



## INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E IMPACTOS SOBRE O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

Olivia Brajterman

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Planejamento Energético, COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Rio de Janeiro

Março 2016

**INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E IMPACTOS SOBRE O SETOR  
ENERGÉTICO BRASILEIRO**

Olivia Brajterman

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

---

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

---

Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.

---

Prof. Bruno Soares Moreira Cesar Borba, D.Sc.

---

Dra. Joana Pereira Portugal, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
MARÇO DE 2016

Brajterman, Olivia

Introdução de veículos elétricos e impactos sobre o setor energético brasileiro/ Olivia Brajterman – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XII, 142 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 117-127

1. Veículos Elétricos. 2. Planejamento Energético. 3. Cenários de Demanda Energética. I. Schaeffer, Roberto *et al.*
- II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, sou extremamente grata aos meus orientadores. Ao Roberto Schaeffer, que me incentivou a trabalhar com este tema e que seguirá sempre sendo uma referência de conhecimento e humildade para mim. Ao André Lucena, grande amigo e, conforme descobri, um professor exemplar com uma paixão incansável por ensinar. Aos dois, gratidão pelos seus conselhos e por estarem sempre presentes, mesmo que a um oceano de distância. Obrigada também a todos os professores e pesquisadores, que com o seu trabalho ajudam a manter o conteúdo do curso atual e interessante e a estimular os alunos incessantemente.

Costumo dizer que a qualidade de qualquer curso depende 50% dos professores e 50% dos alunos. Portanto, obrigada a todos os colegas que ajudaram a fazer este mestrado valer tanto a pena. Em especial, a parceria com Lili, Pelé e Gui nos primeiros períodos foi mais que linda – certamente o mestrado teria sido muito mais difícil sem sua generosidade para discutir as nossas dúvidas e sem sua cumplicidade quando parecia que não tinha como absorver todo o conteúdo! Mas, como sabemos que nem tudo no mestrado é só estudo e trabalhos, sou eternamente grata ao Bruno Cunha, à Mari Império e tantos outros que ajudaram a promover a descontração nos tantos churrascos (em terra ou al mare)!

Fiz este mestrado em período parcial e durante todo o tempo contei com o apoio dos meus colegas da ICF, primeiro no Rio e depois em Londres. O escritório do Rio foi uma escola e agradeço imensamente por todas as nossas trocas e pelo exemplo de parceria que esta equipe foi. Que venham outras tantas oportunidades de trabalharmos juntos novamente! Um obrigado especial à Ana, à Paty e ao Pedro, que me deram toda a força para entrar neste mestrado, e à Laura, que aguardou pacientemente a sua conclusão!

Por último, as pessoas que são a parte melhor de mim mereceriam mil páginas de agradecimento. Toda gratidão do mundo ao Pepe, minha fonte maior de apoio, exemplo de amor imenso, meu melhor amigo. Vencemos juntos esse desafio e venceremos muitos outros mais. Que venham os próximos! Te amo! Ao meus pais e à minha irmã, palavras soarão sempre vazias para expressar a minha gratidão. Vocês são a peça fundamental de quem eu me formei, minha referência primeira de amor e o motor da minha ambição. Minhas conquistas são suas também. Minha gratidão maior por tudo, sempre. Amo vocês.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E IMPACTOS SOBRE O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

Olivia Brajterman

Março/2016

Orientadores: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Programa: Planejamento Energético

Esta tese tem por objetivo analisar os impactos da introdução de veículos elétricos sobre o sistema energético nacional, no que tange à demanda de energia final e a mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Na primeira etapa, estima-se a demanda de energia final de diversos cenários de penetração de veículos elétricos em um modelo paramétrico de projeção de demanda (LEAP) e três cenários, representando demandas máximas e mínimas de eletricidade e de etanol, são selecionados. Na segunda etapa, estes cenários são rodados em um modelo integrado de otimização (MESSAGE Brasil) sob um cenário de referência, a fim de investigar como o setor elétrico, sucroalcooleiro e energético como um todo reagem a estes cenários. Conclui-se que os impactos são significativos e que políticas de promoção de veículos elétricos deveriam ser acompanhadas de mecanismos de suporte e fortalecimento do setor sucroalcooleiro e de políticas de suporte a fontes primárias menos intensivas em carbono.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ELECTRIC VEHICLES INTRODUCTION AND ITS IMPACTS OVER THE ENERGY  
SECTOR IN BRAZIL

Olivia Brajterman

March/2016

Advisors: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Department: Energy Planning

This thesis aims to assess the impacts of introducing electric vehicles over the Brazilian energy sector – in terms of primary energy and mitigation of greenhouse gas emissions (GHG). Under the first step, the final energy demand from a number of scenarios is assessed in a parametric model for energy demand forecasting (LEAP) and three scenarios, representing the highest and the lowest ethanol and electricity demand, are selected. Under the second step, these scenarios are modelled in an integrated optimization model, MESSAGE Brasil, under a reference scenario. The objective of this stage is to assess the impacts over the Brazilian sugar and ethanol industry, electric grid and the energy system. This study concludes that the impacts are significant and that policies promoting electric vehicles should be coupled with policies aimed at safeguarding the ethanol industry's competitiveness and with policies supporting electricity sources with lower emission intensity.

## **Sumário**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 - VEÍCULOS ELÉTRICOS: ASPECTOS TÉCNICOS E INTERAÇÕES COM SETORES ECONÔMICOS .....</b>                               | <b>7</b>  |
| 2.1 - TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS LEVES (VMCs, FFVs HEVs, BEVs, PHEVs) .....                                    | 7         |
| 2.1.1 - <i>Veículos convencionais e veículos convertidos a GNV</i> .....   | 8         |
| 2.1.2 - <i>Veículos elétricos</i> .....  | 11        |
| 2.2 - DESCRIÇÃO DAS INTERAÇÕES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM DEMAIS SETORES DA ECONOMIA .....                                | 19        |
| 2.2.1 - <i>Veículos elétricos e o sistema elétrico</i> .....   | 19        |
| 2.2.2 - <i>O papel do smart grid e V2G na integração de veículos elétricos e fontes renováveis de eletricidade</i> ..... | 25        |
| 2.2.3 - <i>Veículos eletrificados e o setor sucroalcooleiro</i> .....  | 27        |
| <b>3 - REVISÃO DE CENÁRIOS DE PENETRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS..</b>   | <b>32</b> |
| 3.1 - VISÃO GERAL DAS PUBLICAÇÕES .....  | 34        |
| 3.2 - DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS UTILIZADOS .....  | 38        |
| 3.2.1 - <i>IEA (2009) - Transport, Energy and CO<sub>2</sub> - Moving toward sustainability</i> ...                      | 38        |
| 3.2.2 - <i>EPE (2014) - Demanda de Energia 2050. NOTA TÉCNICA DEA 13/14</i> ...  | 40        |
| 3.2.3 - <i>US EIA (2014) - Annual Energy Outlook 2014</i> .....  | 41        |
| 3.2.4 - <i>Wu et al. (2012)</i> .....  | 42        |
| 3.2.5 - <i>IIASA (2012) - Global Energy Assessment [GEA 2012]</i> .....  | 44        |
| 3.2.6 - <i>EPRI (2007) - Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles</i> .....                          | 46        |
| <b>4 - METODOLOGIA .....</b>   | <b>49</b> |
| 4.1 - ADAPTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS .....  | 51        |
| 4.2 - LEAP: METODOLOGIA PARA A PROJEÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA .....  | 61        |
| 4.2.1 - <i>Frota nacional, vendas no ano base e projeção de vendas</i> .....   | 62        |
| 4.2.2 - <i>Percentual de consumo de combustível por tecnologia</i> .....   | 63        |
| 4.2.3 - <i>Perfil da frota</i> .....   | 65        |
| 4.2.4 - <i>Curvas de sucateamento</i> .....  | 67        |
| 4.2.5 - <i>Projeção de vendas</i> .....  | 69        |
| 4.2.6 - <i>Eficiência</i> .....  | 69        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.3 - DESCRIÇÃO DO MESSAGE.....  | 72         |
| 4.3.1 - <i>Estrutura do MESSAGE Brasil</i> .....   | 75         |
| 4.3.2 - <i>Premissas do MESSAGE Brasil</i> .....   | 82         |
| <b>5 - RESULTADOS: DEMANDA DE ENERGIA POR VEÍCULOS LEVES E IMPACTOS SOBRE O SETOR ENERGÉTICO .....</b> | <b>87</b>  |
| 5.1 - RESULTADOS DO LEAP: DEMANDA DE ENERGIA POR VEÍCULOS LEVES (2010-2050) .....                      | 87         |
| 5.1.1 - <i>Demandas de energia para 22 cenários</i> .....  | 87         |
| 5.1.2 - <i>Seleção de 3 cenários para o MESSAGE-Brasil</i> .....                                       | 93         |
| 5.1.3 - <i>Ajustes nos resultados de demanda</i> .....   | 96         |
| 5.2 - RESULTADOS DO MESSAGE-BRASIL: IMPACTO SOBRE O SETOR ENERGÉTICO .....                             | 99         |
| 5.2.1 - <i>Impactos sobre o consumo de energia primária</i> .....                                      | 99         |
| 5.2.2 - <i>Impactos sobre o setor elétrico</i> .....   | 102        |
| 5.2.3 - <i>Impactos sobre o setor sucroalcooleiro</i> .....  | 107        |
| 5.3 - SUMÁRIO E DISCUSSÃO .....  | 109        |
| <b>6 - CONCLUSÃO .....</b>   | <b>114</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>ANEXO I: REVISÃO DE CENÁRIOS NÃO INCLUÍDOS NA ANÁLISE DO LEAP ...</b>                               | <b>128</b> |

