético. Logo, a indústria automotiva está enfrentando grandes desafios em relação à sua tecnologia tradicional, o motor de combustão interna, que frequentemente é criticado como insustentável a médio/longo prazo, devido principalmente às emissões de gases poluentes durante o processo de combustão e por ser uma máquina com baixa eficiência. Além disso, essa indústria ainda sofre forte pressão de agências reguladoras, que exigem ações voltadas para a diminuição de impactos ambientais causados pelos veículos. Tão logo, questões sobre a sustentabilidade, originalmente confinado a acadêmicos e especialistas, conquistou a atenção pública, o que levou consumidores a mudarem suas opiniões e padrões de compras (Arena, Azzone et al., 2013).

Além da preocupação em relação à poluição ambiental, outra questão relevante é o consumo de energia. Como a maior parcela da matriz energética mundial ainda provém de fontes não renováveis, surgiu um grande interesse pela eficiência energética. A melhoria das condições ambientais locais e regionais, a redução do consumo de energia e a desvinculação das curvas de crescimento do consumo global versus a curva do crescimento do PIB são apontadas como fatores relevantes em busca da sustentabilidade mundial (Guglielmetti, 2002).

Outro obstáculo que o setor de transportes enfrenta está associado à sua dependência quase total de derivados de petróleo como fonte de energia. O setor da economia que mais consome petróleo em todo o mundo é o de transportes, responsável em 2009 por 61,7% do consumo de petróleo e 23% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (Team, 2012). Este setor foi também o maior responsável pelo crescimento do consumo de petróleo nas últimas décadas, conforme pode ser observado na Figura 4.

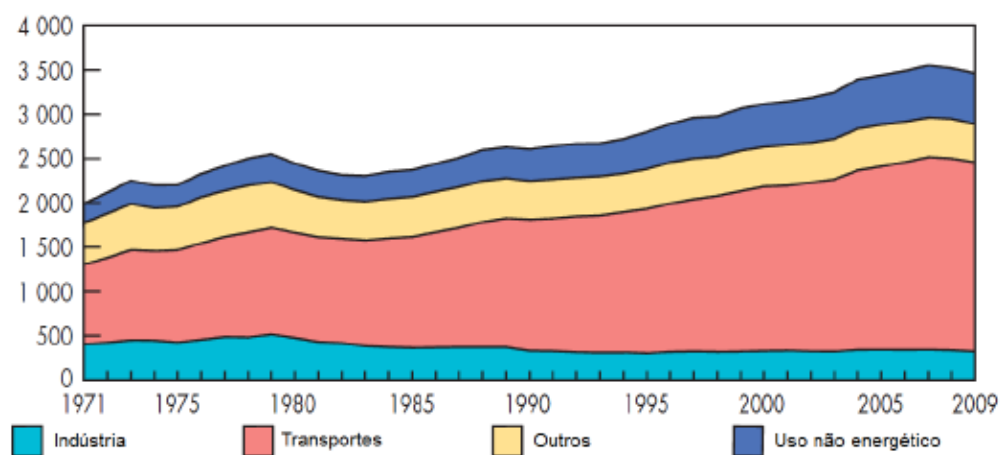


Figura 4 – Evolução do consumo final de petróleo por setor (10<sup>3</sup> tep)

Fonte: (Team, 2012)

Nos países em desenvolvimento como a Índia, China e Brasil, o crescimento anual na frota de automóveis aumenta ainda mais rapidamente, assim como as emissões ambientais vinculadas ao transporte. Nesses países o transporte público é insuficiente, a gestão de veículos é deficiente, além da tecnologia veicular ser obsoleta. Para agravar ainda mais a situação desses países, o transporte não motorizado está sendo substituído por veículos motorizados, devido ao aumento de renda da população (Ronchini Ximenes, Girardello Merli *et al.*, 2010).

De acordo com MME (2011), o setor de transportes no Brasil é o segundo maior usuário de energia final, entre 25 e 30% do uso total de energia no país. Além disso, esse setor ainda é responsável por 55% dos derivados de petróleo consumidos no Brasil.

Comparada a média mundial, o consumo de combustíveis fósseis no setor de transporte do Brasil é relativamente baixa, devido à adição de 25% de etanol anidro à gasolina, e ao grande número de veículos que utilizam o etanol hidratado como combustível veicular. No entanto, mesmo sob essas condições, o processo da combustão emite gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono

(CO) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), entre outros. Esses gases poluentes dão origem a muitas situações prejudiciais ao meio ambiente, tais como a intensificação do efeito de estufa, alterações climáticas, acidificação dos solos e dos recursos aquíferos, aparecimento de problemas respiratórios e cancerígenos nas populações que estão mais expostas a essas emissões, entre outros (Momoh e Omoigui, 2009).

Diante dessas questões, governos ao redor do mundo estão tomando medidas para minimizar os problemas relacionados à mobilidade urbana, segurança energética e mudança climática. Segundo dados apresentados no 4º relatório de avaliação do IPCC, o aumento de temperatura do planeta entre 2,0 – 2,4 °C em comparação ao período pré-Revolução Industrial, requer o início do declínio das emissões mundiais de GEE. Com isso, foi proposto a redução entre 50% a 85% das emissões globais de GEE em relação aos níveis de 2000. Essa meta deverá ser alcançada até 2050. A fim de atingir esta meta de longo prazo, os países industrializados deverão reduzir suas emissões em 25% a 40% até 2020. Os países emergentes em forte expansão deverão ter suas emissões reduzidas substancialmente em relação aos aumentos de emissões previstos para os próximos anos (La Rovere, 2015).

Segundo Balat, Balat et al., (2008), grande parte do esforço atual para controle das emissões de GEE e a busca pela sustentabilidade no setor automotivo, se concentra em:

- Reduzir o consumo de energia,
- Aumentar a eficiência da conversão ou da utilização de energia,
- Utilização de combustíveis alternativos, sobretudo os de base renovável,
- Desenvolver motores mais eficientes,
- Promover a evolução tecnológica de forma a implantar novos sistemas de propulsão,
- Reduzir o peso do automóvel,
- Introduzir medidas para o controle e minimização do tráfego,
- Incentivar novos hábitos de condução,
- Promover a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

Logo, pode-se constatar que existem possíveis soluções para problemas relacionados ao setor automotivo do país. Para que isso ocorra, será necessário grandes investimentos combinados com políticas de apoio, que são fundamentais para implementar e financiar mudanças. Muitos dos recursos de investimento podem ser encontrados através das políticas nacionais e locais, assim como mecanismos institucionais, que também são capazes de apoiar a mudança efetiva.



Em face dessa necessidade de mudança, existe uma técnica capaz de analisar toda a cadeia de produção, uso e fim de vida de processos e produtos, considerando os recursos energéticos, as matérias primas e emissões decorrentes dessas atividades. Esse método é a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Este trabalho aplica ACV para diferentes cenários da tecnologia veicular/combustível no Brasil, a fim de se conhecer os impactos ambientais causadas por cada um desses sistemas, e a partir desses resultados, realizar comparações dos sistemas em estudo.

Por fim, justifica-se a realização deste trabalho, diante da necessidade de estudos adequados que gerem informações relevantes e evidenciem os possíveis impactos ambientais causados por sistemas automotivos, para que se possa elaborar ferramentas capazes de auxiliar nas tomadas de decisões relacionadas com as melhorias das condições sociais e reduções dos impactos ambientais.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem o objetivo de realizar avaliações do ciclo de vida para diferentes cenários alternativos da tecnologia veicular/combustível no Brasil, visando quantificar e comparar os impactos ambientais provocados pelos sistemas estudados.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar a revisão bibliográfica do estado da arte do etanol, gasolina, veículos híbridos, e da metodologia da ACV;
- Levantar e ajustar os dados dos sistemas, com a finalidade de realizar o inventário do ciclo de vida do etanol, gasolina, eletricidade veículo equipado com motor de combustão interna (ICEV), elétrico a bateria (BEV) e veículo híbrido plug-in (PHEV);
- Simular o ciclo de vida dos sistemas automotivos no software SimaPro, utilizando um Eco-Indicador que contenha modelos matemáticos e categorias de impacto ambiental compatíveis com o objetivo do trabalho;

- Avaliar e comparar os resultados da avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) dos sistemas, e elaborar conclusões.

## **1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

### **Capítulo 1**

Na Introdução apresenta-se as considerações iniciais e comentários relativos ao tema da dissertação. São estabelecidos os objetivos gerais e os específicos, assim como a justificativa ao tema escolhido e a estrutura da dissertação.

### **Capítulo 2**

Neste capítulo realiza-se a revisão bibliográfica das fontes energéticas, dos sistemas de propulsão tradicionais e alternativas que melhor se adequam à situação no Brasil, além de fornecer os conceitos e o procedimento para a Análise do Ciclo de Vida. Apresenta-se alguns estudos precedentes sobre o tema da análise do ciclo de vida relacionado aos sistemas veiculares.

### **Capítulo 3**

Este capítulo apresenta a descrição da metodologia aplicada neste trabalho. São definidos a unidade funcional, as fronteiras dos sistemas, os cenários propostos para esse estudo e a seleção do método de avaliação do impacto.

### **Capítulo 4**

Este capítulo apresenta os inventários relativos aos processos de produção, uso e fim de vida dos sistemas em estudo.

### **Capítulo 5**

O capítulo 5 fornece os resultados da ACV dos cenários propostos. Indica-se quais são os processos que possuem maior contribuição para os aspectos ambientais de cada cenário descrito. Apresenta-se uma comparação geral dos impactos ambientais dos cenários analisados.

### **Capítulo 6**

No capítulo 6 foram apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 O ETANOL

O etanol é um composto orgânico, cuja fórmula química é  $C_2H_5OH$ , que pode ser produzido a partir de diversas fontes de biomassas e diferentes tecnologias de conversão (Hansen, Zhang *et al.*, 2005). Devido ao fato da matéria prima do etanol ser a biomassa, esse combustível também é conhecido como bioetanol. O etanol pode ser produzido a partir de qualquer matéria orgânica de origem biológica que contenha quantidades consideráveis de açúcares, ou materiais que possam ser convertidos nos mesmos, tais como amido ou celulose. A cana de açúcar e a beterraba são exemplos de matérias-primas que contêm açúcar, logo, podem ser utilizados para a produção de etanol. O trigo, a cevada e o milho são matérias-primas que contêm amido, e que podem ser facilmente convertidos em açúcar. Uma parte significativa da madeira de árvores e ervas são compostas por celulose, que pode ser convertidos em açúcar, no entanto o processo é mais complicado do que o requerido para amido (Escobar, Lora *et al.*, 2009).

O bioetanol pode ser utilizado em motores de combustão interna de ignição por centelha (Ciclo Otto) de duas maneiras basicamente: misturas de gasolina e etanol anidro, ou como etanol hidratado (BNDS e CGEE, 2008).

O etanol hidratado deve ser utilizado em motores fabricados ou adaptados especificamente para esse fim, com algumas modificações nos materiais que estão em contato com o combustível, como tratamento anticorrosivo das superfícies metálicas dos tanques, filtros e bombas de combustível, substituição de tubulações ou adoção de materiais mais compatíveis com o etanol (BNDS e CGEE, 2008).

## **2.1.1 Cadeia Produtiva do Etanol de Cana-de-açúcar e Uso Final**

O processo produtivo e uso do etanol dividem-se em cinco etapas, descritas detalhadamente a seguir:

### **2.1.1.1 Etapa agrícola**

#### **2.1.1.1.1 Preparação do Solo**

Esta etapa inclui uma série de operações que têm por finalidade fornecer as melhores condições físico-químico-biológicas ao solo para a germinação das sementes (Ometto, 2005).

Essa fase inicia-se pelos estudos das qualidades do solo, que tem como intuito obter um melhor desenvolvimento da cana-de-açúcar. Após a escolha da área segue-se as operações convencionais, que são basicamente o nivelamento, limpeza do solo, calagem (aplicação de calcário que visa à correção de acidez do solo e a maior disponibilização de nutrientes à planta), uso de grade pesada para a eliminação das raízes que sobram em campo (soqueiras), e por fim, operações de conservação do solo. Para esta etapa são utilizados máquinas e implementos agrícolas (Luca, 2002).

#### **2.1.1.1.2 Plantio**

A etapa do plantio da cana-de-açúcar pode ocorrer das seguintes maneiras: da forma manual ou mecanizada, através do plantio direto ou convencional. No plantio direto não há necessidade da retirada das palhas, e a inserção das mudas de cana-de-açúcar é realizada através de uma operação de sulcagem (produzir depressões no solo). No convencional, as palhas são retiradas para a realização da aração e da gradagem, seguida por sulcagem (Ometto, 2005).

#### **2.1.1.1.3 Manejo**

O manejo é uma prática agrícola comum, utilizado em diversas culturas. Os principais objetivos dessa atividade segundo Ometto (2005) são:

- Preservar ou restaurar as propriedades físicas e químicas do solo;
- Eliminar ou reduzir a ocorrência das plantas invasoras;
- Conservar o sistema de controle de erosão;
- Controlar pragas ou doenças.

#### **2.1.1.1.4 Colheita**

A etapa da colheita pode ser realizada através do método manual, ou mecanizada. Na colheita manual realiza-se a queimada para eliminar a palha, a fim de facilitar o manuseio dos cortadores e para afastar animais perigosos no campo (Pellegrini e Oliveira, 2008). Esse recurso foi drasticamente reduzido e substituído pela colheita mecanizada (sem queima), por conta das restrições ambientais, já que a queima danifica os solos, favorece a erosão, além de emitir gases poluentes e material particulado (Unica, 2012).

A colheita mecânica é realizada com a cana-de-açúcar crua, sem a queima prévia do canavial. Esse tipo de colheita é benéfica, pois evita danos aos tecidos celulares planta, além de todas as adversidades ocasionadas pelas queimadas (Carvalho, 2011).

#### **2.1.1.2 Transporte**

Após o corte, a cana-de-açúcar deve ser transportada imediatamente ao setor industrial, por meio de caminhão ou carreta tracionada por trator, a fim de evitar perdas de sacarose. O combustível geralmente utilizado pelos caminhões e tratores é o óleo diesel (Pellegrini e Oliveira, 2008).

#### **2.1.1.3 Processo industrial**

##### **2.1.1.3.1 Lavagem da cana-de-açúcar**

A primeira etapa do processo industrial é a lavagem da cana-de-açúcar. Essa etapa ocorre após a colheita, para que sejam retiradas terras e outras impurezas. Diante da tendência da mecanização da colheita há uma expressiva redução do uso de água para a fase da lavagem, já que a cana crua não retém tanta impureza (BNDS e CGEE, 2008).

##### **2.1.1.3.2 Moagem e Extração do Caldo**

Logo após a lavagem a cana-de-açúcar é picada, desfibrada e passa por uma série de moendas que separa o caldo contendo sacarose, do bagaço contendo a fibra (Leal, 2010). A tecnologia padrão de extração típica nos processos da indústria brasileira é a moagem, que consiste em extrair o caldo por meio de fricção mecânica a partir de rolos de pressão à cana desfibrada (Vilela, 2013). Para maximizar a extração do caldo, promove-se a embebição (adição de água) do bagaço após a passagem nos primeiros rolos da moenda (Acioli, 1994).

### **2.1.1.3.3 Tratamento Químico**

Após a fase de extração, o caldo resultante deve ser tratado para a remoção das impurezas existentes em sua composição (Pellegrini e Oliveira, 2008). Ele é peneirado, e passa a ser chamado de caldo misto. Esse caldo contém grande parte dos açúcares existentes na cana-de-açúcar. A seguir ele é aquecido entre 90° e 105° e então encaminhado para o decantador, onde ocorre a decantação de sedimentos. O caldo resultante desta etapa denomina-se caldo clarificado e os sedimentos contidos no fundo do decantador denomina-se lodo. O lodo é encaminhado para filtros rotativos a vácuo, que tem a finalidade de maximizar a recuperação do caldo, resultando em caldo limpo e na torta. Esta última é enviada para a lavoura como adubo, pois é rica em sais minerais (D'Agosto, 2004).

### **2.1.1.3.4 Fermentação do Caldo**

O caldo clarificado é bombeado para um tanque onde é resfriado, para então seguir para o processo de fermentação, que consiste na conversão do açúcar em álcool, através da adição do fermento ao caldo. Este fermento contém leveduras que são responsáveis por esse processo (Udop, 2012).

A fermentação do caldo ocorre em dornas de fermentação, pela ação de leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae* (Souza, 2010). O caldo fermentado é centrifugado e obtém-se o vinho, que é enviado para as colunas de destilação, e o leite de levedura, em que as leveduras são recuperadas e tratadas para novo uso (Udop, 2012).

### **2.1.1.3.5 Destilação do Vinho**

A destilação industrial do álcool é realizada em colunas de destilação, similares às encontradas nas refinarias de petróleo. As colunas são aquecidas na parte inferior e resfriadas na parte superior, de modo que o vinho que alimenta a base da coluna evapora. Em função da diferença de temperatura de vaporização do álcool e da água, à medida que o vapor sobe, ele vai se enriquecendo de álcool. Então esta mistura é condensada e coletada em bandejas ao longo da coluna (D'Agosto, 2004).

Na destilação o etanol é recuperado inicialmente na forma hidratada, com cerca de 6% de água em peso. Este processo gera como resíduo a vinhaça ou vinhoto, normalmente numa proporção de 10 a 13 litros, por litro de etanol hidratado produzido (Ometto, 2005). A composição da vinhaça é extremamente variável, mas de maneira geral, pode-se afirmar que ela possui um elevado conteúdo de matéria orgânica e altas concentrações de macronutrientes,

principalmente potássio (Rocha, 2009). Esse rejeito é importante para as lavouras por ser rico em sais minerais. No entanto, se não for tratado e nem usado de forma racional, ele é um grande poluidor de corpos aquáticos, ameaçando a fauna e as populações que se beneficiam dessa água (Lima e Marcondes, 2002).

#### **2.1.1.3.6 Desidratação: Etanol Anidro**

O etanol hidratado passa por uma coluna de desidratação, e com o auxílio do ciclohexano é formando o etanol anidro, com 0,4% de água em volume (BNDS e CGEE, 2008).

#### **2.1.1.4 Distribuição**

Após a produção, o álcool combustível é estocado junto às destilarias e então transferido por modo rodoviário ou dutoviário até as bases de distribuição das empresas distribuidoras dos combustíveis convencionais. As estruturas relacionadas ao transporte e armazenamento devem ser adequadas às características químicas do etanol e principalmente impedir a absorção de água, tendo em vista a estreita afinidade entre a água e o álcool (D' Agosto, 2004).

#### **2.1.1.5 Uso final**

O uso de etanol como combustível em veículos aplica-se em dois diferentes casos no Brasil: na mistura compulsória de etanol anidro à gasolina e em veículos “flexfuel”, que são veículos projetados para serem abastecidos com gasolina, álcool, ou qualquer mistura destes dois combustíveis. A vantagem desse tipo de automóvel está na possibilidade pela escolha do combustível conforme o preço, qualidade, características de desempenho ou até mesmo disponibilidade.

O etanol tem em sua molécula um átomo de oxigênio e por isso necessita de uma menor quantidade de ar para realizar combustão. Logo, a produção de CO<sub>2</sub>, por quilograma de álcool é menor do que dos outros combustíveis. Adicionalmente, o etanol é um combustível que resulta em uma combustão mais limpa, pois possui moléculas mais simples, com apenas dois carbonos, resultando em menores emissões de poluentes. Outra vantagem é a captura de carbono durante o processo de fotossíntese da cana-de-açúcar (Vilanova, 2007).

## **2.2 GASOLINA**

A gasolina é uma mistura composta basicamente por hidrocarbonetos obtidos através do refino do petróleo. No Brasil, a gasolina que se encontra disponível para o mercado consumidor é a gasolina do tipo C, ou seja, é a mistura de uma gasolina pura, ou tipo A, com uma a mistura compulsória, compreendida entre 21% e 25%, de etanol anidro, conforme determinação da agência reguladora (Cardoso, 2006).

### **2.2.1 Cadeia produtiva da gasolina e uso final**

A gasolina é obtida a partir do refino do petróleo, e sua cadeia de suprimento geralmente é dividida em: exploração, transporte, etapa industrial, distribuição e uso.

#### **2.2.1.1 Exploração do petróleo**

A fase de exploração do petróleo é dividida nas seguintes atividades: prospecção, sondagem, perfuração, extração, e separação.

##### **2.2.1.1.1 Prospecção**

A fase de exploração inicia-se com a prospecção, que são técnicas específicas que visam fundamentalmente localizar as regiões que possuem maiores condições para acumular o petróleo, pois não é possível prever onde existe petróleo, e sim os locais mais favoráveis para sua ocorrência (Thomas, 2004).

##### **2.2.1.1.2 Sondagem**

Após a prospecção a próxima etapa é a sondagem, que consiste na perfuração de um poço, com a finalidade de avaliar se há realmente a existência de petróleo. Usualmente, uma série de procedimentos acompanha a sondagem por perfuração e diversos testes são executados a fim de avaliar a ocorrência ou não de jazidas comerciais (Thomas, 2004).

##### **2.2.1.1.3 Perfuração e extração**

Após a conclusão da sondagem por perfuração e mediante as informações sobre as condições do poço, e caso haja a existência de petróleo, inicia-se a etapa de extração. O



petróleo encontra-se impregnado em rochas porosas que contém camadas de gás natural, petróleo e água, submetidos a altas pressões. Realizada a perfuração do poço, cria-se um caminho para que a pressão impulse naturalmente os materiais para a superfície (D'agosto, 2004).

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço é inserida. Entre os tubos e a parede há o preenchimento com cimento para isolar as rochas atravessadas, permitindo o avanço da perfuração com segurança (Thomas, 2004).

#### **2.2.1.1.4 Separação**

Finalizado o processo de extração, o petróleo é conduzido a um separador com a finalidade de separar o petróleo do gás e da água. Este equipamento normalmente fica próximo ao local de extração e serve como um primeiro estágio do processamento do petróleo (D'agosto, 2004).

#### **2.2.1.2 Transporte e armazenagem**

Uma vez extraído o petróleo, ele é encaminhado para centros de armazenagem e terminais de embarque, iniciando-se a etapa de transporte. Geralmente o transporte entre o ponto de extração e os centros de armazenagem é realizado por meio de oleodutos. Para o transporte a longas distâncias, como no caso da importação de petróleo ou produção no mar utiliza-se o transporte por navios, denominadas de petroleiros (D'agosto, 2004).

#### **2.2.1.3 Etapa industrial: refino**

O refino do petróleo consiste na série de beneficiamentos pelos quais passa o mineral bruto, para a obtenção de seus derivados, que são produtos de grande interesse comercial. Esses beneficiamentos englobam etapas físicas e químicas de separação e conversão, que fornecem os derivados finais do petróleo (Mariano, 2001).

As características dos petróleos tem influência sobre a técnica adotada para refino, e frequentemente determinam os produtos que melhor podem ser obtidos. Logo, nem todos os derivados podem ser produzidos a partir de qualquer tipo de petróleo. Da mesma forma, não existe uma técnica de refino adaptável a todos os tipos de petróleo (Abadie, 2002).

Segundo Abadie (2002), os processos em uma refinaria podem ser classificados em quatro grandes grupos:

- Processos de Separação: São de natureza física e têm por objetivo separar o petróleo em suas frações básicas;
- Processos de Conversão: São de natureza química e visam transformar uma fração do composto, em diferentes produtos, ou mesmo alterar a constituição molecular de uma dada fração, de modo a melhorar sua qualidade;
- Processos de Tratamento: Tem como finalidade principal eliminar as impurezas que estão presentes nas frações e que podem comprometer suas qualidades finais;
- Processos Auxiliares: são procedimentos que tem como propósito fornecer insumos a determinadas operação ou tratar os rejeitos dos processos.

A primeira etapa do processo de refino é a dessalinização, em que o petróleo bruto é aquecido e passa por um processo para remoção de sais corrosivos, metais e sólidos em suspensão. Em seguida, ocorre a destilação primária, em que o material é pré-aquecido e introduzido numa torre de destilação. Esse compartimento possui vários estágios de separação, para cada fração desejada. Os principais produtos deste processo são: gás de refinaria (metano e etano), gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, querosene, gasóleo e resíduo atmosférico. Essas frações deverão ser tratadas para se transformarem em produtos finais, ou enviadas como matéria-prima para outros processos de refino, em que ocorrerá o beneficiamento (Cardoso, 2006).

Uma vez que sejam produzidos, os derivados são bombeados por dutos para tanques de armazenagem na refinaria. Em seguida, através de dutos ou transporte rodoviário, são entregues às distribuidoras de combustível, que possuem tanques de armazenagem próprios (D'Agosto, 2004).

#### **2.2.1.4 Distribuição**

A gasolina proveniente de uma refinaria normalmente é enviada para empresas distribuidoras, que possuem tanques de armazenamento em suas bases de distribuição. Nas bases distribuidoras é onde ocorre a mistura do etanol à gasolina. Essas bases podem ser primárias (caso receba o combustível de uma refinaria), ou secundárias (caso receba o combustível de uma base primária). A partir dessas bases de armazenamento o combustível é distribuído para os postos de revenda, através do transporte rodoviário (Cardoso, 2006).

### 2.2.1.5 Uso Final

O uso da gasolina no Brasil aplica-se a três casos distintos: em veículo com motor de combustão interna movido a gasolina (ICEVg), em veículos “flexfuel” (ICEVf) em uma mistura aleatória de gasolina com o etanol hidratado, e por fim, em veículos híbridos (HEV) que possuem MCI e outro motor auxiliar, que no caso estudado nesse trabalho é um motor elétrico.

Uma das características notável desse tipo de combustível é a geração de poluentes atmosféricos, notadamente o CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, durante a combustão. As taxas de emissão variam em função da especificação da gasolina utilizada (BNDS e CGEE, 2008).

## 2.3 MATRIZ ENERGÉTICA

A produção e o uso da energia estão fortemente relacionados com o desenvolvimento da sociedade e oferecem muitos benefícios como: a possibilidade de utilização de aparelhos elétricos, o transporte de pessoas e de cargas de maneira rápida e eficiente, a diversificação das indústrias e dos produtos fabricados, entre muitos outros. Entretanto, a forma como a energia é produzida e utilizada está na origem de muitos problemas ambientais atuais (Goldenberg, 2003).

Os padrões atuais de produção de energia são baseados em fontes provenientes de combustíveis fósseis, que emitem poluentes locais, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento energético em longo prazo no planeta. A utilização de energia proveniente de fontes renováveis seria uma possível contribuição para minimizar essas adversidades, e nesse sentido o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao restante do mundo. Em 2013, a participação de energia renovável na matriz energética brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequena redução devido à menor oferta de energia hidráulica (EPE, 2014). A Figura 5 apresenta essas variações:

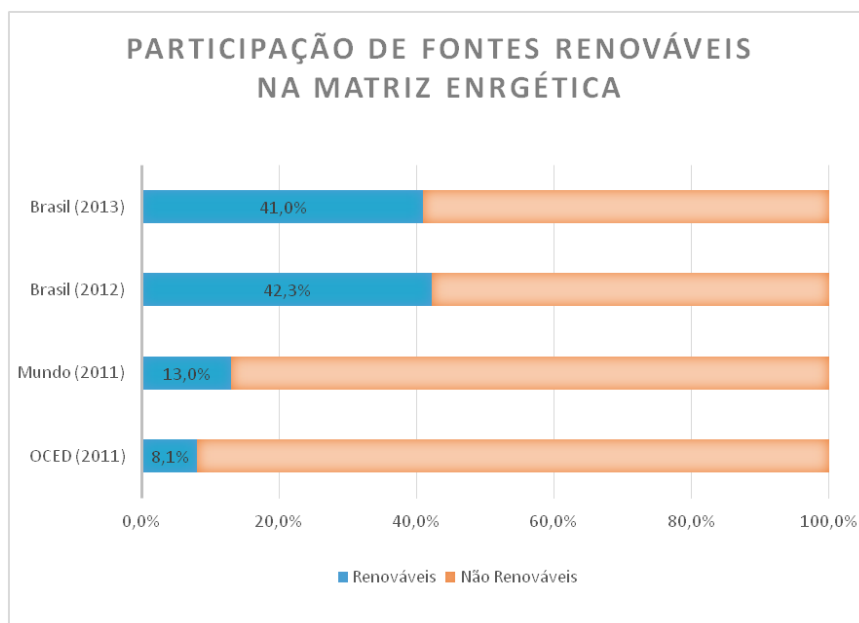


Figura 5 – Participação de fontes não renováveis na matriz energética  
Fonte: EPE, 2014.

De acordo com a Figura 6, verifica-se que para o ano de 2014 o maior consumidor de energia é o setor industrial, responsável por 35% do consumo, seguido pelo setor do transporte, que foi responsável por 33% do consumo de energia no país.

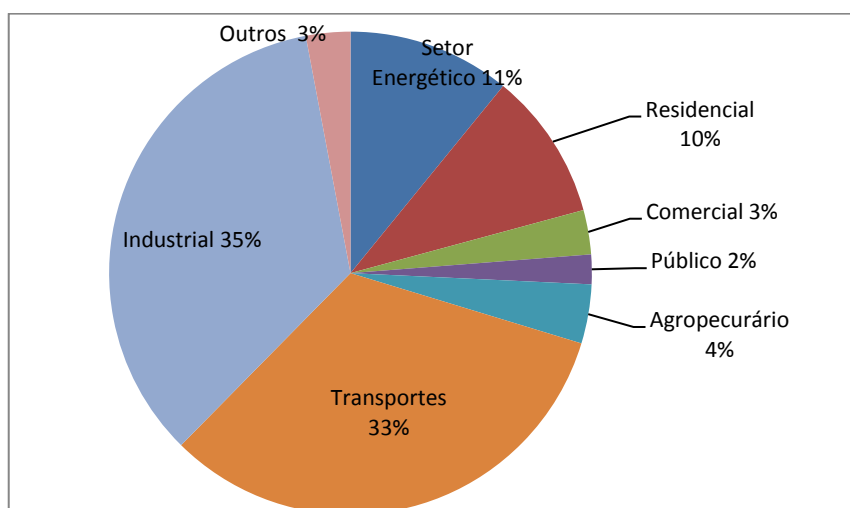


Figura 6 – Consumo energético total por setor no Brasil

Fonte: BEN, 2015.

Embora não seja o maior consumidor de energia, o setor de transporte é o responsável pelo maior consumo de derivados do petróleo no país e de acordo com a Figura 7, para o ano de 2014, esse setor foi responsável por cerca de 50% do total desse consumo. Isso se deve ao

fato do Brasil ter o sistema rodoviário como o principal meio de transporte, tanto de cargas como de passageiros.

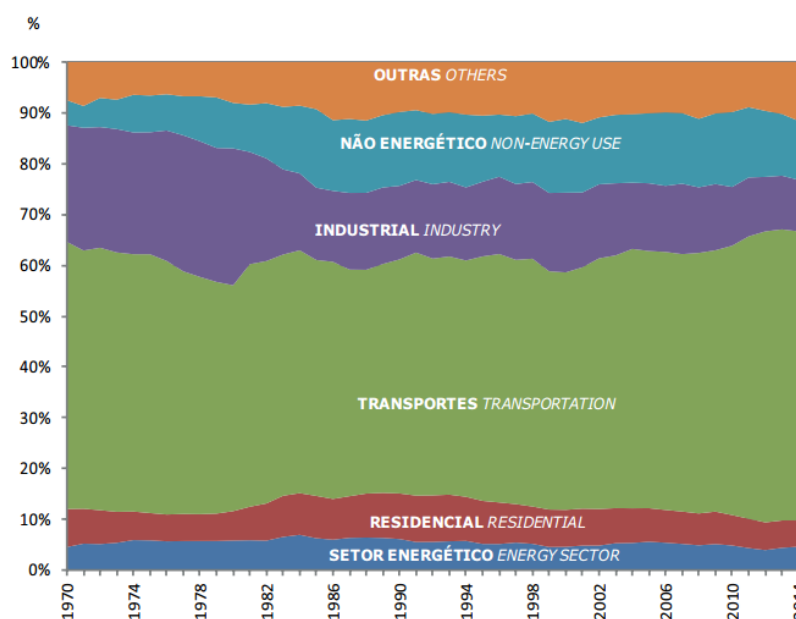


Figura 7 – Composição Setorial do Consumo de Derivados do Petróleo no Brasil  
Fonte: BEN 2015

### 2.3.1 Energia Elétrica

Especificamente, tem-se a eletricidade como uma forma de energia fundamental no consumo energético mundial, no entanto, os impactos causados por esse tipo de energia são muito expressivos e interferem no meio ambiente de várias maneiras: causam impactos nas funções dos ecossistemas incluindo a regulação climática, ciclagem de nutrientes, distribuição de água, dinâmica dos solos, dinâmica da população natural, entre outros (Kammem; PACC, 2004).

O setor elétrico brasileiro tem passado por profundas transformações provenientes do processo de transição do seu modelo estrutural. Empresas do setor de energia que antes estavam inseridas em um mercado monopolista, hoje competem com outros geradores. A adoção da concorrência empresarial nos segmentos de geração e comercialização de energia elétrica mudou a maneira com que essas empresas lidam com o mercado de energia.

A matriz elétrica brasileira (Figura 8) está atualmente dominada por fontes de origem renovável, predominantemente pela hidroeletricidade com 70,6%, seguindo pelas

termelétricas de gás natural com 11,3%, as plantas de cogeração a biomassa com 7,6%, as usinas nucleares com 2,7%, as termelétricas que usam derivados de petróleo 4,4% e as com o carvão e seus derivados representa 2,6%. A geração eólica está em um processo de desenvolvimentos e representa 1,1% da matriz elétrica brasileira (EPE, 2014).

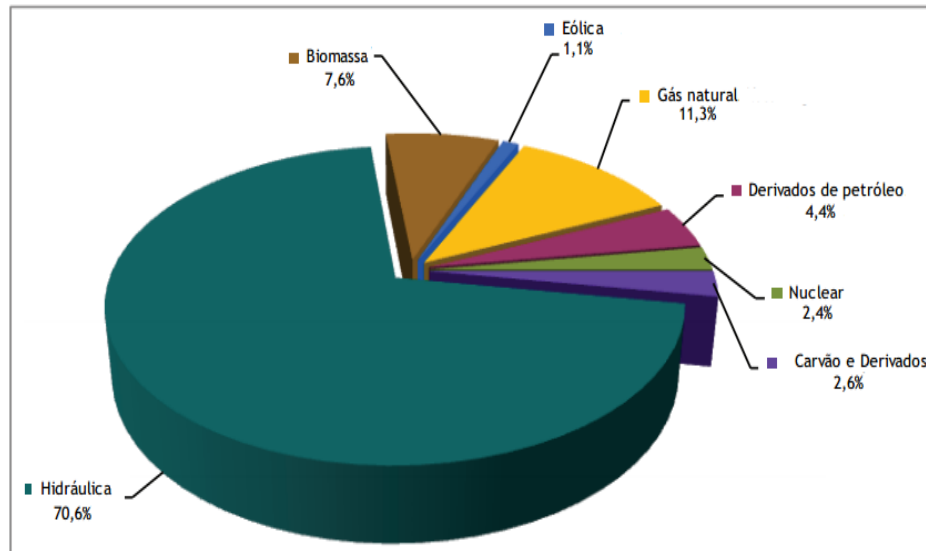


Figura 8 – Oferta interna de energia elétrica por fonte  
Fonte: Balanço Energético Nacional, 2014.

De acordo com a Figura 9, o setor que mais consome energia elétrica no país é o setor industrial, com cerca de 38,8% do total utilizado no país, seguido pelo setor residencial e comercial, com respectivamente 24,9% e 17,1% do consumo do país. Já o setor de transporte é o que menos utiliza energia elétrica no país, com cerca de 0,4% do consumo total. Isto indica um uso potencial da eletricidade no setor de transporte, sempre que seu custo de geração seja competitivo e tenha um menor impacto ambiental se comparado com as tecnologias atuais. Além disso, também deverá ser considerada a origem (renovabilidade e sustentabilidade) e o incremento da capacidade de geração de eletricidade excedente, que teria de ser produzida para suprir a nova demanda (BEN 2015).