## **ÍNDICE DE TABELAS**

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 3-1 – PUBLICAÇÕES INCLUÍDAS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE CENÁRIOS .....                                       | 34  |
| TABELA 3-2 - COMPOSIÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LEVES EM 2050, CENÁRIOS COM PHEVs .....                              | 47  |
| TABELA 3-3 - EPRI 2007 – COMPOSIÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LEVES EM 2050, CENÁRIOS SEM PHEVs.....                   | 47  |
| TABELA 4-1 – IEA 2009 – TAXA DE PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS LEVES ENTRE 2005 – 2050 (%)..... | 54  |
| TABELA 4-2 – IEA 2009 - CENÁRIOS ADAPTADOS DE PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS (%) .....                                   | 54  |
| TABELA 4-3 – EPE 2014 – CENÁRIO ADAPTADO (%). ....  | 56  |
| TABELA 4-4 – US EIA 2014 – CENÁRIO ADAPTADO (%) .....   | 57  |
| TABELA 4-5 – WU ET AL. 2012 – CENÁRIOS ADAPTADOS (%). ....  | 58  |
| TABELA 4-6 – GEA 2012 - CENÁRIOS ADAPTADOS DE PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS (%) .....                                   | 59  |
| TABELA 4-7 – EPRI 2007 - CENÁRIOS ADAPTADOS DE PENETRAÇÃO DE TECNOLOGIAS (%) .....                                  | 61  |
| TABELA 4-8 – COMBUSTÍVEIS CONSUMIDOS POR CADA TECNOLOGIA .....  | 63  |
| TABELA 4-9 – TIPOLOGIAS DE MACRO CENÁRIOS (%) .....   | 64  |
| TABELA 4-10– QUILOMETRAGEM MÉDIA PERCORRIDA POR VEÍCULOS.....   | 67  |
| TABELA 4-11– EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR TECNOLOGIA DE PROPULSÃO.....   | 71  |
| TABELA 4-12 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICO-ECONÔMICAS DAS OPÇÕES DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO MESSAGE-BRASIL .....             | 85  |
| TABELA 5-1 – TIPOLOGIAS DE MACRO CENÁRIOS (%) .....   | 88  |
| TABELA 5-2 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR TECNOLOGIA DE PROPULSÃO (KM/TJ) .....  | 92  |
| TABELA 5-3– CONSUMO NOS CENÁRIOS EXTREMOS ( $10^6$ GJ) – SELEÇÃO RESTRITA .....                                     | 93  |
| TABELA 5-4– PERFIL DE VENDAS EM 2050 NOS CENÁRIOS EXTREMOS ( $10^6$ GJ) – SELEÇÃO RESTRITA.....                     | 93  |
| TABELA 5-5 - CONSUMO NOS CENÁRIOS EXTREMOS ( $10^6$ GJ) – SELEÇÃO AJUSTADA .....                                    | 94  |
| TABELA 5-6 - PERFIL DE VENDAS EM 2050 NOS CENÁRIOS EXTREMOS ( $10^6$ GJ) – SELEÇÃO AJUSTADA .....                   | 94  |
| TABELA 5-7 – DEMANDA DE ENERGIA AJUSTADA – GEA REFERENCE (TWh) .....  | 98  |
| TABELA 5-8 - DEMANDA DE ENERGIA AJUSTADA – PNE 2050 (TWh).....  | 98  |
| TABELA 5-9 – DEMANDA DE ENERGIA AJUSTADA – IEA BLUE EV/SHIFTS (TWh) .....   | 98  |
| TABELA 5-10 – CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA – RENOVÁVEIS VERSUS NÃO-RENOVÁVEIS (%).....                               | 105 |
| TABELA 0-1 - PENETRAÇÃO DE PHEVs NA FROTA BRASILEIRA DE VEÍCULOS LEVES .....  | 129 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 1-1 – CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA FINAL SEGUNDO DIFERENTES MODAIS NO SETOR DE TRANSPORTES, 2009 ....                                   | 1   |
| FIGURA 1-2 – CONSUMO DE ENERGIA FINAL NO BRASIL 2014 .....   | 2   |
| FIGURA 1-3 – EMISSÕES DE GEE NO SETOR ENERGÉTICO - MtCO <sub>2</sub> EQ.....   | 3   |
| FIGURA 1-4 – MATRIZ ENERGÉTICA DE TRANSPORTES – 2014.....  | 5   |
| FIGURA 2-1 – FUNCIONAMENTO DO MOTOR CICLO OTTO .....   | 9   |
| FIGURA 2-2 – VEÍCULOS HÍBRIDOS EM SÉRIE .....  | 13  |
| FIGURA 2-3 – VEÍCULOS HÍBRIDOS EM PARALELO.....  | 14  |
| FIGURA 2-4 – VEÍCULOS HÍBRIDOS MISTOS .....  | 15  |
| FIGURA 2-5 – ENERGIA ESPECÍFICA E POTÊNCIA ESPECÍFICA DE DIFERENTES TIPOS DE BATERIAS .....  | 21  |
| FIGURA 3-1 – METODOLOGIA DE ANÁLISE.....   | 33  |
| FIGURA 3-2 – IEA 2008 - CENÁRIOS DE VENDAS DE VEÍCULOS DE PASSAGEIROS EM IEA 2009, EM MILHÕES DE VEÍCULOS (2005-2050) .....                  | 40  |
| FIGURA 3-3 – EPE 2014 – COMPOSIÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS DE PASSAGEIROS (2012-2050) .....   | 41  |
| FIGURA 3-4 – AEO 2014 - VENDAS DE VEÍCULOS LEVES DE TECNOLOGIAS AVANÇADAS NO CENÁRIO DE REFERÊNCIA, EM MILHÕES DE VEÍCULOS (2012-2040) ..... | 42  |
| FIGURA 3-5 – WU ET AL. 2012 – COMPOSIÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LEVES NOS CENÁRIOS 1-4 (2010-2030) .....                                     | 44  |
| FIGURA 3-6 – GEA 2012 - CENÁRIOS DE VENDAS DE VEÍCULOS, EM MILHÕES DE VEÍCULOS (2005 – 2100) .....   | 46  |
| FIGURA 3-7 – EPRI 2007 – COMPOSIÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LEVES NO CENÁRIO DE PENETRAÇÃO MÉDIA DE PHEVs (2010-2050) .....                   | 48  |
| FIGURA 4-1 – METODOLOGIA DE ANÁLISE.....   | 49  |
| FIGURA 4-2 – EPRI 2007 – COMPOSIÇÃO DAS VENDAS DE VEÍCULOS LEVES NO CENÁRIO DE PENETRAÇÃO MÉDIA DE PHEVs (2010-2050) .....                   | 60  |
| FIGURA 4-3 – PERFIL DE IDADE DA FROTA, POR TECNOLOGIA .....  | 66  |
| FIGURA 4-4 – CURVA DE SUCATEAMENTO.....  | 69  |
| FIGURA 4-5 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS CADEIAS ENERGÉTICAS NO MESSAGE BRASIL.....  | 76  |
| FIGURA 4-6 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS CADEIAS ENERGÉTICAS NO MESSAGE BRASIL – VEÍCULOS ELÉTRICOS.....                                     | 79  |
| FIGURA 4-7 – PERFIL DE CARGA POR REGIÃO E POR ESTAÇÃO DO ANO (DIAS DE CARGA MÁXIMA DE PICO) .....  | 84  |
| FIGURA 5-1 – MACRO CENÁRIO A: DEMANDA DE ENERGIA FINAL ACUMULADA – 2010-2050 (TJ) .....  | 88  |
| FIGURA 5-2 – MACRO CENÁRIO B: DEMANDA DE ENERGIA FINAL ACUMULADA – 2010-2050 (TJ) .....  | 89  |
| FIGURA 5-3 – MACRO CENÁRIO C: DEMANDA DE ENERGIA FINAL ACUMULADA – 2010-2050 (TJ) .....  | 90  |
| FIGURA 5-4 – CONSUMO DE ENERGIA FINAL - GEA REFERENCE (10 <sup>6</sup> GJ).....  | 95  |
| FIGURA 5-5 – CONSUMO DE ENERGIA FINAL – PNE 2050 (10 <sup>6</sup> GJ) .....  | 95  |
| FIGURA 5-6 – CONSUMO DE ENERGIA FINAL – IEA BLUE E/SHIFTS (10 <sup>6</sup> GJ) .....   | 96  |
| FIGURA 5-7 – CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA (TWh) .....   | 100 |
| FIGURA 5-8 – CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA – RENOVÁVEIS VERSUS NÃO-RENOVÁVEIS (%) .....  | 101 |

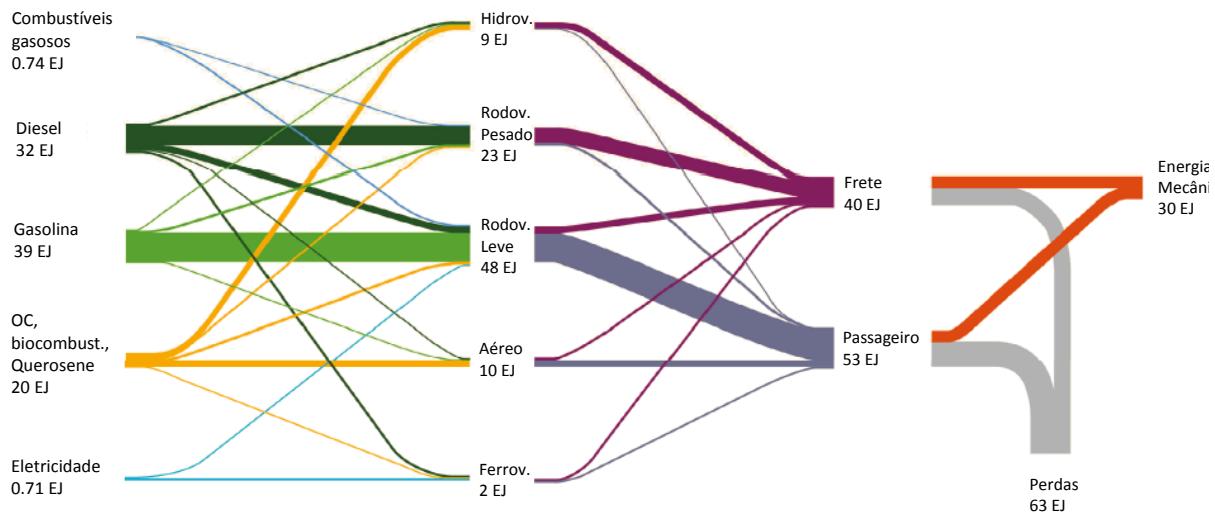
|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 5-9 – EMISSÕES DE GEE (MTCO <sub>2</sub> EQ).....  | 102 |
| FIGURA 5-10 – GERAÇÃO DE ELETRICIDADE (TWH – ENERGIA FINAL).....  | 104 |
| FIGURA 5-11 – GERAÇÃO ELÉTRICA: FATOR DE EMISSÃO E CUSTO .....  | 107 |
| FIGURA 5-12 – DEMANDA DE ETANOL NOS CENÁRIOS (TJ) .....   | 108 |
| FIGURA 5-13 – GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR BAGAÇO (TWH) .....  | 109 |
| FIGURA 0-1 – EC 2012 - PENETRAÇÃO DE VEÍCULOS ELETRIFICADOS NA FROTA EUROPEIA DE VEÍCULOS LEVES (2010-2050) ..... | 130 |
| FIGURA 0-2 – ITS 2011 – CENÁRIO DE EFICIÊNCIA: FROTA DE VMCs E HEVs (EM MILHÕES).....                             | 133 |
| FIGURA 0-3 – ITS 2011 – CENÁRIO DE SUCESSO DOS FCVs: FROTA DE VMCs E FCVs (EM MILHÕES) .....                      | 133 |
| FIGURA 0-4 – ITS 2011 – CENÁRIO PORTFOLIO: FROTA DE VMCs, HEVs E TECNOLOGIAS AVANÇADAS (EM MILHÕES) ....          | 134 |
| FIGURA 0-5 – ITS 2011- CENÁRIOS DE LIMITES DE EMISSÕES: FROTA DE VEÍCULOS LEVES (EM MILHÕES) .....                | 136 |
| FIGURA 0-6 – MIT (2008) - CENÁRIO <i>TURBOCHARGED ICE FUTURE</i> .....  | 138 |
| FIGURA 0-7 – MIT 2008 - CENÁRIO <i>HYBRID STRONG</i> .....  | 139 |
| FIGURA 0-8 – MIT 2008 - CENÁRIO <i>MARKET MIX</i> .....   | 140 |
| FIGURA 0-9 – TURTON 2006 – DEMANDA DE VEÍCULOS LEVES (EM MILHÕES DE KM).....                                      | 141 |
| FIGURA 0-10 – EXCEN 2013 – FROTA DE VEÍCULOS LEVES NO CENÁRIO BASE (EM MILHÕES).....                              | 142 |
| FIGURA 0-11 – EXCEN 2013 – FROTA DE VEÍCULOS LEVES NO CENÁRIO 1 (EM MILHÕES).....                                 | 142 |
| FIGURA 0-12 – EXCEN – FROTA DE VEÍCULOS LEVES NO CENÁRIO 2 (EM MILHÕES) .....                                     | 142 |
| FIGURA 0-13 – EXCEN – FROTA DE VEÍCULOS LEVES NO CENÁRIO COMPULSÓRIO (EM MILHÕES) .....                           | 142 |

## **LISTA DE ACRÔNIMOS**

|                |  |
|----------------|--|
| <b>BEN</b>     | Balanço Energético Nacional  |
| <b>BEV</b>     | Veículo Elétrico a Bateria   |
| <b>CCS</b>     | Captura e Estocagem de Carvão / <i>Carbon Capture and Storage</i>  |
| <b>CEST</b>    | Turbinas a vapor de extração e condensação   |
| <b>COP</b>     | Conferência das Partes   |
| <b>CP</b>      | Carvão pulverizado   |
| <b>CSP</b>     | Sistemas de Concentração Solar / <i>Concentrated Solar Power</i>   |
| <b>EPE</b>     | Empresa de Pesquisa Energética   |
| <b>EPRI</b>    | Electric Power Research Institute  |
| <b>FCV</b>     | Veículo a pilha-combustível / <i>Fuel cell vehicle</i>   |
| <b>GEA</b>     | Global Energy Assessment   |
| <b>GEE</b>     | Gás de Efeito Estufa   |
| <b>GNV</b>     | Gás Natural Veicular   |
| <b>HEV</b>     | Veículo Híbrido Elétrico   |
| <b>IAEA</b>    | Agência Internacional de Energia Atômica / International Atomic Energy Agency                                    |
| <b>IEA</b>     | Agência Internacional de energia / <i>International Energy Agency</i>  |
| <b>IGCC</b>    | Ciclo Combinado com Gaseificação integrada / Integrated Gasification Combined Cicle                              |
| <b>IIASA</b>   | International Institute for Applied Systems Analysis   |
| <b>INDC</b>    | Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada / <i>Intended Nationally Determined Contribution</i>           |
| <b>IPCC</b>    | Intergovernmental Panel of Climate Change  |
| <b>LEAP</b>    | Long-range Energy Alternatives Planning  |
| <b>MCI</b>     | Motor a Combustão Interna  |
| <b>MCTI</b>    | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação   |
| <b>MESSAGE</b> | Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts                            |
| <b>MME</b>     | Ministério de Minas e Energia  |
| <b>O&amp;M</b> | Operação e Manutenção  |
| <b>PHEV</b>    | Veículo Elétrico Plug-in   |
| <b>PNE</b>     | Plano Nacional de Energia  |
| <b>PV</b>      | Painel Fotovoltaico  |
| <b>RSU</b>     | Resíduos Sólidos Urbanos   |
| <b>UNFCCC</b>  | Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas / <i>United Nations Framework on Climate Change</i> |
| <b>US EIA</b>  | Administração norte-americana de informação de energia / <i>United States Energy Information Administration</i>  |
| <b>US EPA</b>  | Agência Norte-americana de Meio Ambiente / <i>United States Energy Protection Agency</i>                         |
| <b>UTE</b>     | Unidade Termelétrica   |
| <b>V2G</b>     | Vehicle to Grid  |
| <b>VMC</b>     | Veículo Mono-combustível   |

## 1 -INTRODUÇÃO

O setor de transportes é um setor-chave para a gestão energética e será de suma importância para o esforço mundial de progressão em direção a uma economia de baixo carbono nos próximos anos. Atualmente, os transportes de passageiros respondem por 60% da demanda de energia no mundo. No setor de transportes como um todo, a demanda energética é atendida principalmente por derivados de petróleo, que compõem 93% desta demanda (IEA, 2015). A Figura 1-1 evidencia o consumo de energia final por subsetores de transporte, detalhando os fluxos de energia e as perdas do setor que chegam a cerca de dois terços da energia final demanda (IPCC, 2014).



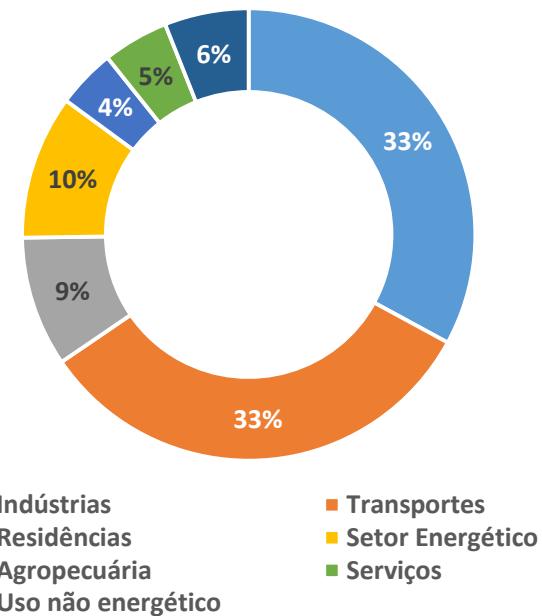
**Figura 1-1 – Consumo mundial de energia final segundo diferentes modais no setor de transportes, 2009**

Fonte: IPCC (2014)

Em termos de emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE), o setor é responsável por 14% das emissões mundiais. A perspectiva é que estas emissões passem dos atuais 6.7

GtCO<sub>2</sub>/ano para 9.3–12 GtCO<sub>2</sub>/ano em 2050. Grande parte destas emissões será atribuível ao transporte rodoviário em economias em desenvolvimento e emergentes (IPCC, 2014).

No Brasil, os resultados do Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2015) reafirmam a relevância do setor de transportes para o consumo de energia final no país. Conforme evidenciado na Figura 1-2, o setor é o maior consumidor de energia final, empatado com as indústrias. A tendência é que os transportes alcancem a primeira posição isolada, uma vez que o consumo energético neste setor vem apresentando franca expansão, com aumento de 5% ao ano nos últimos dez anos, comparado com os 2% de crescimento anual médio no setor industrial (MME/EPE, 2015).



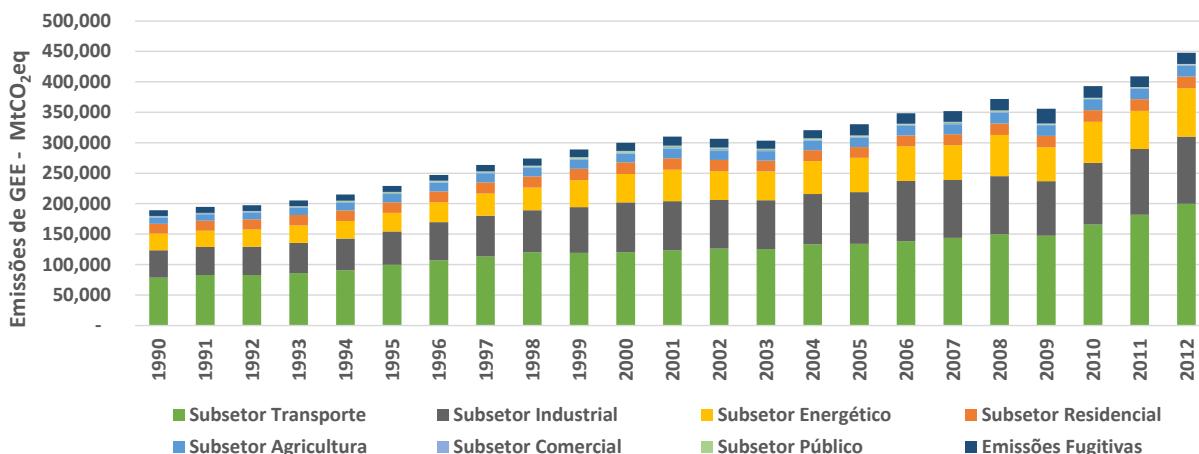
**Figura 1-2– Consumo de energia final no Brasil 2014**

Fonte: Elaboração própria com base em MME/EPE (2015)

Sob o ponto de vista de emissões de GEE, o setor de transportes representa quase a metade (47%) das emissões nacionais associadas ao setor de energia – ficando à frente da indústria –, e 17% das emissões totais do país. O transporte rodoviário, com uma emissão de 183 mil tCO<sub>2</sub>eq (toneladas de equivalente de dióxido de carbono), representa a quase totalidade das emissões do subsetor (MCTI 2014).

Conforme evidenciado na Figura 1-3, as emissões do subsetor de transportes estão entre as que mais crescem no setor de energia, com uma expansão anual média de 7% nos últimos 5

anos. Esta taxa de crescimento é apenas menor que a taxa do subsetor energético<sup>1</sup> cujas emissões aumentaram 8% ao ano nos últimos 5 anos (MCTI 2014).



**Figura 1-3– Emissões de GEE no setor energético - MtCO<sub>2</sub>eq**

Fonte: MCTI (2014)

No Brasil, os veículos leves respondem por cerca de 47% da demanda energética de transportes, resultando em 13% da demanda energética nacional total (MME/EPE, 2015).

Com a crescente importância do setor energético para as emissões nacionais (MCTI, 2014), e tendo ainda em vista as perspectivas de um aumento da população nacional e da renda percapita, o estudo das tendências de demanda de energia desta categoria revela-se fundamental para estratégia nacional de redução de emissões.

O documento mais recente que descreve a abordagem nacional para mitigação de emissões de GEE corresponde à pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada, ou INDC<sup>2</sup>, na sigla em inglês. Esse documento detalha os compromissos de redução de emissões de GEE propostos pelo país na vigésima primeira Conferência das Partes (COP 21) à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC<sup>3</sup> na sigla em inglês), em Paris. Na INDC, o país se compromete a reduzir suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025. Entre as ações citadas pela INDC para o cumprimento desta meta, duas concernem ao setor de transportes diretamente. Primeiramente, é proposto que a

<sup>1</sup> O subsetor energético compreende a indústria de geração de energia, sendo composto principalmente por usinas termelétricas.

<sup>2</sup> Intended Nationally Determined Contribution.