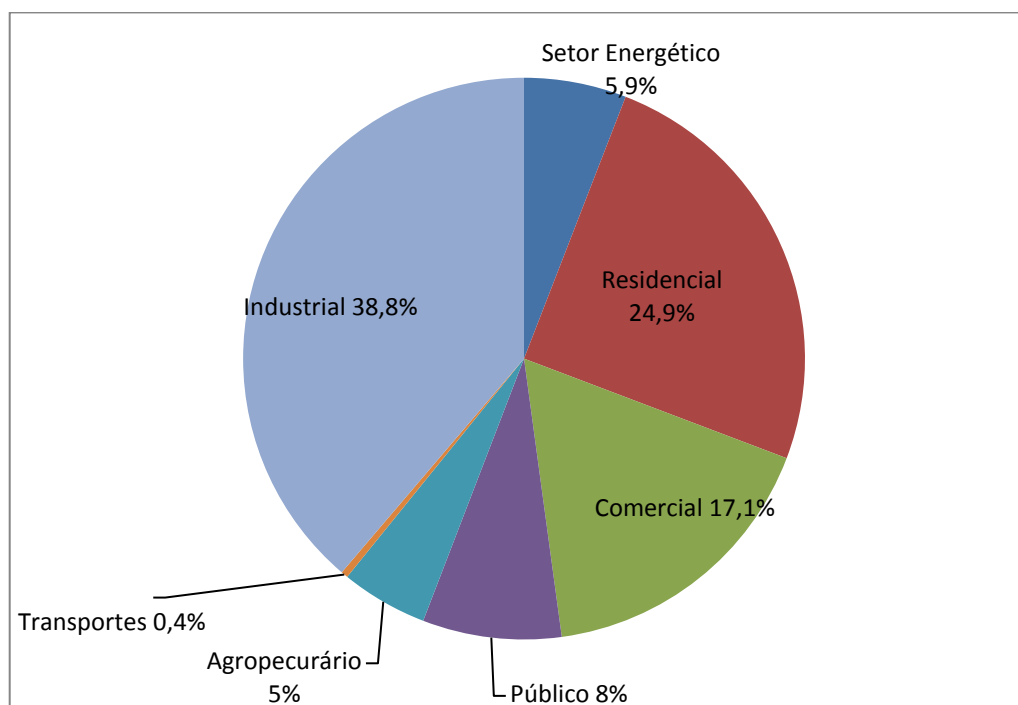


Figura 9 – Consumo de energia elétrica final por setor no Brasil  
Fonte: BEN 2015

### 2.3.1.1 Geração de energia elétrica

O processo de geração de energia elétrica está intimamente ligado a diferentes tipos de fontes primárias de energia e tecnologias de conversão. Cada tecnologia relacionada à geração de energia possui características distintas e específicas em termos de dimensionamento, custos, emissões de resíduos, por isso é importante que se conheça detalhadamente a matriz elétrica em estudo (Annel, 2015).

Nesse sentido, a matriz de energia elétrica brasileira foi caracterizada através de informações, principais características e tecnologias empregadas, que estão descritas a seguir:

#### 2.3.1.1.1 As usinas hidrelétricas

As usinas hidrelétricas utilizam o movimento da água de um corpo d'água para gerar eletricidade. A água é utilizada para girar as turbinas hidráulicas que estão acopladas a um gerador elétrico e assim, transforma a energia cinética do movimento da água em energia mecânica, e finalmente em energia elétrica (Coltro, 2003).

A energia hidráulica é utilizada em grande escala no Brasil, devido principalmente à ampla rede fluvial existente no país. No entanto, estão sendo discutidas fontes alternativas para a produção de energia elétrica, pois a falta de chuvas está causando um grande déficit na

oferta de energia, além de problemas relacionados à impactos ambientais nas construções de reservatórios, como perdas de espécies de plantas e animais (Eletrobrás, 2014).

Na literatura, as usinas hidrelétricas são consideradas uma das tecnologias com menores emissões de gases de efeito estufa, embora existam algumas controvérsias e incertezas sobre a quantidade de emissões devido ao alagamento do solo (Gagnon, et al, 2002, Raadal et al, 2011). Essas emissões estão relacionadas à decomposição do estoque de biomassa terrestre preexistente nas áreas de alagamento, assim como da matéria orgânica proveniente da bacia de drenagem a montante (carbono da biomassa e do solo e eventual lançamento de esgoto e águas residuais) e da matéria orgânica internamente produzida no lago (produção de fitoplâncton) (Paciornik, N. 2006).

### **2.3.1.1.2 Usinas Nucleares**

As usinas nucleares tem o mesmo princípio de funcionamento de centrais termelétricas convencionais, com a particularidade de que o vapor é gerado pela fissão de átomos de urânio. O processo de fissão do átomo de urânio libera calor e aquece um fluido, produzindo o vapor que movimenta uma turbina acoplada a um gerador elétrico, gerando a energia elétrica (Miranda, 2012).

A maior vantagem ambiental da geração elétrica através de usinas nucleares é a não utilização de combustíveis fósseis, evitando o lançamento na atmosfera dos gases responsáveis pelo aumento do aquecimento global e outras emissões tóxicas. Usinas nucleares ocupam áreas relativamente pequenas, podem ser instaladas próximas aos centros consumidores e não dependem de fatores climáticos (chuva, vento, etc.) para o seu funcionamento (Eletrobrás, 2014).

Em face aos benefícios relacionados à emissão de GEE, a utilização de energia nuclear é criticada por alguns especialistas devido ao alto custo de investimentos requeridos para a implementação dessas usinas, aos problemas relacionados à deposição dos resíduos radioativos, incertezas sobre a segurança do reator, além do alto custo necessário para a desativação das instalações nucleares (Goldemberg, 1998). Para reforçar essa posição contra a utilização de energia proveniente de fonte nuclear, o acidente na usina de Fukushima no Japão intensificou a discussão da comunidade internacional sobre a segurança das usinas nucleares em operação e em fase de construção (Farias, 2011).

As usinas nucleares brasileiras em operação – Angra 1 e Angra 2 – estão localizadas na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, que fica em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, e pertence à Eletrobrás Eletronuclear.



### **2.3.1.1.3 Usinas Eólicas**

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética através das turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores. A instalação de turbinas eólicas é ideal em locais em que a velocidade média anual dos ventos seja superior a 3,6 m/s (Aneel, 2015).

As fazendas eólicas não utilizam combustíveis e não possuem emissões de GEE diretas relacionadas, ao contrário da produção de estruturas e de equipamentos necessários para a produção do parque eólico (portanto é necessário que uma análise completa que leve em conta a energia consumida e as emissões de GEE decorrentes das etapas de construção, transporte, levantamento, operações, manutenções e descomissionamento do parque eólico (Lenzen; Wachsmann, 2004)).

O aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica apresenta algumas características ambientais desfavoráveis como, por exemplo: impacto visual, ruído, interferência eletromagnética, danos à fauna. Porém, algumas destas características podem ser significativamente minimizadas e até mesmo eliminadas com planejamento adequado e inovações tecnológicas (Terciote, 2002).

### **2.3.1.1.4 Usinas térmicas**

A energia térmica é o resultado da combustão de diversos materiais, como carvão, petróleo, gás natural, que são fontes não renováveis e biomassa (lenha, bagaço de cana etc.), que é uma fonte renovável. Ela pode ser convertida em energia mecânica e eletricidade, por meio de equipamentos como a caldeira a vapor e as turbinas a gás. Após a produção de eletricidade, o calor rejeitado pode ainda ser aproveitado em outros processos, principalmente na indústria (MMA, 2014).

### **2.3.1.1.5 Usinas termelétricas a carvão**

As termelétricas movidas a carvão mineral utilizam o ciclo Rankine, para produzir eletricidade. Esse ciclo consiste em queimar o carvão em uma caldeira que está envolvida por tubos que contém água, fazendo com que o calor produzido pela queima transforme a água em vapor. Esse vapor, que está a uma alta temperatura e pressão irá movimentar uma turbina que está acoplada a um gerador elétrico, produzindo eletricidade (Breeze, 2005).

Embora as termelétricas a carvão representem apenas uma pequena parte da matriz elétrica brasileira, essa tecnologia é responsável pelas maiores emissões de CO<sub>2</sub> por MWh

produzido (Lenzen, et al, 2006). Ainda que a extração do carvão e posterior utilização na produção de energia gerem benefícios econômicos (como empregos diretos e indiretos, aumento da demanda por bens e serviços na região e aumento da arrecadação tributária), o processo desde a extração até a combustão provoca significativos impactos socioambientais (Aneel, 2014).

#### **2.3.1.1.6 Usinas termelétricas a gás natural**

Nas usinas termelétricas a gás natural, a primeira etapa do processo consiste na mistura de ar comprimido com o gás natural a fim de se obter a combustão. O resultado é a emissão de gases em alta temperatura, que provocam o movimento das turbinas conectadas aos geradores de eletricidade. A energia térmica, portanto, transforma-se em mecânica e, em seguida, em elétrica.

No Brasil, o gás natural é encontrado, em geral, associado ao petróleo. A maior parte das reservas localiza-se no mar, principalmente no litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo (Eletrobrás, 2014).

#### **2.3.1.1.7 Usinas termelétricas utilizando derivados do petróleo**

Nas usinas termelétricas que utilizam derivados do petróleo, dois combustíveis são os mais utilizados: óleo diesel e óleo combustível.

As termelétricas movidas a óleo diesel utilizam motores do ciclo Diesel para gerar eletricidade. Nesse ciclo, um pistão comprime o ar contido num cilindro, para que a temperatura do ar aumente acima do ponto de ignição do combustível que, então é introduzido na câmara e entra em ignição espontânea. O vapor produzido irá girar as turbinas, e assim gerar a eletricidade (Miranda, 2012). As termelétricas movidas a óleo combustível utilizam o ciclo Rankine, descrito anteriormente.

#### **2.3.1.2 Transmissão**

As usinas produtoras de energia elétrica geralmente são construídas longe dos centros consumidores, logo, a eletricidade produzida é transportada por longas distâncias em um complexo sistema de transmissão. Esse sistema é composto por cabos aéreos revestidos por camadas isolantes e fixados em grandes torres de metal. Após percorrer esse caminho, a energia elétrica chega a subestações, local onde ocorre a diminuição da tensão, para que possa se iniciar o processo de distribuição.

### **2.3.1.3 Distribuição**

A distribuição de energia se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado à entrega de energia para um usuário final. Como regra geral, o sistema de distribuição pode ser considerado como um conjunto de instalações e equipamentos elétricos, que operam geralmente em sistemas de baixa tensão.

O sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil é regulado por resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel, 2015). A energia distribuída é entregue aos consumidores conectados à rede elétrica por uma determinada empresa de distribuição.

## **2.4 VEÍCULOS CONVENCIONAIS**

Os automóveis com motor de combustão interna são considerados veículos convencionais, uma vez que estão associados ao usual, ao conceito de veículo comum (Faias, 2006).

### **2.4.1 Cadeia produtiva do automóvel**

As principais etapas para a produção do automóvel são:

#### **2.4.1.1 Extração de materiais**

Os automóveis ao longo dos anos sofreram profundas modificações. O peso médio do automóvel, por exemplo, foi reduzido gradativamente em virtude da substituição de aço por metais mais leves, tendo como um dos principais objetivos o aumento da eficiência do veículo (de acordo com a classe do veículo). No entanto, principalmente após os anos 90, visando mais conforto e melhorias no desempenho de componentes e acessórios o aço foi novamente inserido na produção do automóvel, gerando um aumento de peso considerável (Ugaya 2001).

Um automóvel é composto basicamente por aço, ferro fundido, alumínio, borracha, vidro, cobre, entre outros, como pode ser observado na Figura 10.

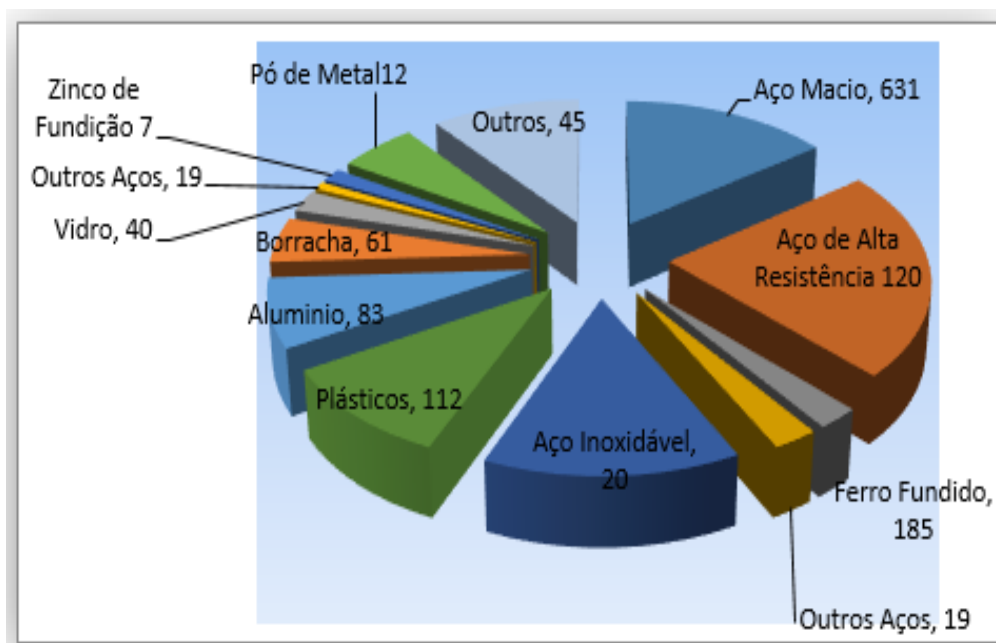


Figura 10 – Distribuição de materiais do veículo em kg

Fonte: Ugaya (2001).

A seguir são descritos os dois principais processos de extração de matéria prima:

#### 2.4.1.1.1 Mineração

É um processo cujo objetivo é a extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais. As principais etapas da exploração são: pesquisa, prospecção, estudo de viabilidade, desenvolvimento de acesso a região a ser explorada, exploração e recuperação da zona afetada pela exploração. Os principais minerais extraídos nessa etapa são: carvão, calcário, minério de ferro, minério de chumbo, minério de zinco, minério de alumínio, bauxita sílica, caulim.

#### 2.4.1.1.2 Extração de materiais fósseis

O emprego de material fóssil para o setor automotivo exerce uma influência decisiva sobre a criação e o desenvolvimento dessa indústria. Vários processos produtivos da indústria automobilística dependem exclusivamente de materiais fósseis. Os principais produtos extraídos como matéria prima são: gás natural e petróleo.

### **2.4.1.2 Processamento de material / manufatura**

A competitividade trouxe à indústria automobilística nacional uma crescente busca por produtividade, qualidade e flexibilidade para satisfazer a uma demanda crescente do mercado com produtos heterogêneos e diversificados. Isso gerou investimentos em sistemas de produção com processos automatizados, criando complexidade das instalações, exigindo maiores capacitações dos profissionais que planejam o controle e a automação da linha de produção (Barros, 2006).

Após a fase de extração, a matéria prima sofre múltiplos processos de fabricação inicial, para que se obtenham peças com formas básicas ou definitivas, como ligas, ou materiais mais elaborados como chapas, placas, perfis (Fiat, 2014).

Esse material chega em forma de bobinas ou chapas cortadas para o processo de manufatura. Nas prensas, esses materiais passam por diversas operações de embutimento, dobra e recorte. No final, a peça apresenta a estética e a geometria definidas de acordo com os níveis acurados de precisão e acabamento (Fiat, 2014).

O processo de manufatura automotiva pode ser subdividido em estamparia (Press Shop), armação de carrocerias (Body Shop), pintura (Paint Shop) e montagem final (Final Assembly). A estamparia é um processo no qual as chapas planas de metal são precisamente moldadas em uma prensa de estampagem. Na pintura encontram-se os processos de tratamento de superfície (fosfatização, vedação e pintura). Em um processo de armação ou montagem de uma carroceria automotiva, as peças unitárias metálicas são posicionadas em dispositivos e soldadas entre si formando subconjuntos. Por sua vez, os subconjuntos são soldados formando conjuntos (ex.: assoalho, laterais, portas) e esses por sua vez formam a carroceria completa. Durante a montagem final são agregados todos os itens de acabamento final do produto (motor, bancos, vidros, rodas etc.) (Barros, 2006).

Após o encerramento do processo de produção, os automóveis são enviados às concessionárias ou pontos de vendas.

### **2.4.2 Uso final**

Os maiores impactos gerados no uso final de automóveis são ocasionados pela utilização das fontes de energia, assunto que será abordado em outros capítulos.

No uso final alguns impactos contabilizados são referentes à manutenção e a substituição de peças como, por exemplo, a troca de óleos de motor, fluido de freio e de limpeza para o para brisa, pneus, entre outros.

### **2.4.3 Fim de vida**

No Brasil não existe regulamentação específica para o descarte dos veículos velhos e sem condições de circulação e o país tampouco possui empresas especializadas neste serviço. Por esta razão, os veículos acabam sendo levados para desmanches e depósitos expostos, poluindo o meio ambiente (AEA, 2009).

Nos desmanches é feito todo o processo de manufatura reversa para reaproveitamento de peças para o mercado de reposição. Uma parcela do material restante é enviada para a reciclagem, particularmente a sucata ferrosa.

## **2.5 VEÍCULO ELÉTRICO (EV), HÍBRIDO (HEV), HÍBRIDO PLUG-IN (PHEV)**

Atualmente, os veículos elétricos, híbridos e plug-ins estão ressurgindo como soluções para diferentes problemas relacionados com segurança energética e impactos ambientais, por isso, atualmente empresas automobilísticas estão realizando pesquisas e promovendo o desenvolvimento tecnológico desses tipos de automóveis (Dijk e Yarime, 2010).

### **Veículos elétricos**

O veículo puramente (EV) não possui motor de combustão interna. Ele é movido por energia elétrica, seja provida por bateria, por célula de combustível, por placas fotovoltaicas (energia solar) ou ligados à rede elétrica, como os trólebus. Entre esses, grande parte das montadoras tem se concentrado no aperfeiçoamento e produção de veículo elétrico que utiliza bateria (BEV) (Castro, 2010).

Diante da característica de não realizar o processo de combustão para o uso final, esse tipo de veículo pode propiciar ganhos substanciais em termos de economia e emissões de poluentes atmosféricos, já que ao menos no local onde é utilizado, não há emissões de

substâncias nocivas ao meio ambiente, pois as emissões de escape são nulas. Outra vantagem do veículo elétrico é ser pouco ruidoso, tornando-o cada vez mais atrativo, principalmente para ser utilizado em grandes centros urbanos (Lora, 2002).

## **Veículos Híbridos**

O veículo híbrido (HEV) é caracterizado pelo uso de duas fontes distintas de energia para a sua movimentação: um motor elétrico e uma unidade de força auxiliar, além de um dispositivo para armazenar energia (Bitsche e Gutmann, 2004). Uma das formas mais empregada e estudada de veículos híbridos é a que combina motor de combustão interna e motor elétrico.

Com os diferentes modos de operação um veículo híbrido torna-se muito mais flexível do que um veículo convencional. Com a configuração adequada e controle específico para cada condição de operação, este veículo pode aperfeiçoar o desempenho global, a eficiência e o nível de emissões poluentes (Ehsani, Gao *et al.*, 2009). Estas combinações permitem que o motor térmico funcione em regime aproximadamente permanente, o que resulta em um mínimo de emissões e de consumo de combustível (Kheir, Salman *et al.*, 2004).

A parte elétrica do veículo pode funcionar como motor ou gerador. No caso do funcionamento como motor, tenta-se trabalhar, sobretudo nas baixas rotações, zona de funcionamento em que o motor de combustão interna com ciclo Otto tem baixo desempenho energético. No funcionamento como gerador, tenta-se aproveitar a energia cinética que o carro possui e seria desperdiçada em frenagens. Este processo de recuperação de energia é conhecido como frenagem regenerativa (*regenerative braking*) (Borba, 2012).

Desta forma, a principal vantagem dos veículos híbridos está relacionada com o fato de permitir que o MCI opere na região ótima do motor, reduzindo o consumo energético do mesmo. Mais do que isso, os avanços da eletroeletrônica e áreas afins têm possibilitado o desenvolvimento de motores elétricos e sistemas de acionamento de alta eficiência, o que, aliado à capacidade de regeneração de potência durante frenagens ou em descidas, tornam os veículos elétricos híbridos mais eficientes do que os veículos convencionais (Baran, 2012).

Percebe-se uma clara distinção entre os veículos elétricos puros e os híbridos em relação a dois aspectos: a autonomia, que atualmente é maior nos híbridos justamente pela utilização acessória de um motor a combustão, e o maior peso do conjunto de baterias no veículo puramente elétrico (Castro, 2010).

## **Veículos Híbridos Plug-in**

Um veículo híbrido “plug-in” (PHEV) é um híbrido completo, que possui a capacidade de extrair e armazenar energia a partir de uma rede elétrica. Esta mudança permite combinar energia dos combustíveis fósseis com uma variedade de fontes de energia elétrica. Esse sistema causa impactos importantes, geralmente benéficos, sobre tudo no consumo de petróleo e emissões de CO<sub>2</sub>. (Lukic, Cao et al., 2008; Wu, Cao et al., 2011).

Um dos principais benefícios do PHEV deriva do fato de que as concessionárias de energia elétrica operam na maior parte do tempo em um nível de subutilização, devido às características do sistema energético para atender uma expectativa de pico de demanda. Assim, exceto por esses períodos de pico de uso, o sistema poderia gerar e fornecer uma quantidade substancial de energia necessária para abastecer os veículos que consomem eletricidade da rede a um baixo custo marginal de geração de energia (Sovacool, 2009).

### **2.5.1 Principais componentes de BEV, HEV e PHEV**

Os componentes dos veículos elétricos têm algumas diferenças em relação aos componentes dos veículos com motor a combustão interna. A mais significativa é a inclusão de um sistema de armazenamento, sendo a bateria o principal componente, e motor elétrico (Castro, 2010).

#### **2.5.1.1 Sistema de armazenamento de energia**

É um dos sistemas mais importantes do veículo elétrico, uma vez que é o responsável por armazenar e fornecer a energia necessária para que o motor obtenha uma boa eficiência. No entanto, atualmente é uma das grandes limitações dos projetos de veículos elétricos, devido ao seu peso excessivo, custo demasiadamente elevados, além de oferecerem autonomias relativamente baixas, em geral. Os principais componentes desse sistema são: baterias eletroquímicas e ultracapacitores, também conhecidos como supercapacitores.

A bateria consiste em um dispositivo capaz de armazenar energia química para posteriormente a converter em energia elétrica. As principais características desejáveis em uma bateria são: grande capacidade de armazenamento de energia, menor peso possível e elevada taxa de eficiência de conversão de energia (Bastos, 2008).



As principais tecnologias de baterias utilizadas em veículos elétricos e híbridos são: baterias de chumbo-ácido, níquel cádmio, hidreto metálico de níquel e íon de lítio. As características destes tipos de baterias são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características dos Principais Tipos de Baterias

Características	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Custo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Energia específica mássica (Wh/kg)	30-50	50-80	40-100	160
Tensão por Célula (V)	2,00	1,25	1,25	3,60
Corrente de Carga	Baixa	Muito Baixa	Moderada	Alta
Número de Ciclos (carga/descarga)	200-500	1000	1000	1200
Autodescarga por mês (% do total)	Baixa (5%)	Moderada (20%)	Alta (30%)	Baixa (10%)
Tempo Mínimo para Carga (h)	8 a 16	1 a 1,5	2 a 4	2 a 4

Fonte: Borba (2012)

O supercapacitor consiste em um dispositivo que armazena energia através das características físicas dos materiais, ou seja, através da separação física das cargas positivas e negativas. Isso permite o seu rápido carregamento, uma vez que não existem reações químicas. As descargas podem fornecer uma elevada quantidade de energia em pouco tempo (Ehsani, Gao *et al.*, 2009).

Geralmente são utilizados em momentos que a bateria não responde da maneira eficiente, como em momentos de arrancadas, subidas e outras solicitações de carga e potência rápidas, que gerem picos (Chan, 2007).

### 2.5.1.2 Motor elétrico

Uma das principais características do motor elétrico é o seu alto rendimento, principalmente se comparado ao MCI, usualmente é superior a 90%, o que, juntamente com a frenagem regenerativa, tornam a eficiência dos veículos elétricos maiores que as outras categorias de veículos.

Nos HEV e PEHV o motor elétrico pode realizar duas funções distintas, ora converte energia elétrica em energia mecânica (realizando o esforço de tração do veículo) ora transforma a energia mecânica em energia elétrica (funcionando como gerador) (Ehsani, Gao *et al.*, 2009).

A seleção de um motor elétrico adequado para sistemas propulsão elétricos e híbridos é muito importante e depende dos seguintes fatores (Rahman, Ehsani *et al.*, 2000):

- Densidade do torque;
- Capacidade da velocidade;
- Eficiência Energética;
- Segurança e confiabilidade;
- Dissipação de calor;
- Expectativa do condutor;
- Características próprias do veículo (Ex: peso, área frontal, etc).

## 2.6 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma ferramenta utilizada para avaliar aspectos ambientais e energéticos associado a bens e processos durante o ciclo de vida, ou seja, do berço ao túmulo (proveniente da expressão inglês “*from cradle to grave*”). O ciclo inicia-se quando são requeridos os recursos da natureza, sejam materiais ou energéticos, para a manufatura de um determinado produto e finaliza-se após o cumprimento de sua função, retornando ao meio ambiente. A Figura 11 ilustra os estágios típicos do ciclo de vida de um produto (Rubin, 2001).

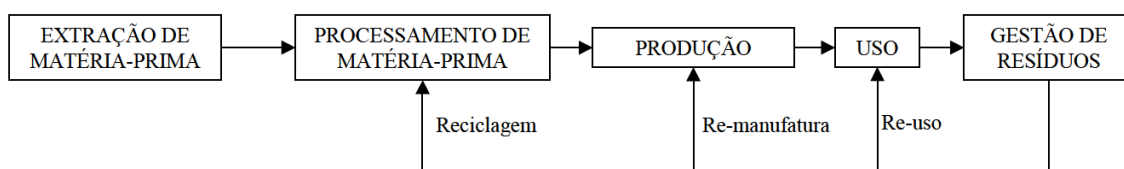


Figura 11 – Etapas do Ciclo de Vida  
Fonte (Rubin, 2001).

A ACV destina-se a uma grande variedade de propósitos, como por exemplo, identificar oportunidades de melhorias no setor industrial (aumento da eficiência de processos, redução de custos, e em relação à publicidade relacionada aos aspectos ambientais de seus produtos); possibilita que consumidores realizem escolhas mais informadas, além de permitir que o setor governamental se fundamente em resultados de estudos ACV para elaborar e fomentar políticas públicas que respeitem o meio ambiente e incentivem práticas sustentáveis (Galdiano, 2006; e IBICT, 2015).

## 2.6.1 Metodologia da análise do ciclo de vida

O processo para a análise do ciclo de vida geralmente compreende uma estrutura metodológica normatizada internacionalmente pela ISO, e no Brasil, pela ABNT, em que são determinadas as fases e os procedimentos gerais da execução de um estudo de ACV (Finkbeiner, Inaba *et al.*, 2006)

Segundo Finkbeiner, Inaba *et al.* (2006), houve um processo de revisão da primeira geração de padrões da ACV, e as quatro normas existentes ISO 14040:1997, ISO 14041:1999, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000, foram tecnicamente revistas, canceladas e substituídas, como pode ser observado na Figura 12.

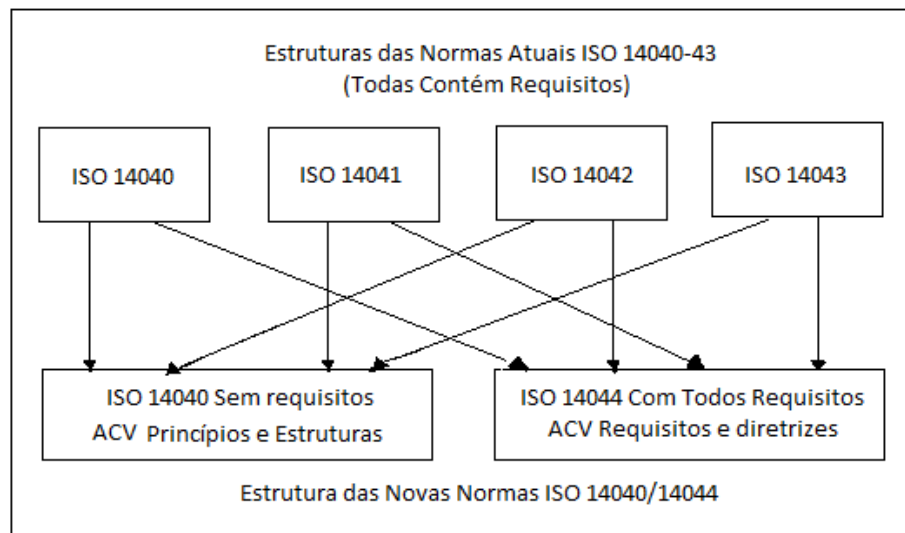


Figura 12 – Nova estrutura da Norma ISO

Fonte: Finkbeiner, Inaba *et al.* (2006)

De acordo com ISO14044, existem quatro fases de estudo para a ACV, observadas na Figura 13 a seguir:

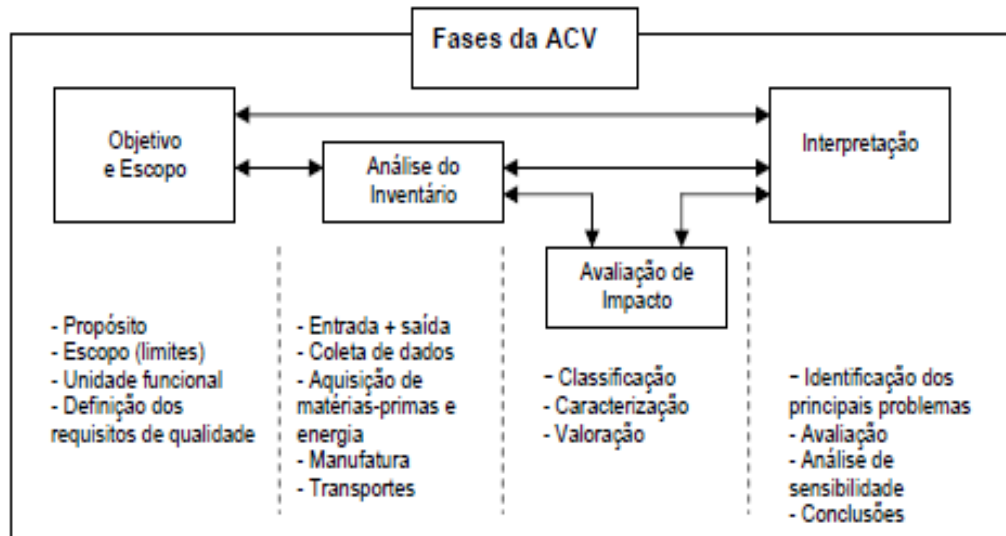


Figura 13 – Fases de uma ACV

Fonte: Chehebe (1998).

### 2.6.1.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo e o escopo são as primeiras fases para a realização da ACV. Estas etapas devem ser coerentes com a aplicação pretendida e claramente definidas (Ometto, 2005). De acordo com a ISO14040 (2006), o objetivo deve declarar de maneira inequívoca a aplicação pretendida e o processo de revisão crítica que se pretende adotar.

O escopo do trabalho deve identificar e definir o objeto de análise e limitá-lo para incluir o que é significativo, e deve considerar os seguintes aspectos:

#### 2.6.1.1.1 Função do Sistema

É a definição clara das características de performance do produto a ser modelado (função). A função selecionada para um determinado estudo depende do objetivo e do escopo do estudo (Chehebe, 1998).

#### 2.6.1.1.2 Unidade Funcional

Segundo a ISO14040 (2006), a unidade funcional é uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema do produto, que constitui a referência para a qual as entradas e as saídas são relacionadas. O objetivo primário da unidade funcional é servir de unidade de referência para o estudo, pois a comparação entre os sistemas deve ser realizada com base na mesma unidade.

### 2.6.1.1.3 Fluxo de Referência

A comparação entre sistemas deve ser realizada com base na mesma unidade funcional. No entanto, em alguns estudos que comparam diferentes sistemas, a unidade funcional pode não ser adequada para a coleta de dados (de ambos os sistemas) necessários à etapa de inventário. Nesses casos existe a necessidade de utilizar-se a unidade de fluxo de referência equivalente. Logo, o fluxo de referência é a quantidade de produto necessária para realizar a função definida. Fluxo de referência liga a unidade funcional com a unidade operacional utilizada para fazer o inventário (Chehebe, 1998).

### 2.6.1.1.4 Identificação dos limites

De acordo com a ISO14040 (2006), as fronteiras do sistema determinam quais as entradas e saídas serão incluídas no estudo, as fronteiras técnicas, geográficas e históricas. A seguir serão descritos os limites de um estudo:

#### A) Fronteiras do sistema

De acordo com a ISO14040 (2006), as fronteiras do sistema determinam quais as unidades de processo devem ser incluídas na ACV, assim como seleção de entradas e saídas.

A ACV enfoca os aspectos ambientais de um processo ou produto desde o berço até o túmulo, no entanto por ser uma metodologia complexa, este tipo de abordagem requer uma grande alocação de recursos. Por esta razão, a ACV tem sido aplicada em muitos casos, de forma simplificada (Todd, Curran et al., 1999). O objetivo e a finalidade da ACV definem o nível de simplificação aceitável, sendo que três diferentes abordagens podem ser consideradas:

#### Análise berço-portão

São removidos todos ou alguns estágios finais, relacionados como o uso e a disposição final do produto.

#### Análise portão-portão

São removidos todos ou alguns estágios iniciais e finais, neste caso o foco principal de estudo é o processo de manufatura do produto em si.

#### Análise portão-túmulo

São removidos todos ou alguns estágios iniciais, ou seja, relacionados com a obtenção das matérias-primas, pois o foco de análise é a disposição final do produto.

**B) Limites geográficos:** representa a relação entre os dados utilizados e a região estudo, ou seja, é a região específica do estudo de ciclo de vida (D'Agosto, 2004).

C) **Limite temporal:** está relacionado ao intervalo de tempo sobre o qual a base de dados será coletada.

D) **Limites tecnológicos:** estão relacionadas aos tipos de tecnologias disponíveis durante o processo de análise e também presentes no estudo (Chehebe, 1998).

#### **2.6.1.1.5 Dimensões das aplicações e dos fluxos a serem considerados**

A fim de permitir o refinamento das fronteiras do sistema e garantir a equivalência entre os níveis aprofundamento dos produtos, existem três fases que podem ser desenvolvidas e detalhadas no escopo do trabalho, que são apresentadas a seguir (D' Agosto et al., 2009):

- Macro fase: entradas e cargas ambientais diretamente relacionados com os processos.
- Meso fase: entradas e cargas ambientais para a produção do nível 1.
- Micro fase: entradas e cargas ambientais para a produção de nível 2 e para bens de capital.

O conhecimento e desenvolvimento dessas fases permitem melhores fundamentos para decisões de corte, para a seleção dos limites do sistema, além de avaliar a importância dos bens de capital em uma perspectiva do berço ao túmulo.

#### **2.6.1.2 Análise do inventário**

A etapa da Análise do Inventário do Ciclo de vida, segundo a ISO14040 (2006), envolve a coleta dos dados e os procedimentos utilizados para quantificar as entradas (materiais e energéticas) e as saídas (na forma emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos) ao longo do ciclo de vida do produto.