<sup>3</sup> United Nations Framework Convention on Climate Change.

participação da bioenergia renovável na matriz energética nacional seja elevada para 18% até 2030<sup>4</sup>. Para tanto, sugere-se a elevação da oferta de etanol – inclusive de segunda geração – e da participação de biodiesel no diesel. Em segundo lugar, propõe-se, de forma ampla a implementação de “medidas de eficiência, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas” (BRASIL 2015, p. 4).

Em Paris, o governo nacional consentiu em que as partes do Acordo de Paris tenham a obrigação de monitorar, relatar e verificar o seu progresso em direção ao cumprimento de seus compromissos de redução de emissões<sup>5</sup>. Após a ratificação e com a entrada em vigor do Acordo, as partes do acordo deverão estabelecer estratégias mais concretas para o cumprimento da meta assumida, incluindo o papel do setor de transportes nesta estratégia.

No contexto do desafio da transição para uma economia de baixo carbono, a eletrificação da frota de veículos vem sendo vista como uma medida promissora. Ainda que não seja diretamente citada na INDC brasileira, no Roteiro da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*), vislumbra-se uma introdução de veículos elétricos e plug-in híbridos tal que eles alcancem 50% das vendas de veículos leves em 2050 (IEA, 2011). A relevância atribuída a esses veículos no contexto de uma transição para uma economia de baixas emissões de GEEs está associada à maior eficiência de conversão energética que eles apresentam (IEA, 2011).

A maior eficiência dos veículos elétricos frente aos convencionais está principalmente associada ao fato de a eficiência de conversão no motor elétrico (isto é, da bateria para o motor) ser muito próxima de 100% enquanto, no motor a combustão interna, esta eficiência fica em torno de 30-40%. A análise da eficiência analisada sob o ponto de vista da transmissão de energia da bateria/do tanque de combustível para as rodas é comumente classificada como *tank-to-wheel*. Esta classificação se aplica também à análise de outras características de desempenho ambiental de veículos, como as emissões de GEE. No caso dos veículos elétricos, a tecnologia de geração da eletricidade que alimenta a bateria tem grande influência sobre os seus impactos energéticos e ambientais. Assim, uma análise sob o ponto de vista

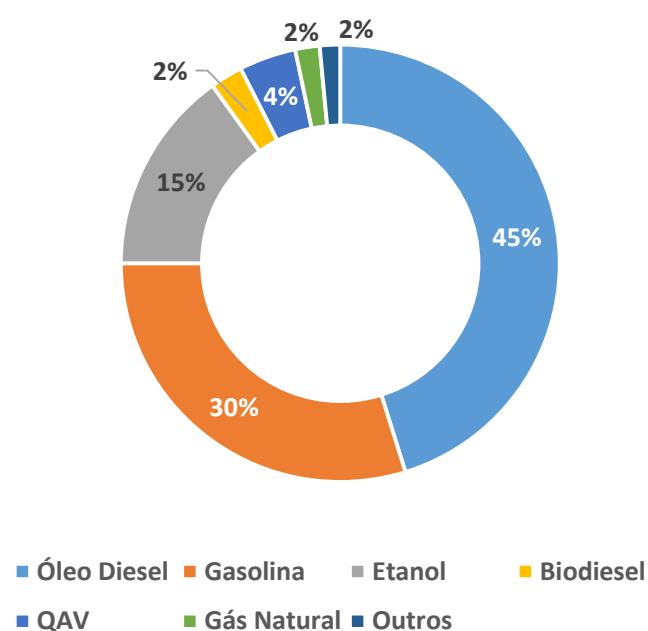
---

<sup>4</sup> Ainda que a meta seja estabelecida até 2025, a iNDc oferece valores indicativos para 2030.

<sup>5</sup> Cabe ressaltar que, sob o Acordo de Paris, o compromisso de redução de emissões é voluntário. Os incentivos do Acordo ao cumprimento das reduções propostas estão relacionados à transparência com relação ao progresso de cada país, por meio da obrigatoriedade de monitorar, relatar e verificar suas emissões periodicamente. Este formato objetiva incentivar um processo de “corrida para o topo” em que países competem pela maior mitigação voluntária, em oposição ao processo observado nas negociações passadas, em que países competiam pelo menor compromisso obrigatório.

da produção da fonte energética de propulsão do veículo, classificada como *well-to-wheel*, tem grande relevância quando se estuda estes veículos.

Conforme evidenciado na Figura 1-4, no Brasil, 17% da energia consumida no setor de transportes já é de origem renovável – principalmente etanol, mas também biodiesel. Além disto, ainda que a matriz elétrica brasileira seja predominantemente hidráulica atualmente, cenários de referência que projetam a composição da matriz elétrica nacional indicam uma progressiva entrada de fontes fósseis, principalmente do carvão e gás natural (Schaeffer *et al.*, 2015, Lucena *et al.*, 2015, Nogueira *et al.* 2014).



**Figura 1-4 – Matriz Energética de Transportes – 2014**

Fonte: Elaboração própria com base em MME/EPE (2015)

A entrada de veículos elétricos, ao mesmo tempo que aumentaria a demanda de energia elétrica, provocando uma maior entrada de fontes fósseis na matriz elétrica nacional, também reduziria a demanda por etanol, impactando a indústria sucroalcooleira. Dado esse cenário, a questão que se coloca é: sob que circunstâncias a entrada de veículos leves eletrificados é estratégica no contexto da transição para uma economia de baixo carbono?

O objetivo deste trabalho é responder a esta pergunta por meio da análise de como o setor energético responderia à entrada de veículos elétricos na frota de veículos leves nacionais. Primeiramente, foi realizada uma revisão dos cenários publicados em literatura nacional e internacional, a fim de se entender quais trajetórias possíveis de penetração de veículos

elétricos estão sendo consideradas. Em seguida, uma seleção dos cenários extraídos da literatura foi analisada em um modelo paramétrico de projeção de demanda *Long-range Energy Alternatives Planning* (LEAP) a fim de determinar aqueles que representam demandas máximas e mínimas de eletricidade e etanol pela frota de veículos leves. Os cenários mais extremos foram, então, rodados em um modelo integrado de otimização, o MESSAGE-Brasil, a fim de investigar como o setor elétrico, sucroalcooleiro e o setor energético como um todo reagem a estes cenários. Em especial, são investigados os impactos em termos de demanda de energia primária, matriz energética, matriz elétrica e emissões de gases de efeito estufa.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo esta Introdução. O capítulo 2 apresenta um panorama das características técnicas dos veículos leves estudados, bem como uma análise das interações dos veículos elétricos com o setor elétrico e sucroalcooleiro. No capítulo 3 são apresentados todos os cenários de penetração de veículos leves identificados na literatura. O capítulo 4, que descreve a metodologia deste estudo, é dividido em três partes: na primeira parte, as adaptações introduzidas nos cenários, de modo a adequá-los ao escopo tecnológico, temporal e geográfico do estudo, são apresentadas; na segunda, a metodologia do LEAP, bem como os parâmetros e premissas aplicados à projeção da demanda associada a estes cenários, são apresentados; na terceira parte, a metodologia, estrutura e premissas do MESSAGE-Brasil são descritas. O capítulo 5 apresenta e analisa os resultados de demanda de energia – estimados por meio do LEAP –, e de oferta de energia, estimados por meio do MESSAGE-Brasil. Por fim, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões que podem ser extraídas da análise dos resultados obtidos, bem como as limitações deste estudo e recomendações para estudos futuros.

## **2 - VEÍCULOS ELÉTRICOS: ASPECTOS TÉCNICOS E INTERAÇÕES COM SETORES ECONÔMICOS**

### **2.1 - Tecnologias de propulsão de veículos leves (VMCs, FFVs HEVs, BEVs, PHEVs)**

Este estudo pretende avaliar o impacto da penetração de veículos elétricos na frota de veículos leves sobre o setor de energia no Brasil. Portanto, cabe aqui oferecer um panorama do perfil das tecnologias de veículos estudadas. Cumpre ressaltar que, dado o foco sobre veículos leves, veículos a diesel não foram abarcados neste estudo. As tecnologias de propulsão de veículos estudadas são apresentadas no Quadro 2-1. Uma descrição detalhada destas tecnologias é apresentada logo a seguir.

**Quadro 2-1 – Categorias de veículos abordadas**

| Categoría  | Descrição   |
|--|---|
| <b>Veículo Convencional (MCI)</b>                      | Veículo convencionalmente comercializado, com motor a combustão interna (MCI) ciclo Otto. Abrange aqueles veículos que rodam apenas com gasolina ou apenas com etanol (denominados aqui como veículos mono-combustível ou VMC) e veículos dotados de tecnologia <i>flex fuel</i> (FFV). Os veículos ditos <i>flex</i> correspondem a veículos que funcionam com qualquer mistura de gasolina C (que já possui um certo teor de etanol anidro) e etanol hidratado. |
| <b>Veículo convertido a gás natural veicular (GNV)</b> | Veículo de qualquer tecnologia que foi convertido para utilizar gás natural veicular (GNV). Conforme se verá adiante, por simplificação, o presente estudo considera que apenas veículos flex são convertidos a GNV.  |
| <b>Veículo Híbrido (HEV)</b>                           | Veículo com dois motores, sendo um motor elétrico, alimentado por uma bateria elétrica, e um motor a combustão interna. A bateria do HEV é recarregável exclusivamente por meio do sistema de frenagem regenerativa. Até o momento, o dos veículos híbridos disponíveis no mercado admite unicamente gasolina pura ou gasolina C <sup>6</sup> .   |
| <b>Veículo Plug-in Híbrido (PHEV)</b>                  | Veículo híbrido, que também conta com um MCI a combustível líquido e um motor elétrico. A sua bateria, no entanto, é recarregável tanto via frenagem regenerativa quanto via conexão a um sistema elétrico.   |
| <b>Veículo Elétrico a bateria (BEV)</b>                | Veículo baseado em um motor elétrico, unicamente. O veículo é alimentado por uma bateria, que pode ser recarregada na rede elétrica local e também através de um sistema de frenagem regenerativa, que aproveita a energia liberada durante as frenagens.   |

Fonte: IEA (2011) e Doucette & McCulloch (2011).

### 2.1.1 - Veículos convencionais e veículos convertidos a GNV

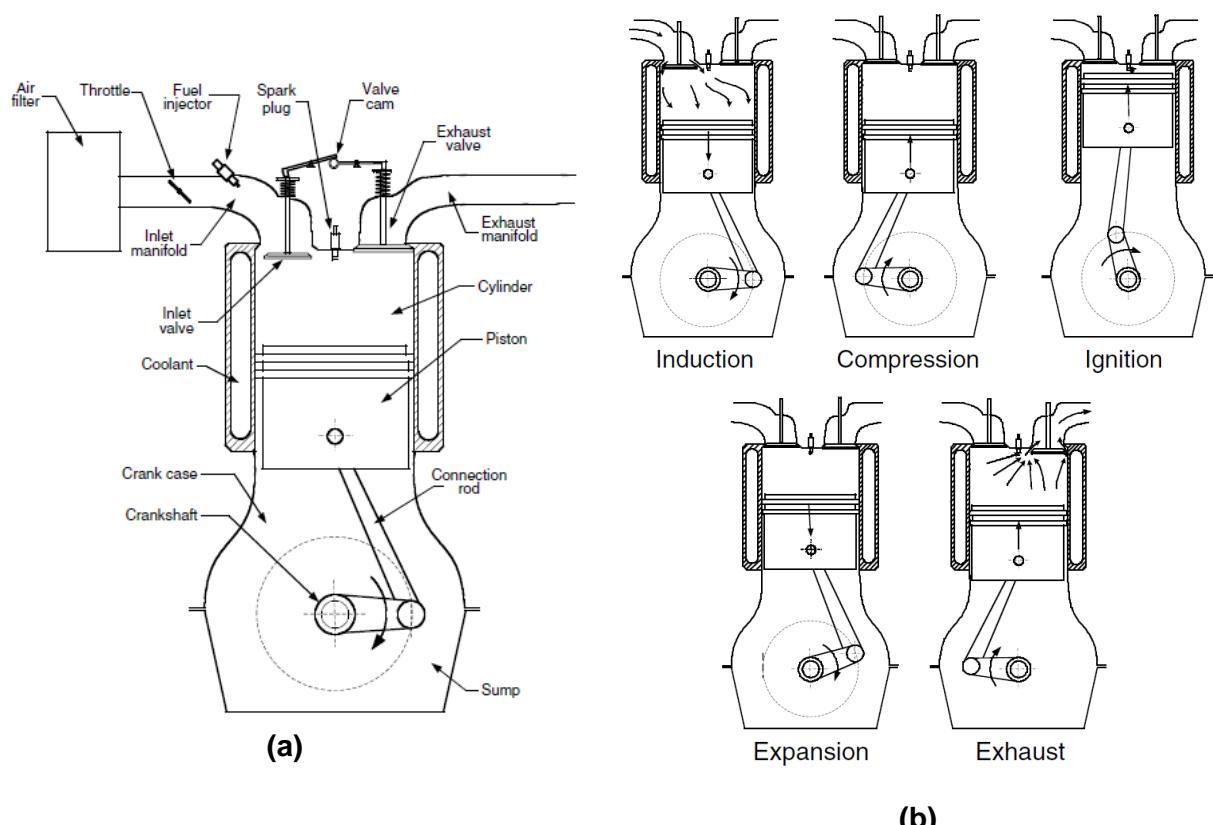
Os veículos ditos convencionais no presente estudo correspondem aos veículos dotados de um MCI. Esta categoria inclui os veículos que rodam apenas a gasolina ou apenas a etanol, denominados aqui de veículos mono-combustível (VMC), e veículos *flex fuel* (FFV). Quando estes veículos são convertidos a GNV eles são classificados neste estudos GNV apenas. Os MCIs operam realizando a queima do combustível, de modo a converter sua energia química em calor para gerar trabalho mecânico e, assim, propulsionar o veículo (Heywood 1988, Malfatti 2009 *apud* Rodrigues, 2012). Neste motor, o fluido de trabalho corresponde à mistura ar-combustível (antes da queima) e aos produtos da combustão (após a queima). Este motor difere dos demais motores pelo fato de a combustão ocorrer no mesmo local onde o trabalho mecânico é realizado (Heywood, 1988).

---

<sup>6</sup> Uma exceção é um modelo da Ford que roda com misturas de até 85% em volume de etanol na gasolina. Para mais informações, ver: [http://corporate.ford.com/dynamic/metatags/article-detail/flexible-fuel-hybrids-352p?cmp=ford\\_rss\\_tags%7CAlternative%20Fuels](http://corporate.ford.com/dynamic/metatags/article-detail/flexible-fuel-hybrids-352p?cmp=ford_rss_tags%7CAlternative%20Fuels). Último acesso em: 24 de setembro de 2014

O motor a combustão interna foi concebido na década de 1860 e J. J. E. Lenoir (1822-1900) foi o primeiro a desenvolver uma versão comercial desta tecnologia. Alguns anos mais tarde, Nicolaus A. Otto (1832-1891) e Eugen Langen (1833-1895) aprimoraram o MCI, introduzindo um ciclo de quatro tempos, ao invés de apenas dois<sup>7</sup>, melhorando sua eficiência energética. Estava criado o conceito fundamental do motor ciclo Otto tal qual o conhecemos atualmente. Nos anos seguintes e até os dias de hoje, inúmeros aprimoramentos foram feitos a este primeiro desenho, mas este conceito fundamental se manteve desde então (Heywood, 1988).

O motor ciclo Otto funciona movendo um pistão para cima e para baixo, que por sua vez transmite o trabalho mecânico para o eixo de transmissão. Os quatro tempos do motor ciclo Otto são: (1) admissão; (2) compressão; (3) expansão; (4) exaustão (Heywood, 1988). A Figura 2-1 ilustra o seu funcionamento.



**Figura 2-1 – Funcionamento do motor ciclo Otto<sup>8</sup>**

Fonte: Ehsani *et al.* (2004)

<sup>7</sup> Para mais detalhes sobre a operação do motor de dois tempos vide HEYWOOD (1988), pp 11-12, ou EHSANI, *et al.* (2004), pp.83-86.

<sup>8</sup> Na ilustração (b) são mostrados cinco tempos, e não quatro. Isto se deve ao fato de esta ilustração dividir a compressão e a ignição em dois subtempos, para fins didáticos.

Os quatro tempos de operação do motor são descritos em detalhe a seguir (Heywood, 1988):

1. **Admissão.** Nesta etapa o pistão inicia no topo do cilindro e termina no fim do cilindro, a fim de permitir a entrada da mistura ar-combustível dentro do cilindro. De modo a permitir o máximo de admissão, a válvula de admissão é aberta assim que esta etapa se inicia e fechar assim que ela termina.
2. **Compressão.** Uma vez que a válvula de admissão é fechada, a mistura ar-combustível dentro do cilindro é comprimida a uma pequena fração de seu volume original. Ao fim da etapa de compressão, a combustão é iniciada por meio de uma faísca e a pressão no cilindro se eleva rapidamente.
3. **Expansão.** No início da expansão, o pistão novamente se encontra no topo do cilindro e termina esta etapa inicia no fim do cilindro, conforme os gases em alta temperatura e alta pressão pressionam o pistão para baixo, provocando a rotação do eixo de transmissão. O trabalho realizado nesta etapa é cerca de cinco vezes superior ao trabalho realizado na etapa de compressão.
4. **Exaustão.** Nesta etapa, os gases de exausto são liberados, primeiro porque a pressão dentro do cilindro é superior à pressão dos gases de exausto. Em segundo lugar, porque, por inércia, o pistão seguirá se movimentando e irá “empurrá-los” para fora. Conforme o pistão se aproxima do topo do cilindro, a válvula de exaustão se abre. Assim que esta válvula se fecha, o ciclo se reinicia.

Uma vez que este ciclo se completa apenas uma vez a cada duas movimentações completas do pistão (i.e., para cima e para baixo), a operação de abertura e fechamento das válvulas de admissão e exausto deve ser operada por um sistema auxiliar, em uma velocidade 50% inferior à velocidade do motor. Assim, parte da energia mecânica gerada na etapa de expansão deve ser armazenada em um sistema auxiliar para alimentar as três etapas seguintes (Heywood, 1988).

Além disto, a energia gerada a cada ciclo deve ser suficiente para superar o atrito das partes móveis do motor e o arrasto e o atrito do veículo a uma dada velocidade. Dadas todas estas perdas, apenas 16-17% da energia química contida no combustível é aproveitada para propulsionar o veículo. (Gomez, 2015).

Os MCIs admitem gasolina, etanol, GNV e diesel. O tipo de motor descrito na Figura 2-1 corresponde ao motor com ignição via centelha. Existem também motores com ignição via

compressão. Neste caso, o diesel, em função de seu índice de cetano, é o combustível consumido (Heywood, 1988). Para os veículos convencionais, este estudo irá focar nos veículos com motores por centelha (ciclo Otto), uma vez que o escopo da análise é dos veículos leves<sup>9</sup>. Atualmente, o tipo mais comum de motor ciclo Otto no país é o dos veículos *flex fuel*, que admite gasolina C e etanol em qualquer proporção. A operação do MCI com dois combustíveis de propriedades físico-químicas distintas é possível por meio de um sensor capaz de ajustar o funcionamento do motor conforme a mistura (Gomez, 2015).

### 2.1.2 - Veículos elétricos

Veículos elétricos utilizam um motor elétrico para propulsão, e baterias químicas, pilhas a combustível, ultracapacitores ou sistemas armazenadores de energia cinética (*flywheel kinetic energy*) para alimentar o motor elétrico (Ehsani *et al.*, 2004). Existem veículos puramente elétricos – veículos acionados a bateria, ou BEVs – e também veículos que combinam a propulsão elétrica com motores tradicionais, chamados de veículos híbridos (HEVs) ou veículos híbridos plug-in (PHEV), a depender da forma de recarga da bateria. Estas três categorias de veículos elétricos (HEVs, PHEVs e BEVs) serão avaliadas no presente estudo. Não serão incluídos aqui os veículos acionados a pilhas a combustível, ultracapacitores ou por sistemas armazenadores de energia cinética, por serem estes ainda praticamente não estarem disponíveis comercialmente atualmente.

Os primeiros veículos eletrificados foram concebidos ainda na década de 1830, poucas décadas após Alessandro Volta (1745–1827) demonstrar a possibilidade de se estocar energia elétrica quimicamente em baterias. O primeiro veículo aplicando esta bateria foi um triciclo desenvolvido por Trouvé em 1881 (Hoyer, 2008). Entre 1880 e 1900, os veículos elétricos viveram uma época de ouro. Contudo, no início do século XX, os veículos elétricos competiam no mercado com os veículos com motor a vapor e com os veículos a gasolina (Hoyer, 2008). A partir da década de 1920, a primazia dos veículos a gasolina tornou-se clara e os veículos elétricos perderam força no mercado. Os motivos apontados para o sucesso dos veículos a gasolina (e o consequente ocaso dos veículos elétricos) são diversos. BORBA (2012) indica os seguintes fatores:

---

<sup>9</sup> Em alguns países, em especial na Europa, há uma tendência de aumento das vendas dos veículos leves com motor a diesel, dados os incentivos atuais (ACEA 2016). Contudo, no Brasil, os motores ciclo Otto seguem dominando o mercado de veículos leves de passageiros (i.e., não comerciais) (MMA 2014)

- A redução do preço final do veículo a gasolina (Ford T), a partir do desenvolvimento do sistema de produção em série, por Henry Ford;
- A invenção da partida elétrica, em 1912, que eliminou a necessidade da manivela para acionar os veículos com MCI
- A desenvolvida rede de rodovias dos EUA, que na década de 20 interligavam diversas cidades, demandava veículos capazes de percorrer longas distâncias
- A queda no preço da gasolina, viabilizada pelas descobertas de petróleo no Texas que reduziram o preço da gasolina, tornando-a um combustível atrativo para o setor de transportes.