As principais fases necessárias para a elaboração de um inventário são descritas a seguir:

##### **2.6.1.2.1 Preparação para a coleta de dados:**

Diante do grande volume de informações na etapa de coleta de dados, é conveniente preparar formulários sistemáticos para armazenar tais informações. Logo, alguns cuidados devem ser tomados para assegurar a qualidade e confiabilidade dos dados, como por exemplo, a elaboração de fluxogramas específicos que mostrem as unidades de processo e sua descrição

detalhada. Para cada processo, deve-se coletar informações sobre as entradas e saídas ambientais e as unidades de medidas utilizadas (Chehebe, 1998).

#### **2.6.1.2.2 Coleta de dados:**

Os procedimentos utilizados para a coleta de dados devem descrever quantitativamente e qualitativamente as entradas e saídas de cada processo, assim como procedimentos de alocação, caso necessário. Assim que as informações forem recebidas, é importante verificar se os dados estão completos e compatíveis com dados de outras fontes (Chehebe, 1998).

#### **2.6.1.2.3 Refinamento dos limites do sistema:**

Após a coleta de dados deve-se revisar todo o sistema relacionado ao produto, analisar os limites e os critérios de corte que foram estipulados na fase de definição do objetivo e do escopo do estudo (Chehebe, 1998). Recomenda-se a realização de análises de sensibilidade para determinar as significâncias das unidades de processos e suas possíveis alterações (Maurice et al., 2000).

#### **2.6.1.2.4 Alocação**

A alocação é o ato de distribuir proporcionalmente a responsabilidade sobre os fluxos de consumo de recursos e geração de rejeitos de um processo em seu ciclo de vida. Quando um ou mais produtos de um sistema em estudo são passíveis de comercialização ou mesmo usados em benefícios de outro sistema, a alocação precisa ser realizada para particionar as cargas ambientais (Silva, 2005).

Segundo Fava et al., (1994), os procedimentos de alocação são aplicáveis em:

- Processos marcados por múltiplas saídas, responsáveis pela produção de mais de um produto, sendo que alguns fluxos cruzam as fronteiras do sistema.
- Processos marcados por múltiplas entradas, como o tratamento de resíduos, em que diferentes materiais são tratados em um mesmo sistema.
- Processos multifuncionais, que envolvem processos de reciclagem em ciclo aberto, onde um resíduo que deixa as fronteiras do sistema é utilizado como matéria-prima por outro sistema.

De acordo com Chehebe, 1998, os principais métodos de alocação são:

- **Método de alocação por substituição:** este método baseia-se no entendimento que alguns produtos são utilizados em substituição a outros. Para realizar essa alocação, considera-se desnecessária a produção do produto que foi substituído, omitindo também seus efeitos ambientais.
- **Métodos de alocação baseado em propriedades físicas:** a alocação dos efeitos ambientais entre os co-produtos são baseados em suas massas, conteúdo energético ou em equivalências químicas. No entanto esse método só é satisfatório caso exista uma forte correlação entre as propriedades escolhidas e valor econômico dos co-produtos.
- **Método de alocação com base em fatores econômicos:** a principal razão da utilização deste método são os valores atribuídos pela sociedade aos produtos. No entanto a dificuldade para a aplicação desse método é a natureza transitória dos valores econômicos.

### 2.6.1.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida

A avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) tem como propósito determinar os potenciais de impactos ambientais das informações levantadas e quantificadas no inventário, além de fornecer subsídios para a etapa de interpretação. A AICV avalia o sistema de produto sob uma perspectiva ambiental, com o uso de categorias de impacto e de indicadores de categoria associados aos resultados do ICV. A estrutura geral da AICV é composta por três elementos obrigatórios (ISO14040 (2006)) e duas opcionais:

#### 2.6.1.3.1 Seleção e definição das categorias do impacto

Nessa etapa, ocorre a identificação das categorias de impactos ambientais. Segundo Fava (1994) não existe uma série de categorias predeterminadas como um padrão a ser seguido.

A seleção e a definição das categorias ambientais devem levar em consideração as preocupações ambientais identificadas no objetivo e no escopo do estudo (Renó, 2011):

A seguir são descritos alguns exemplos de categorias de impactos ambientais:

#### **Toxicidade Humana**

A toxicidade humana é ocasionada por atividades antrópicas que emitem substâncias que apresentam características tóxicas, não biodegradáveis e que se concentram nos seres vivos, como por exemplo, o níquel, platina, mercúrio, entre outros. Geralmente esses poluentes chegam aos seres humanos através de duas rotas de exposição: por via aérea ou por



meio de ingestão de alimentos. Essa categoria é expressa em kg 1,4-DB eq. (Wenzel, Hauschild et al., 2000).

### **Aquecimento Global**

O Potencial de Aquecimento Global, GWP (Global Warming Potential) foi desenvolvido pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Este impacto ocorre devido ao aumento das emissões de gases, tais quais, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e aerossóis na atmosfera, que promovem um acréscimo da radiação infravermelha emitidas pela terra, e o conseqüente aumento da temperatura média do planeta. Grande parte destas emissões é decorrente da queima de combustíveis fósseis. Seu fator de caracterização é expresso em kg CO<sub>2</sub> eq. (Rodrigues Ferreira, 2004).

### **Depleção da Camada de Ozônio**

A camada de ozônio é uma camada natural da estratosfera, que funciona como um filtro que impede a passagem de raios ultravioleta provenientes do sol. Emissões de substâncias como clorofluorcarbonos (CFCs) interferem nas reações químicas normais de oxigênio e contribuí para a destruição dessa camada. Com a diminuição da concentração de ozônio na estratosfera, diminui a absorção destas radiações, aumentando sua incidência sobre os sistemas biológicos na Terra. As principais conseqüências da depleção da camada de ozônio são: danos aos seres humanos tais como, catarata, câncer de pele, queimaduras, problemas no sistema imunológico e no meio ambiente, entre outros. A Depleção do Ozônio apresenta valores menores em magnitude quando comparado às demais categorias. Isso se deve ao fato dos agentes contribuintes terem sido reduzidos drasticamente ou até mesmo proibidos. O potencial de redução do Ozônio para diferentes gases é expresso em unidade de kg CFC-11eq. (Kiperstok, 2002).

### **Acidificação**

Este impacto é decorrente do aumento da acidez de solos, lençóis freáticos e águas superficiais, provocados por atividades humanas, em especial a queima de combustíveis fósseis. As substâncias que mais contribuem para a acidificação são o NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e NH<sub>3</sub>, que ao entrarem em contato com a atmosfera reagem com o vapor de água e formam ácidos. Os poluentes acidificantes têm uma ampla variedade de impactos no solo, águas subterrâneas e superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais (edifícios). Exemplos desses impactos são: a mortalidade de peixes, o declínio da floresta e o esfurelar dos materiais de edifícios. Seu fator de caracterização é expresso em kg SO<sub>2</sub> eq. (Wenzel, Hauschild et al., 2000).

### **Formação de oxidantes fotoquímicos**

Esta categoria de impacto faz referência à reação fotoquímica que ocorre sob influência dos raios ultravioletas, em que NO<sub>x</sub> e VOCs reagem produzindo oxidantes que causam o nevoeiro fotoquímico (ou smog). A inalação deste nevoeiro é considerada danosa à saúde humana e pode alterar o nicho ecológico de outros organismos vivos. Seu fator de caracterização é expresso em kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq. (Rodrigues Ferreira, 2004).

### **Eutrofização**

O potencial de eutrofização consiste no enriquecimento da água ou solo com macronutrientes como o nitrogênio (N) e o fósforo (P). Esse enriquecimento pode causar um aumento no crescimento de plantas aquáticas e / ou a mudança na composição de espécies nos ecossistemas aquáticos e terrestres. O potencial de eutrofização é expresso em unidade de kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq (Nichols et al., 1996).

### **Depleção de recursos abióticos**

Esta categoria de impacto está diretamente relacionada com a diminuição dos recursos naturais extraídos da natureza. Os aspectos mais importantes na definição do problema de depleção dos recursos abióticos são a sua abundância (reservas) e a sua importância social (produção anual). Existem, no entanto, outros aspectos que devem ser considerados na definição do problema de depleção tais como: reservas provadas; possibilidade de substituição (combustíveis fósseis por energia solar); funcionalidade (expressa em preço). O fator de caracterização é expresso em kg Sb-eq. (Mattos, Shiraishi et al., 2003).

### **Potencial de Depleção Abiótica de Combustíveis Fósseis**

A categoria de potencial de recursos abióticos de combustíveis fósseis está intimamente relacionada com o poder calorífico inferior do combustível fóssil. As substâncias que contribuem para essa categoria são: carvão, gás natural e petróleo bruto. Essa categoria é expressa em MJ (CML, 2003).

#### **2.6.1.3.2 Classificação**

Classificação é a fase na qual os resultados do inventário de ciclo de vida são relacionados qualitativamente e agrupados com as categorias de impactos ambientais (Galdiano, 2006).

### **2.6.1.3.3 Caracterização**

A caracterização é uma etapa realizada após a classificação, em que os aspectos ambientais classificados são quantificados em termos de uma unidade comum de cada categoria de impacto (Yokote, 2003).

### **2.6.1.3.4 Normalização**

É um elemento opcional, e de acordo com Yokote (2003), a normalização tem por finalidade dar um melhor entendimento da grandeza ao impacto ambiental do sistema produtivo, além de auxiliar na análise de consistência e na comunicação da significância do indicador de impacto. O procedimento de normalização é feito pela divisão do indicador do impacto por um valor referência (pode ser uma média global, nacional, regional, uma base per capita, ou média similar).

### **2.6.1.3.5 Ponderação**

É um elemento opcional, e geralmente é aplicado em alguns casos que os inventários apresentam uma grande quantidade de dados envolvidos e existe complexidade para relacioná-los e prefere-se trabalhar com um indicador ambiental único. Este é formado atribuindo-se pesos a cada categoria de impacto em termos de sua importância, somando-os os resultados ponderados (Renó, 2011).

## **2.6.1.4 Interpretação dos resultados**

O objetivo dessa etapa é combinar, resumir e discutir os resultados do estudo, com a finalidade de obter fundamentos para conclusões e recomendações que satisfaçam os objetivos iniciais. Esses resultados devem ser apresentados na forma de um relatório consistente.

A fase de interpretação do ciclo de vida compreende vários elementos, como se segue:

### **2.6.1.4.1 Identificação dos problemas significativos**

Esta fase inclui a estruturação das informações provenientes do inventário, identificando as questões ambientais relevantes.

#### **2.6.1.4.2 Avaliação**

Tem como finalidade a determinação da confiabilidade nos resultados, incluindo os temas e relevância identificados anteriormente. Os resultados devem ser apresentados de forma clara e compreensível.

#### **2.6.1.4.3 Conclusões, limitações e recomendações**

Tem como objetivo estabelecer conclusões e recomendações para os usuários do estudo. Além disso, através do relatório, devem fornecer uma visão transparente e completa do estudo.

## **2.7 ESTUDOS PRECEDENTES**

Os primeiros estudos relacionados com a análise do ciclo de vida em relação aos sistemas automotivos iniciaram-se na década de 60, com a finalidade de se obter uma menor dependência em relação aos produtos derivados do petróleo. Posteriormente, a crescente busca da sociedade por produtos ambientalmente sustentáveis, estimulou maiores interesses pelo estudo e desenvolvimento da metodologia da ACV.

Um exemplo desses ACV automotivo é o trabalho desenvolvido por Ma, Balthasar et al., (2012), no qual foram consideradas as seguintes tecnologias veiculares:

- ICEVg (veículo de combustão interna que utiliza gasolina como combustível).
- ICEVd (veículo de combustão interna que utiliza diesel como combustível).
- BEV e HEV utilizando eletricidade a partir de uma variedade de fontes de energia.

O intuito deste trabalho foi analisar e comparar as emissões GEE para os veículos em estudos. Os EV ainda não estavam à disposição no mercado, tendo como expectativa a introdução em 2015.

A função do sistema analisado é o transporte de uma determinada carga, passageiros e / ou carga, com base em simulações da condução no mundo real, ao longo da vida útil de um automóvel, o qual é assumido como sendo 15 anos. A unidade funcional utilizada neste trabalho é 1 km percorrido por um veículo, variando de acordo com a região geográfica onde o veículo é utilizado (Reino Unido e Estados Unidos).

O ciclo de vida dos veículos e combustíveis inclui as seguintes fases:

- Ciclo de vida do combustível (WTW):
  - ✓ A produção e transporte de matéria-prima.
  - ✓ A produção e distribuição de combustíveis e energia elétrica.
  - ✓ Fase de uso do veículo
- Ciclo de vida do veículo:
  - ✓ A produção de matérias-primas.
  - ✓ A fabricação, distribuição e montagem dos componentes do veículo.
  - ✓ A manutenção e reparação do veículo durante todo o seu tempo de vida.
  - ✓ Fase de fim de vida do veículo.

Os resultados apresentados para o estudo evidenciam que para um veículo de passageiros, em condições urbanas, no âmbito WTW (well-to-wheels), o BEV tem uma menor taxa de emissão de GEE que o ICEVg e ICEVd. Já em relação ao HEV, as emissões de GEE não apresentam diferenças significativas. Esses resultados estão vinculados à matriz energética considerada, que possui um alto índice de sensibilidade para esta categoria. Porém, diante das emissões associados à fabricação de veículos e fim de vida, os resultados são mais elevados para o BEV, em comparação ao ICEV, devido à emissão de GEE associados à fabricação da bateria. Também apresenta maiores emissões do que a fabricação do HEV, devido ao maior peso da bateria.

O trabalho realizado por Faria, et al., 2013, aplica a ACV para a tecnologia convencional, representados por ICEVg e ICEVd, e para veículos elétricos, que são representadas por BEV e PHEV. Alguns parâmetros que contribuem para um consumo de energia do veículo, tais como perfil de condução, deslocamento em áreas inclinadas, e no caso específico para automóveis elétricos, que é a frenagem regenerativa, foram considerados.

Para avaliar com mais precisão a contribuição da geração de eletricidade, uma análise WTT (well-to-tank, ou seja, considera a produção da fonte de energia, mas não considera a etapa de uso) foi realizada considerando os seguintes cenários europeus:

- Matriz elétrica com alta contribuição de energia proveniente de combustíveis fósseis, que representa a matriz elétrica da Polônia.
- Cenário com baixas emissões de GEE, típico de uma matriz que possui alta contribuição de energia proveniente de fontes nucleares, que é representada pela matriz elétrica da França.

- Matriz elétrica com maiores contribuições de energia proveniente de fontes renováveis, representado pela matriz de Portugal.

O resultado da análise realizada no trabalho é apresentado na Figura 14. Verificou-se que o estilo mais agressivo de condução, com acelerações rápidas e de alta velocidade, pode aumentar o consumo do combustível em até 47%. Os testes também demonstraram que a utilização de ar condicionado (AC) para o controle da temperatura no interior de veículo pode aumentar o consumo de energia entre 24 e 60%. Para os veículos convencionais, a fase de utilização é a responsável por grande parte os impactos globais. Já para os veículos elétricos, as fontes de energia que compõe a matriz elétrica são de grande relevância sobre o impacto de emissão dos GEE.

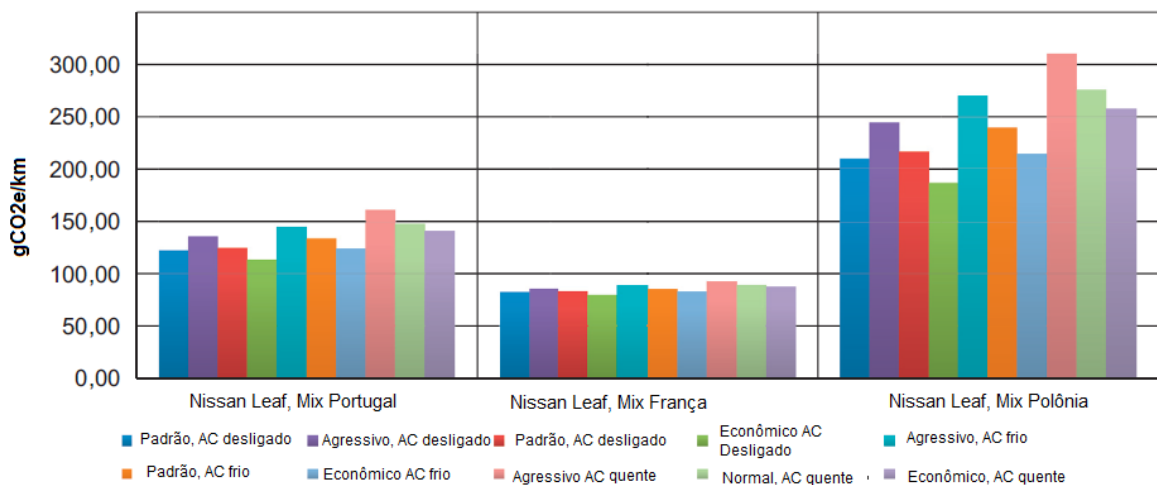


Figura 14 – Impactos da fase de operação do Nissan Leaf  
Fonte: Faria, et al., (2013).

Para todas as tecnologias de veículos convencionais, a fase de operação é a que mais contribui para as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de um veículo, com cerca de 85-90% das emissões. Para um BEV, a etapa que mais contribui para as emissões de GEE é a de produção de eletricidade, sendo que este resultado é dependente do mix de eletricidade utilizada, portanto, este deve ser conhecido com um bom grau de certeza.

O veículo que utiliza um mix de eletricidade com a maior parte de energia proveniente de fontes fósseis, a etapa WTT representará mais de 75% das emissões do ciclo de vida do veículo. Para o mix de eletricidade que contem uma maior parte de energia proveniente de fonte nuclear ou renovável, a fase dominante para emissões de GEE será a produção do veículo e da bateria, com pelo menos 50% das emissões de ciclo de vida. A produção da

bateria é responsável por uma grande parte das emissões do ciclo de vida do veículo, devido aos processos altamente intensivos de energia necessários para obter os materiais utilizados em sua produção. As emissões de GEE nas etapas de manutenção e eliminação de veículos representam menos de 10% das emissões globais.

Boureima et al., (2009) compara o PHEV, BEV, ICEV<sub>GLP</sub> e ICEV<sub>g</sub>, através da abordagem da ACV. Neste estudo, utilizou-se um sistema de modelagem baseado em faixas, ou seja, variações do peso, do consumo de combustíveis e para emissões dentro da categoria carro de família, ao invés de utilizarem os valores médios. As diferentes tecnologias de veículos são modeladas de acordo com a Figura 15:

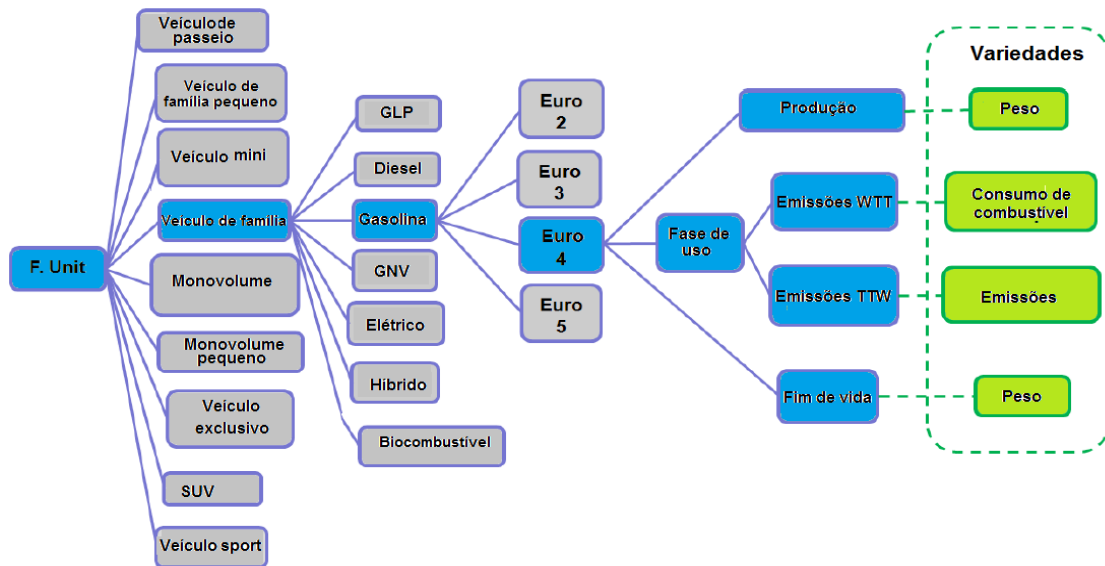


Figura 15 – Sistema de modelagem baseado em um intervalo de análise  
Fonte: Boureima, et al., (2009).

Em relação às emissões de GEE, o ICEV<sub>g</sub> tem o maior impacto em comparação aos outros veículos. Isto é devido às emissões durante a combustão da gasolina. Para os ICEV<sub>GLP</sub>, PHEV, e BEV os resultados são respectivamente, 20,3%, 27,4% e 78,3% menores do que emissão para os o ICEV<sub>g</sub>.

A análise para a acidificação do ar revelou que, ao contrário do GEE, o PHEV tem maiores contribuições do que o ICEV<sub>g</sub>. Isto é devido à produção de níquel contido na bateria de NiMH. A produção de níquel é responsável por uma maior emissão de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>, que são os principais poluentes para o impacto acidificação. É importante mencionar que a bateria de lítio parece ser menos perigoso para a saúde humana em comparação com a bateria de NiMH.

Bauer et al., (2015), realiza a ACV de uma ampla gama de tecnologias atuais e futuras de veículos de passageiros e suas cadeias de fornecimento de energia. O portfólio de tecnologia inclui ICEVg, HEV, BEV , e veículos elétricos híbridos de células de combustível (FCHEV). Gasolina, diesel, gás natural, eletricidade (considerou-se diferentes mix) e hidrogênio foram os combustíveis considerados no estudo. O prazo da análise leva em consideração a expectativa de desenvolvimento de tecnologia durante os próximos 15 anos (até 2030). Essa análise futura consiste em uma estrutura de simulação dos veículos, que permite a variação de parâmetros e consideração de futuros progressos tecnológicos. Como ilustrado na Figura 16:

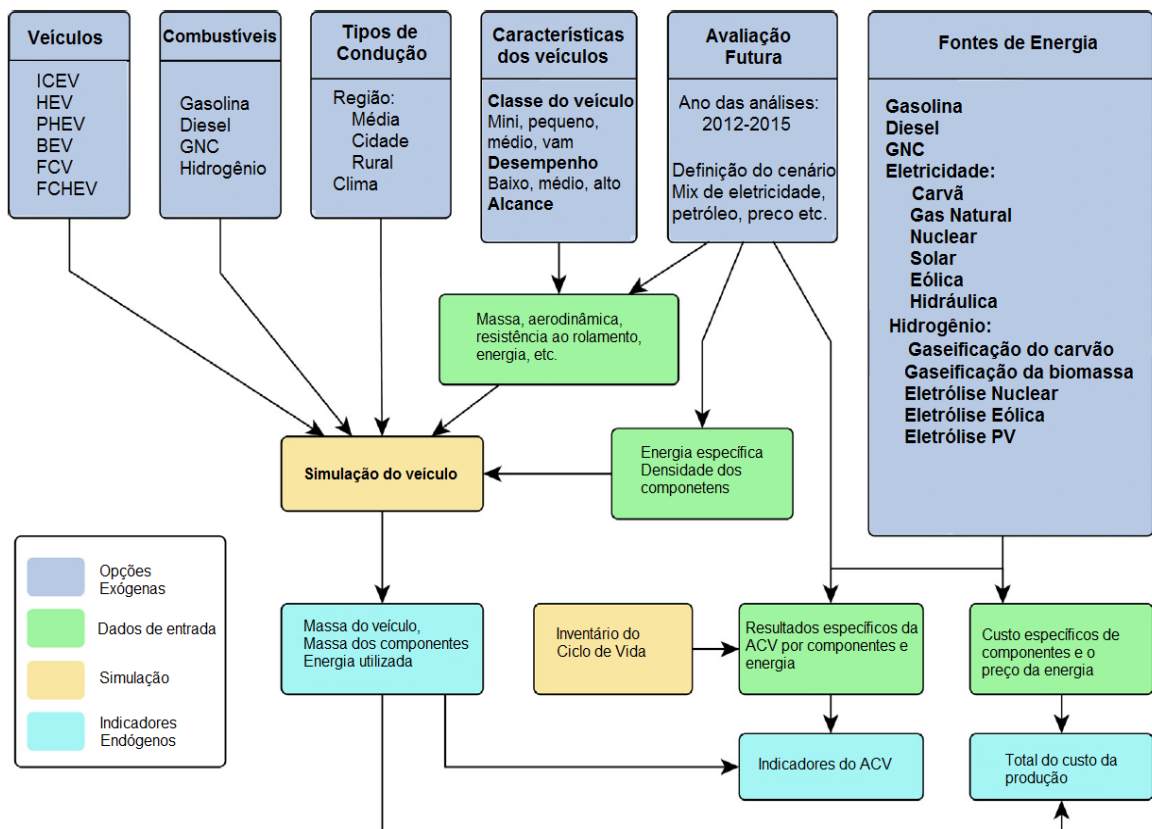


Figura 16 – Quadro de análise utilizando indicadores ambientais e técnicos para veículos atuais e futuros

Fonte: Bauer et al., (2015).

Os resultados AICV enfatizam o consumo de combustível como o principal fator que altera o desempenho ambiental dos veículos convencionais. Levando-se em conta a evolução tecnológica esperada até 2030, espera-se que todas as atuais tecnologias de veículos podem e provavelmente irão reduzir as emissões ambientais, devido principalmente ao aumento da



eficiência veicular e também em virtude do progresso tecnológico, no entanto, essas mudanças foram mais sensíveis para veículos que ainda estão em fase de aperfeiçoamento.

O maior potencial de toxicidade humana é para o BEV, devido aos elevados encargos do mix de eletricidade europeu e para a produção da bateria. As substâncias tóxicas são liberadas principalmente por atividades de mineração do níquel, cobre, platina, alumínio e do carvão. Os encargos de acidificação terrestre e formação de material particulado do BEV irão diminuir substancialmente em 2030 devido às alterações previstas no mix de eletricidade, assim como os encargos da acidificação terrestre. Os maiores encargos relacionados com FCHEV são devidos às emissões provenientes de mineração de platina, que é utilizado no catalisador.

A seguir é apresentada a Tabela 2 com o resumo dos principais artigos relacionados aos estudos de ACV automotivo. Para a realização esta tabela, levou-se em conta a unidade funcional, os limites do sistema, os veículos e combustíveis em estudo, as categorias de impactos analisadas, a procedência dos dados, assim como o software utilizado para realizar as simulações.

Verificou-se que a unidade funcional mais comum nas análises é 1 km, e essa escolha facilita a comparação entre diferentes estudos, independente da vida útil do automóvel. Para a maioria dos estudos considerados, incluiu-se o ciclo de vida do automóvel e da fonte de energia utilizada para a propulsão. Isso se deve ao fato de veículos convencionais e alternativos possuírem diferentes etapas do ciclo de vida mais impactantes ambientalmente. A categoria de impacto mais utilizada para avaliação é o GWP. Primeiramente isso se deve ao fato das emissões do GEE ser um dos principais problemas relacionado ao ciclo de vida dos sistemas automotivos. Além disso, o GWP é considerado uma categoria consolidada, e um método de ponto médio, ou seja, está diretamente ligado com as substâncias emitidas, ao contrário de pontos finais, em que são levados em consideração diversos fatores e fenômenos ambientais para a quantificação dos impactos, tornando-os mais incertos. O software mais utilizado é o SimaPro, pois ele reúne as principais bases de dados e métodos de Avaliação de Impactos do Ciclo de vida disponíveis no mercado, além de permitir análises profundas em cada um dos fluxos de matéria e energia e a identificação precisa da origem dos impactos ambientais (Pré Sustainability, 2015).

Tabela 2 – Estudos precedentes.

<b>Autores - País</b>	<b>UF</b>	<b>Limite</b>	<b>Veículos- combustíveis</b>	<b>Categorias analisadas</b>	<b>Fonte de dados</b>	<b>Software/Método</b>
Helms, H., et al (Alemanha)	150000km	“Tank-to-Wheel” combustíveis	BEV PHEV- Eletricidade, Gasolina	GWP, Acidificação	Literatura	Software UMBERTO1
Beera, T., et al. (Austrália)	22MJ/km	“Well-to-Wheel” combustíveis	GNC, GLP, GNL, Biodiesel Baixo Enxofre, Diesel Ultrabaixo Enxofre, Diesel Etanol e Óleo de Resíduos.	GWP	Literatura e Ecoinvent	SimaPro / GWP
Lave, L., et al.	100000 milhas	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	Gasolina, Disesel, GNC, Etanol, Hidrogênio, BEV, FCV	GWP	Literatura	Software (EIO-LCA)
Heather, L., et al.	312 000 km.	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	Gasolina, Diesel, Etanol FCV, ICEV, HEV	GWP	Literatura	Software (EIO-ACV)
Lane, B., et al (Inglaterra)	1 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	Diesel, GN, GNL, Biodiesel, Etanol, BEV, HEV.	GWP	Literatura	GREET
Hongrui, Ma. (Alemanha)	1 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	HEV and BEV, ICV, Eletricidade, Gasolina	GWP	Literatura	LBST E3
Boureima F.S., et al (Bélgica)	230500km	“Well-to-Wheel” combustíveis	BEV, HEV, GLP, Gasolina	GWP ,Acidificação, Saúde Humana,	Literatura e Ecoinvent	Impact 2002 +
Lin Gao, et al (EUA)	256,000 km	“Well-to-Wheel” combustíveis	EV, HEV, FCV Eletricidade, Gasolina	GWP	Literatura	GREET
Laster B. et al (Canadá)	250000km	“Well-to-Wheel” combustíveis	HEV, ICEV, Gasolina	GWP	Literatura	-
Bauer, C., et al (Suíça)	240000 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	BEV, FCV, HEV, ICEV	Formação de Material Particulado, Toxicidade Humana, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificação Terrestre, GWP,	Literatura	SimaPro- ReCiPe, IPCC GWP

<b>Autores - País</b>	<b>UF</b>	<b>Limite</b>	<b>Veículos- combustíveis</b>	<b>Categorias analisadas</b>	<b>Fonte de dados</b>	<b>Software/Método</b>
Evanthia, A., et al (Grécia)	250,000 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	ICEV, BEV, HEV	GWP	Literatura	-
Evanthia A., et al (Grécia)	100 km	“Well-to-Wheel” combustíveis	Biodiesel, Diesel, Gasolina	Efeitos Respiratórios Orgânicos e Inorgânicos, acidificação, Eutrofização, GWP, Ecotoxicidade, Efeitos Carcinogênicos	Literatura	SimaPro/ Eco-Indicator 99
Granovskii, M., et al (Canadá)	100km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	HEV, BEV, FCV, ICEV	Poluição do Ar, GWP	Literatura	-
Maria B.G., et al (Holanda)	1,54passageiro/ 200000km	Ciclo de vida do veículo	ICEV	Efeitos Respiratórios Orgânicos e Inorgânicos, Acidificação, Eutrofização, GWP, Ecotoxicidade, Efeitos, Depleção dos Minerais e Combustíveis Fósseis, Radiação, Depleção da Camada de Ozônio, Uso da Terra.	Literatura	SimaPro/ Eco-indicator 99
Samaras, C., et al	1 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	HEV, ICEV, PHEV	GWP	Literatura	(EIO-ACV)
Faria, R., et al (Portugal)	1 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	ICEV, PHEV, BEV, Gasolina, Diesel, HFCV	GWP	Literatura Ecoinvent	-
Boureira F.S., et al (Bélgica)	230,500 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	FCEV, BEV, VHE, ICEV, GLP, GNC, Diesel, Gasolina, Biogás Etanol (Primeira e Segunda geração), Metanol, Biodiesel	IPCC GWP, Acidificação, Eutrofização, Extração Mineral, Energia Renovável e não Renovável, Efeitos Respiratórios	Literatura Ecoinvent	Métodos: CML 2001, Impact 2002+, Eco-Indicador99

<b>Autores - País</b>	<b>UF</b>	<b>Limite</b>	<b>Veículos- combustíveis</b>	<b>Categorias analisadas</b>	<b>Fonte de dados</b>	<b>Software/Método</b>
D' Agosto, 2004 (Brasil)	1000 pass.km	WTW	Gasolina, Óleo Diesel, Biodiesel, GNV, Etanol	CO <sub>2</sub> Energia	Literatura Fontes específicas	-
Querini , F., et al (Franças)	1 km	Tank to Whells	Etanol, Gasolina, Diesel	Acidificação, Oxidação Fotoquímica, Potencial de Formação de Ozônio Fotoquímico, Eutrofização Marinha	-	Gabi – Métodos: CML2001 e ReCiPe2008
Evanthia, A., et al (Grécia)	100km	Well-to-Wheel	Diesel, Biodiesel, Gasolina	Efeitos Respiratórios Orgânicos e Inorgânicos, Combustíveis Fósseis, GWP, Acidificação, Eutrofização, Ecotoxicidade, Efeitos Carcinogêncios	-	SimaPro Método: Eco-Indicator 99
Nuri C. O., et al (EUA)	1 km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	CVs, HEVs, PHEVs,	Emissão dos GEE, Energia	REET	REET
Hawkins,T.R., et al (Noruega)	1km	Ciclo de vida do veículo, “WTW” combustíveis	ICEV, EV, Eletricidade, GN, Gasolina, Diesel	GWP, Acidificação, Formação de Material particulado, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade da Água Doce e Terrestre, Eutrofização, Depleção Mineral, Depleção dos Recursos Fósseis	Literatura Ecoinvent REET	REET

## **Capítulo 3**

### **METODOLOGIA**

A estrutura metodológica deste trabalho está baseada em normas padronizadas pelo ISO 14040 e ISO 14044. Esta estrutura determina as fases e os procedimentos necessários para a realização do estudo energético e ambiental para os diferentes cenários da tecnologia veicular/combustível no Brasil.

#### **3.1 OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO**

O objetivo deste trabalho é a realização de um estudo de avaliação dos impactos ambientais dos sistemas veículos/combustíveis utilizados no Brasil através da aplicação da ACV. Os cenários analisados foram selecionados de acordo com a frota de automóveis e de combustíveis convencionalmente utilizados pela população brasileira, a fim de compará-los com sistemas que se encontram em fase experimental no país. Os sistemas dotados para o estudo foram: veículo de combustão interna/gasolina (ICEVg); veículo de combustão interna/etanol (ICEVe); veículo de combustão interna/etanol/gasolina (ICEVf); veículo elétrico/eletricidade (BEV); veículo híbrido plug-in/gasolina/eletricidade (PHEV).

O Escopo deste trabalho irá considerar os seguintes elementos:

### **3.1.1 Função do sistema**

A função do sistema é a utilização de um meio de transporte para produzir um deslocamento de um passageiro por quilômetro.

### **3.1.2 Unidade Funcional**

A unidade funcional estabelecida para o estudo é de 1km, ou seja, o deslocamento de um passageiro em um automóvel. A principal razão para esta escolha é a facilidade para a comparação entre os diferentes estudos de ACV automotivo, independente da vida útil do automóvel.

### **3.1.3 Fluxo de referência**

O fluxo de referência adotado nesse estudo é 260.000 km percorridos, ou seja, a vida útil média em km de um automóvel utilizado no Brasil. A determinação desta unidade foi baseada em dados disponíveis referentes ao tempo de vida médio e a quilometragem média anual da frota de automóveis no país, o que define a vida média de um veículo em quilômetros. Segundo a Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE) a idade média da frota brasileira é de 12,8 anos. A Figura 17, apresenta valores médios referentes às regiões brasileiras.