Nos últimos anos, os veículos eletrificados vêm reganhando espaço, sendo vistos como uma alternativa viável para equacionar as questões de poluição atmosférica local e global e de uso de recursos não renováveis. As vantagens dos veículos eletrificados sobre os veículos convencionais incluem: maior eficiência, menores emissões no cano de descarga, menor ruído, maior conforto na direção, etc. (Ehsani *et al.*, 2004). A seguir, as três tecnologias de veículos elétricos abordadas neste estudo – HEV, PHEV e BEV – são descritas.

#### **a.1) Veículos elétricos híbridos (HEVs)**

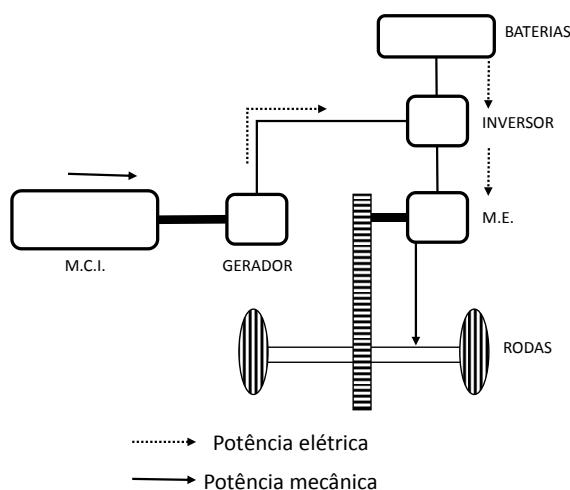
Via de regra, um veículo híbrido elétrico corresponde a um veículo que combina quaisquer duas fontes de energia para sua propulsão (Pollet *et al.*, 2012). Um veículo *elétrico* híbrido, por sua vez corresponde a um veículo que dispõe de um motor elétrico e de um motor mecânico (Ehsani *et al.*, 2004). A configuração mais típica, e que será considerada neste estudo, é aquela em que o motor mecânico corresponde ao motor a combustão interna<sup>10</sup>. No HEV, o motor elétrico é alimentado por uma bateria com capacidade suficiente para armazenar a eletricidade gerada pelo motor mecânico e pela frenagem regenerativa. Esta bateria fornece energia ao motor sempre que necessário, permitindo inclusive que o motor seja desligado a baixas velocidades (IEA, 2011).

Em sua operação mais típica, a bateria do veículo híbrido irá suprir energia para o motor elétrico na partida do veículo, a baixas velocidades e em momentos de aceleração, onde este

<sup>10</sup> Especificamente, este estudo irá concentrar-se nos HEVs providos de um motor ciclo Otto (i.e., cuja ignição se dá por faísca).

motor é capaz de oferecer um alto torque. O MCI, que é apenas capaz de oferecer um baixo torque a baixas velocidades, é acionado apenas a velocidades maiores, ou quando o veículo requer uma maior aceleração ou mais energia para carregar a bateria. Esta configuração permite que o MCI seja utilizado apenas em seu ponto ótimo e desligado em sinal de trânsito ou em situações de tráfego intenso, onde a sua eficiência é tipicamente mais baixa. Em função disto, o veículo híbrido tende a ser mais eficiente que seu equivalente convencional (Poullikkas, 2015).

De modo geral, existem três configurações possíveis para os veículos híbridos: híbridos em série, híbridos em paralelo e híbridos mistos. Cada uma destas configurações é descrita a seguir.



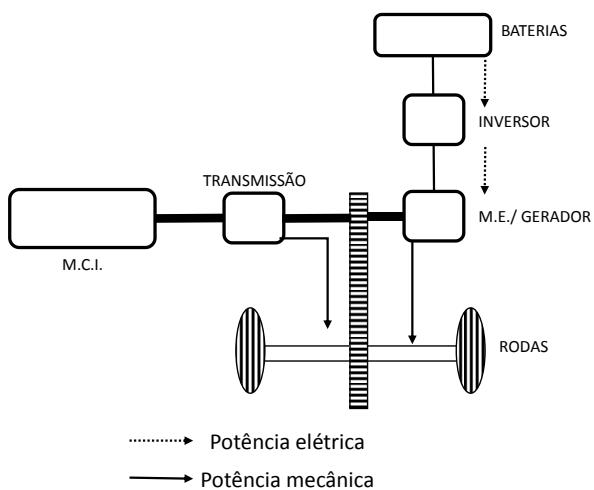
**Figura 2-2 – Veículos híbridos em série**

Fonte: Adaptado de Melo, Kronemberger e Siqueira (2004) *apud* Simon (2013)

Os veículos híbridos em série correspondem à configuração mais simples desta tecnologia e podem ser também denominados extensores de autonomia. Conforme ilustrado na Figura 2-2, nos híbridos em série, a energia mecânica fornecida pelo MCI é convertida em energia elétrica, por meio de um gerador e pode alimentar tanto o motor elétrico diretamente como ser utilizada para recarregar a bateria. Além disto, a bateria do HEV pode ser recarregada por meio de sistema de frenagem regenerativa, que reaproveita a energia dispersada na frenagem (Liao *et al.*, 2004 *apud* Simon, 2013). Dado que o MCI é aplicado apenas para carregar a

bateria, isto permite que o HEV tenha um motor menor e um conjunto de baterias maior<sup>11</sup> (Friedman, 2003).

Outra vantagem da configuração em série é que ela permite que o MCI opere no seu ponto ótimo continuamente, a qualquer velocidade, uma vez que este motor serve unicamente como a fonte de carga da bateria e não possui ligação mecânica direta com as rodas. (Pollet et al., 2012). Isto faz com que o HEV em série seja especialmente vantajoso para ciclos de direção de baixa velocidade, ou caracterizado por paradas constantes (e.g. condução urbana). Todavia, cabe ressaltar que este sistema apresenta baixo desempenho a altas velocidades. Assim, ele tende a ser mais indicado para veículos de grande porte, como por exemplo o ônibus ou para condução em ambientes urbanos. Cabe ressaltar ainda que configuração em série requer uma combinação de equipamentos – o motor elétrico, o transformador e o gerador – operando conjuntamente. Isto torna a eficiência conjunta dos equipamentos inferior à das demais configurações (Borba, 2012).



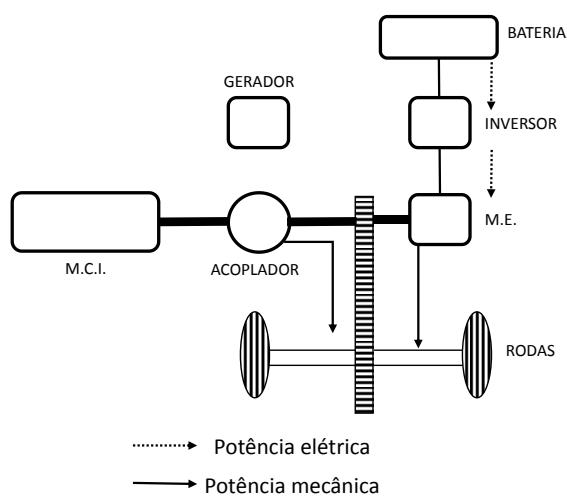
**Figura 2-3 – Veículos híbridos em paralelo**

Fonte: Adaptado de Melo, Kronemberger e Siqueira (2004) *apud* Simon (2013)

Na configuração em paralelo, a fonte de energia que propulsiona o veículo pode fluir por duas vias alternativas: pelo motor elétrico ou pelo motor mecânico. Em geral, ambos os motores se encontram conectados ao sistema de transmissão às rodas (Pollet et al., 2012). Deste modo, quando o nível de carga da bateria se encontra elevado, o veículo pode ser propulsionado por

<sup>11</sup> Dado que as baterias correspondem a uma das peças mais caras do veículo elétrico, isto faz com que este tipo de HEV seja mais caro que os demais (Friedman 2003).

qualquer um destes motores de forma independente ou por ambos simultaneamente. Quando o nível de carga da bateria do veículo encontra-se baixo, o veículo pode operar apenas com o motor mecânico (Sabri *et al.*, 2015). Nestes casos, quando a energia fornecida pelo MCI for superior à necessária para movimentar o veículo, seu torque servirá também para recarregar a bateria (Borba, 2012). No caso do híbrido em paralelo, a bateria também pode ser carregada por meio do sistema de frenagem regenerativa. Em comparação com o híbrido em série, a configuração em paralelo requer menos aparatos – e.g. dispensa o gerador – e permite um menor dimensionamento do conjunto MCI/motor elétrico (Pollet *et al.*, 2012, Borba, 2012).



**Figura 2-4 – Veículos híbridos mistos**

Fonte: Adaptado de Melo, Kronemberger e Siqueira (2004) *apud* Simon (2013)

Por fim, a configuração mista (também conhecida como série-paralelo) combina as duas configurações anteriores de modo a maximizar os benefícios do híbrido em série e do híbrido paralelo. Neste sistema, tanto o MCI quanto o motor elétrico estão conectados à transmissão, tal qual o híbrido paralelo. Contudo, nos momentos em que o HEV opera em baixa rotação, o sistema permite que o MCI se desconecte da transmissão de modo a fornecer energia para a bateria do motor elétrico, tal qual no híbrido em série (Simon 2013, Borba, 2012). Com isto, o motor pode operar no seu ponto ótimo mais frequentemente. Já quando o veículo requer velocidades mais elevadas, o MCI pode ser reconectado, evitando-se assim as perdas decorrentes das progressivas conversões do HEV em paralelo (i.e., conversão da energia mecânica do MCI para energia elétrica, que será então estocada em uma bateria para finalmente suprir eletricidade ao motor elétrico quando necessário). A eficiência do HEV misto, portanto, tem o potencial de superar tanto o HEV em paralelo quanto o HEV em série. Contudo, esta configuração herda do híbrido em série os custos mais elevados associados

ao conjunto de baterias, que é maior que no caso do HEV paralelo. O Toyota Prius, um dos mais híbridos mais emblemáticos do mercado, aplica a tecnologia mista (Friedman, 2003).

### **a.2) Veículos elétricos híbridos plug-in**

Os veículos *plug-in* diferem do HEV pelo fato de admitirem que a recarga da bateria seja feita externamente, por meio de uma rede de fornecimento de eletricidade. Assim, também nestes veículos existem duas fontes propulsoras, o MCI e o motor elétrico, e também nestes veículos um sistema de frenagem regenerativa permite converter a energia cinética dispersa na frenagem em energia elétrica. Contudo, o conjunto de baterias nos PHEVs tende a ser maior que nos HEVs, mas menor que no caso dos veículos elétricos a bateria (BEVs) (Borba, 2012). Diferentemente dos HEVs, que costumam operar de modo a manter a carga da bateria aproximadamente constante, os PHEVs podem operar em ciclos de descarga e recarga profundas da bateria. Além disto, uma vantagem dos PHEVs em relação aos BEVs reside em sua autonomia, a qual, dada a presença do MCI é maior que no caso dos BEVs. A autonomia da bateria dos PHEVs disponíveis no mercado hoje varia tipicamente entre 30km – 100km (Borba, 2012). A nomenclatura do PHEV evidencia estas diferenças, com PHEV20 indicando PHEVs cuja autonomia com bateria é de 20 quilômetros, e PHEV80 indicando PHEVs cuja autonomia com a bateria é de 80 quilômetros (IEA 2011).