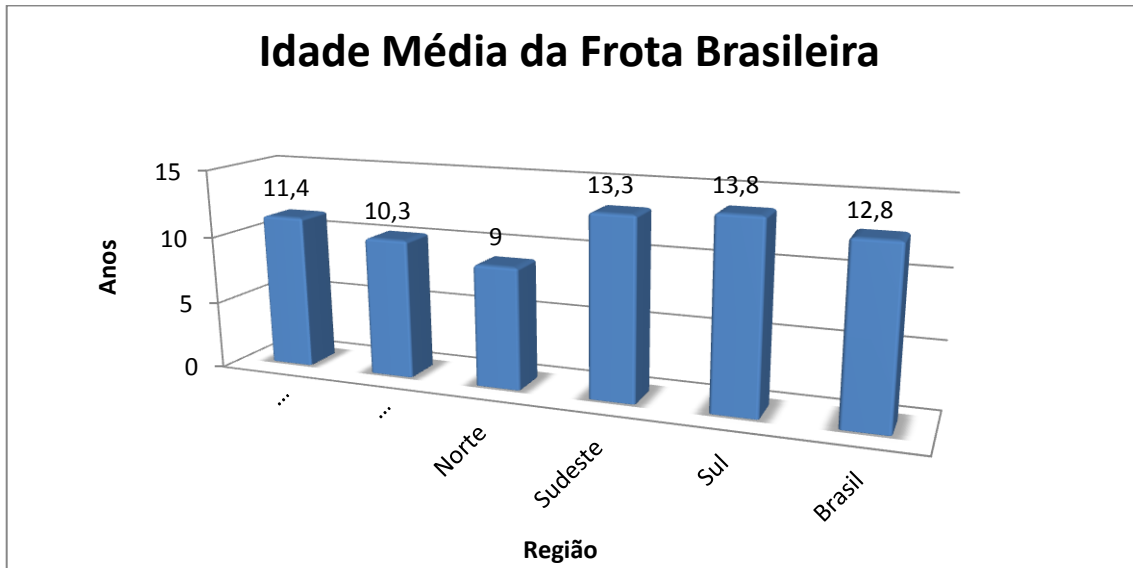


Figura 17 – Idade média da frota de automóveis no Brasil  
Fonte: Anuário FENABRAVE, 2011.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças), para o ano de 2014, um veículo médio da frota nacional brasileira, percorreu 12.755 km. Como se pode observar na Figura 18, essa média obteve uma pequena variação entre os anos de 2010 e 2014.

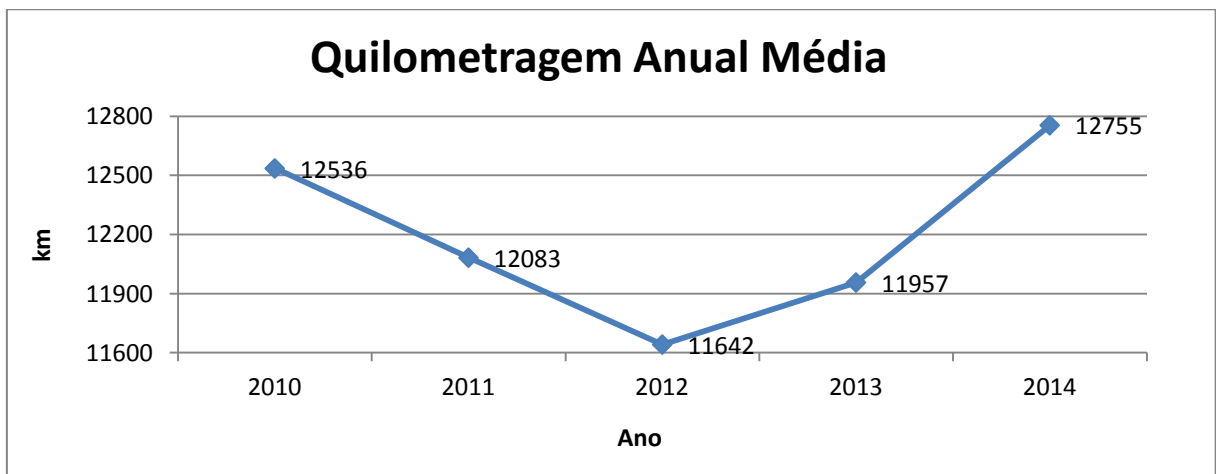


Figura 18 – Quilometragem anual média da frota de automóveis no Brasil  
Fonte: Sindipeças, 2014.

### 3.1.4 Identificação dos limites do estudo

Avaliar os encargos ambientais associados aos veículos de passageiros requer a consideração de seus ciclos de vida completos, uma vez que os encargos substanciais podem ser gerados não só na utilização de veículos, mas também na fase de produção, ou produção das fontes de energia.

O âmbito desta análise representa um ACV completo dos automóveis e fontes de energia, ou seja, uma abordagem do berço ao túmulo (a extração de recursos minerais e energéticos, a etapa industrial, distribuição, uso, e fim de vida), no entanto, para o estudo dos combustíveis e eletricidade, essa abordagem denomina-se well-to-wheel (WTW).

Para caracterizar os sistemas de estudo deste trabalho, foram escolhidos diferentes fontes de energia e sistema de propulsão. Estes modelos foram elaborados a partir do perfil dos principais combustíveis utilizados para veículos leves, da Região Metropolitana de São Paulo que está apresentado na Figura 19. Considerou-se também alguns sistemas automotivos que ainda estão em fase experimental na cidade.

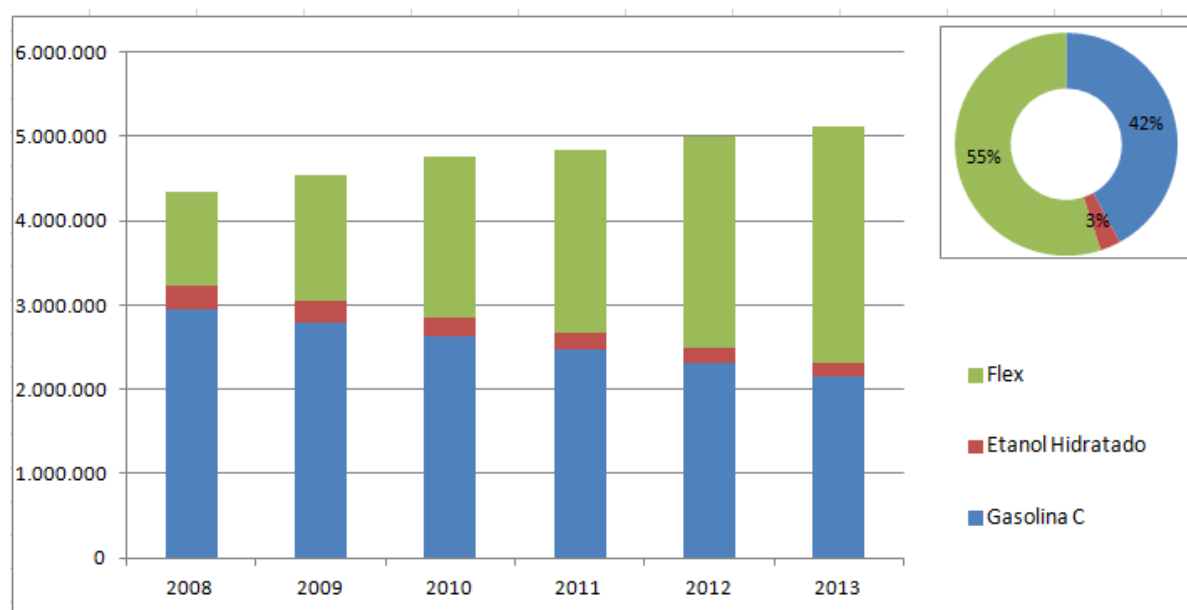


Figura 19 – Evolução da frota circulante de automóveis da Região Metropolitana de São Paulo

Fonte: CETESB (2014).

A abrangência da tecnologia considera veículos que utilizam motores de combustão interna de ignição por centelhamento, veículos elétricos e os híbridos.



A abrangência temporal está associada ao uso final, ou seja, o momento presente do estudo (principais dados serão relativos ao ano de 2013).

A seguir serão descritas as fronteiras do sistema para cada cenário em estudo:

### 3.1.4.1 Fronteiras do sistema para o Cenário 1: ICEVg

O primeiro cenário em estudo representa um veículo com motor de combustão interna que utiliza a gasolina como combustível. Na configuração deste cenário, assume-se que a gasolina é o combustível convencional utilizado no Brasil. No entanto, devido a especificações e proporções definidas pela legislação em vigor para o ano de 2013, definiu-se que a gasolina distribuída ao usuário final, deve ser uma mistura de gasolina A, com a proporção de 25% de álcool etílico anidro. A Figura 20, representa as fronteiras do sistema para este primeiro cenário.

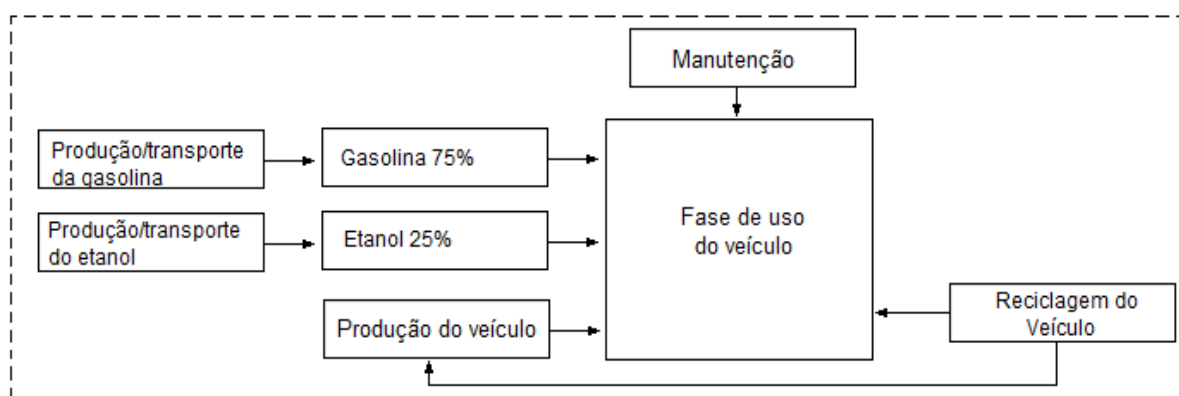


Figura 20 – Fronteira do sistema para o ICEVg

Para facilitar o entendimento das fronteiras adotadas, assim como os níveis de profundidade estabelecidos para cada cenário, optou-se por fragmentar os fluxogramas de cada subproduto específico. Para o segundo nível de profundidade deste sistema, considerou-se os estágios descritos a seguir:

- Ciclo de vida da gasolina: considerou-se o ciclo de vida completo, que envolve extração, transporte, refino, distribuição, uso final; representado pela Figura 25.
- Ciclo de vida do etanol: etapa agrícola, transporte, etapa industrial, distribuição, uso final; representado pela Figura 26.
- Ciclo de vida do automóvel: etapa industrial, distribuição uso final e fim de vida (reciclagem); representado pela Figura 28.

### 3.1.4.2 Fronteiras do sistema para o Cenário 2: ICEVe

O segundo cenário em estudo representa um veículo com motor de combustão interna, que utiliza apenas o etanol como combustível. Ainda que se enquadre na categoria de combustível de origem renovável, o etanol já é aceito como um combustível convencional utilizado no Brasil, pois ele é utilizado por grande parte da frota de veículos do país. A demanda dos consumidores por etanol está em ascensão e atualmente ele pode ser utilizado em automóveis flex (o usuário pode optar por utilizar 100% deste combustível), ou em automóveis que utilizam apenas etanol (são escassos atualmente). A Figura 21 representa as fronteiras do sistema para este cenário:

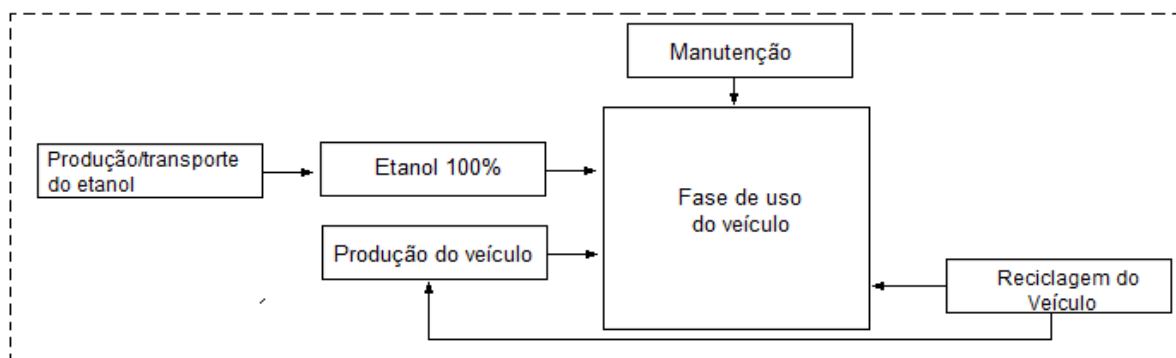


Figura 21 – Fronteira do sistema para o ICEVe

Para o segundo nível de profundidade deste sistema, considerou-se os estágios descritos a seguir:

- Ciclo de vida do etanol: etapa agrícola, transporte, etapa industrial, distribuição, uso final; conforme a
- Figura 26.
- Ciclo de vida do automóvel: etapa industrial, distribuição uso final e fim de vida (reciclagem); representado pela Figura 28.

### 3.1.4.3 Fronteiras do sistema para o Cenário 3: ICEVf

O terceiro cenário em estudo representa um veículo com motor de combustão interna, que utiliza a gasolina C e o etanol hidratado, com diferentes proporções, de acordo com a preferência do consumidor. A escolha por esse tipo de combustível é variável de acordo com fatores específicos da economia do país, facilidade de obtenção ou inerente ao impacto

ambiental causado pelo combustível em questão. A Tabela 3, apresenta a média de consumo de gasolina C e etanol dos usuários que utilizam o veículo flexível no ano de 2013.

Tabela 3 – Frota de veículos flexível fuel que opta por cada combustível.

Ano Calendário	Fração da Frota Usando Gasolina C	Fração da Frota Usando Etanol Hidratado
2004	0%	100,00%
2005	0%	100,00%
2006	8,5%	91,50%
2007	16%	84,00%
2008	20%	80,00%
2009	30%	70,00%
2010	48%	52,00%
2011	68%	32,00%
2012	75%	25,00%

Fonte: Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2013).

A Figura 22, representa as fronteiras do sistema para este cenário.

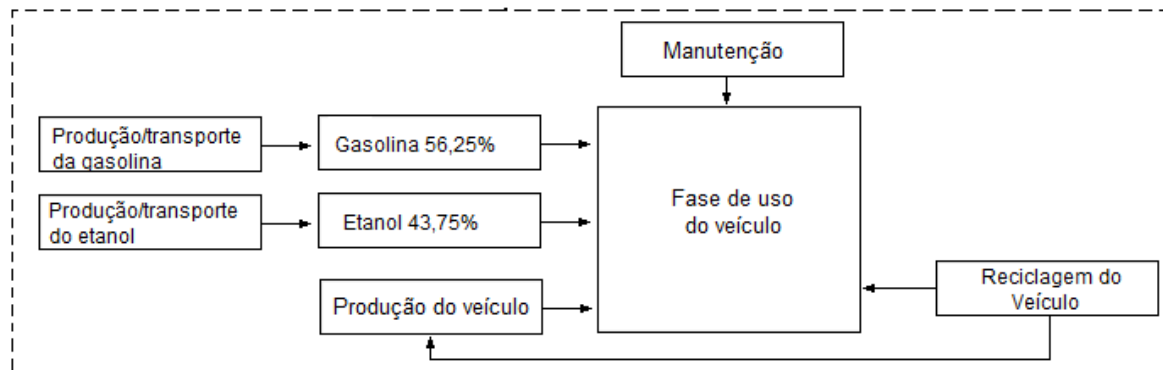


Figura 22 – Fronteira do sistema para o ICEVf

Para o segundo nível de profundidade deste sistema, considerou-se os estágios descritos a seguir:

- Ciclo de vida da gasolina: considerou-se o ciclo de vida completo, que compreende a extração, transporte, refino, distribuição, uso final; representado pela Figura 25.
- Ciclo de vida do etanol: compreende a etapa agrícola, transporte, etapa industrial, distribuição, uso final; conforme a
- Figura 26.

- Ciclo de vida do automóvel: etapa industrial, distribuição uso final e fim de vida (reciclagem); representado pela Figura 28.

### 3.1.4.4 Fronteiras do sistema para o Cenário 4: PHEV

O quarto cenário em estudo é representado pelo PHEV, que além de possuir um motor elétrico, apresenta um motor de apoio, que no caso é o de combustão interna. O objetivo desta configuração é reduzir o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de poluentes atmosféricos. Esse tipo de automóvel percorre parte do trajeto no modo exclusivo elétrico, em que as emissões atmosféricas são nulas, e partes específicas do trajeto funciona com o sistema do motor de combustão interna (Abve, 2009). Esse cenário será formado pelos seguintes elementos: Eletricidade da rede + Gasolina (75%) + Etanol (25%) + Veículo Elétrico Plug-in, como indica a Figura 23:

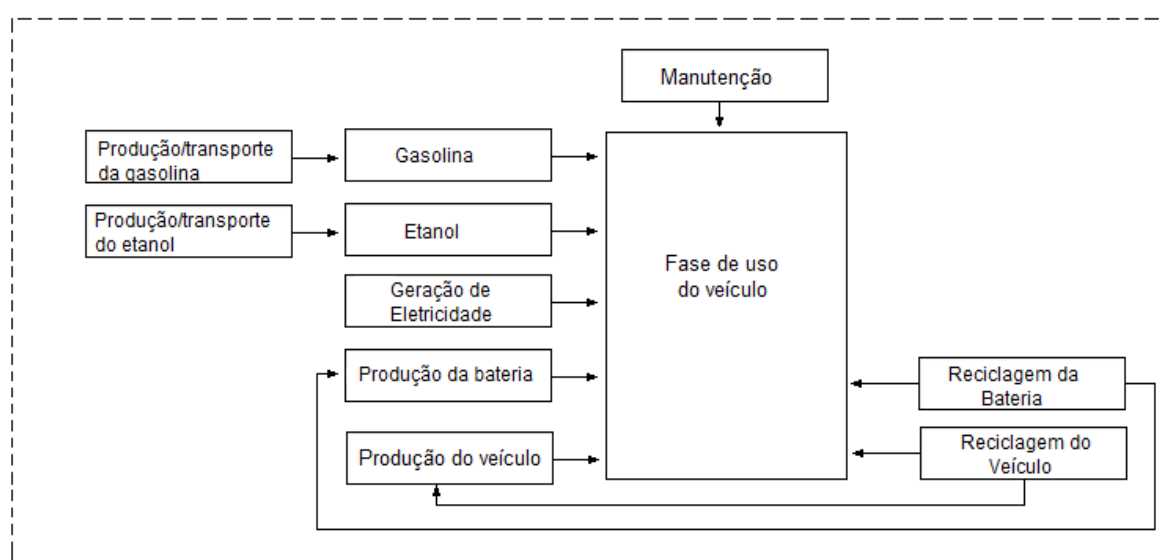


Figura 23 – Fronteira do sistema para o PHEV

Para o segundo nível de profundidade deste sistema, considerou-se os estágios descritos a seguir:

- Ciclo de vida da gasolina: considerou-se o ciclo de vida completo, que compreende a extração, transporte, refino, distribuição, uso final; conforme a Figura 25.
- Ciclo de vida do etanol: compreende a etapa agrícola, transporte, etapa industrial, distribuição, uso final; representado pela
- Figura 26.

- Ciclo de vida da eletricidade: compreende as etapas de produção de energia elétrica, transmissão e uso final conforme a Figura 27.
- Ciclo de vida do automóvel: etapa industrial, distribuição uso final e fim de vida (reciclagem); representado pela Figura 28.
- Ciclo de vida da bateria: extração de matéria prima da bateria, produção da bateria, uso final e fim de vida (reciclagem), conforme a Figura 29.

### 3.1.4.5 Fronteiras do sistema para o Cenário 5: BEV

Este tipo de automóvel utiliza como sistema de propulsão o motor elétrico, um sistema de armazenamento de energia, a bateria, e como fonte de energia a eletricidade. Embora a venda e utilização de carros elétricos ainda seja pequena, mesmo em países mais desenvolvidos, existe uma grande oportunidade para a penetração desses veículos no mercado de automóveis MME (2011). Este cenário é formado pelos seguintes elementos: Automóvel com motor elétrico + Energia elétrica+ bateria, como representado na Figura 24:

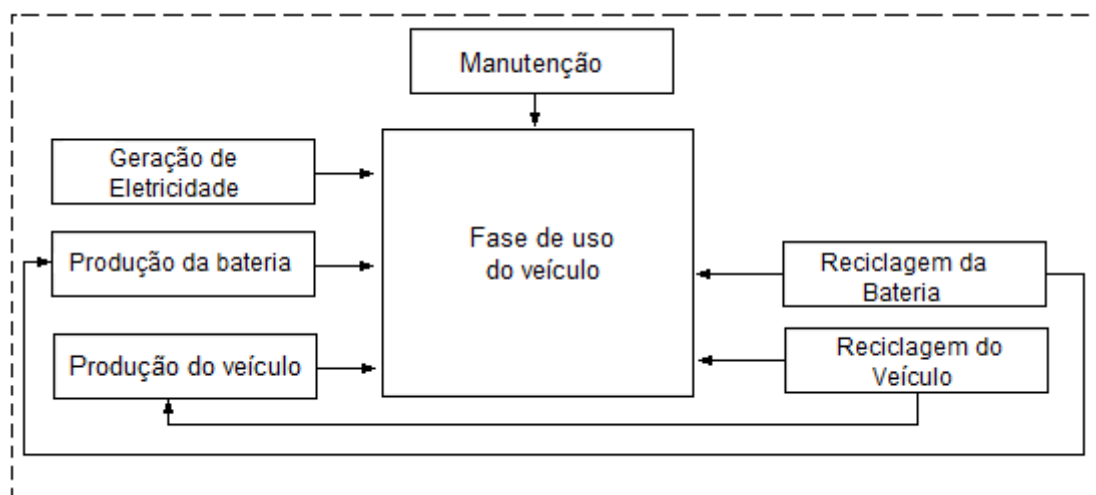


Figura 24 – Fronteira do sistema para o BEV

Para o segundo nível de profundidade deste sistema, considerou-se os estágios descritos a seguir:

- Ciclo de vida da eletricidade: compreende as etapas de produção de energia elétrica, transmissão e uso final, conforme a Figura 27.
- Ciclo de vida do automóvel: etapa industrial, distribuição uso final e fim de vida (reciclagem); representado pela Figura 28.

- Ciclo de vida da bateria: extração de matéria prima da bateria, produção da bateria, uso final e fim de vida (reciclagem) Figura 29.

### **3.1.5 Fronteiras do sistema para o segundo nível de profundidade (subsistemas)**

A partir dos cenários propostos para o estudo, foi possível elaborar um segundo nível de profundidade, ou seja, os subsistemas inclusos no ciclo de vida. A seguir serão descritos os subsistemas considerados:

#### **3.1.5.1 Fronteiras da Gasolina**

O ciclo de vida da gasolina inicia-se com a extração do petróleo, que pode ser em terra (*on shore*) ou no mar (*off shore*) onde foram considerando os diferentes insumos e energia para cada tipo de extração. A segunda fase é de transporte da matéria prima, que pode ocorrer por dutos, navios ou caminhões, dependendo da origem do petróleo. Para esta etapa são considerados os insumos energéticos. Geralmente esse petróleo é estocado em terminais, seguindo então para a fase industrial, ou seja, o refino, e foram considerados os insumos desta etapa, assim como os consumos energéticos. Após a etapa industrial, tem-se como produto a gasolina, que é transportada até os pontos de distribuição. No Brasil, usualmente a gasolina é transportada por dutos até os estoques das empresas distribuidoras, localizados próximos às refinarias (base primária). Daí o combustível pode ser transportado para outros locais de estocagem (base secundária) ou para revendedores, e por fim o uso final (D'Agosto, 2004).

Como fronteira geográfica para a produção de petróleo, adotou-se a Bacia de Santos, pois atualmente essa região é uma das responsáveis pela produção da gasolina da região Sudeste. A fase de uso foi fixada na cidade de São Paulo, pois é cidade com a maior frota de automóveis dos país, logo com maiores problemas relacionados ao tráfego urbano. A Figura 25 apresenta o fluxograma das fronteiras do sistema da gasolina.

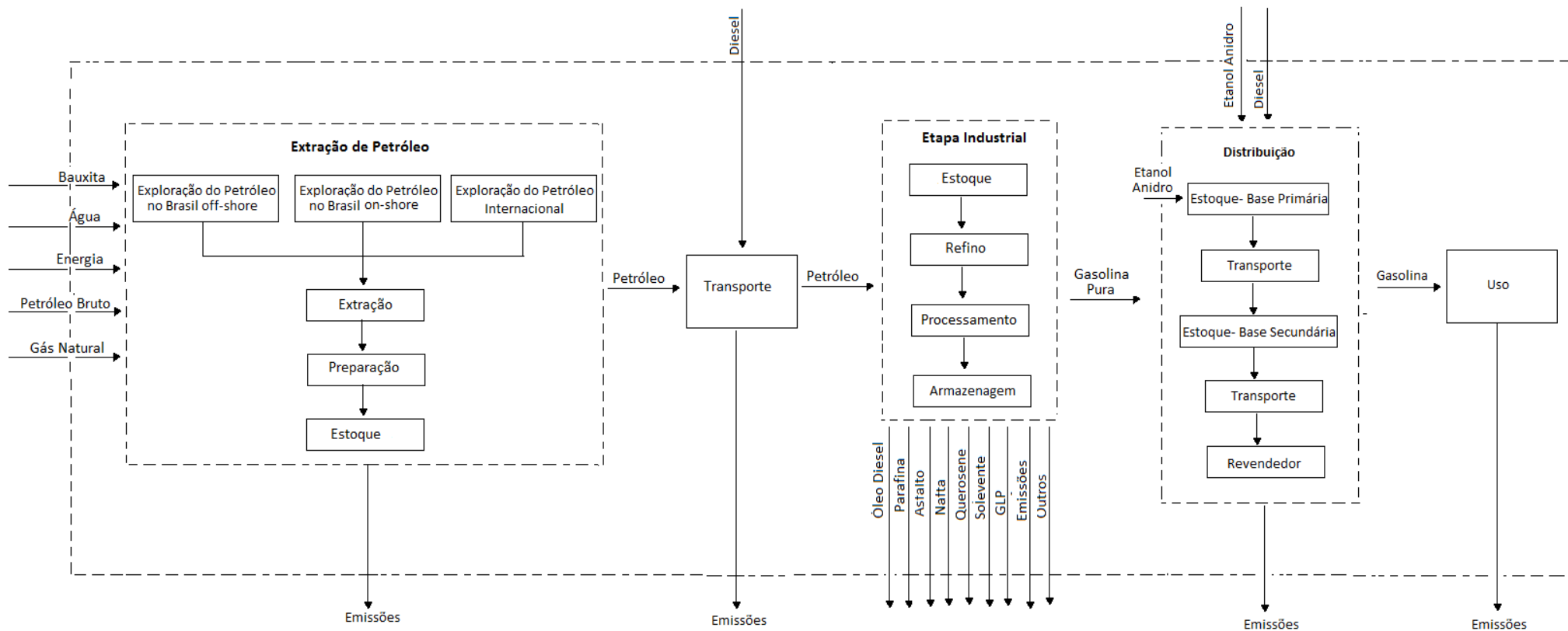


Figura 25 – Fronteiras do sistema da gasolina

### 3.1.5.2 Fronteiras do Etanol

O ciclo de vida do etanol inicia-se com a etapa agrícola, que envolve a utilização de sementes, insumos como fertilizantes e agrotóxicos, além de energias utilizadas diretamente nos processos. Foram adotadas distâncias conforme a literatura, dos insumos até a área de plantação. Essa etapa tem como produto a cana-de-açúcar, que então é transportada até a usina produtora de etanol, e nesta etapa considera-se a utilização de diesel, como combustíveis utilizados pelos caminhões. A etapa industrial envolve todas as etapas de processamento da cana-de-açúcar até a conversão em etanol. São considerados os insumos industriais para a produção do etanol, assim como a energia produzida através da co-geração. A distribuição do etanol é realizada por caminhões, e considera-se o diesel consumido nessa etapa. O etanol é transportado até uma base primária, local onde ocorre à mistura do etanol à gasolina A. Em seguida o etanol pode ser transportado para outros locais de estocagem (base secundária) ou para revendedores, e por fim o uso final.

Como fronteira geográfica da produção do etanol, adotou-se a região nordeste do Estado de São Paulo, especificamente a cidade de Colina, local onde se encontra a maior parte da produção canavieira do Brasil. As fronteiras do sistema adotadas para o combustível etanol encontram-se na

Figura 26:





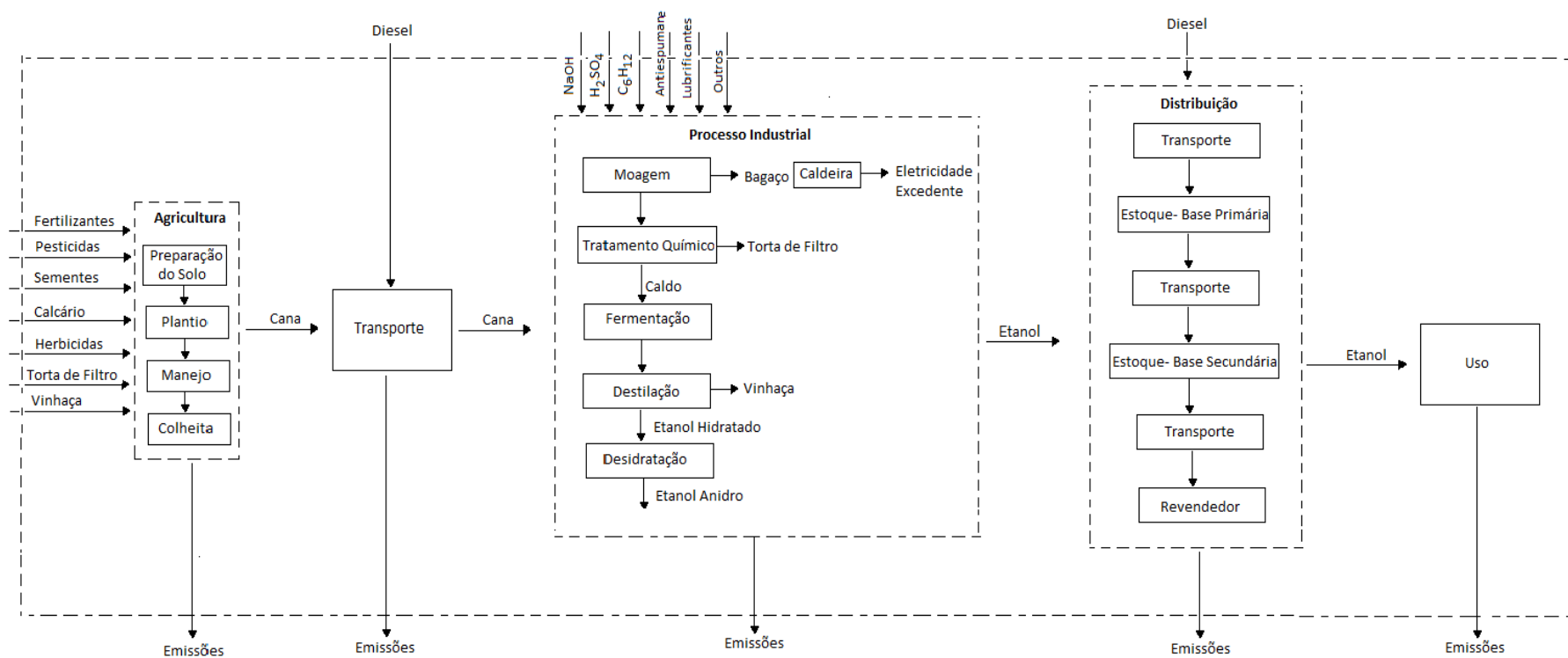


Figura 26 – Fronteiras do sistema do etanol

### 3.1.5.3 Fronteiras da Eletricidade

A Figura 27 apresenta as fronteiras do sistema para a produção de eletricidade considerada nesse estudo. A geração de energia elétrica no Brasil é composta basicamente por subsistemas interconectados. Logo, para as fronteiras desse sistema consideraram-se as principais fontes de energia que compõe a matriz elétrica brasileira. Para cada fonte considerada, iniciou-se com a etapa a partir da exploração da matéria prima, seguido da produção de energia, passando pela transmissão e por fim a distribuição ao usuário final.

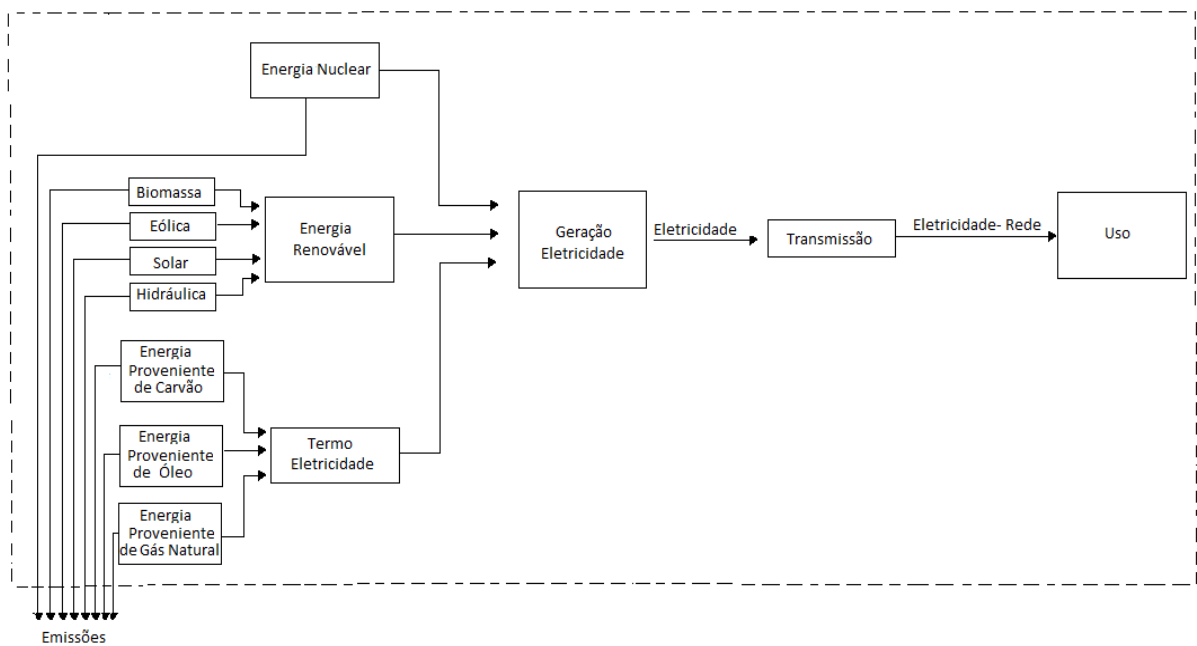


Figura 27 – Fronteiras do sistema da eletricidade

#### **3.1.5.4 Fronteiras do Automóvel**

A Figura 28 apresenta as fronteiras do sistema para o automóvel de combustão interna. O estudo inicia-se na etapa de produção industrial, ou seja, essa fase ocorre na planta de produção do automóvel. A etapa de extração de matéria prima, assim como a utilização dos insumos para essa etapa, não foram inclusos, devido à falta de dados disponíveis para o caso do Brasil.

A etapa de processamento do material, consumo energético, transporte até o centro revendedor, o uso e a reciclagem do automóvel foram considerados.

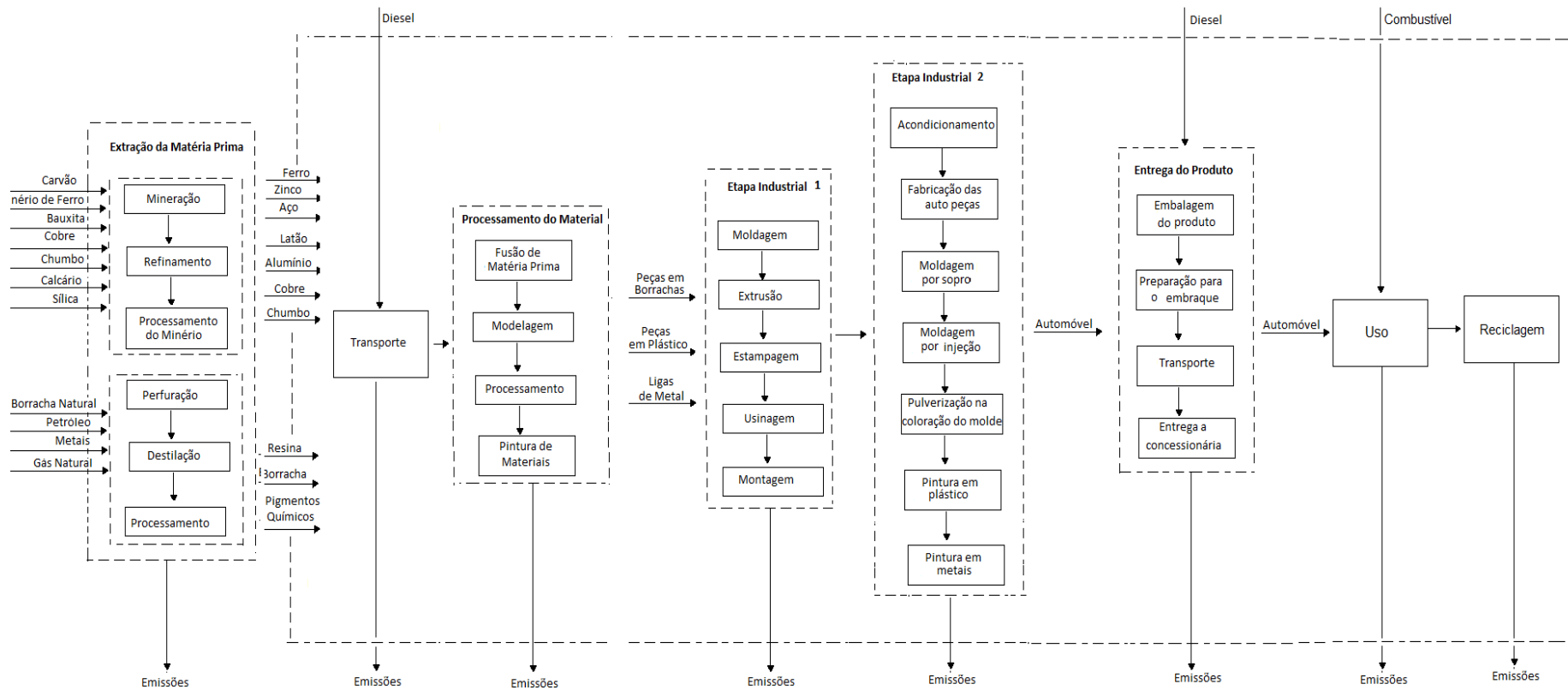


Figura 28 – Fronteiras do sistema do automóvel

### 3.1.5.5 Fronteiras da Bateria

A Figura 29 apresenta as fronteiras do sistema para a produção da bateria considerada nesse estudo. Está incluso no sistema a extração da matéria prima, transporte até a planta de fabricação da bateria, a produção dos componentes utilizados na bateria, assim como a montagem, os insumos e emissões, além do transporte da bateria até o centro revendedor, o uso, o transporte até a planta de reciclagem, e por fim, a reciclagem.

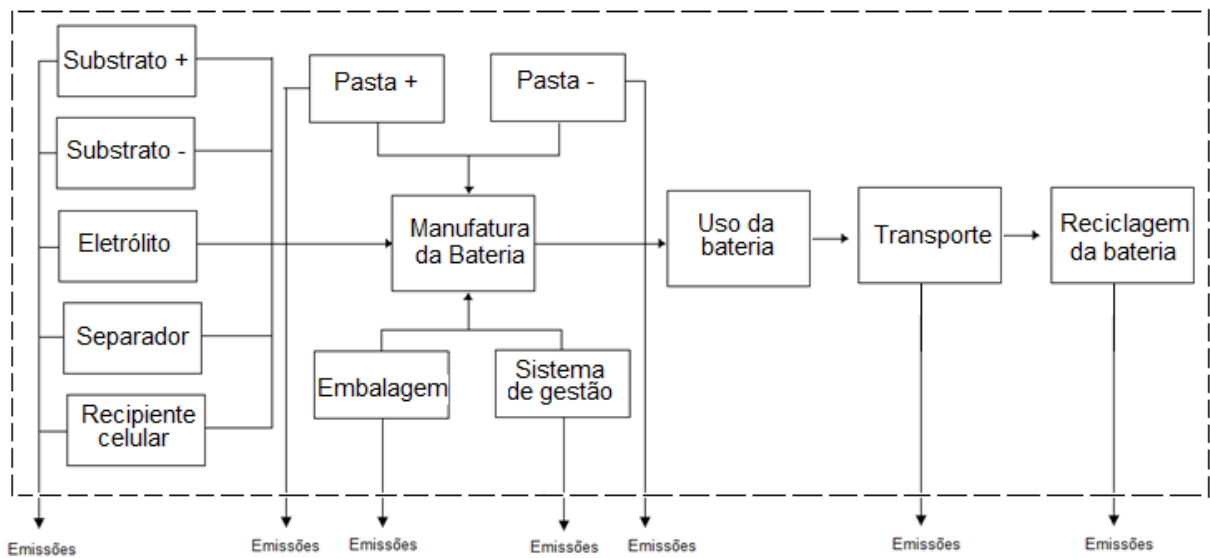


Figura 29 – Fronteiras do sistema da bateria

## Capítulo 4

### ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Este capítulo contém os inventários do ciclo de vida do processo de produção e uso do etanol, gasolina, eletricidade, veículo convencional e bateria de íon de lítio.

A etapa da análise do Inventário do Ciclo de vida, segundo a ISO14040 (2006), envolve a coleta dos dados e os procedimentos utilizados para quantificar as entradas (materiais e energéticas) e as saídas (na forma emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos) ao longo do ciclo de vida do produto.

#### 4.1 PREPARAÇÃO PARA A COLETA DE DADOS

As fronteiras inicialmente propostas para o estudo foram definidas a partir de trabalhos semelhantes realizados, como por exemplo, o trabalho de Bauer et al., (2015), Boureima, F. et al., (2009); Messagie, M. et al., (2014), Faria, R. et al., (2013), entre outros, porém com distintas realidades, como por exemplo, os tipos de combustíveis e a matriz energética adotada, as distâncias estabelecidas para o transporte, entre outros. Logo, fez-se necessário a realização de um modelo particular para os casos estudados nesse trabalho. Devido ao grande

volume de informações referentes aos dados envolvidos na análise, decidiu-se consolidar essas informações aos inventários expostos no capítulo seguinte.

## **4.2 COLETA DE DADOS**

A coleta de dados realizadas nesse estudo foi dividida de acordo com cada sistema proposto. A seguir são apresentados de forma bastante resumido as principais fontes de dados para cada sistema. Para os dados não inventariados, recorreu-se a base de dados do SimaPro.

- Automóvel modelo Golf: Schweimer, et al., (2004).
- Gasolina: Borges, (2004).
- Etanol: Cavalett et al., (2012).
- Eletricidade: Banco de dados Ecoinvent.
- Bateria automotiva: Majeau-Bettez et al., (2011).

### **4.2.2 INVENTÁRIO DA GASOLINA**

O inventário do ciclo de vida da gasolina agrega uma série de subsistemas interligados. Esses sistemas são: extração do petróleo, refino, transporte e uso. Isto inclui a pré-produção, correntes de fabricação do produto final, mas não foram inclusos a produção de máquinas utilizadas para essa funcionalidade.

Para o presente estudo, considerou-se que o petróleo utilizado para a produção da gasolina no Brasil possui duas origens distintas, sendo fixado o valor de 50% do petróleo proveniente de fontes internacionais, e 50% do petróleo proveniente de bacias nacionais.

#### **4.2.2.1 Exploração da matéria prima: petróleo**

Os dados referentes à produção de matéria prima foram baseados em Borges, (2004). Considera-se que o óleo diesel foi utilizado para realizar a perfuração e produção, enquanto que o gás natural foi consumido para a geração da energia utilizada nos processos.

A extração de petróleo gera principalmente emissões diretas do metano e NMVOC devido a vazamentos, liberações e queima de gases.



A Tabela 4 apresenta dados relacionados com a extração do petróleo em alto mar. Os dados desse inventário foram baseados em plataformas localizadas no Mar do Norte, e este se difere da extração no Brasil, principalmente na fase de perfuração e tipo de plataforma utilizada. No entanto, como para este estudo não está incluso os dados referentes aos bens de capital, pode-se estabelecer uma equivalência com os dados brasileiros. Este inventário inclui o transporte do petróleo até a costa, por meio de dutos.

Tabela 4 – Inventário do ciclo de vida de 1kg de petróleo extraído em alto mar

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
<b>Entradas</b>		
Petróleo	kg	1,01
Gás natural	kg	0,055
Bauxita	kg	0,0004
Energia (não especificada)	MJ	2,66
Água	kg	0,0095
<b>Saídas</b>		
<b>Emissões para o ar</b>		
CO	mg	70
CO <sub>2</sub>	g	152
CxHy	g	1,8
MP	mg	230
NO <sub>x</sub>	g	2,2
HCl	kg	1,10E-05
SO <sub>x</sub>	mg	60
<b>Emissões para a água</b>		
Petróleo	mg	35
Íons metálicos	mg	5
Fenol	µg	1000
<b>Resíduos Sólidos</b>		
Resíduo mineral	kg	0,0011
Escória	kg	1,10E-05

Fonte: Borges, (2004).

## **Petróleo Nacional**

A Bacia de Campos no RJ é a maior área produtora de petróleo do Brasil, no entanto a bacia com maior potencial de crescimento é na Bacia de Santos, pois nela se encontra a camada de pré-sal recentemente descoberta e explorada a partir de 2009. Sua localização se estende desde o litoral sul do estado do Rio de Janeiro até o norte do estado de Santa Catarina

(Petrobrás, 2015). Devido esse potencial de desenvolvimento, este é o local escolhido para a extração do petróleo.

### **Petróleo Importado**

Grande parte do petróleo importado consumido pelas refinarias brasileiras é proveniente do Oriente Médio, representando 50% do total utilizado. Por uma questão de simplificação, o transporte marítimo foi modelado considerando-se que todo o petróleo importado é proveniente dessa região. A distância adotada entre o continente africano e o Brasil é de 20.000km.

#### **4.2.2.2 Transporte da matéria prima**

Os dados utilizados para o transporte de matéria prima foram baseados em Borges (2004), e estão apresentados na Tabela 5.

Para o cenário do petróleo produzido no Brasil, o volume total é transportado desde a bacia de Campos, passando por terminais de armazenamento, até o destino final, a Refinaria.

Em relação ao transporte de petróleo proveniente do Oriente Médio, o consumo de energia foi calculado com base nos dados dos navios petroleiros utilizados para o transporte, além da distância média entre os portos de Jeddah (Arábia Saudita) até o Terminal de Ilha Grande, no Rio de Janeiro.

O petróleo importado é transportado para o Brasil por petroleiros da Petrobrás, que atualmente trabalha com navios com capacidade entre 70.000 e 100.000 t (Petrobras, 2014). A distância do transporte do petróleo importado ao Brasil foi estimada a partir de medição aproximada de 20.000km do Oriente Médio

Tabela 5 – Inventário do transporte marítimo 1t.km

Parâmetros	Unidade	Quantidade
<b>Entradas</b>		
Bauxita	mg	2,98
Petróleo	kg	8,19
Energia (não especificada)	KJ	20,36
Gás natural	mg	522
Água	µg	246
<b>Saídas</b>		
<b>Emissões para o ar</b>		
Aldeídos	µg	25,2
Amônia	µg	12,6
CO	mg	70,7
CO <sub>2</sub>	g	24,7
CxHy	mg	57
MP	mg	1,78
Metais	µg	74,5
N <sub>2</sub> O	µg	30,2
NO <sub>x</sub>	mg	458
SO <sub>2</sub>	mg	372
Fuligem	µg	700
SO <sub>x</sub>	µg	671
COV	mg	1,29
<b>Emissões para a água</b>		
DBO	µg	3,78
Cl <sup>-</sup>	µg	74,5
DQO	µg	18,8
Petróleo	µg	364
CxHy	µg	149
SDT	µg	7,98
SST	mg	3,78
H <sub>2</sub>	µg	224
Íons metálicos	µg	37,3
óleos	µg	43,4
<b>Resíduos sólidos</b>		
Resíduos minerais	mg	10,4
Óleo	mg	103
Resíduos sólidos (não inerte)	µg	983
Escória	µg	14,9

Fonte: Borges, 2004.

### 4.2.2.3 Produção da gasolina

A produção da gasolina envolve basicamente o refino do petróleo, que neste estudo definiu-se como limite geográfico a cidade de Cubatão.

Uma refinaria é composta por uma série de operações diferentes que geram muitos produtos, emissões e os resíduos gerados normalmente são tratados em equipamentos e estações semelhantes. Sabe-se que os procedimentos de alocação devem ser evitados, porém em alguns casos, torna-se inevitável, como neste estudo, no qual as operações industriais são integradas, dificultando uma análise mais profunda das imputações que devem ser feitas entre os derivados.

O processo de destilação do petróleo gera quantidades consideráveis de efluentes. A Tabela 6 apresenta as principais entradas e saídas de materiais no refino do petróleo.

Tabela 6 – Inventário da unidade de processo de refino de petróleo

Parâmetros	Unidade	Quantidade
<b>Entrada de outro sistema</b>		
Petróleo consumido no Brasil	t	1
<b>Saídas</b>		
<b>Emissões para o ar</b>		
	g	8173,2
CO <sub>2</sub>	g	20,16
CH <sub>4</sub>	g	5,76
NOx	g	25,93
CO	g	996,3
NMCOV	g	10
MP	g	4,88
SOx	g	11,52
CxHy	g	0,023
H <sub>2</sub> S	g	0,21
<b>Emissões para a água</b>		
Cl <sup>-</sup>	g	24
Na <sup>+</sup>	g	16
Óleo	g	7

Fonte: Borges, 2004.

Uma vez que no refino do petróleo são gerados diversos produtos comercializáveis, é necessário que se faça a distribuição dos aspectos ambientais. A Tabela 7 apresenta o volume de derivados, produzidos a partir de 1kg de petróleo.

Tabela 7 – Produção dos derivados para 1 kg petróleo

<b>Derivados de petróleo</b>	<b>Quantidade (l)</b>
Gasolina	2,39E-01
Gasolina de aviação	8,50E-04
GLP	1,12E-01
Óleo Combustível	2,19E-01
Óleo diesel	4,11E-01
Querosene de aviação	4,47E-02
Querosene iluminante	2,79E-03
Asfalto	2,05E-02
Coque	2,24E-02
Nafta	1,08E-01
Óleo lubrificante	9,48E-03
Parafina	1,70E-03
Solvente	8,38E-03
Outros	1,43E-02

#### 4.2.2.4 Distribuição da gasolina

A gasolina produzida na Refinaria Presidente Bernardes, é bombeada através de oleodutos para tanques de estocagem das companhias distribuidoras, que ficam situados próximos à refinaria. Para o estudo, considerou-se o centro de distribuição na cidade de São Caetano do sul. Nesta base ocorre a mistura do álcool etílico anidro combustível à gasolina. Os dados referentes a esse produto estão especificados na Tabela 8.

Tabela 8 – Distâncias entre os centros de produção ao centro de distribuição

<b>Localização</b>	<b>Distâncias</b>	<b>Modo de Transporte</b>
Terminal de Santos - Refinaria Presidente Bernardes (Cubatão)	50 km	Oleoduto
Refinaria Cubatão- Centro de distribuição São Caetano do Sul	46 km	Oleoduto
Usina São José (Colina-SP) - Centro de distribuição (mistura compulsória na gasolina)	430 km	Rodoviário

Os dados utilizados para essa etapa variam de acordo com a operação da companhia de distribuição de combustível. Neste estudo foram considerados os dados da Companhia Petrobras Distribuidora (BR distribuidora), que pode ser observado na Tabela 9. O relatório

especifica que a energia elétrica (E.E.), adquirida da rede externa, é a fonte de energia utilizada para o bombeio dos produtos e que os derivados de petróleo são consumidos nos terminais, principalmente para geração de vapor que é utilizado no aquecimento de produtos mais viscosos, como petróleo, óleo combustível e asfalto (D'Agosto, 2004)

Tabela 9 – Consumo de energia para bombeio por oleodutos e operações nos terminais

Operação	Consumo de energia	Unidade	Tipo de energia
Bombeio	0,0311	kWh/t.km	Energia elétrica

Fonte: D'Agosto (2004).

A gasolina C proveniente dos tanques de estocagem então é transportada aos postos de revenda de toda a região. Nos postos de revenda, o combustível é descarregado por gravidade, não havendo necessidade de qualquer tipo de bombeio. A partir de então é realizada a entrega aos consumidores finais.

#### 4.2.2.5 Uso Final

A gasolina é utilizada por dois 3 cenários distintos: ICEVg e ICEVf, PHEV. Para que se obtenham os dados necessários para o consumo dos automóveis, é necessário que se conheça a eficiência (km/l) dos veículos, e as proporções dos combustíveis utilizados. A Tabela 10 apresenta os dados utilizados para os inventários do uso ICEVg, enquanto que a Tabela 11, apresenta os dados utilizados para os inventários do uso do ICEVf. Os dados para o PHEV serão discutidos no inventário da eletricidade.

Tabela 10 – Dados do ICEVg

ICEVg	Quantidade
Fluxo de referência (km)	260000
Consumo específico (km/l)	12,2
Total de gasolina A (l)	15983,6
Total de etanol	5327,9

Tabela 11 – Dados do ICEVf

ICEVf	Quantidade
Fluxo de referência (km)	260000
Consumo específico (km/l)	11,1
Total de combustível (l)	23423,4
Total de gasolina A (l)	13175,7
Total de etanol (hidratado+anidro)	10247,7

Os dados de emissão associado ao uso da gasolina foram adotados, conforme Cavalett et al., (2012), e estão apresentados na Tabela 12, e as emissões associados ao uso do etanol na Tabela 13.

Tabela 12 – Emissão por 1MJ de gasolina

<b>Emissão Gasolina</b>	<b>Quantidade (g)</b>
COV	2,4E-2
CH <sub>4</sub>	8,2E-3
NO <sub>x</sub>	1,4E-2
N <sub>2</sub> O	8,6E-3
CO	1,8E-1
CO <sub>2</sub>	5,8E1

Fonte: Cavalett et al., (2012).

Tabela 13 – Emissão por 1MJ de etanol

<b>Emissão Gasolina</b>	<b>Quantidade (g)</b>
COV	1,9E-2
CH <sub>4</sub>	6,9E-3
NO <sub>x</sub>	1,76E-2
N <sub>2</sub> O	2,6E-3
CO	2,6E-1
CO <sub>2</sub>	-

Fonte: Cavalett et al., (2012).

## 4.2.2 INVENTÁRIO DO ETANOL

A etapa do inventário foi conduzida de forma a atender aos objetivos propostos. Este estudo fornece informações atualizadas e abrangentes do inventário de ciclo de vida para o etanol de cana-de-açúcar no Brasil, considerando as etapas de produção agrícola, transportes, produção de etanol, e seu uso final.

Basicamente, os dados utilizados dos inventários do etanol foram coletados de fontes secundárias, ou seja, de dados da literatura ou de especialistas no assunto. Outras variedades de dados foram obtidas a partir do banco de dados do software SimaPro.

Para a realização deste trabalho, selecionou-se um empreendimento representativo, baseado em um real cenário nacional da produção de etanol. Este empreendimento é uma destilaria produtora de etanol de primeira geração, que também produz eletricidade excedente pelo sistema de cogeração alimentada com resíduos de cana (bagaço e palha). Decidiu-se estabelecer hipoteticamente essa usina aos redores do município de Colina, localizado no

nordeste do Estado de São Paulo, pois nessa região existem muitos empreendimentos voltados para a produção do etanol.

#### 4.2.2.1 Etapa agrícola

O sistema de produção de etanol considerado nesse estudo é baseado em Cavalett et al. (2012). Adotou-se um sistema convencional de produção de cana-de-açúcar, que realiza a colheita de forma mecanizada, sem queima prévia da cana de açúcar, usina autônoma (ou seja, produz somente etanol e eletricidade), com eletrificação dos sistemas e sem queima da palha na caldeira de cogeração de eletricidade.

A seguir são descritos as principais informações relativas a essa etapa:

##### 4.2.2.1.1 Insumos agrícolas e coprodutos

De maneira geral, a adubação de plantio será realizada em toda a área de plantio, independente da aplicação de vinhaça, a cada 5 anos. Já a adubação de manutenção é realizada todo ano, a não ser quando ocorre a reforma do canavial (Rocha, 2009).

A base de dados dos insumos agrícolas aplicados na produção da cana-de-açúcar foi coletada de fontes secundárias, adquiridas em grande parte da literatura. Diante do fato de alguns dos fertilizantes serem provenientes de outros países e outros serem produzidos no Brasil, adotou-se distâncias fictícias para o transporte desses fertilizantes até a plantação de cana-de-açúcar. Considerou-se o mix de energia elétrica do Brasil como energia utilizada para as produções. A taxa de aplicação de insumos e coprodutos é variável em função do desenvolvimento da planta.

A seguir são descritos os principais insumos considerados na etapa agrícola:

- **Fertilizante Nitrogenado (N):** Considerou-se a ureia como fonte de nitrogênio para a cultura da cana. O processo de produção de ureia no Brasil foi adaptado a partir do banco de dados Ecoinvent (Swiss Centro de Inventários do Ciclo de Vida 2009), de acordo com Ribeiro, 2009. A fim de aproximar-se de dados atuais para a produção brasileira de ureia, considerou-se o mix de energia elétrica consumida no Brasil.
- **Fertilizante Fosfatado (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):** Como fonte de fósforo utilizado na cultura de cana-de-açúcar no Brasil, empregou-se o superfosfato simples (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). As quantidades de produção foram extraídas de Viana, 2008, e considerou-se o uso de eletricidade do Brasil.



- **Fertilizante Potássico ( $K_2O$ ):** O fertilizante potássico utilizado neste trabalho será o  $K_2O$ . As quantidades de produção foram extraídas de Viana, 2008, e considerou-se o uso de eletricidade no Brasil.
- **Calcário Viana:** A aplicação de calcário na cultura de cana-de-açúcar é necessária quando por análise do solo, a sua acidez indicar pH menor que 5,5 (solo ácido). As doses recomendadas de calcário divergem bastante, principalmente após a expansão do seu cultivo para solos menos férteis. Para este estudo, tomou-se como base o inventário de calcário consumido no Brasil (Viana, 2008).
- **Herbicidas:** É utilizado para o controle de plantas invasoras. Para este trabalho, foi considerado uso do Herbicida Alochlor, baseado no inventário de Viana, 2008.
- **Inseticidas:** É utilizado para o controle de pragas. Para este trabalho, foi considerado o uso do Inseticida Triclorfom, baseado no inventário de Viana, (2008).
- **Vinhaça e Torta de Filtro:** Atualmente existe a tendência de substituir parcialmente a adubação química pela aplicação de vinhaça e torta de filtro, ambas obtidas no processamento industrial da cana. A aplicação desses insumos varia de acordo com a necessidade da lavoura em nutrientes (Viana, 2008).

A Tabela 14 a seguir, apresenta as quantidades dos insumos agrícolas, considerados nesse estudo:

Tabela 14 – Insumos da etapa agrícola

Insumo agrícola	Valor aplicado (kg/ha)
N	58,7
$P_2O_5$	20,6
$K_2O$	30,4
Calcário	400,0
Herbicida	5,0
Inseticida	2,0

Fonte: Souza (2010).

#### 4.2.2.1.2 Consumo de combustível

Na etapa agrícola, utiliza-se o óleo diesel como combustível. A Tabela 15 apresenta os dados relativos as distâncias adotadas no transporte dos insumos.

Considera-se que a distância da planta de geração ao campo de plantação de cana-de-açúcar seja de 25 km. Adotou-se como distâncias médias para o transporte de calcário e gesso, até o campo, como sendo de 400 e 300 km. A distância da revendedora de fertilizantes até o campo foi estipulada em 200 km (uma distância).

Na primeira fase desse processo ocorre o transporte dos insumos até a área do plantio. A Tabela 15 apresenta o tipo de caminhão utilizado para o transporte e a distância percorrida.

Tabela 15 – Transporte dos insumos

<b>Etapa</b>	<b>Tipo de caminhão</b>	<b>Distância (km)</b>
Transporte de mudas de cana	15t	15
Transporte do calcário da planta para campo	30t	400
Transporte do gesso da mina até o campo	30t	300
Fertilizante do armazém até o campo	30t	200
Torta de filtro da planta ao campo	>32t	25
Cana do campo à planta	>32t	25

Fonte: Souza (2010).

A segunda fase do processo refere-se ao consumo de diesel nos tratos culturais, ou seja, a quantidade consumida pelo maquinário agrícola nas atividades de gradagem, subsolagem, sulcamentos, destruição da soqueira, aplicação de calcário e fertilizante, semeadura, colheita, transbordo e transporte da cana até a usina. Na Tabela 16 a seguir, são apresentados alguns valores médios desse consumo:

Tabela 16 – Consumo de diesel nos tratos culturais

<b>Cana planta</b>	<b>l/ha</b>
Aplicação de calcário	3,0
Incorporação dos restos culturais	12,0
Aração pesada I	28,9
Subsolagem	20,6
Gradagem pesada I	21,5
Gradagem intermediária II	12,0
Gradagem niveladora II	8,3
Sulcamento	15,3
Fechamento dos sulcos e aplicação de inseticida	7,0
Aplicação de herbicidas	3,6
Quebra lombo	6,2
Aplicação de herbicidas	3,6

Fonte: Souza (2010).

#### 4.2.2.1.3 Emissões

O cultivo de cana-de-açúcar produz emissões tanto para a atmosfera quanto para a água, principalmente devido às operações agrícolas realizadas pelos tratores e pelos caminhões de carga pesada que transportam a cana de açúcar. Os principais poluentes atmosféricos emitidos pelos tratores agrícolas estão descritos na Tabela 17:

Tabela 17 – Poluentes emitidos pelos tratores agrícolas

<b>Poluentes</b>	<b>Valor kg/l diesel consumido</b>
CO <sub>2</sub>	2,0E0
HC	6,5E-3
CO <sub>2</sub>	1,8E-2
NO <sub>x</sub>	4,5E-2
PM10	4,7E-3
SO <sub>x</sub>	3,2E-3

Fonte: Wang et al., (2003).

Quanto os principais poluentes emitidos para água de uma cultura de cana-de-açúcar são fósforo e nitrato. A quantidade aproximada emitida de cada um deles está apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 – Emissões para água provenientes do cultivo da cana

<b>Poluentes</b>	<b>kg/kg de cana-de-açúcar</b>
Fósforo	4,1E-6
Nitrato	2,1E-5

Fonte: Nemecek (2004).

#### 4.2.2.2 Transporte

Após a colheita de cana-de-açúcar, ela é lançada em veículos de transbordo, que irá transferi-la para caminhões que farão o transporte até a usina.

A Tabela 19 apresenta o consumo específico do caminhão utilizado para o transporte, e a Tabela 20 apresenta as emissões causadas por esse caminhão.

Tabela 19 – Consumo dos veículos pesados

<b>Tipo de Caminhão</b>	<b>Capacidade (t)</b>	<b>Consumo (km/l)</b>
Caminhão truck	>32t	1,6

Fonte: Souza (2010).

Tabela 20 – Poluentes emitidos por veículos de carga pesada.

Poluentes	Valor g/km
CO <sub>2</sub>	935,0
NO <sub>x</sub>	7,7
CO	1,7
Partículas finas	0,0

Fonte: Lloyd e Cackette (2003).

#### 4.2.2.3 Processo industrial

Embora a maioria das unidades do Brasil seja usinas de açúcar, com destilarias anexas, neste estudo foi considerada uma destilaria autônoma como referência, de forma que fosse possível avaliar os fluxos de energia e materiais associados à produção do etanol desconectados do açúcar. Essa concepção foi utilizada apenas para facilitar a avaliação dos fluxos de energia e materiais. Esta consideração não compromete a qualidade da análise, uma vez em que as produções de açúcar e álcool envolvem processos claramente distintos, com fronteiras, equipamentos e usos de energia conhecidos (Seabra, 2008).

As alocações entre produtos e coprodutos da usina de etanol foram padronizadas neste trabalho, ou seja, para todos os processos a alocação em base energética foi adotada.

Os principais coprodutos da produção do etanol considerados nesse estudo são os excedentes de bagaço e a energia elétrica.

No Brasil, a produtividade da cultura da cana varia 80,0 – 85,0 t de cana por hectare (tc / ha); no entanto espera-se um aumento da produção, através da redução de práticas de queimadas que ainda ocorrem na colheita manual (Rocha, 2014). Baseados em dados de Rocha (2014) e Cavalett (2012), considerou-se os seguintes dados de produção, descritos na Tabela 21:

Tabela 21 – Dados da produção do etanol

Fluxo de Referência	30588,0 l etanol
Produtividade da cana	83,0 t cana/ha
Produção industrial	88 l etanol/tc
Produção de eletricidade	12kwh/tc

#### Insumos industriais

No processo industrial do etanol de cana-de-açúcar, os principais insumos químicos utilizados são ácido sulfúrico, cal virgem, lubrificantes, entre outros. Segundo a literatura, as quantidades de insumo utilizados na produção de etanol, estão descritos na Tabela 22:

Tabela 22 – Insumos da etapa industrial

<b>Insumo Químico</b>	<b>Quantidade</b>
Cal virgem (g/tc)	1066,5
Ácido fosfórico (g/tc)	23,3
Ácido sulfúrico (g/l etanol)	6,3
Lubrificantes (g/tc)	13,9

Fonte: Souza (2010).

Para o inventário desse estudo, considerou-se a produção de ácido sulfúrico consumido no Brasil, baseado no estudo de Viana, 2008. Para o óleo lubrificante consumido na etapa industrial, utilizou-se os dados do estudo de Borges, 2004. Os demais insumos foram dados adaptados a partir do banco de dados Ecoinvent (Swiss Centro de Inventários do Ciclo de Vida 2009).

#### 4.2.2.4 Distribuição

Dados referentes a distribuição do etanol foram obtidos através da Petrobrás. Considerou-se a Usina instalada no município de Colina- SP. O ponto final para a distribuição de etanol foi fixado no município de São Caetano do Sul- SP, devido à presença de um terminal de armazenamento, onde ocorre a mistura de etanol à gasolina e a distribuição para os postos de revenda. Para este estudo, a logística de distribuição do etanol é integralmente do modo rodoviário. O caminhão utilizado para o transporte possui capacidade de carga de 30.000 l. Os dados relacionados ao transporte do etanol até o centro distribuidor estão descritos na Tabela 23.

Tabela 23 – Distribuição do etanol

<b>Dados de Transporte</b>	
Consumo do caminhão de 30.000 l de capacidade (km/l)	2,0
Distância da usina ao posto de abastecimento (km)	430,0
Consumo caminhão cheio para 430 km (l)	211,8
Consumo do caminhão para 30588 l de etanol (l)	216,0

#### 4.2.2.5 Uso Final

Admite-se o uso desse exclusivo do etanol para o ICEVe em toda a vida útil do veículo, ou seja, 260.000km. Os dados referentes a esse cenário estão disponíveis na Tabela 24.

Tabela 24 – Dados do ICEVe

<b>Uso do Etanol</b>	
Consumo específico do automóvel (km/l)	8,5
Fluxo de referência (km)	260000,0
Total de etanol (l)	30588,2

Os dados de emissão associado ao uso do etanol hidratado como combustível nos veículos de combustão interna foram adotados conforme Cavalett et al. (2012), e estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Emissões do etanol

<b>Emissões Etanol (g/km)</b>	
VOC	5,1E-2
Metano	1,8E-2
NOx	4,7E-2
N <sub>2</sub> O	7,0E-3
CO	6,9E-1
CO <sub>2</sub>	-

Fonte: Cavalett et al. (2012).

#### 4.2.3 INVENTÁRIO DA ELETRICIDADE

Este capítulo tem como premissa estabelecer uma metodologia para a construção do inventário do ciclo de vida baseado nas características da matriz de energia elétrica brasileira, utilizando dados provenientes da literatura.

Para determinar o impacto da produção e uso da energia elétrica sobre o meio ambiente é necessário abordar os diferentes processos de conversão de energia que integram a matriz elétrica brasileira, que são associados aos seguintes processos: energia hidrelétrica, energia térmica convencional, energia nuclear, energia eólica (Miranda, 2012). A Tabela 26 a seguir, apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil, para o ano de 2013.

Tabela 26 – Eletricidade por fonte de energia

<b>Eletricidade- Fonte de energia</b>	<b>(%)</b>
Eletricidade Biomassa	7,6
Eletricidade carvão betuminoso	2,6
Eletricidade gás natural	11,3
Eletricidade Hidráulica	70,6
Eletricidade Eólica	1,1
Eletricidade Diesel	4,4
Eletricidade Nuclear	2,2

Fonte: BEN (2014).

De uma maneira geral, tecnologias que utilizam combustíveis fósseis para a geração da eletricidade estão relacionadas com emissões diretas de GEE, principalmente com a fase de operação da usina, enquanto que as tecnologias que utilizam combustíveis renováveis, grande parte das emissões está na fase de construção das estruturas e de equipamentos (Weisser 2007).

A seguir são apresentadas as principais referências utilizadas para caracterizar o inventário da Energia elétrica no Brasil, distribuídos de acordo com as fontes de energia participativas na matriz elétrica brasileira:

#### **4.2.3.1 Produção da energia elétrica**

##### **4.2.3.1.1 Energia proveniente de fontes hidráulicas**

Atualmente, no Sistema Interligado Nacional existem 164 aproveitamentos hidrelétricos em operação no ano de 2015, que estão localizadas em todas as regiões do Brasil (ONS, 2015). No entanto, a maior fonte de energia hidráulica provém de Itaipu, responsável por cerca 17% do total de energia consumida no Brasil (Itaipu, 2014). Logo, para o inventário da produção de eletricidade proveniente de fontes hidráulicas, utilizou-se um conjunto de dados da literatura, que representa uma hidrelétrica de reservatório conectado à rede. As plantas do reservatório são modeladas com plantas características de regiões tropicais. O tempo de vida assumido é de 150 anos (Karin Treyer, Paul Scherrer, 2007).

As fronteiras da análise compreendem a construção e operação da represa, a energia incorporada nos principais materiais e insumos da construção e operação (cimento, aço, cobre, diesel, lubrificantes, etc.), o transporte de materiais para a usina, os dados representativos da área e volume ocupado pela barragem e área alagada (Flórez-Orrego, 2014).

A respeito das fontes primárias envolvidas na construção e transporte para usina hidrelétrica, ou autores reportaram que 19% da energia provem do carvão, 15% da hidroeletricidade, 4% do gás natural e 62% de derivados do petróleo (Flórez-Orrego, 2014).

Diante dessa premissa, as fronteiras da análise para a construção do inventário da energia elétrica a partir de fontes hidráulicas, compreendem a construção da infraestrutura de uma usina onshore, a energia incorporada nos principais materiais e insumos da construção e operação, o transporte de materiais para a usina. Este inventário foi baseado no estudo de Deutsches Windenergie- Institute, 2001.