Existem diferentes modos de gerenciamento da energia dos PHEVs, que determinam não apenas a fonte de energia de tração, como também as vias que estas fontes utilizam para ativar as rodas. Alguns exemplos de modos de gerenciamento de energia incluem o modo de sustentação de carga, o modo de depleção de carga, o modo veículo elétrico a bateria e o modo MCI (Bradley e Frank, 2009). Estas tipologias de gerenciamento são detalhadas a seguir.

**Modo de sustentação de carga.** Neste modo, o nível de carga da bateria é controlado para permanecer em uma margem estreita de operação. Conforme destacado previamente, este é o modo em que os HEVs operam tipicamente. Uma vez que o nível de carga da bateria não se altera significativamente, o combustível líquido para o MCI é a principal fonte de energia de propulsão do PHEV (Bradley e Frank, 2009). Neste modo, o estado de carga é mantido em um nível mínimo tal que se evite danos ou reduções à vida útil da bateria (Borba, 2012).

**Modo de depleção de carga.** Conforme o nome sugere, neste modo, o veículo opera em ciclos profundos de descarga da bateria. O motor do veículo pode ou não estar operando, mas ao menos uma parte da energia de propulsão do PHEV estará sendo fornecida pela

bateria (Bradley e Frank 2009, Amjad *et al.*, 2010). Usualmente, PHEVs possuem uma autonomia de 30 a 100 quilômetros no modo depleção de carga. Cabe ressaltar que neste modo, o desgaste da bateria é maior que nos demais, de modo que seu ciclo de vida chega a, no máximo, 5.000 ciclos de carga e descarga (Borba, 2012).

**Modo veículo elétrico a bateria.** Neste modo, o MCI é impedido de tracionar o veículo e toda a energia de propulsão da bateria é fornecida pelo motor elétrico, a partir da bateria. Uma vez que a bateria é a única fonte de energia fornecida à operação do veículo, o nível de carga é reduzido ao longo do tempo (Bradley e Frank, 2009).

**Modo MCI.** Neste modo, a operação do sistema de tração elétrico é significativamente limitada e não fornece tração ao PHEV, de modo que ele opera de forma muito próxima a um veículo convencional (Bradley e Frank, 2009).

A seleção entre estes diferentes modos de gerenciamento de energia pode ser realizada de forma automática, de acordo com o nível de carga, a velocidade do veículo, a velocidade de rotação e o torque do MCI, temperatura externa, temperatura da bateria, dentre outros (Bradley e Frank, 2009).

A forma pela qual um PHEV seleciona cada um destes modos para operação varia consideravelmente. Contudo, um design comum aquele em que o PHEV opere inicialmente em modo de depleção de carga, para posteriormente mudar para o modo de sustentação de carga, quando a bateria atinge um nível mínimo pré-determinado (Amjad *et al.*, 2010). Este tipo de operação é denominado combinado (*blended*). Outro tipo de operação inclui a operação em extensão de autonomia (*range extender*), em que o PHEV opera em modo BEV (e não em depleção de carga) e muda para o modo de sustentação de carga uma vez que dado nível mínimo de carga da bateria é atingido. Há também a opção de operação na zona verde (*greenzone*), na qual o PHEV opera continuamente em modo de sustentação de carga, mas pode ser manualmente alterado pelo condutor quando, por exemplo, o veículo adentra uma região onde há controle de emissões veiculares (Bradley e Frank, 2009).

### **a.3) Veículos elétricos a bateria (BEV)**

Nos veículos a bateria, toda a propulsão do veículo é realizada por meio do motor elétrico, alimentado pelo conjunto de baterias. A bateria dos veículos elétricos é recarregada principalmente a partir da eletricidade da rede elétrica, mas também por meio da frenagem regenerativa.

Esta configuração apresenta vantagens e desvantagens. As vantagens destes veículos correspondem à emissão zero de GEEs e de poluentes locais, sob o ponto de vista tank-to-wheel, e à baixa emissão de ruído (IEA, 2009). Há também a vantagem de os BEVs serem mais leves que os HEV e os PHEVs, por dispensarem o conjunto de equipamentos dos veículos MCI (IEA 2011). Por outro lado, uma vez que seus motores são propulsionados exclusivamente pelas baterias, os BEVs exigem um conjunto de baterias muito maior que os PHEVs a fim de garantir uma autonomia razoável. Ainda assim, o BEV oferece uma vantagem considerável em termos de eficiência: seu consumo de energia por quilômetro rodado chega a ser três vezes menor que de um MCI e até duas vezes inferior ao consumo de energia no HEV (IEA 2011). Por outro lado, uma das maiores desvantagens dos veículos elétricos a bateria corresponde à sua baixa autonomia. A tecnologia atual para bateria de veículos elétricos permite uma autonomia de 20 a 160 km por carga, enquanto que os veículos convencionais apresentam uma autonomia de aproximadamente 500 km (IEA 2011, Borba, 2012).

A bateria dos veículos elétricos opera tipicamente em modo de depleção de carga, de modo que seu estado de carga varia entre 100% e 20%. Dada a ausência de um sistema de propulsão auxiliar (como ocorre nos PHEVs), estes veículos nunca operam em modo de sustentação de carga. Tipicamente, a capacidade da bateria de um BEV é superior à de PHEVs e HEVs, chegando a mais de 40kW (condizente com uma autonomia de 160 km). Estas baterias são capazes de operar mais de 1.000 ciclos de descarga profunda (Borba, 2012).

A estrutura dos BEVs é formada por três componentes: o sistema de propulsão, o sistema da bateria e o sistema auxiliar. O sistema de propulsão do motor elétrico é composto pelo sistema de controle do veículo, pelo conversor eletrônico de potência, pelo motor elétrico em si e pela transmissão. O sistema da bateria é formado pelas baterias, pelo sistema de gerenciamento das baterias e pela unidade de carga. Por fim, o sistema auxiliar é composto pelo sistema de aquecimento/refrigeração, pelas bombas eletrônicas e por outros equipamentos eletrônicos auxiliares (Pollet et al., 2012).

O princípio de operação do BEV é razoavelmente simples. Os pedais de aceleração e freio fornecem sinais para o sistema de controle, que por sua vez fornece sinais de controle ao conversor eletrônico de potência, que funciona de modo a regular o fluxo de energia entre o motor elétrico e a bateria. O motor elétrico também pode operar como um gerador, convertendo a energia mecânica da frenagem em energia elétrica para alimentar a bateria. A

unidade de gestão de energia, em conjunto com o sistema de controle, opera para assegurar a recuperação da energia na frenagem regenerativa. (Pollet et al., 2012)

Dada tal simplicidade do sistema, os BEVs dispensam uma série de equipamentos associados aos MCIs, tais como a caixa de marcha, o motor de arranque, o escapamento e o catalizador (associados ao sistema de exaustão), o radiador, a bomba d'água (associados ao sistema de arrefecimento), dentre outros (Borba, 2012). Além disto, tipicamente, os BEVs são construídos sobre plataformas de veículos subcompactos, que costumam ser mais leves, favorecendo, assim, uma maior autonomia destes veículos (Schmitt, 2010).

## **2.2 - Descrição das interações de veículos elétricos com demais setores da economia**

Conforme já destacado, o presente estudo visa investigar os impactos da entrada dos veículos elétricos sobre o perfil de consumo de combustíveis nos demais setores da economia. A fim de subsidiar esta análise, apresenta-se a seguir um panorama da interação dos veículos elétricos com o sistema elétrico como um todo; do papel do *smart grid* e, em particular do *vehicle-to-grid* na integração destes veículos com um sistema elétrico progressivamente mais renovável e; uma análise dos possíveis impactos da entrada de veículos elétricos sobre o setor sucroalcooleiro.

Cabe destacar que um setor que potencialmente seria impactado por uma ampla penetração de veículos elétricos seria o setor de refino, uma vez que se pode esperar que a disseminação de veículos elétricos provoque uma redução na demanda de gasolina. Contudo, dada a alta complexidade associada a este setor – i.e uma ampla gama de produtos associada a cada tipo de óleo, cada perfil de refinaria, as possibilidades de importação/exportação, etc. – fez com que se considerasse esta análise como demasiado extensa para o escopo deste estudo.

### *2.2.1 - Veículos elétricos e o sistema elétrico*

Um dos pontos centrais para a análise da interação dos veículos eletrificados com demais setores do sistema energético é investigar as interações entre estes veículos e o sistema elétrico. A IEA, no World Energy Outlook 2010 (2012), sugere que ainda que a demanda total de eletricidade por veículos elétricos possa ser pequena em relação à carga total (especialmente no curto prazo), seu impacto sobre a carga de pico, provocado pela

preferência de motoristas pela carga durante a noite, poderá ser representativo. De acordo com SIMON (2013), à medida em que os veículos elétricos atinjam uma maior disseminação na frota nacional, será necessário que concessionárias de distribuição de eletricidade se adaptem a um novo tipo de carga que apresenta características de uma alta demanda de energia no horário de pico do sistema.

As características das baterias dos veículos eletrificados, que constituem o elo de ligação entre o veículo e o setor elétrico (Borba, 2012), e os tipos de recarga aplicados, são tópicos chave para se entender esta interação.