#### **4.2.3.1.2 Energia proveniente de fontes nucleares**

Atualmente no Brasil, estão em operação as usinas de Angra 1 e Angra 2, que juntas geram aproximadamente 14.640.181,7 MWh (Eletrobrás Eletronuclear, 2014).

As fronteiras desse sistema compreende o processo de mineração e moagem do urânio, em que se considerou o consumo de óleo diesel e gás natural em iguais proporções e a eletricidade proveniente da rede.

Na etapa do transporte do minério de urânio até a planta de processamento há consumo de óleo diesel nos caminhões de médio porte. A distância desse trajeto foi baseada em valores médios de transporte de substâncias químicas, reportados por diversos autores em cenários europeus. A energia térmica fornecida para os processos de conversão e enriquecimento do urânio é proveniente do gás natural (Beer T, et al al., 2000).

Para a etapa de construção e operação da usina considerou-se a energia incorporada nos principais materiais (cimento, aço, cobre, diesel, lubrificantes, etc.), além do consumo de produtos químicos. Nesse estudo foram inclusos a disposição dos resíduos radioativos e contaminados, assim como o transporte desses resíduos até sua destinação final, o que inclui a utilização de óleo diesel. Os dados desse inventário são provenientes de estudos realizados por Robert Dones e Karin Treyer, 2007.

#### **4.2.3.1.3 Energia proveniente de termelétricas a carvão mineral**

Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional 2014, a geração elétrica proveniente de usinas termelétricas a carvão mineral, teve um crescimento de cerca de 75% em relação ao ano anterior, o que causou um aumento significativo de emissões de GEE.

Os dados fornecidos para a confecção do inventário de ciclo de vida da energia elétrica proveniente de usinas termelétricas a carvão mineral foram baseado nos estudos de Dones et al 2007. As fronteiras da análise compreendem os processos de mineração e processamento



do carvão, em que as emissões são associadas principalmente à utilização de combustíveis fósseis nas operações da mina (maquinário) e o beneficiamento do carvão (Castelo Branco, 2012; Mouron, 2013). Após a etapa de mineração o carvão então é transportado desde a mina até a termelétrica, o que inclui o consumo de diesel. Para a etapa de geração de energia elétrica na termelétrica, considerou-se apenas o consumo de energia, pois de acordo com White et al. (2000), os insumos na etapa de operação representam valores muito pequenos, logo estes podem ser desprezados.

#### **4.2.3.1.4 Usinas térmicas a gás natural e derivados do petróleo**

Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional 2014, a geração elétrica proveniente de usinas termelétricas a carvão mineral, teve um crescimento de cerca de 47% em relação ao ano anterior.

Basicamente, os dados utilizados nos inventários foram coletados de fontes secundárias, provenientes do estudo de Heck, 2007; e Itten et al, 2014. Para este estudo, foram incluídas 4 etapas da cadeia produtiva do gás natural e derivados do petróleo: a extração e separação do petróleo bruto, o transporte, e o refino.

A primeira etapa do processo consiste na extração e separação do petróleo em óleo cru, gás natural e água. O petróleo pode ser tanto extraído em bases offshore como onshore. No caso das bases offshore, o transporte do petróleo e gás natural ocorre em navios, em que se é considerado a utilização do óleo combustível pesado. Os produtos então chegam até a base em terra, e são levados para a refinaria, onde ocorrem grande partes dos processos utilizam gás natural como combustível. Além disso, foi considerada uma energia adicional necessária para a fabricação, construção e manutenção de equipamentos e instalações. Essa energia incorporada em equipamentos de fabricação edifícios é baixa em comparação com os fluxos de energia associados à produção de energia.

#### **4.2.3.2 Uso da eletricidade em BEV e PHEV**

A fase de utilização para os sistemas automotivos tradicionais acarreta o mais notável conjunto de impactos globais durante todo o ciclo de vida, no entanto, para sistemas automotivos elétricos, a contribuição dos impactos ambientais na fase de uso está intimamente ligado na combinação do *mix* de eletricidade que é utilizada para recarregar a bateria.

A Tabela 27 abaixo contém os dados relativos aos consumos do PHEV (Volt) e do BEV (Leaf) utilizados nesse trabalho, que foram obtidos pelos sites das indústrias automobilísticas Nissan Portugal e Chevrolet Estados Unidos.

Tabela 27 – Características dos veículos BEV e PHEV

<b>Características do automóvel</b>	<b>Volt</b>	<b>Leaf</b>
Peso da bateria (kg)	197,0	300
Peso do automóvel	1715,0	1521
Alcance (km)	580 (80ED + 500ER)	160
Consumo eletricidade (kWh/100 km)	17	17
Consumo gasolina (l/100 km)	0(ED) 6.9(GD) 3.9(MD)	0
Km modo eletricidade	35.862,9	260000
km modo gasolina	224.137,9	0
Consumo eletricidade total kWh	6096,7	44200
Consumo gasolina total l	15465,5	0

Legenda:

ED: Apenas elétrico

GD : Apenas gasolina

MD: Unidade Mista

#### **4.2.4 INVENTÁRIO DO AUTOMÓVEL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA**

O inventário do veículo Golf foi utilizado para este estudo. Os dados foram adaptados para modelar suas características específicas, principalmente às relacionadas a carroceria e outras partes que são comuns ao segmento de carros de família. Logo este inventário foi utilizado para todos os veículos em estudo, e as principais características específicas para os PHEV e BEV como a bateria, o consumo específico e o alcance de cada veículo, foram coletados de outras fontes específicas.

Usualmente, o ciclo de vida do berço ao túmulo de um produto é muito complexo. O esforço necessário para apresentar todos os processos envolvidos é imensurável, dessa forma,

muitos estudos optam por resumir os processos específicos em grupos. Assim, para essa dissertação, muitas peças pequenas e feitas de um mesmo material ou com tecnologia semelhante, foram resumidos e colocados no inventário de acordo com o seu peso em quilogramas.

Os dados utilizados para o inventário de ciclo de vida do automóvel foram adaptados do estudo de Schweimer 2001, que teve como referência a planta de produção da Volkswagen, na Alemanha. Ainda que estes dados não sejam atuais, muitos autores ainda os utilizam, como por exemplo, Boureima et al., (2009), Messagie et al., (2014), Faria et al., (2013), entre outros. Isso se deve ao fato da confidencialidade de dados relativos à indústria automobilística, o que impede fontes de dados mais recentes e aprofundadas.

O inventário adotado registra um grande número de diferentes tipos e quantidades de material e de energia necessários para a produção de um veículo. Logo, compreende-se que há diversos subsistemas interligados, sejam por correntes de massa ou de energia. No entanto, devido à confidencialidade estabelecida pelos fornecedores dos dados e também ao grande número de processos envolvidos, o inventário é consolidado, ou seja, várias unidades de processo são relatadas para um subsistema único. Esta forma de apresentação adotada preserva a identidade da empresa, no entanto não descaracteriza o objetivo proposto pelo estudo, uma vez que as principais características do produto são apresentadas de forma condensada.

Os dados compactados nos inventários correspondem a um total de 900 materiais e produtos, além de 500 processos. Componentes individuais que pesam pelo menos 1g foram levados em consideração. Esse estudo considerou apenas os processos diretamente ligados ao automóvel como produto. Isso inclui pré-produção e fabricação do produto final, no entanto não inclui a produção do maquinário. As alocações foram realizadas de acordo com a massa.

As informações de consumo de energia inseridos no inventário representam a média do consumo de energia por veículo, em uma planta específica, localizada em Wolfsburg na Alemanha. Para que os resultados expressem um valor mais próximo da realidade brasileira, tomou-se como referência a utilização do mix de energia elétrica do Brasil.

Duas características distintas dessa planta foram utilizadas nesse trabalho: o sistema de recirculação de água, que visa diminuir o consumo de água doce e o processo de captação de água proveniente das chuvas.

#### **4.2.4.1 Fabricação de Materiais e Componentes**

A etapa relacionada à produção de materiais é posterior à fase de extração de matéria prima e engloba um intenso consumo energético, além de uma série de intervenções ambientais. No entanto, essa fase ainda não está inserida na planta da Volkswagen, e sim em diversas categorias de indústrias, tais como metalúrgicas, siderúrgicas, químicas de plástico e borracha, entre outros.

A liga de alumínio é o único metal leve utilizado na produção dos materiais e essencialmente é expresso com a utilização de alumínio reciclado. Cabos, motores elétricos, interruptores, fusíveis, etc., são combinados em um único grupo de materiais (componentes elétricos), assim como os demais, de acordo com os materiais de cada componente.

As alocações de recursos durante a produção dos componentes e materiais são realizadas individualmente, geralmente em relação à massa. A fim de uma maior compreensão dos processos envolvidos na produção de um automóvel, a Tabela 28 apresenta os principais materiais utilizados na produção das peças:

Tabela 28 – Materiais para a produção de componentes automotivos

<b>Material - Produção de Materiais e componentes</b>	<b>Quant. (kg)</b>	<b>Material - Produção de Materiais e componentes</b>	<b>Quant. (kg)</b>
Alumínio Primário	6,4	PMMA	1,3
Alumínio Secundário	57,6	PC policarbonato	2,2
Chumbo	38	Poliéster	18
Cromo	2,4	Polyol	19
Cobre	10,4	Poliestireno	2,1
Magnésio	0,03	POM	2,3
Níquel	1,4	PP	49,6
Aço laminado a frio	552	PPE	3,7
Aço billed	203	PVC	16
Aço Galvanizado	246	Resina	0,7
Titânio	0,31	Fluido de freio	2,6
Coqueria	3,2	Etileno	56,5
ABS	12,4	Etilenoglicol	6,8
EPDM	30	Etanol a 96%	27,4
MDI	6,9	Float glass	30
Nitril rubber	0,9	Fibras de vidro	2,9
PA 6	7,6	Pintura, geral	5,3
PA 6.6	14,3	Solvente para pintura	6,2
PE HD	22,3	Ácido sulfúrico 96%	1,48
Resina Fenólica	0,8	Calcário (CaCO <sub>3</sub> )	529

#### 4.2.4.2 Etapa industrial: produção e montagem do veículo

O relatório da fabricação não é abrangente, no entanto possui um conteúdo resumido, de maneira que se possa realizar um relatório com resultados válidos.

Nessa etapa ocorre um extenso processo de montagens entre os componentes, dando origem às principais peças do automóvel e através de outras sucessivas montagens, até a produção completa do automóvel.

A Tabela 29, apresenta os principais insumos utilizados na etapa de produção e montagem de uma unidade de automóvel.

Tabela 29 – Insumos utilizados na produção de 1 automóvel

<b>Insumos</b>	<b>Quantidade</b>
Água de reuso /água da chuva (m <sup>3</sup> )	31,3
Água doce (m <sup>3</sup> )	3,2
Ar comp 6 bar (Nm <sup>3</sup> )	812,0
Ar comp 12 bar (Nm <sup>3</sup> )	210,0
Lubrificante de refrigeração (kg)	0,05
Refrigerante (kg)	4,2
Óleo lubrificante (kg)	2,8
Argon (kg)	0,15
Gás carbônico (kg)	0,5
Oxigênio (kg)	5,02
Nitrogênio (kg)	1,03
Butanol (kg)	0,4
Butiglicol (kg)	0,08
Ácido sulfúrico 35% (kg)	0,3
Espuma de poliuretano (kg)	16,0
Folha de Slash	8,7
Aço inoxidável	13,2
Mola de aço	4,8
Materiais elétricos (kg)	32,0
Materiais de borracha (kg)	6,6
Materiais sintéticos (kg)	42,0
Materiais de Metais leves (kg)	11,0
Materiais de Metais comuns (kg)	0,9
Materiais de aço (kg)	221,0

#### 4.2.4.3 Transporte

Com o intuito de se aproximar da realidade nacional, considerou-se a unidade industrial localizada em São Bernardo do Campo - SP, pois nessa região está instalada uma grande montadora de automóveis. A revendedora está situada em São Caetano do Sul, devido à proximidade entre a montadora e a região de uso do veículo. A distribuição do automóvel é realizada integralmente pelo modo rodoviário. Os dados relacionados ao transporte do automóvel da unidade industrial até à revendedora, estão descritos na Tabela 30.

Tabela 30 – Dados para o transporte do veículo ao centro revendedor

<b>Dados para o Transporte do Automóvel</b>	
Consumo do caminhão de 45t de capacidade (km/l)	1,6
Distância da unidade industrial à revendedora (km)	15,0
Consumo de diesel do caminhão cheio para 15 km (l)	9,4
Consumo do caminhão para o transporte de 1 automóvel (l)	0,2

#### 4.2.4.4 Uso Final

Diversos itens são utilizados e substituídos durante o ciclo de vida de um automóvel, como por exemplo óleo do motor, líquidos refrigerantes, fluido de freio e de para-brisas, amortecedores, velas, pneus entre outras peças. No entanto, devido ao baixo impacto dessa etapa no ciclo de vida geral de um automóvel, segundo Mayyas et al., (2012), cerca de 5 % do impacto total, considerou-se apenas o consumo de combustível para o uso do automóvel, devido a grande relevância dessa etapa do ciclo de vida.

#### 4.2.4.5 Fim de vida

Para este trabalho, o fim-de-vida foi modelado com relação ao estado-da-arte das instalações de reciclagem belgas devido à disponibilidade de dados. Adotou-se um consumo de energia geral para todo o processo de reciclagem de 66 kWh / t. A taxa de reciclagem por tipo de material, pode ser observada na Tabela 31:

Tabela 31 – Taxa de reciclagem média

<b>Material</b>	<b>Taxa média de reciclagem (%)</b>	<b>Quantidade reciclada por veículo (kg)</b>
Ferro- Metais	99,8	633,2
Alumínio	93,2	48,2
Cobre	88,5	8,1
Chumbo	91,4	11,9
Polipropileno	54,5	27,0
Polietileno	54,5	12,1
PMMA	32,5	0,4
ABS	54,2	6,7
EPP	2,9	0,1
PP-EPDM	8,0	2,4
Borracha	32,0	14,1

Fonte: Boureima, et al., 2009.

## **4.2.5 INVENTÁRIO DA BATERIA DE ÍON DE LÍTIO PARA BEV E PHEV**

Para o modelo representativo do automóvel de combustão interna, utilizou-se o veículo Golf. A fim de realizar uma comparação com o foco na produção e uso da bateria para veículos elétricos, optou-se por manter o inventário do automóvel, adicionando o ciclo de vida de uma bateria de íon de lítio.

De acordo com referências consultadas e a fim de simplificar os inventários, considerou-se a mesma bateria representante tanto a tecnologia PHEV como BEV. Na prática o estado da arte dessas baterias apresentam propriedades eletroquímicas e materiais um pouco diferentes, no entanto, Singh et al., (1998), Gaines et al., (2000), Schexnayder et al., (2001), e Ying et al., (2006), combinaram os inventários, de modo a conseguir um inventário geral representativo para as duas tecnologias.

As cadeias de produção das baterias foram inventariadas basicamente com os dados baseados em condições médias europeias, devido à maior disponibilidade de dados, exceto para eletricidade utilizada no processo, em que foi adotado o mix de eletricidade no Brasil.

Os transportes utilizados para todo o processo de produção das baterias são realizados com caminhões de médio porte, no entanto, devido a falta de empresas especializadas na



produção desse dispositivo no Brasil, foram utilizados dados referentes a distâncias médias europeias.

O estudo da produção da bateria foi baseado no estudo de Majeau Bettez (2011). Essa análise considera um alto valor energético total para a fabricação da bateria, correspondente a 80MJ/kg, valores mais expressivos que de outros autores, como Notter et al., (2012) e Zacrisson et al., (2010). Basicamente essa diferença é resultado das fronteiras adotadas. Esse estudo inclui as aspetos da produção de alumínio e cobre para a produção dos substratos dos elétrodos, assim como as etapas da extração de salmoura, o que promove um aumento no consumo de energia.

#### 4.2.5.1 Caracterização e montagem da bateria

Para esse estudo, considerou-se os componentes que estão descritos na Tabela 32 a seguir:

Tabela 32 – Componentes para a produção de 1k de bateria de íon de lítio

<b>Montagem da Bateria de Íon de Lítio</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
<b>Materiais Requeridos</b>		
Pasta do eletrodo positivo	kg	2.50E-01
Pasta do eletrodo negativo	kg	8,00E-02
Substrato do eletrodo negativo	kg	3,60E-02
Substrato do eletrodo positivo	kg	8,30E-06
Eletrólito	kg	1,20E-01
Separador	kg	3,30E-02
Recipiente	kg	2,00E-01
Embalagem	kg	1,70E-01
Sistema de gestão da bateria	kg	2,00E-02
Eletricidade	MJ	2,70E01
Óleo combustível	MW	2,90E00
Gás natural	KW	2,20E01

Fonte: Majeau-Bettez, et al., 2011.

O processo de montagem dos elementos descritos acima, possui um alto consumo energético. A processo inicia-se com a montagem da célula da bateria, que inclui a preparação do eletrodo e de seu revestimento, a calandragem dos materiais ( passagem das lâminas sob rolos de alta pressão e temperatura), assim como o corte e a secagem. O seguinte passo é a montagem, que ocorre em um ambiente seco, onde as células são empilhadas, os coletores de correntes são soldados, as células são colocadas em um recipiente e o eletrólito é adicionado e então as células são fechadas (Dunn, et al., 2012).

A Tabela 33 a seguir, apresenta as quantidades necessárias para a montagem de 1kg da bateria de íon de lítio.

Tabela 33 – Montagem da bateria de íon de lítio

<b>Produção da bateria de íon de lítio (1kg)</b>	
Pasta do eletrodo positivo (kg)	2,50E-01
Pasta do eletrodo negativo (kg)	8,00E-02
Separador (kg)	3,30E-02
Substrato, eletrodo positivo (kg)	3,60E-02
Substrato, eletrodo negativo (kg)	8,30E-02
Eletrólito (kg)	1,20E-02
Recipiente celular (kg)	2,00E-01
Módulo da bateria e embalagens (kg)	1,70E-01
Sistema de gestão da bateria (BMS) (kg)	2,00E-02

Fonte: Majeau-Bettez, et al., 2011.

#### **4.2.5.1.1 Pasta do eletrodo positivo para baterias de íons de lítio**

Este elemento é composto basicamente por um material eletroquimicamente ativo, que para este estudo foi utilizado o fosfato de ferro de lítio ( $\text{LiFePO}_4$ ), uma substância aglutinante, que no caso foi o empregado o Politetrafluoretileno (também conhecido como Teflon) e o negro de carbono (para melhorar a condutividade). O material eletroquimicamente ativo corresponde a 88% da massa total dessa pasta, o material aglutinante cerca de 8% e o negro de carbono 5%.

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t. Para as emissões, utilizou-se como base de dados, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram utilizadas.

#### **4.2.5.1.2 Produção de pasta de eletrodo negativo da bateria de íons de lítio**

Para pasta eletrodo negativo foi utilizado o grafite e uma material ligante, que para este estudo foi o politetrafluoretileno. Os dados utilizados foram extraídos do banco de dados do Ecoinvent, 2009.

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t.

Para as emissões, utilizou-se como base, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram utilizadas.

#### **4.2.5.1.3 Produção de eletrólito para a bateria de íon de lítio**

Os eletrólitos líquidos são geralmente compostos por soluções molares de sais de lítio em uma mistura de solventes de dimetil carbonato e carbonato de etileno (Aurbach, et al., 2007). No entanto, para a realização desse inventário, não foram utilizados dados específicos de  $\text{LiPF}_6$  ou dos solventes, porém foram adotados “produtos químicos genéricos”. Ao invés dos produtos específicos, foram utilizados “produtos químicos orgânicos” e “produtos químicos inorgânicos”. A utilização da infraestrutura foi baseada na "fábrica de produtos químicos, orgânicos" de Ecoinvent, 2009.

#### **4.2.5.1.4 Produção dos substratos dos eletrodos positivo e negativo para baterias de íon de lítio**

O substrato é uma camada fina em folha de metal, que serve como suporte físico do eletrodo além de ser um coletor de corrente. Para o eletrodo positivo, geralmente o substrato é uma folha de alumínio, enquanto que para o eletrodo negativo, o cobre geralmente é preferido (Gaines, et al., 2000). Para as matérias-primas, foram utilizados dados de médias globais. Para o eletrodo positivo, considerou-se a produção de alumínio, e para o eletrodo negativo, a produção de cobre. No entanto, não foram encontrados dados disponíveis sobre o processo de fabricação da folha real. Logo, para ambos os inventários, utilizou-se " processo de fabricação da folha de rolamento ".

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t. Para as emissões, utilizou-se como base, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram consideradas.

#### **4.2.5.1.5 Produção de sistema de gerenciamento de bateria**

As células de íon de lítio necessitam de controle adicional externo afim de evitar situações de sobrecarga ou sobre o descarregamento, diferente do perfil de outras baterias, que possuem um mecanismo de estabilização inerente (Gaines, et al., 2000).

Estima-se que esse componente da bateria representa cerca de 4% da massa total da bateria (Schexnayder et al., 2001). Placas, circuitos e fios, constituem cerca de metade dessa

massa. Fios de cobre (ambos interno e externo) foram assumidos para representar metade da massa de BMS, e um recipiente de aço inoxidável para o restante (Schexnayder, et al, 2001).

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t. Para as emissões, utilizou-se como base, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram consideradas.

#### **4.2.5.1.6 Produção dos recipientes das células da bateria**

Usualmente os recipientes de células para baterias de íon de lítio são feitos de alumínio, embora aço inoxidável por outras vezes é utilizado (Gaines et al., 2000). Para a confecção desse inventário, considerou-se a produção de alumínio como matéria prima, de acordo com dados referentes a média global. No entanto, não há dados sobre os processos específicos para a produção do recipiente, logo, este foi substituído por processos relacionados à “produção de folha de rolamento de metal”.

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t. Para as emissões, utilizou-se como base, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram consideradas.

#### **4.2.5.1.7 Produção do separador**

O separador tem a função de evitar que os dois eletrodos se toquem, enquanto os eletrólitos fluam com a menor resistência possível. Os separadores da bateria de íon de lítio geralmente são confeccionados de um material poroso. Para esse estudo, foi assumido como sendo composto de polietileno granulado de baixa densidade e polipropileno granulado, em quantidades iguais. Optou-se por dados referentes a média global.

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t. Para as emissões, utilizou-se como base, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram consideradas.

#### **4.2.5.1.8 Produção das embalagens e módulos da bateria**

Para a produção dos módulos da bateria várias células são combinadas em uma embalagem, que por fim resulta na bateria (Gaines et al., 2000). Para este inventário, foram

combinados as produções de módulos e das embalagens da bateria, com um só produto, o tereftalato de polietileno (PET).

Para a atividade relacionada ao transporte, adotou-se dados provenientes do estudo de Klein et al., 2012. Utilizou-se um caminhão de médio porte, com capacidade acima de 16t.

Para as emissões, utilizou-se como base, os padrões de emissão EURO 2. Informações relacionadas aos bens de capital e infraestrutura não foram consideradas.

#### **4.2.5.2 Uso Final**

A fase de uso do veículo elétrico consiste no mecanismo de carregar e descarregar a bateria. Essa grandeza está ligada diretamente à distância percorrida pelo veículo, pelas perdas nas formas adicionais no sistema de transmissão e distribuição, além do gasto com mecanismos do automóvel, como por exemplo, aquecimento, ventilação e som (Çağatay et al., 2011 e Majeou et al., 2011). Todos os dados relacionados ao consumo de energia de operação do veículo elétrico e outras perdas adicionais foram estimados baseado em veículos existentes e considerações teóricas (Faria, et al., 2013). Outro fator que influencia o consumo de combustíveis de automóveis é combinação dos percursos entre áreas urbanas e estradas. Para esse estudo, foi considerado uma média de 55% de uso em áreas urbanas e 45% em áreas extra urbana (Gao et al., 2012).

#### **4.2.5.3 Fim de vida - Reciclagem**

A recuperação e reciclagem de materiais da bateria têm aumentado significativamente devido principalmente aos custos elevados das matérias primas para a produção, e em alguns países devido ao rigor da legislação (Gao, 2012). No entanto, a reciclagem das baterias de lítio raramente são incluídas nas avaliações energéticas e ambientais, devido ao pouco enfoque que essa etapa possui atualmente, pois esses processos ainda estão em fase de experimento. Não é como o caso da reciclagem das baterias de chumbo ácido, em que esse processo de reciclagem já foi consolidado.

Um aspecto considerável a respeito da reciclagem da bateria é a verificação da energia necessária para recuperar os materiais, pois se esse valor exceder a energia necessária para utilizar materiais virgens, a reciclagem torna-se menos atrativa (Notter, 2012).

Um pré-requisito essencial para a reciclagem das baterias de Li-íon é a análise e desenvolvimento de processos de coleta e logística a montante de reciclagem, pois uma boa

estrutura das redes de reciclagem para toda a cadeia de processo torna o processo mais econômico (LithoRec, 2009).

O transporte utilizado para o trajeto desde o depósito até a planta de reciclagem, foi estimado em uma distância total de 151,5 km. Supõe-se que será utilizado um caminhão de médio porte, que irá operar com 50% de sua capacidade. A Tabela 34 a seguir, apresenta um resumo dos requisitos de transporte estimados para a reciclagem de cada bateria.

Tabela 34 – Fase do transporte da reciclagem

<b>Fase de transporte</b>	<b>Volt</b>	<b>Leaf</b>
Uso final- Centro de coleta- Depósito (km)	1,5	1,5
Depósito - Planta de reciclagem (km)	150,0	150,0
Consumo do caminhão (km/l)	5,6	5,6
Consumo total do caminhão (l)	27,0	27,0
Consumo total para 1 bateria (l)	3,8	5,6

Após o transporte até a planta de reciclagem, as baterias são encaminhadas para área onde ocorre os processos de desmantelamento e reciclagem. Uma empresa francesa, a Recupyl, é especialista na reciclagem de baterias de Li-íon de automóveis e patenteou um dos mais modernos métodos de reciclagem de bateria, que consiste apenas no processo de Hidrometalurgia (Boureima, 2010).

Hidrometalurgia é um ramo da metalurgia extrativa em que os metais são tratados com uma solução aquosa. Esse processo consiste em recuperar os metais em baterias por moagem e imersão dos componentes numa solução aquosa. Os principais passos em neste processo são (Recupyl, 2015):

- Separação mecânica: primeiramente ocorre a separação mecânica dos componentes da bateria, incluindo a separação do cobre, do alumínio e aços inoxidáveis.
- Lixiviação: os metais são imersos em uma solução, que pode ser um ácido ou uma base, dependendo da fase a ser tratada. Os metais em solução já estão na forma iônica.
- Purificação: etapa em que ocorre a remoção dos metais pesados.
- Separação: etapa em que ocorre a separação dos diversos metais.

Processos hidrometalurgicos não só dão alta pureza aos metais, como também são eficientes em termos de energia e sem emissão de dioxinas. A Tabela 35 a seguir apresenta os dados do processo hidrometalurgico para a reciclagem da bateria de íon de lítio (Recupyl, 2015)

Tabela 35 – Inventário da reciclagem da bateria de íon de lítio

<b>Processo hidrametalurgico para as baterias de li-íon</b>	Unidade	Quantidade
<b>Entradas</b>		
<i>Insumos de Matéria Prima</i>		
Resíduos de bateria	kg	1000
Reagentes	kg	25
<i>Consumo de eletricidade</i>		
Eletricidade (mix Brasil)	kWh	140
<i>Consumo de água</i>		
Água industrial	m <sup>3</sup>	0,72
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (92%)	l	126
Cal	kg	116
<b>Saídas</b>		
<b>Saídas do produto</b>		
Sal de Cobalto (as CoCO <sub>3</sub> ) para	kg	340
Produzir de Co	kg	(Co=180)
Sal de Li (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) para	kg	198
Produzir Li	kg	(Li=30)
Ferro e aço para indústria de aço	kg	165
Produtos não ferrosos	kg	150
<b>Fluxo</b>		
<b>Emissões para o ar</b>		
SO <sub>2</sub>	g	4,5
VOC	g	2,5
<b>Emissões para a água (esgoto)</b>		
Sólido em suspensão	g	12
DBO	g	30
HC	g	0,01
Cu+Co+Ni	g	0,05
Fluoride	g	0,03
Água de esgoto	kg	337
<b>Resíduos sólidos</b>		
Papel e plástico	kg	130
Resíduo para o aterro	kg	202
Gesso para o aterro	kg	339

## Capítulo 5

### **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA**

Neste trabalho será utilizado o software SimaPro, elaborado pela Pré-Consultants. Esse programa é utilizado com o intuito de analisar, identificar e comparar os impactos ambientais de diferentes produtos. O SimaPro possui duas bases de dados distintas: uma base para o inventário, e uma base para a avaliação. Ambas as bases de dados contêm informações que podem ser expandidas e modificadas pelo usuário. Informações podem ser adicionadas, de modo a ter acesso a mais elementos ou a alguma informação mais específica. O software está ordenado em projetos, os quais podem incluir diversos ciclos de vida de um ou vários produtos e cujos processos podem ser extraídos de qualquer das bases de dados disponíveis no programa, que se encontram organizadas em seis categorias: materiais, energia, transportes, processos, utilizações e estratégias de condicionamento e de processamento de resíduos (Rocha, 2009).

#### **5.1 SELEÇÃO E DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS E DAS CATEGORIAS DO IMPACTO**

Este trabalho usará o método CML 2 baseline 2000 v.2.03 (Chain Management by Life Cycle Assessment) que se encontra na base de dados do software SimaPro 7.1.8. Este método foi desenvolvido na Universidade de Leiden (Holanda) pelo Centre for Environmental Science of Leiden University, tendo por princípio a utilização de indicadores referenciais. Decidiu-se usar o CML 2 baseline 2000, pois esse método elabora a abordagem orientada



para o problema (ponto médio), além de possuírem categorias de impactos que refletem os principais impactos causados emissões veiculares.

As categorias de impacto escolhidas para esse estudo foram: Potencial de Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio, Toxicidade Humana, Acidificação, Eutrofização, Depleção dos Recursos Abióticos, Depleção dos Recursos Abióticos de Combustíveis Fósseis. Estas categorias foram selecionadas de maneira a atingir o objetivo e o escopo deste estudo.

## 5.2 RESULTADOS

Nesta etapa do trabalho foram determinados os impactos ambientais de diferentes tecnologias de veículos. Utilizou-se o Eco Indicador CML-IA baseline, e como ferramenta computacional o software SimaPro 8.0.3. Os resultados são relativos às seguintes fases: “Well-to-Tank” (a produção e distribuição do combustível e /ou eletricidade), “Tank-To-Wheel” (as emissões na fase de uso), o ciclo de vida do veículo, e o ciclo de vida das baterias de íon de lítio (para o PHEV e BEV).

### 5.2.1 Potencial de aquecimento global

A comparação entre diferentes tecnologias de automóveis evidencia que o potencial de aquecimento global é altamente influenciado pela tecnologia do veículo e pelo tipo de combustível utilizado.

Conforme se observa na Figura 30 o ICEVg possui o maior impacto para o GWP, com a emissão de 2,29E-01 kg de CO<sub>2</sub> eq./km. Isso ocorre devido à grande quantidade de CO<sub>2</sub> lançados na atmosfera a partir da combustão da gasolina. Esse índice é menor que as médias mundiais, devido principalmente à adição de etanol anidro à composição da gasolina A. A produção do automóvel para o ICEVg é responsável por cerca de 25% da emissão total de CO<sub>2</sub> eq, que tem como maior contribuinte as etapas de processamentos dos materiais e manufatura. No entanto esse valor é relativamente baixo devido à utilização de energia elétrica de baixa emissão de CO<sub>2</sub> utilizada nesses processos. A produção do combustível é responsável por 14% das emissões de CO<sub>2</sub> eq, esse resultado é menor que as médias mundiais, devido principalmente à adição de etanol ao combustível, pois durante a etapa agrícola da

cana de açúcar, ocorre a captura de CO<sub>2</sub>. As emissões de escapamento são responsáveis por aproximadamente 60% do total das de CO<sub>2</sub> eq, e reciclagem do automóvel por -4,0%.

O PHEV possui o segundo maior resultado para o GWP, com o valor de 1,84E-01 kg de CO<sub>2</sub> eq./km. Este resultado é variável conforme a matriz elétrica considerada e pelas quantidades específicas de gasolina e eletricidade adotadas, que neste caso a utilização do veículo em modo elétrico corresponde apenas a 7,5% da quilometragem total percorrida. A produção do automóvel é responsável por aproximadamente 32% das emissões de CO<sub>2</sub> eq., enquanto que para a produção dos combustíveis, cerca de 17% . Já para as emissões de escape, o resultado foi de 36%, considerado baixo, devido à característica de emissão de escape zero, quando o veículo utiliza o modo elétrico. A produção da bateria de íons de lítio assume uma participação aproximada de 14% das emissões de CO<sub>2</sub> eq. Esse resultado é inferior ao da produção da bateria de íon de lítio para BEV, devido ao menor peso da bateria. A reciclagem do automóvel é responsável -4,5% das emissões de CO<sub>2</sub> eq., enquanto que da bateria aproximadamente -3,0%.

O ICEVf ocupa o terceiro maior resultado para o GWP, com o valor de 1,23E-01 kg de CO<sub>2</sub> eq./km. Este resultado foi satisfatório, devido aos beneficiamentos da utilização do etanol adicionada à gasolina. A produção do automóvel é a maior contribuinte da emissão total de CO<sub>2</sub> eq. para esta categoria, com aproximadamente 48%. A produção dos combustíveis e emissões de escape, com respectivamente cerca de 11% e 40% das emissões de CO<sub>2</sub> eq, estes resultados são menores que do ICEVg, devido ao beneficiamento da utilização do etanol hidratado como parte do combustível utilizado. A reciclagem do automóvel contribui com aproximadamente -5% das emissões de CO<sub>2</sub> eq.

Com o resultado de 1,18E-01 kg de CO<sub>2</sub> eq./km, o quarto maior resultado foi para o BEV, que possui como característica emissões de escape zero. Um fator determinante para este resultado foi à utilização de dados referentes à matriz elétrica brasileira, que possui uma base energética renovável, conseqüentemente uma menor emissão de gases do efeito estufa na etapa de produção da energia. A etapa de produção da bateria de íon de lítio, corresponde a 35% das emissões de CO<sub>2</sub> eq. A produção do automóvel é responsável por cerca de 50% da emissão total de CO<sub>2</sub> eq., enquanto que a produção do combustível por aproximadamente 15%. A reciclagem do automóvel é responsável por cerca de -5,5% e a reciclagem da bateria por -3,5%.

E o veículo que possui o menor potencial de aquecimento global é o ICEVe, com 6,62E-02 kg de CO<sub>2</sub> eq./km. Isso é devido principalmente aos benefícios da captação do CO<sub>2</sub> durante a produção da cana-de-açúcar. Além disso, a eletricidade usada para a produção do

etanol é proveniente do bagaço da cana-de-açúcar. Outros fatores determinantes para esse resultado foram o aumento da produtividade da cana de açúcar nos últimos anos, assim como a drástica diminuição da pré-queima na colheita da cana-de-açúcar, diminuindo ainda mais a emissão de CO<sub>2</sub>. A produção do automóvel é a maior contribuinte da emissão total de CO<sub>2</sub> eq para esta categoria de veículo. A produção do combustível é responsável por aproximadamente 9% das emissões. Na etapa agrícola o CO<sub>2</sub> eq contabilizado é proveniente das etapas de transporte da cana-de-açúcar e tratos culturais. A reciclagem do automóvel é responsável por aproximadamente por -6% das emissões de CO<sub>2</sub> eq.

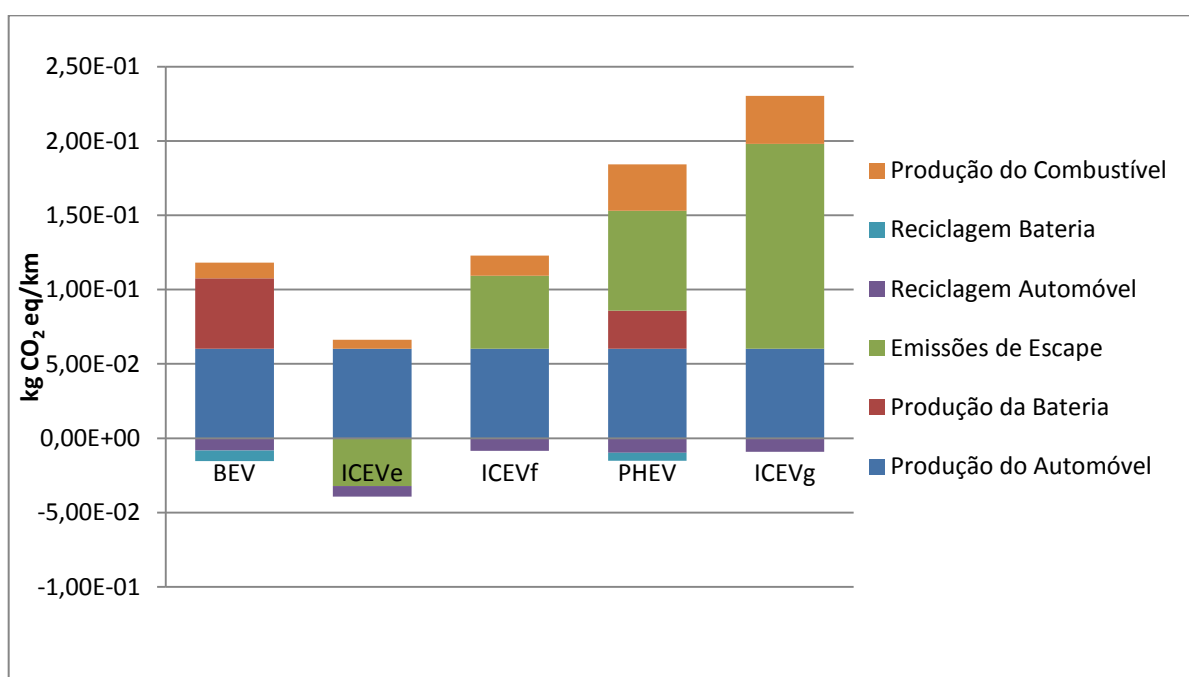


Figura 30 – Potencial de aquecimento global

## 5.2.2 Potencial de acidificação

De acordo com a Figura 31, os resultados do potencial de acidificação foram mais expressivos para ICEVe, com o valor de  $9,42E-04$  kg SO<sub>2</sub> eq./km. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 13% das emissões de SO<sub>2</sub> eq. A produção do combustível é a etapa com participação mais significativa para esta categoria de impacto, responsável por aproximadamente 77% das emissões. Esse resultado é devido à utilização de fertilizantes e produtos químicos fosfatados na etapa agrícola da produção de etanol, que geram SO<sub>2</sub> como resíduos. As emissões de escape são responsáveis por 10%. A reciclagem do automóvel é responsável por aproximadamente -4% das emissões de SO<sub>2</sub> eq.

O segundo maior potencial de acidificação é atribuído ao ICEVf, com o valor de  $7,03E-04$  kg SO<sub>2</sub>eq./km. O resultado pra este tipo de automóvel é alterado sensivelmente pelas quantidades específicas de etanol utilizado como combustível, que para esse estudo adotou-se a utilização de 25% de etanol hidratado, além do etanol anidro utilizado como mistura compulsória na gasolina A. A produção do automóvel é a responsável por cerca de 16% das emissões SO<sub>2</sub> eq. A produção do combustível também é a etapa com participação mais significativa para esta categoria de impacto, que contribui com aproximadamente 75% das emissões. As emissões de escape são responsáveis por 9%, e a reciclagem do automóvel por -5% das emissões de CO<sub>2</sub> eq.

O ICEVg possui o terceiro maior potencial de acidificação, com  $5,86E-04$  kg SO<sub>2</sub> eq./ km. Esse resultado é consideravelmente menor que os dos ICEVe, ICEVf, devido à menor quantidade de etanol utilizado nesse sistema, que no caso é a apenas a mistura compulsória de etanol anidro à gasolina. A produção do automóvel é a responsável por cerca de 20% das emissões SO<sub>2</sub> eq. A produção do combustível é a etapa com participação mais significativa para esta categoria de impacto, que contribui com aproximadamente 72% das emissões. As emissões de escape são responsáveis por 8%, e a reciclagem do automóvel por -4% das emissões de SO<sub>2</sub> eq.

O quarto maior potencial é para o PHEV com o resultado de  $5,19E-04$  kg SO<sub>2</sub> eq./km. A utilização de energia elétrica proveniente de fontes renováveis beneficia o resultado dessa categoria de impacto. A produção da bateria de íon de lítio não tem uma participação significativa para esta categoria de impacto, com apenas 4% do total de SO<sub>2</sub> eq total. A produção do automóvel é a responsável por cerca de 24% das emissões SO<sub>2</sub> eq. A produção do combustível também é a etapa com participação mais significativa para esta categoria de impacto, que contribui com aproximadamente 66% das emissões. As emissões de escape são

responsáveis por 6%, e a reciclagem do automóvel -4% e da bateria por -1% das emissões de CO<sub>2</sub> eq.

O melhor resultado foi para BEV, com o valor de 3,03E-04 kg SO<sub>2</sub> eq./km. A produção da bateria de íon de lítio possui uma participação mais significativa que a para o PHEV, devido à massa dessa bateria, com 10% da contribuição total de SO<sub>2</sub> eq. As atividades relacionadas à mineração e metalurgia, necessárias para a produção do níquel nos eletrodos e dos coletores de corrente das baterias de íon de lítio são as etapas que mais contribuem para essa etapa. A produção do automóvel é a responsável por cerca de 39% das emissões SO<sub>2</sub> eq. A produção do combustível contribui com aproximadamente 49% das emissões. As emissões de escape por 6%, e a reciclagem do automóvel é responsável por -8% e da bateria por -2% das emissões de SO<sub>2</sub> eq.

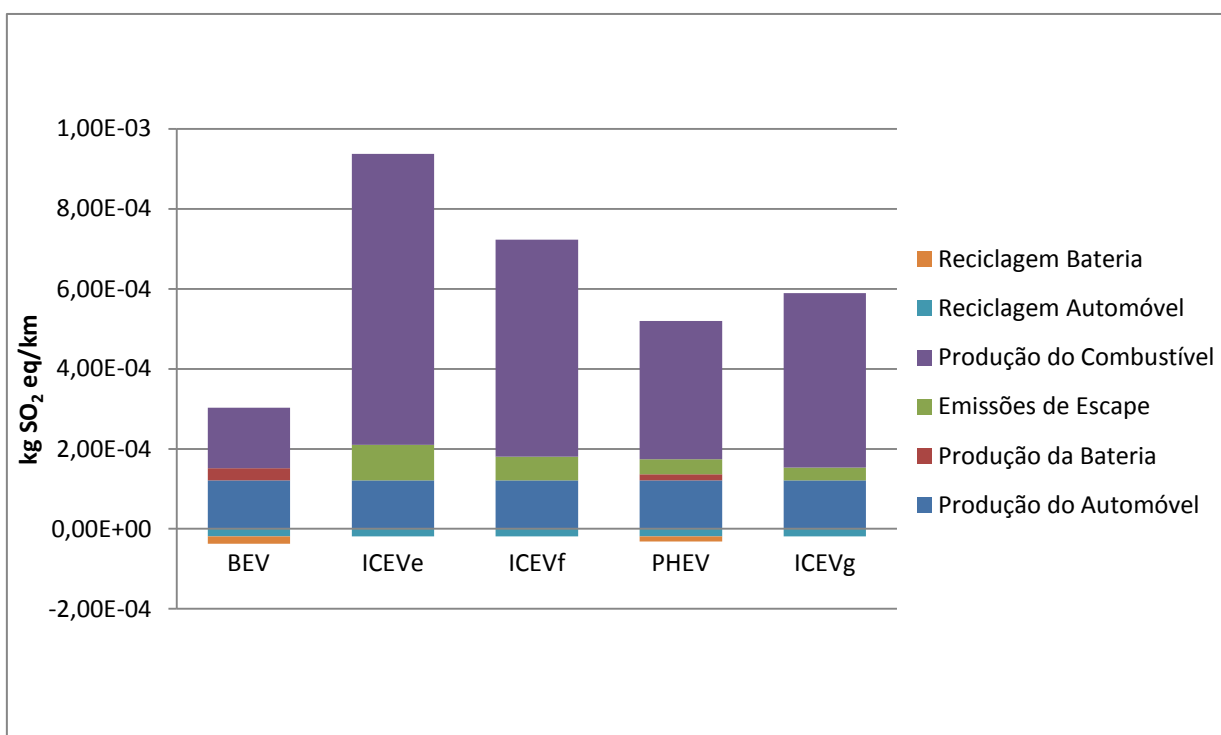


Figura 31– Potencial de acidificação

### 5.2.3 Potencial da depleção da camada de ozônio

Conforme a Figura 32, o potencial de depleção da camada de ozônio é maior para o ICEVg, com o valor de  $4,24E-08$  kg CFC- 11eq./km. A produção do automóvel é responsável por cerca de 20% da emissão total de CFC-11eq. A produção do combustível é o maior contribuinte para esta categoria, com aproximadamente 80% das emissões, e esse resultado é justificável, devido às emissões de  $CH_4$  (combinado com alguma substância halogenada) na produção de gasolina, e a reciclagem do automóvel é responsável por -2,5% das emissões de CFC-11eq.

O segundo maior potencial é para PHEV, que além do encargo proveniente da gasolina, ainda possui uma parcela referente à produção da bateria de íons de lítio. A produção do automóvel é responsável por aproximadamente 25% das emissões de CFC-11eq., enquanto que a produção dos combustíveis assume a participação de 65% das emissões. A produção da bateria de íons de lítio contribui com cerca de 10% das emissões de CFC-11eq, e a maior parte dessas emissões, é proveniente do uso do politetrafluoretileno como dispersante / ligante na pasta de eletrodo, que emite etano halogenado em suas reações. A reciclagem do automóvel corresponde a -2,5% das emissões, enquanto que a reciclagem da bateria por -2,0%.

O terceiro maior resultado é para o ICEVf, com o valor de  $1,86E-08$  kg CFC- 11eq./km. A produção do automóvel contribui 46% da emissão total de CFC-11eq. A produção do combustível é a maior contribuinte para esta categoria, com aproximadamente 54% das emissões. A reciclagem do automóvel é responsável por aproximadamente -3% das emissões de CFC-11eq.

O quarto maior resultado é para BEV, com  $1,60E-08$  kg CFC-11eq./km. A maior contribuição para esta categoria de automóvel foi para a etapa da produção do automóvel, com aproximadamente 55% das emissões, seguido pela produção da bateria, que é responsável por 40%. A produção da eletricidade é a menor contribuinte para esta categoria de automóvel, com apenas 5% das emissões de CFC-11eq. A reciclagem do automóvel é responsável por cerca de -3,5% e a reciclagem da bateria por aproximadamente -3 %.

Por fim, o menor valor é referente ao ICEVe, e isso ocorre devido ao fato de não existir emissões diretas na produção/uso do ICEVe, e sim de forma indireta, como na produção de óleo diesel que é utilizado como combustíveis nos caminhões e tratores. A produção do automóvel é a maior contribuinte, com 85% da emissão total de CFC-11eq. A produção do

etanol é responsável por 15% das emissões. A reciclagem do automóvel corresponde a aproximadamente -6% das emissões de CFC-11eq.

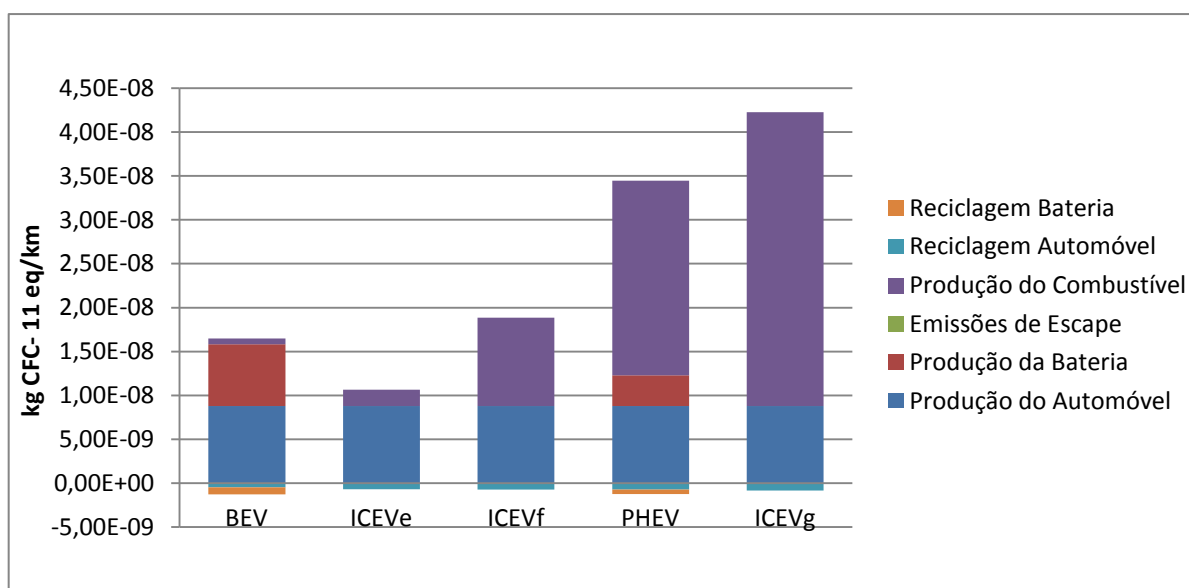


Figura 32 – Depleção da camada de ozônio

## 5.2.4 Potencial de eutrofização

Como observado na

Figura 33, o ICEVe apresenta o maior potencial de eutrofização, com  $1,05E-04 \text{ kg PO}_4^{-3} \text{ eq./km}$ . A produção do automóvel corresponde a 15% das emissões totais de  $\text{PO}_4^{-3} \text{ eq.}$  Este resultado tem uma considerável influência da emissão de resíduos industriais na produção do automóvel, principalmente na etapa de pintura. A etapa de maior emissão de  $\text{PO}_4^{-3} \text{ eq.}$ , é a produção do etanol, responsável por 75%. Isso se deve principalmente a etapa agrícola, em que são utilizadas substâncias que contribuem a esse impacto, como por exemplo, a disposição da vinhaça e utilização de adubação nitrogenada, adubação fosfatada. As emissões de escape são responsáveis por cerca de 10%. A reciclagem do automóvel corresponde a aproximadamente -2,5% das emissões de  $\text{PO}_4^{-3} \text{ eq.}$

O ICEVf possui o segundo maior resultado para esta categoria de impacto, com  $7,53E-05 \text{ kg PO}_4^{-3} \text{ eq./km}$ . A produção dos combustíveis assume a participação de 70% das emissões totais de  $\text{PO}_4^{-3} \text{ eq.}$  A produção do automóvel corresponde a 20% das emissões de  $\text{PO}_4^{-3} \text{ eq.}$ , enquanto que as emissões de escape são responsáveis por cerca de 10%. A reciclagem do automóvel corresponde a aproximadamente -2,5% das emissões de  $\text{PO}_4^{-3} \text{ eq.}$

O terceiro maior resultado é para ICEVg com  $6,35E-05$  kg  $PO_4^{-3}$ eq./km. A produção do automóvel contribui com 34% da emissão total de  $PO_4^{-3}$ eq. A produção do combustível é responsável por aproximadamente 57% das emissões, enquanto que as emissões de escape são responsáveis por cerca de 8%. A reciclagem do automóvel corresponde a -3%.

O PHEV apresenta o quarto maior resultado, com  $5,85E-05$  kg  $PO_4^{-3}$ eq./km. A produção do automóvel é responsável por aproximadamente 35% das emissões de  $PO_4^{-3}$ eq, enquanto que a produção dos combustíveis assume a participação de 49%, e as emissões de escape são responsáveis por aproximadamente 6%. A produção da bateria de íons de lítio contribui com cerca de 10% das emissões, e a produção do catodo da bateria de íon de lítio é bastante significativa devido as emissão de resíduos que causam a eutrofização. A reciclagem do automóvel corresponde a -3,5% das emissões, enquanto que a reciclagem da bateria -2,0%.

E finalmente, a categoria de automóvel que assume o menor potencial de eutrofização é o BEV, com o valor de  $2,97E-05$  kg  $PO_4^{-3}$  eq/km. A maior contribuição para esta categoria de automóvel foi na etapa da produção do automóvel, com aproximadamente 60% das emissões, seguido pela produção da bateria, que é responsável por 33%. A produção da eletricidade é a menor contribuinte para esta categoria de automóvel, com apenas 7% das emissões de  $PO_4^{-3}$ eq. A reciclagem do automóvel é responsável por cerca de -4% e a reciclagem da bateria por aproximadamente -3,5%.

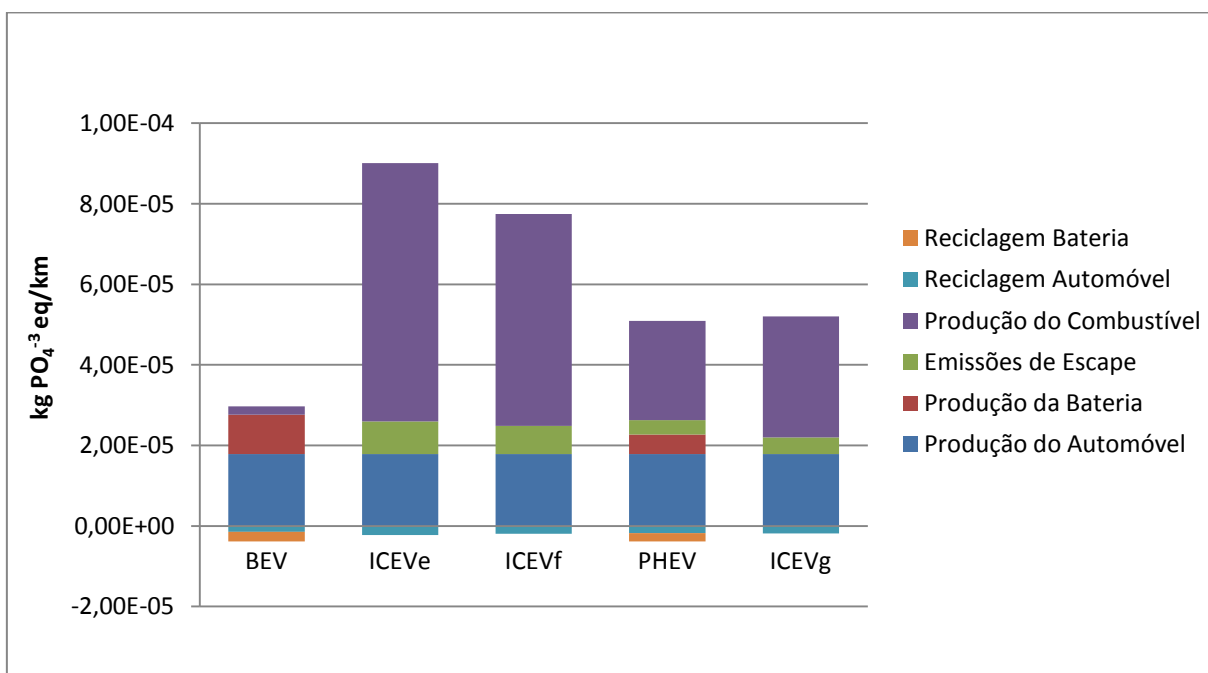


Figura 33 – Potencial de eutrofização



### 5.2.5 Potencial de toxicidade humana

De acordo com a Figura 34, o maior potencial de toxicidade humana é para BEV, com  $7,04E-02$  kg 1,4-DB eq/km. A produção da bateria de íon de lítio possui a participação mais significativa para esta categoria de impacto, com 57% da contribuição total de 1,4-DB eq. Esse resultado deve-se principalmente aos elevados encargos das substâncias tóxicas que são liberadas por atividades de mineração de metais (como por exemplo, de níquel, cobre, platina e alumínio), que aparecem como os maiores contribuintes da produção da bateria. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 37% das emissões. A produção da eletricidade é a menor contribuinte para esta categoria de automóvel, com apenas 6% das emissões. A reciclagem do automóvel é responsável por -5% e da bateria por -6% das emissões de 1,4-DB eq.

O PHEV possui o segundo maior resultado para a toxicidade humana com  $6,38E-02$  kg 1,4-DB eq/km. A produção da bateria de íon de lítio é responsável por 30% da contribuição total de 1,4-DB eq. Esse valor é menor que a produção da bateria do BEV, devido à sua menor massa. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 40% das emissões. A produção dos combustíveis corresponde a 29% dos impactos para a toxicidade humana. As emissões de escape são responsáveis por valores mínimos para o potencial de toxicidade humana. A reciclagem do automóvel é responsável por -6,5% e da bateria por -4% das emissões de 1,4-DB eq.

O terceiro maior potencial de toxicidade humana é para ICEVg com o valor de  $4,30E-02$  kg 1,4-DB eq/km. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 60% das emissões. A produção dos combustíveis corresponde a 38% dos impactos para a toxicidade humana. Esse resultado é decorrente principalmente de substâncias tóxicas utilizadas/emitidas no refino do petróleo. As emissões de escape correspondem a uma participação reduzida para a toxicidade humana. A reciclagem do automóvel é responsável por -8%.

O ICEVf possui o quarto maior resultado para a toxicidade humana, com  $3,99E-02$  1,4-DB eq/km. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 65% das emissões. A produção dos combustíveis corresponde a 35% dos impactos para a toxicidade humana. As emissões de escape correspondem a um impacto irrelevante para esta categoria de impacto. A reciclagem do automóvel é responsável por -9%.

E por fim, o ICEVe é o veículo com menor potencial de toxicidade humana, com  $3,65E-02$  1,4-DB eq/km. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente

70% das emissões. A produção do etanol corresponde a 29% dos impactos para a toxicidade humana. Esse resultado é atribuído principalmente aos herbicidas, pesticidas e fertilizantes utilizados em atividades agrícolas para a produção de etanol. As emissões de escape correspondem a uma parcela mínima para essa categoria de impacto, enquanto que a reciclagem do automóvel corresponde a -10% do potencial de toxicidade humana.

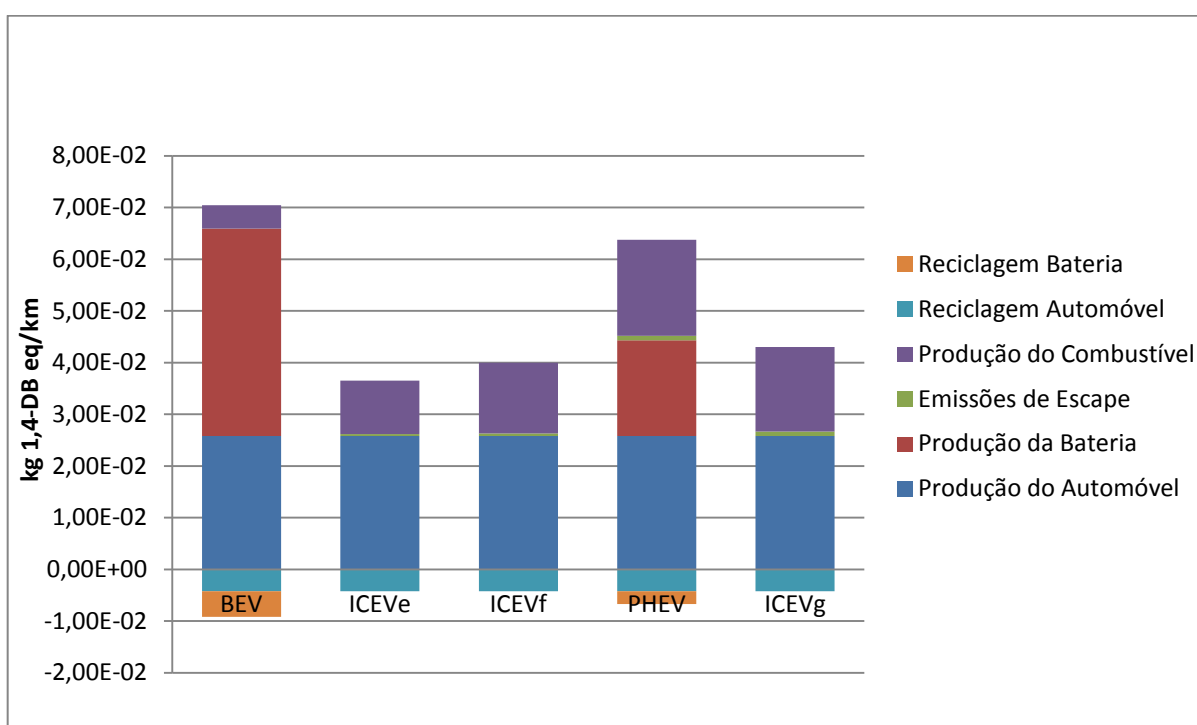


Figura 34 – Potencial de toxicidade humana

## 5.2.6 Potencial de oxidação fotoquímica

De acordo com a Figura 35, os valores mais elevados de oxidação fotoquímica são para veículos que utilizam do etanol como combustível. Para o ICEVe o valor é de  $9,97E-04$  kg  $C_2H_4eq/km$ . A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 27% das emissões. A etapa mais significativa para esse categoria de impacto, é a produção do etanol, que corresponde a 56% dos impactos, causados principalmente pelas emissões de, CO, SOx, NOx e acetaldeído na armazenagem do álcool, fermentação, tratamento do bagaço e na de cogeração de energia elétrica, que estão relacionados à emissão de grande parte das substâncias que contribuem para a formação de compostos oxidantes. As emissões de escape

correspondem a 23% impacto, enquanto que a reciclagem do automóvel corresponde a -2,5% do potencial de oxidação fotoquímica.

O ICEVf ocupa o segundo maior resultado de  $7,68E-04$  kg  $C_2H_4$  eq/km. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 34 % das emissões. A etapa responsável pelo maior potencial de oxidação fotoquímica é produção dos combustíveis, que correspondem a 44 % das emissões de  $C_2H_4$  eq. Esse impacto é consequência das emissões na produção do etanol, já citadas anteriormente, assim como das emissões da produção do gás natural e da exploração do petróleo, que contribuem para a formação dos compostos oxidantes. As emissões de escape correspondem a 22% das emissões de  $C_2H_4$  eq, enquanto que a reciclagem do automóvel corresponde a -3% do potencial .

O terceiro maior resultado é para ICEVg, com o valor é de  $6,91E-04$  kg  $C_2H_4$  eq/km. A produção do automóvel é a responsável por aproximadamente 38 % das emissões. A produção do combustível corresponde a aproximadamente 42% dos impactos. As emissões de escape correspondem a 20%, enquanto que a reciclagem do automóvel corresponde a -3,5%.

O PHEV apresenta o quarto maior resultado para o potencial de oxidação fotoquímica, com  $6,83E-04$  kg  $C_2H_4$  eq/km. A produção do automóvel contribui com 39% das emissões e a produção da bateria com cerca de 13%. A produção dos combustíveis corresponde a 33%, e as emissões de escape a 15% das emissões de  $C_2H_4$  eq. A reciclagem do automóvel corresponde a -4% do potencial e a reciclagem da bateria a -3% das emissões.

Por fim, o melhor resultado para esta categoria de impacto foi apresentado pelo BEV, com o valor de  $4,85E-04$  kg  $C_2H_4$  eq/km. A produção de eletricidade contribuiu com apenas 10% das emissões para o potencial de oxidação fotoquímica. A produção da bateria de íon de lítio é responsável por 35% das emissões, e são causados por atividades relacionadas à mineração e para a fabricação de produtos eletrônicos. A produção do automóvel contribui com 55% das emissões de  $C_2H_4$  eq. A reciclagem do automóvel corresponde a -4,5% do potencial e a reciclagem da bateria a -3,5% das emissões.

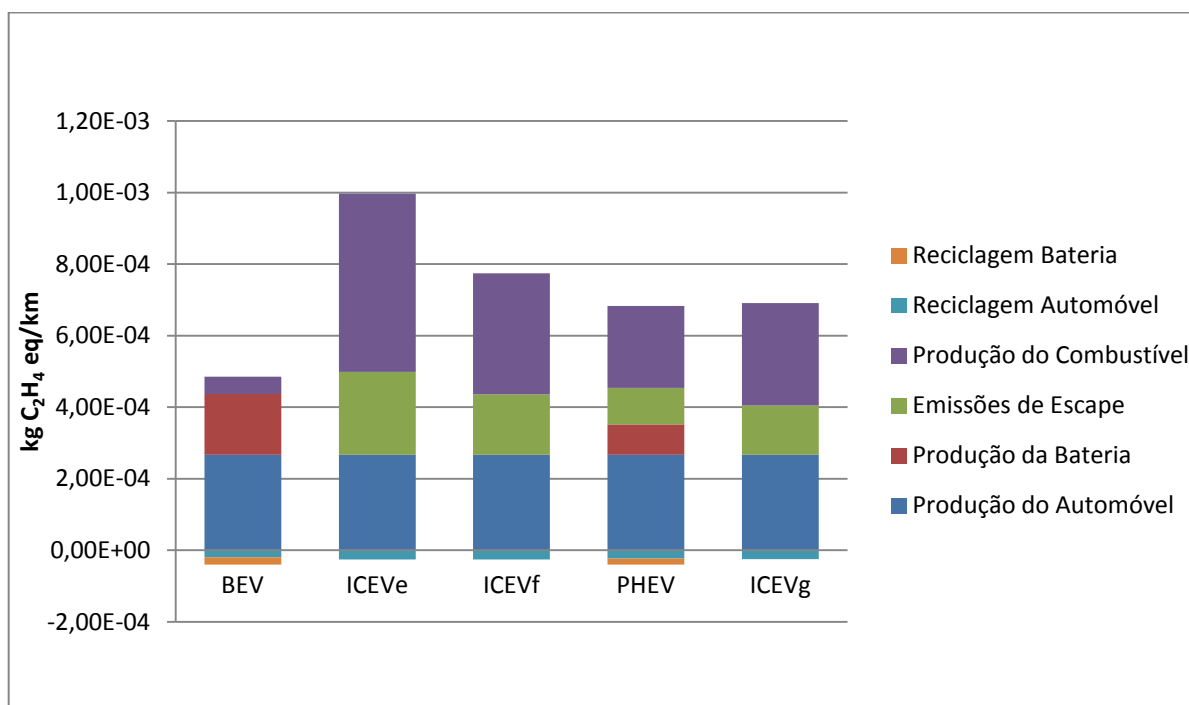


Figura 35 – Potencial de oxidação fotoquímica

### 5.2.7 Potencial de depleção abiótica

De acordo com a Figura 36, os veículos em estudo possuem resultados semelhantes, uma vez que a etapa que assume maior contribuição para essa categoria de impacto é a produção do automóvel, em que a utilização de recursos minerais é muito expressiva.

O BEV apresenta o maior resultado para o potencial de depleção abiótica, com 1,67E-02 kg Sb-eq. A produção do automóvel contribui com 55%. A produção da bateria corresponde a 40%, e a etapa com maior contribuição é a extração dos materiais específicos utilizados para sua produção. A etapa de produção da eletricidade corresponde a 5%, sendo a produção de fios de cobre e cabos elétricos utilizados na distribuição da eletricidade os maiores contribuintes para esta etapa. A reciclagem do automóvel corresponde a -10% do potencial e a reciclagem da bateria a aproximadamente.

O segundo maior resultado é para o PHEV um pouco abaixo do que o BEV, com 1,65E-02 kg Sb-eq. Isso ocorre devido ao menor peso da bateria do PHEV. A produção do automóvel contribui com 55%. Produção do combustível com 15%. A produção da bateria corresponde a 30%. A reciclagem do automóvel corresponde a aproximadamente -10% do potencial e a reciclagem.

O ICEVe, possui o terceiro maior impacto para o potencial de depleção abiótica com  $1,52E-02$  kg Sb-eq. A produção do automóvel contribui com 55%. Produção do combustível com 45%, sendo utilização de fertilizantes minerais, a base de P, por exemplo, durante a produção da cana-de-açúcar a etapa mais expressiva. A reciclagem do automóvel corresponde a -10% do potencial.

O ICEVf ocupa o quarto maior resultado, com o valor de  $1,51E-02$  Sb-eq. A produção do automóvel contribui com 55%. Produção do combustível com 45%. A reciclagem do automóvel corresponde a -10% do potencial e a reciclagem da bateria -8%.

E finalmente, o veículo com menor potencial de depleção abiótica é o ICEVg, com  $1,49E-02$  Sb-eq. A produção do automóvel contribui com 55%. Produção do combustível com 45%. A reciclagem do automóvel corresponde a -10% do potencial e a reciclagem da bateria a -5%.

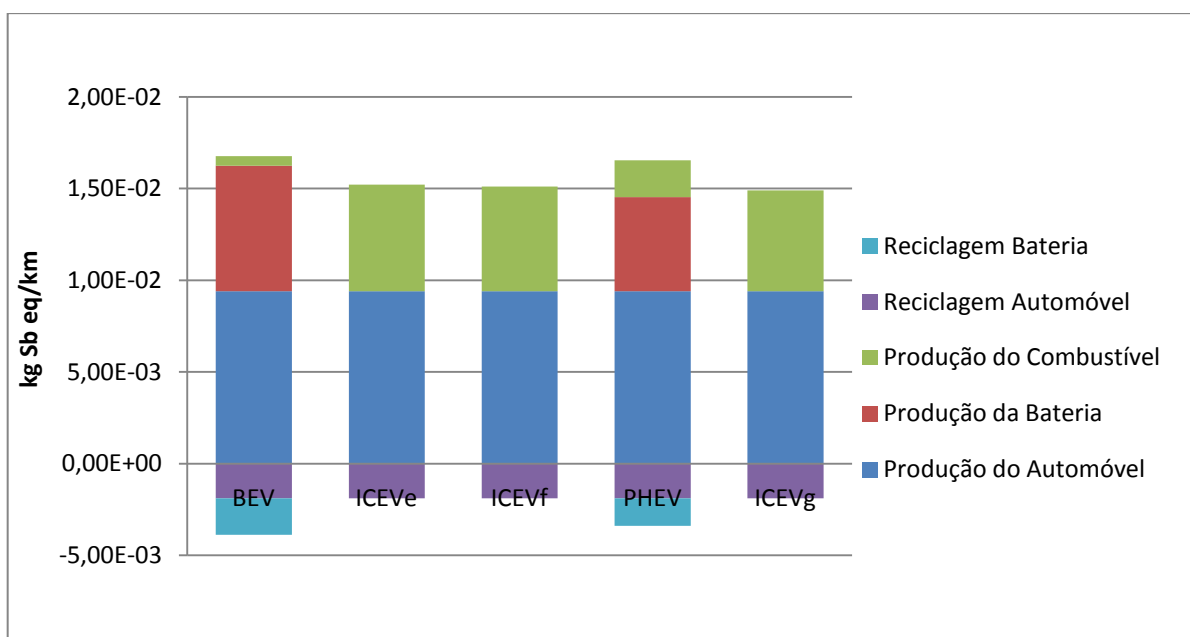


Figura 36 – Potencial de depleção abiótica

## 5.2.8 Potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis

De acordo com a análise apresentada, os resultados mais expressivos foram para automóveis que utilizam predominantemente combustíveis fósseis como fonte de energia, como observado na Figura 37. O ICEVg apresentou o maior impacto para o potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis, com 3,12E0 MJ. A produção do automóvel contribui com 15%. Produção do combustível com 85%. A reciclagem do automóvel corresponde a -4% do potencial.

O ICEVf é responsável pelo segundo maior impacto, com 2,40E0 MJ. A produção do automóvel contribui com 17%. Produção do combustível com 83%. A reciclagem do automóvel corresponde a -4,5% do potencial.

O PHEV apresenta o terceiro resultado mais expressivo para essa categoria de impacto, com 2,50E0 MJ. A produção do automóvel contribui com 17%. Produção do combustível com 78%. A produção da bateria corresponde a 5%. A reciclagem do automóvel corresponde a -5 % do potencial e a reciclagem da bateria 0,5%

O quarto maior potencial, é o ICEVe, com 8,70E-01 MJ. A produção do automóvel contribui com 54%. Produção do etanol com 46%, sendo o consumo de diesel para o transporte da cana-de-açúcar, tratos culturais na etapa agrícola e a distribuição do etanol as etapas mais significativas. A reciclagem do automóvel corresponde a -5,5% do potencial.

Finalmente, o menor resultado, foi para o BEV com 1,18E-1 MJ. A produção do automóvel contribui com 50% dos impactos, a produção da bateria corresponde 37%, a etapa de produção da eletricidade a 13%, a reciclagem do automóvel a -6 % e a reciclagem da bateria corresponde a 1% do impacto. O resultado apresentado para o BEV deste estudo é inferior ao apresentado por outros autores, diante do fato da matriz elétrica brasileira conter uma pequena contribuição de energia proveniente de fontes fósseis.

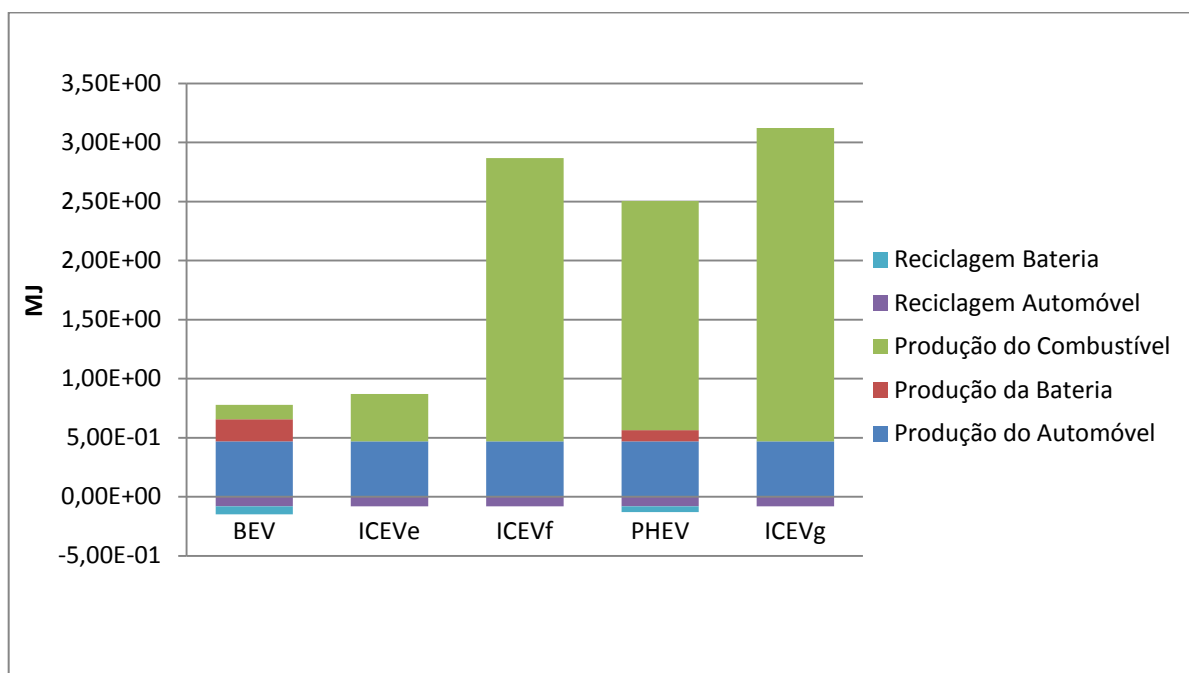


Figura 37 – Potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis

## 5.2.9 Comparação geral entre os veículos

Os resultados da ACV são apresentados na Figura 38 como o total de cargas ambientais ao longo de toda a vida útil dos veículos. São apresentadas as 7 categorias de impactos desse estudo.

Os ICEVe, ICEVf, ICEVg PHEV possuem linhas de tendência similares para o polo em categorias que são mais sensíveis ao uso do etanol (eutrofização, acidificação e oxidação fotoquímica), já que estes utilizam o etanol como parte do combustível, porém o ICEVe apresenta os maiores impactos, devido ao uso exclusivo de etanol, e o PHEV o menor, devido à pequena parcela de etanol anidro na mistura da gasolina.

Para o polo em que as categorias são mais sensíveis ao uso da gasolina (depleção abiótica, depleção abiótica de combustíveis fósseis e aquecimento global), o ICEVf, ICEVg e PHEV possuem linhas de tendências similares, porém o ICEVg apresenta os maiores impactos, devido ao uso predominante de gasolina.

A extremidade relacionada com a toxicidade humana apresenta os maiores resultados para o BEV e PHEV, pois o elemento que mais influencia esse impacto é a produção da bateria de íon de lítio.

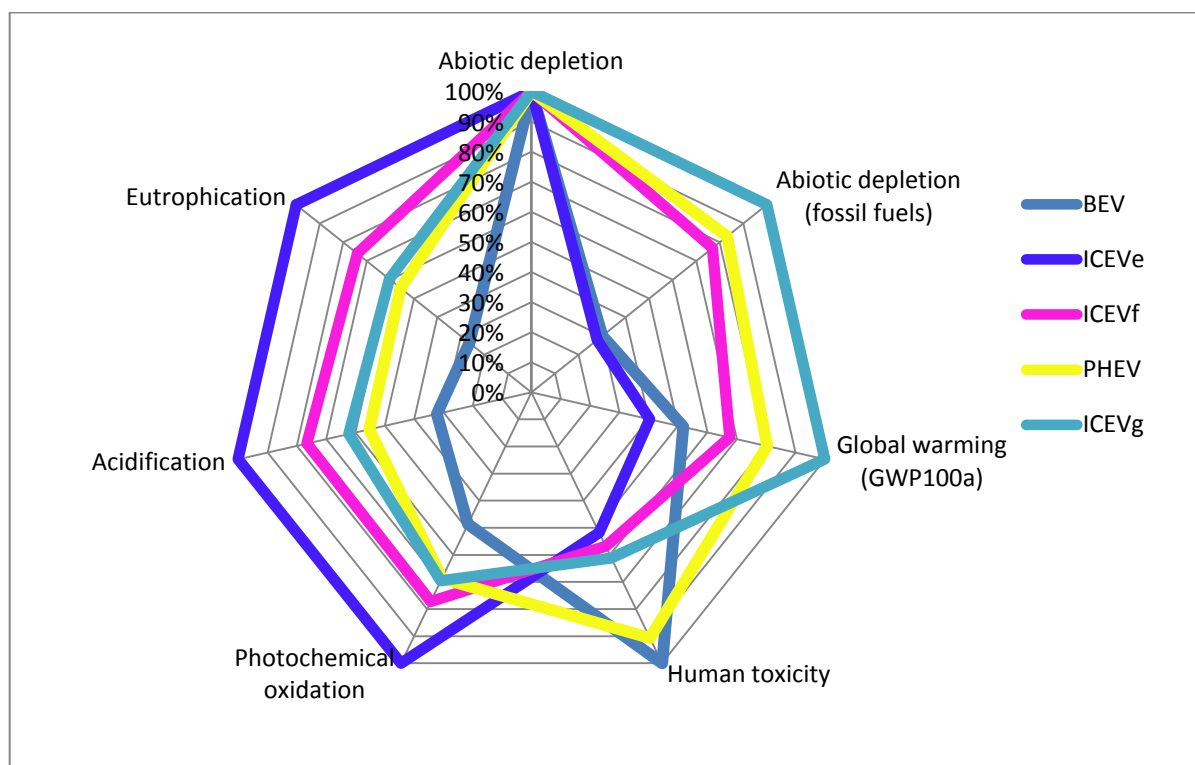


Figura 38 – Comparação Geral dos Resultados

Em linhas gerais, os resultados do estudo para a vida útil dos automóveis (260000km):

Para o potencial de depleção abiótica, observa-se que os valores de todos os veículos são muito próximos entre si, e isso se deve ao fato do maior contribuinte para essa categoria de impacto ser comum a todos, que é a produção de automóvel, por isso a diferença é mínima para esse caso. Os elementos que possuem o maior fator de caracterização para este estudo é a platina e o chumbo.

Para a o potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis observa-se que os valores variam de  $8,11E05$  MJ do ICEVg a  $2,44E05$  MJ do BEV. Os elementos que possuem o maior fator de caracterização para este estudo é o petróleo e carvão que foram utilizados como matéria prima de muitas substâncias e processos.

Para o potencial de aquecimento global observa-se que os valores variam de  $5,95E04$  kg  $CO_2$  eq do ICEVg a  $2,43E04$  kg  $CO_2$  eq ICEVe. Os elementos que possuem o maior fator de caracterização para este estudo foram às emissões para a atmosfera de  $CO_2$  e  $CH_4$ .

Para o potencial de toxicidade humana observa-se que os valores variam de  $1,83E04$  kg 1,4-DB eq do BEV a  $9,50E03$ kg 1,4-DB do ICEVe. Os elementos que possuem o maior fator de caracterização para este estudo foram às emissões do elemento Aldrin para a água e o solo, e as emissões de Cromo IV para o solo.



Para a categoria de potencial de oxidação fotoquímica, observa-se que os valores variam de 2,59E02 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq do ICEVe ao 1,26E02 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq do BEV. Os elementos que possuem o maior fator de caracterização para este estudo foram as emissões para o ar de CO e SO<sub>2</sub>.

Para a categoria de potencial de acidificação observa-se que os valores variam de 2,45E02 kg SO<sub>2</sub> eq do ICEVe a 7,88E01 kg SO<sub>2</sub> eq do BEV. Os elementos que possuem o maior fator de caracterização para este estudo foram as emissões para o ar de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>.

Para a categoria de potencial de eutrofização observa-se que os valores variam de 2,73E01 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq do ICEVe a 7,72E0 kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq do BEV. O elemento que possuem o maior fator de caracterização para este estudo é NO<sub>x</sub>.

Por fim, pode-se concluir que diante da figura x, o BEV é o automóvel com menores cargas ambientais, enquanto o ICEV é o veículo com maiores cargas de maneira global. No entanto, para um resultado específico, devem-se analisar as categorias de impacto de maneira isolada, visando o objetivo do estudo.

## Capítulo 6

### CONCLUSÕES

- Diante das análises realizadas, conclui-se que não existe uma única tecnologia com um melhor desempenho para todas as categorias de impacto. Logo há a necessidade da comparação entre as diferentes categorias de impacto, pois os sistemas em estudo possuem vantagens e desvantagens em relação uns aos outros.
- O ICEVg apresenta o maior potencial de aquecimento global devido as maiores emissões de GEE durante o processo de combustão, e também possui o maior potencial de depleção abiótica de combustíveis fósseis, já que a gasolina é o combustível empregado para a propulsão do veículo.
- O ICEVe é melhor tecnologia em relação ao indicador de aquecimento global, devido principalmente as absorções de CO<sub>2</sub> na etapa da produção de cana-de-açúcar. No entanto essa mesma etapa agrícola causa impactos significativas para as categorias de eutrofização, acidificação e oxidação fotoquímica, devido ao uso de fertilizantes, torta de filtro e vinhaça durante esta etapa.
- A tecnologia referente ao BEV, possui os menores resultados em relação as categorias de impacto: acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e depleção abiótica dos combustíveis fósseis. Isso se deve ao fato da matriz elétrica utilizada, pois o mix da energia elétrica do Brasil é composto em grande parte de energia proveniente de fontes renováveis, principalmente de fontes hidráulicas, em que as emissões dos poluentes para as categorias de impactos mencionadas são baixas. No entanto, impacto relacionado à toxicidade humana, veículos que utilizam bateria (BEV e HEV)

possuem um maior potencial de impacto, e estes resultados estão relacionados aos produtos utilizados na fabricação da bateria.

- ICEVf apresenta melhoras significativas dos potenciais de aquecimento global e depleção abiótica dos combustíveis fósseis em relação ao ICEVg, devido ao consumo de etanol hidratado como parte do combustível utilizado, no entanto, em relação as categorias de eutrofização, acidificação e oxidação fotoquímica, notou-se um pior desempenho, devido as práticas agrícolas para a produção da cana-de-açúcar.
- O PHEV apresenta características similares ao ICEVg, pois também utiliza a gasolina como combustível, mas devido ao uso de eletricidade, o resultado para o potencial de aquecimento global é significativamente menor. O PHEV também apresenta características semelhantes ao BEV, principalmente por fazer o uso da bateria de íons de lítio, o que promove maiores resultados para os potenciais de toxicidade humana e depleção abiótica, no entanto, devido ao menor peso da bateria em relação ao BEV, o PHEV apresenta resultados um pouco menores para essas categorias.

### Recomendações

Esta dissertação foi apenas o início de um trabalho que visa evidenciar os principais impactos ambientais causados pelo sistema de transportes urbano do país, assim como possíveis melhorias do mesmo. No entanto ainda é necessário o aperfeiçoamento deste estudo, a fim de resultados mais acurados. Recomenda-se algumas linhas de ação para essa continuidade:

- Aprimoramento do ICV através de utilização de dados mais recentes e que se aproximem ainda mais da realidade brasileira;
- Refinamento dos processos;
- Aplicação do procedimento para diferentes veículos e combustíveis, em particular para os veículos de carga pesada que utilizam diesel ou biodiesel a partir de diferentes matérias-primas;
- Complementar os estudos de casos com uma análise econômica, para que se possa determinar os principais fatores técnicos e econômicos que contribuem para a viabilidade econômica dos sistemas automotivos estudados.

## BIBLIOGRAFIA

ABADIE, E. (2002), "**Apostila do Curso Refino de Petróleo – Processo de Refinação**". Instituto Brasileiro de Petróleo.

ABNT; NBR-ISO14040. (2001), "**Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios d Estrutura**". Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2001.

ABVE. (2009) - **Associação Brasileira do Veículo Elétrico**. Disponível em: < <http://www.abve.org.br/PF/ExibePF.asp?codigo=0008> >. Acesso em: 02 de outubro de 2014.

ACIOLI, J, de L. (1994), "**Fontes de Energia**", 1ª ed, Brasília, Editora Universidade de Brasília.

AEA (2009) - **Association for Energy Affordability** - Disponível em: <http://aea.us.org/>. Acesso em: 06 de junho de 2014.

ANEEL (2014) - **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 21 de outubro de 2014.

ANFAVEA (2013) - **Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores**-. Disponível em: < [www.anfavea.com.br](http://www.anfavea.com.br). Acesso em 02 de dezembro de 2014.

ARENA, M.; AZZONE, G.; CONTE, A. (2013), "**A streamlined LCA framework to support early decision making in vehicle development**". Journal of Cleaner Production, v. 41, pp 105-113.

AURBACH, et al. (2007), "**Review on electrode–electrolyte solution interactions, related to cathode materials for li-ion batteries**". Journal of Power Sources 165, pp 491–499.

BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C. (2008), "**Progress in bioethanol processing**". Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, n. 5, pp 551-573.

BARAN, R. (2012), "**Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação do Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade**". Tese (Doutor em Planejamento Energético). Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

BARROS, M.,R.,A. (2006), "**Estudo da automação de células de manufatura para montagens e soldagem industrial de carrocerias automotivas**". Mestrado em Engenharia automotiva. Universidade de São Paulo. São Paulo.

BASTOS, L. M. H. (2008), "**Monitorização do desempenho Energético e ambiental de um Veículo Híbrido**". Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

BAUER, C., et al. (2015), "**The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework**". Applied Energy xxx.

BEER, T. et al. (2001), "**Comparison of Transport Fuels**". Australian Greenhouse Office. Melbourne.

BEN (2014) - **Balanco Energético Nacional**. Disponível em: ben.epe.gov.br. Acesso em: 15 de fevereiro de 2015.

BITSCHKE, O.; GUTMANN, G. (2004), "**Systems for hybrid cars**". Journal of Power Sources, v. 127, n. 1–2, pp 8-15.

BNDS; CGEE. (2008), "**Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável**". Rio de Janeiro: Departamento de Divulgação do BNDES.

BORBA, B. S. M. C. (2012), "**Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro**". Tese (Doutor em Planejamento energético). COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

BORGES, F. J. (2004), "**Inventário do Ciclo de Vida do PVC produzido no Brasil**". Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

BOUREIMA, F.; MATHEYS, J.; WYNEN, V.; SERGEANT, N.; VAN MIERLO, J.; MESSAGIE, M. (2009), "**Comparative LCA of Electric, Hybrid, LPG and Gasoline cars in a Belgian context**". World Electr. Veh. v.3, pp 469-476.

BREEZE, P. (2005), "**Power generation technologies**". Great Britain: Elsevier.

ÇAĞATAY, K ., BAYINDIR, M.A.G.A. (2011), "**Comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic controlunits**". Energy Conversion and Management v. 52, pp 1305–1313

CARDOSO, L. C. (2006), "**Petróleo do poço ao posto**". Rio de Janeiro: Qualitymark.

CARVALHO, N. P. (2011), "**Valoração das externalidades negativas do ciclo de vida do etanol - o caso da queima da palha da cana-de-açúcar**". Dissertação (Mestre em Planejamento Energético). Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

CASTELO BRANCO, D. A., SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R. (2010), "**CO<sub>2</sub> emissions abatement costs of reducing natural gas flaring in Brazil by investing in offshore GTL plants producing premium diesel**". Energy v.35, pp 158-167.

CASTRO, B.H.R; Ferreira, T.T. (2010), "**Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidade**". BNDES Setorial 32, pp 267-310.

CAVALETT ET AL. (2012), "**Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods**". Int J Life Cycle Assess v.18, pp 647–658.

CETESB (2014), "**Emissões veiculares no estado de São Paulo 2013**". Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/emissao-veicular/48-relatorios-e-publicacoes>. Acesso em: 07 de novembro de 2014.

CHAN, C. C. (2007), "**The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles**". Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 4, pp 704-718.

CHEHEBE, J. R. B. (1998), "**Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**". Rio de Janeiro (RJ): Qualitymark.

CHEVROLET (2014), Estados Unidos. Disponível em: <http://www.chevrolet.com/>. Acesso em: 03 de novembro de 2014.

CML (2001), "**CML 2 baseline method**". University of Leiden, 2001.

COLTRO, L.; GARCIA, E. E. C.; QUEIROZ, G. C. (2003), "**Life Cycle Inventory for Electric Energy System in Brazil**". International Journal of Life Cycle Assessment, v. 8, n. 5, pp 290–296.

D'AGOSTO, M. A. (2004), "**Análise da Eficiência da Cadeia Energética para as Principais Fontes de Energia Utilizadas em Veículos Rodoviários no Brasil**". Tese (Doutor). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

D'AGOSTO, M. A.; RIBEIRO, S.K. (2009), "**Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach**". Renewable and Sustainable Energy Reviews v. 13 pp 1326–1337.

DEUTSCHES WINDENERGIE- INSTITUTE. (2001), "**A powerhouse for Europe. Technical Possibilities and Ecological Considerations study**".

DIJK, M.; YARIME, M. (2010), "**The emergence of hybrid-electric cars: Innovation path creation through co-evolution of supply and demand**". Technological Forecasting and Social Change, v. 77, n. 8, pp 1371-1390.

DUNN, B. et al. (2012), "**Electrical Energy Storage for the Grid. A Battery of Choices**". Journal of Original Science. v. 334, pp 928-935.

ECOINVENT CENTRE - "**Ecoinvent data and reports v2.2**". Dübendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. (2009), "**Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**".

ELETROBRAS (2014), Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br>. Acesso em 14 de janeiro de 2015.

ELETROBRAS ELETRONUCLEAR (2014), Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br>. Acesso em: 21 de janeiro de 2015.

EMADI, A. et al. (2005), **Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations**. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, v. 54, n. 3, pp. 763-770.

EPE (2014), Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em 27 de janeiro de 2015.

ESCOBAR, J. C. et al. (2009), "**Biofuels: Environment, technology and food security**". Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 6–7, pp 1275-1287.

EVANTHIA A., et al. (2012), "**Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation**". Journal of Cleaner Production 20//2012.

EVANTHIA, A., et al. (2013), "**Comparative economic and environmental analysis of conventional, hybrid and electric vehicles e the case study of Greece**". Journal of Cleaner Production, v.1, pp 14-19.

FAIAS, S. M. R. (2006), "**Optimização de Sistemas de Propulsão de Veículos para Frotas**". Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.

FARIA R et al. (2013), "**Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles**". Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.24, pp 271-287.

FAVA, J. A. (1994), "**A technical framework for life-cycle assessment**". SETAC, Washington.

FENABRAVE (2011), "**Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores**" -. Disponível em: <http://www3.fenabrave.org.br>>. Acesso em: 22 de maio de 2014.

FIAT (2015), Disponível em: [fiat.com.br](http://fiat.com.br). Acesso em 22 de novembro de 2014.

FINKBEINER, M. et al. (2006), "**The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044**". The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 11, n. 2, pp 80-8.

FLOREZ-ORREGO. D.A. (2015), "**Comparação termodinâmica e ambiental (emissões de CO<sub>2</sub>) das rotas de produção e utilização de combustíveis veiculares derivados de petróleo e gás natural, biocombustíveis, hidrogênio e eletricidade (veículos elétricos)**". Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

GAINES, L., CUENCA, R. (2000), "**Costs of Lithium Ion Batteries, Center for Transportation Research**". Argonne National Laboratory.

GAO L, WINFIELD ZC. (2012), "**Life cycle assessment of environmental and economic impacts of advanced vehicles**". Energies v.5, pp 605–620.

GALDIANO, G. D. P. (2006), "**Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil**". Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Química). Engenharia Química, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP.

GANGON, L. BÉLANGER, C., UCHIYAMA, Y. (2002), "**Life-cycle assessment of electricity generations options: The status of research in year 2001**". Energy Policy, v. 30, n. 14, pp 1267-1278.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. (2003), "**Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**". V. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP).

GOLDEMBERG, J. (1998), "**Energia e desenvolvimento**". Estudos Avançados, V 12 no.33 São Paulo.

GRANOVSKII, M., DINCER, I., ROSEN, M.A. (2006), "**Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles**". Journal of Power Sources v. 159, pp 1186-1193)

GUGLIELMETTI, A. H. G. (2002), "**A legislação energética como ferramenta de redução do consumo de energia em edifícios: os impactos para a cidade de São Paulo**". Dissertação (Mestrado) - Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

GUINÉE, J. B. (2002), "**Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards**". Dordrecht; Boston.

HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W. L. (2005), "**Ethanol–diesel fuel blends — a review**". Bioresource Technology, v. 96, n. 3, pp 277-285.

HAWKINS, T.R., et al. (2012), "**Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles**". Journal of Industrial Ecology, v. 17, pp.53-64.

HEATHER, L.M. et al. (2003), "**Life Cycle Assessment of Automobile/Fuel Options**". Environ. Sci. Technol. v. 37, pp 5445-5452.

HECK, et al. (2007), "**Ecoinvent data and reports v2.2**". Dübendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

HELMS, H., et al. "**Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions**". 18th International Symposium Transport and Air Pollution Session 3: Electro and Hybrid Vehicles.

HONGRUI, MA. Et al. (2012), "**A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles**". Energy Policy v.44, pp 160–173.

IBICT (2015), "**Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia**". Disponível em: <http://acv.ibict.br>. Acesso em: 22 de maio de 2015.

IEA- International Energy Agency (2012), "**World energy outlook 2012**".

INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTIVOS RODOVIÁRIOS- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2013), Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Relatório final.



IPCC (2014), "**Intergovernmental Panel on Climate Change**". Disponível em: <http://www.ipcc.ch/>.

ISO (2006), "**Environmental management - Life cycle assessment : Part 1: Life cycle interpretation**". Geneva, Switzerland.

ISO (2006), "**Environmental management : life cycle assessment ; principles and framework = Management environnemental - analyse du cycle de vie - principes et cadre**". Geneva, Switzerland.

ITAIPU (2014), Disponível em: [itaipu.gov.br](http://itaipu.gov.br). Acesso em: 25 de novembro de 2014.

ITTEN, R. et al. (2014), "**Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid**. Paul Scherrer Institut (PSI).

KAMMEM; PACC. (2004), "**Ecoinvent data and reports v2.2**". D'ubendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

KARIN TREYER, PAUL SCHERRER. (2007), "**Ecoinvent data and reports v2.2**". D'ubendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

KHEIR, N. A.; SALMAN, M. A.; SCHOUTEN, N. J. (2004), "**Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic**". Mathematics and Computers in Simulation, v. 66, n. 2-3, p. 155-172.

KIPERSTOK, A. C. et al. (2002), "**Prevenção da poluição : tecnologia e gestão ambiental**". Brasília: SENAI/DN.

KLEIN et al. (2012), "**Engineering Equation Solver for Microsoft Windows operating System**".

La Rovere, E. L. (2015), "**Mitigação Das Mudanças Climáticas**" - Volume 3 Completo. Painel Brasileiro De Mudanças Climáticas (UFRJ).

LANE, B., et al. (2006), "**Final Report London Borough of Camden March 2006**". Ecolane Transport Consultancy.

LAVE, L. et al. (2002), "**An environmental-economic evaluation of hybrid electric vehicles: Toyota's Prius vs. its conventional internal combustion engine: Corolla**". Transportation. Research Part D, pp 155-162.

LEAL, M. R. (2010), "**Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica**". In: CORTEZ, C. L. (Ed.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P & D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo,SP: Blucher, pp.561-575.

LENZEN, M., BILEK, M., HARDY, C., DEY, C. (2006), "**Life-cycle energy balance and greenhouse gas emission of nuclear energy in Australia**". University of Sydney, Australia. Sydney.

LENZEN, M., WACHSMANN, U. (2004), "**Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment**". Applied Energy, v 77, n2. p 119-130.

LASTER, B., et al. (2002), "**An environmental-economic evaluation of hybrid electric vehicles: Toyota's Prius vs. its conventional internal combustion engine Corolla**". Transportation Research Part D 7, pp 155-162.

LIN GAO, et al. (2012), "**Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles**". Energies v. 5, pp 605-620.

LIMA, L. D. R.; MARCONDES, A. D. A. (2002), "**Álcool carburante : uma estratégia brasileira**". Curitiba, Paraná, Brasil: UFPR.

LITHOREC (2009) - "**Recycling of EV-Lithium-Ion-Batteries**". Disponível em: lithorec2.de. Acesso em: 25 de novembro de 2015.

LLOYD, A. C., CACKETTE, T. A. (2001), "**Diesel Engines: Environmental Impact and Control**". Air & Waste Manage. Assoc., v. 51, pp 809 - 847.

LORA, E.E.S. (2002), "**Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**". Ed. Interciência. 2ª edição. Rio de Janeiro.

LUCA, E. F. D. (2002), "**Matéria orgânica e atributos do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana - de - açúcar**". Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo.

LUKIC, S. M. et al. (2008), "**Energy storage systems for automotive applications**". Industrial electronics, IEEE Transactions on, v. 55, n. 6, pp 2258-2267.

MA, H.; BALTHASAR, F. et al. (2011), "**A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicle**". Energy Policy, v. 44, pp 160-173.

MAJEAU-BETTEZ, G. et al. (2011), "**Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles**". Environ. Sci. Technol.,v. 45, pp 4548-4554.

MARIA, B.G.C et al. (2003), "**Life Cycle Impact Assessment of the Average Passenger Vehicle in the Netherlands**". LCA Case Studies, v. 8, pp 297- 304.

MARIANO, J. B. (2001), "**Impactos Ambientais do Refino do Petróleo**". Dissertação (Mestre em Planejamento Energético). COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

MATTOS, I. L. et al. (2003), "**Peróxido de hidrogênio: importância e determinação**". Química Nova, v. 26, n. 3, pp 373-380.

MAURICE, B.; et al. (2000), "**Uncertainty Analysis in the Life Cycle Inventory. Application to the Production of Electricity with French Coal Power Plants**". Journal of Cleaner Production, v. 8, pp. 95-108.

MAYYAS, A., et al. (2012), "**Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review**". Renewable and Sustainable Energy Reviews v. 16, pp 1845– 1862.

MESSEGIE, M et al, (2014), "**A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels**". Energies v. 7, pp 1467-1482.

MIRANDA, M.M. (2012), "**Fator de Emissão de Gases de Efeito Estufa da Geração de Energia Elétrica no Brasil: Implicações da Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**". Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MMA (2014), Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/>

MME (2011), **Balanco energético nacional**, Brasília.

MOMOH, O. D.; OMOIGUI, M. O. (2009), "**An overview of hybrid electric vehicle technology**". In: IEEE, In Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2009. pp 1286-1292.

MOURON, C., COSTA, I.L. (2013), **Estudo Comparativo de Emissões de Gases do Efeito Estufa.** Associação Brasileira do Carvão Mineral.

NEMECEK, T. et al. (2004), **Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems –ecoinvent report nº15**. Dübendorf.

NISSAN PORTUGAL (2014), Disponível em: <http://www.nissan.pt/>. Acesso em 27 de novembro de 2015.

NOTTER, D. A., et al (2010), "**Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles**". Environmental Science & Technology v.44, pp 6550–6556.

NURI, C.O et al. (2015), **Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United State**. Applied Energy v.150, pp 36–49.

OICA (2013) - International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Disponível em: [www.oica.net](http://www.oica.net). Acesso em: 22 de novembro de 2014.

OMETTO, A. R. (2005), **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia**. (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

ONS (2015) - **Operador Nacional do Sistema Elétrico** - Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Acesso em 03 de março de 2015.

PACIORNIK, N. (2006), "**Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros**". Ministério da Ciência e Tecnologia,

PELLEGRINI, L. F.; OLIVEIRA, J. S. D. (2008), "**Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**". Tese (Doutor em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP.

PETROBRÁS (2014) - Acesso em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em 14 de julho de 2014.

PRÉ- SUSTAINABILITY (2015) - Disponível em: [www.pre-sustainability.com](http://www.pre-sustainability.com). Acesso em 03 de maio de 2015.

QUERINI, F., et al. (2011), "**Life cycle assessment of automotive fuels: critical analysis and recommendations on the emissions inventory in the tank to wheels stage**". J Life Cycle Assess. v. 16, 454-464.

RAADAL ET AL. (2011), "**Life cycle greenhouse gas emission (GHG) emissions form the generation of wind and hydropower**". Renewable and Sustainable Energy Reviews. V15, n 7, p. 3417-3422.

RAHMAN EHSANI et al. "**Modern Electrical**". Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

RECUPYL (2015) - "**Innovative battery recycling**". Disponível em: <http://www.recupyl.com>. Acesso em 03 de fevereiro de 2015.

RENÓ, M. L. G. (2011), "**Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo De Produção De Metanol A Partir Do Bagaço de Cana-de-açúcar**". Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

ROBERT DONES E KARIN TREYER.(2007), Ecoinvent (Swiss Centro de Inventários do Ciclo de Vida).

ROCHA. M et al. (2014), "**Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: a meta-analysis**". Renew Sustain Energy Rev v.37, pp 435–59.

ROCHA, M. (2009), "**Uso da análise do ciclo de vida para a comparação do desempenho ambiental de quatro alternativas para tratamento para da vinhaça**". Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá.

RODRIGUES FERREIRA, J. V. (2004), "**Análise de ciclo de vida dos produtos**". (Doutorado em Engenharia do Ambiente), Instituto Politécnico de Viseu. Viseu, Portugal.

RONCHINI XIMENES, A. et al. (2010), "**O impacto ambiental devido a política de crescimento da frota de veículos**". Revista Ciências do Ambiente On-Line, v. 4, n. 2.

RUBIN, E. S. (2001), "**Introduction to Engineering and the environment**". 1st ed., McGraw-Hil Higher Education.

SAMARAS, C., MEISTERLING, K. (2008), "**Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles**". Implications for Policy, Environmental Science & Technology v.42, pp 3170-3176.

SANTOS, L. J. C. (2007), "**Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar**". Tese (Doutor). Engenharia de Materiais e Metalurgia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

SCHEXNAYDER et al. (2001), "**Environmental Evaluation of New Generation Vehicle and Vehicle Components**". OAK Ridge National Laboratory USA Department of Energy.

SCHWEIMER, G. W.; LEVIN, M. (2000), "**Life cycle inventory for the Golf A4**". Research, Environment and Transport.

SEABRA, J.E.A. (2008). "**Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**". Univerisidade Esdadual de Campinas (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica.

SILVA, J. G. (2005), "**Análise do Ciclo de Vida de Tijolos Prensados de Escória de Alto-Forno**". Dissertação (Meste Em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES.

SINDIPEÇAS (2014), "**Sindicato nacional da indústria de componentes para veículos automotores**". Disponível em: < <http://www.sindipecas.org.br/>>. Acesso em: 01 de outubro de 2014.

SINGH, M.; et al. (1998), "**Total energy cycle assessment of electric and conventional vehicles: An energy and environmental analysis**". Argonne National Laboratory, Argonne, Ill: Argonne, IL.

SOVACOOOL, B. K., Hirsh, R. F. (2009), "**Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition**". Energy Policy, v. 37, pp 1095-1103.

SOUZA, S. P. D. (2010), "**Produção integrada de biocombustíveis: Uma proposta para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar**". Dissertação (Mestre). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

TAVARES, M. E. E. (2005), "**Análise do Refino no Brasil: Estado e perspectivas- Uma análise "cross-sectio"**". Tese (Doutor). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

TEAM, G. E. A. W. (2012), "**Global Energy Assessment Toward a Sustainable Future**". Cambridge.

THOMAS, J. E. (2004), "**Fundamentos da Engenharia do Petróleo**". Editora Interciência.

TERCIOTE, R. (2002), "**A energia eólica e o meio ambiente**". Energia e Meio Rural. v 4.

TODD, J. A. et al. (1999), "**Streamlined life-cycle assessment: a final report from the SETAC North America streamlined LCA workgroup**". Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) and SETAC Foundation for Environmental Education.

UDOP (2012), "**Processo de Fabricação de Álcool Etílico Hidratado Carburante**". Disponível em: [www.http://udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=898#nc](http://udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=898#nc) . Acesso em 03 de maio de 2014.

UGAYA, C. M. L. (2001), "**Análise de Ciclo de Vida: estudo de caso para materiais componentes automotivos no Brasil**". (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas.

ÚNICA (2012), "**Colheita Mecanizada de Cana Produz Queda nas Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa**". União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <http://www.unica.com.br>. Acesso em: 06 de junho de 2013.

VIANA, M.M. (2008), "**Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol**". Dissertação de mestrado. Escola Politécnica de São Paulo. Mestrado em Engenharia Química, São Paulo.

VILANOVA, L. C. (2007), "**Efeitos da Adição de Etanol Hidratado no Combustível e do Sistema de Formação da Mistura no Desempenho e nas Emissões de um Motor Bicomcombustível Brasileiro**". Tese (Doutor em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

WANG D et al. (2013), "**Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China**". Energy v.59, pp 402–412.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. Z.; ALTING, L. (2000), "**Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development**". Springer.

WEISS M. (2000), "**On the Road in 2020—A Life-Cycle Analysis of New Automobile Technologies**". Energy Laboratory Report # MIT EL 00-003; M.I.T.: Cambridge, MA, USA.

YING, T.; GAO, X.; HU, W.; WU, F.; NOREUS, D.(2006), "**Studies on rechargeable NiMH batteries**". Int. J. Hydrogen Energy, v.31, pp 525–530.

YOKOTE, A. Y. (2003), "**Inventário De Ciclo De Vida Da Distribuição De Energia Elétrica No Brasil**". Dissertação (Meste Em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

ZACKRISSON, M., L. AVELLAN, AND ORLENIUS, J. (2010), "**Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues**". Journal of Cleaner Production v.18, pp 1519–1529.