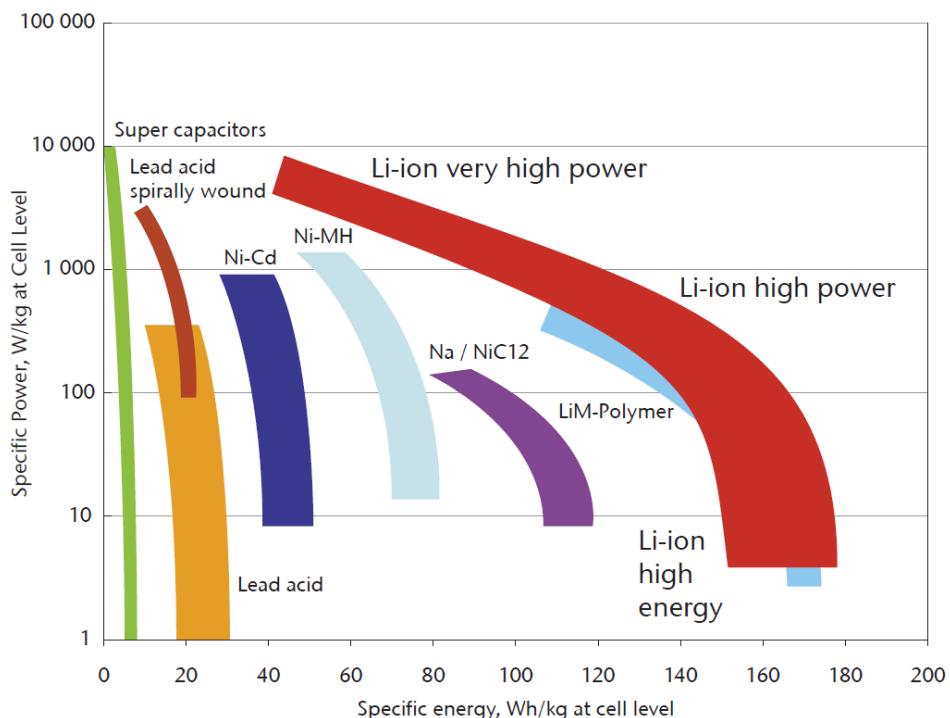
Uma bateria corresponde a uma célula eletroquímica que transforma energia química em eletricidade (Pollet et al., 2012). Conforme já destacado, em um veículo elétrico, as baterias são responsáveis por armazenar a eletricidade provida pelo sistema elétrico e disponibilizá-la ao veículo sempre que necessário. Existem diversas tecnologias de baterias, que diferem principalmente em termos de energia específica (Wh/kg) e potência específica (W/kg). Outros parâmetros relevantes incluem a vida útil (medida em quantidade de ciclos de carga/descarga), custo, tensão e tempo mínimo de recarga (Valsera-Naranjo, 2009). Atualmente, as principais tecnologias de baterias utilizadas em veículos elétricos correspondem às baterias a hidreto metálico de níquel (*Ni-Mh*) e às baterias a íon de lítio (*Li-ion*) (Pollet et al., 2012).

As baterias a hidreto metálico de níquel começaram a ser utilizadas mais amplamente a partir de 2012, substituindo as baterias chumbo ácidas (*Pb*) nos veículos híbridos (Borba, 2012). Estas baterias apresentam a vantagem de ser mais seguras tanto do ponto de vista da produção quanto do uso. Além disto, seu design é mais flexível (permitem cargas de 30 mAh a 250 Ah), elas são mais ambientalmente aceitáveis, demandam pouca manutenção, apresentam alta densidade de potência e energia e seu custo tende a ser menor (Pollet et al., 2012).

Contudo, atualmente, as baterias mais promissoras para o mercado de veículos elétricos são as de íon de lítio (*Li-ion*), dada sua energia e potência específicas e sua vida útil, mais longa que a das demais baterias (IEA 2011). Por outro lado, as desvantagens da bateria *Li-ion* incluem seu maior impacto ambiental, a menor disponibilidade de recursos (e.g. lítio) e aspectos relacionados à segurança (Pollet et al., 2012). Adicionalmente, economicamente, estas baterias ainda permanecem pouco atrativas. Atualmente, o custo das baterias *Li-ion* por quilowatt hora de energia útil é de cerca de USD 500-650, compondo grande parte do custo do veículo (EVI, 2013). Contudo, com base em esforços de pesquisa, desenvolvimento e

Inovação (PD&I) focados no aprimoramento desta tecnologia, bem como com ganhos de escala na produção, acredita-se ser possível que estas baterias se tornem mais competitivas nos próximos anos (Hensley *et al.*, 2012, Gerssen-Gondelach e Faaij, 2012, EVI, 2013).

A Figura 2-5 apresenta diferentes tipos de bateria segundo a energia e a potência específicas de cada tecnologia.



**Figura 2-5 – Energia específica e potência específica de diferentes tipos de baterias**

Fonte: IEA (2011)

Enquanto PHEVs requerem uma bateria que otimize a armazenagem de energia, os BEVs requerem baterias que apresentem uma maior densidade de energia. Com isto, a capacidade de armazenamento de energia das baterias destes veículos varia entre 5-15 kWh para PHEVs e 25-40 kWh para BEVs (Broussely, 2010). Em ambos veículos pode-se esperar a presença de ciclos mais profundos de descarga, ainda que em PHEVs existam também ciclos mais “superficiais” uma vez que estes dispõem de um MCI. Dadas estas diferenças entre perfis de PHEVs e BEVs é possível que os esforços de PD&I culminem no estabelecimento de duas tecnologias distintas de baterias. (IEA 2011).

A recarga das baterias dos veículos pode ser feita de forma indutiva ou condutiva. A carga condutiva é feita por meio de uma conexão física entre a rede e a bateria dos veículos. Por sua vez, a recarga indutiva é realizada através de indução eletromagnética em um processo

de transferência de energia semelhante a um transformador de potência. A recarga condutiva é a mais amplamente utilizada atualmente (Simon, 2013). Ademais, os tipos de recarga podem ser divididos em três níveis: recarga lenta, rápida e ultra-rápida.

A recarga lenta (em 1-CA) é feita em tomadas residenciais padrão, de modo que a tensão de carga varia entre os países (García-Villalobos *et al.* 2014). No Brasil, existem dois padrões de tensão para a distribuição secundária de corrente alternada trifásica em redes públicas: 380/220 e 220/127 V (Brasil, 1988). De acordo com Borba (2012), este tipo de recarga pode ser suficiente para um grande número de proprietários de PHEVs<sup>12</sup>. Contudo, BEVs requereriam recargas adicionais ou mais potentes, de modo que a presença de uma frota significativa de BEVs requereria uma infraestrutura pública de recarga, possivelmente de recarga rápida.

A recarga rápida (em 3-CA) requer uma tensão maior que as tomadas residenciais padrão, mas ainda pode ser instalada em residências, bem como em áreas comerciais. Sistemas de distribuição trifásicos são necessários e a potência de recarga pode atingir entre 10 e 20 kW (García-Villalobos *et al.* 2014). Esta forma de recarga requer algumas adaptações na rede de distribuição de eletricidade, como mudanças de cabos, disjuntores e aterramento (Borba, 2012).

Por fim, na recarga ultra-rápida (em 3-CA ou CC), é necessária a utilização de carregadores externos, em função do tamanho dos carregadores e também dos equipamentos necessários para arrefecimento dos eletrônicos integrados. Neste tipo de recarga, a potência pode atingir 50 kW ou mais (García-Villalobos *et al.* 2014). O nível de potência associado à recarga ultra-rápida está além da capacidade de transformadores residenciais e de alguns transformadores de áreas comerciais. Assim, a instalação deste tipo de ponto recarga tipicamente requer reforços na rede de elétrica da região (Borba, 2012). A recarga ultra-rápida é adequada a situações em que se torna necessário estender a autonomia dos veículos eletrificados em trânsito, ou em caso de emergência, onde o fator tempo é central (García-Villalobos *et al.* 2014).

Cabe ressaltar que a recarga ultra-rápida implica perdas adicionais em relação aos demais tipos. De acordo com Pollet *et al.* (2012), um veículo do modelo Mitsubishi i-MiEV, ao ser

---

<sup>12</sup> Considerando-se 127 V, uma corrente de 15 A e um fator de potência unitário, a potência máxima de recarga chegaria a 1.9 kW (Borba 2012). De acordo com García-Villalobos, et al. (2014), nos Estados Unidos, a potência de recarga atinge 3.7 kW (230 V e 16 A).

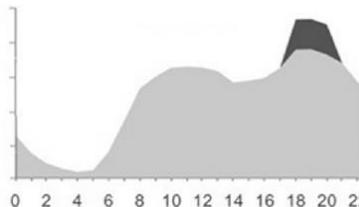
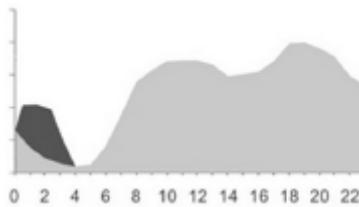
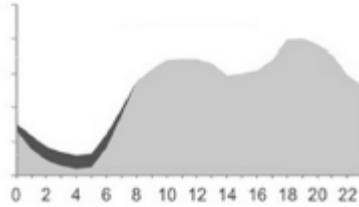
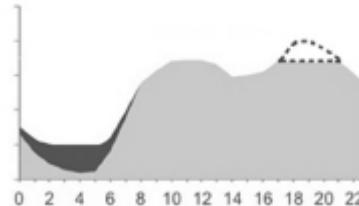
recarregado em uma tomada caseira comum apresenta perdas de cerca de 10%, enquanto que a sua recarga em potências de cerca de 50 kW (condizente com uma recarga ultra-rápida) pode implicar perdas de até 40%, em função da energia dispendida para arrefecer a bateria.

Conforme já destacado, uma ampla penetração de veículos elétricos tenderá a gerar impactos relevantes sobre os sistemas elétricos. Alguns dos possíveis problemas para a rede elétrica incluem: perda de tensão, aumento nas perdas de potência, sobrecarga de transformadores e linhas de transmissão e distribuição, dentre outros (García-Villalobos *et al.* 2014). Por exemplo, VLIET *et al.* (2010) estimam que uma penetração de veículos elétricos que alcance 30% da frota elevaria em 7% o pico de carga do sistema elétrico como um todo, e em 54% o pico de carga de domicílios. Este incremento poderia exceder a capacidade da infraestrutura de distribuição de eletricidade, exigindo adaptações ao sistema.

Dados estes impactos, situações em que há perspectivas de alta penetração de veículos requerem um planejamento da integração destes veículos ao sistema, a fim de introduzir controles com relação ao momento em que a recarga irá ocorrer. Sistemas de recarga inteligente (*smart-grid*) permitem que usuários e operadores da rede estabeleçam padrões de recarga de modo a otimizar os benefícios econômicos e técnicos que não sobrecarreguem o sistema (García-Villalobos *et al.* 2014). Por exemplo, pode-se estabelecer um sistema no qual o veículo conectado à rede apenas será carregado quando a carga dos transformadores estiver abaixo de determinado nível (Shao *et al.*, 2009). De acordo com VLIET *et al.* (2010), a introdução de sistemas em que o veículo seja recarregado fora do horário de pico de carga pode permitir que a entrada de novos veículos dispense a adição de capacidade de geração no sistema.

Um resumo das principais vantagens e desvantagens de um sistema de recarga sem controle e de três sistemas de recarga inteligente é apresentado no Quadro 2-2.

**Quadro 2-2 - Vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de integração de veículos elétricos**

|   | Vantagens   | Desvantagens   |
|---|---|--|
| Recarga não controlada                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples implementação</li> <li>• Simples para o usuário</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrecarga de transformadores e linhas</li> <li>• Desvios de voltagem</li> <li>• Elevação da carga de pico</li> <li>• Elevação da intensidade de CO<sub>2</sub></li> <li>• Elevação do custo da eletricidade</li> <li>• Necessidade de reforçar a rede</li> </ul>   |
| Recarga fora de pico                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples implementação</li> <li>• Achatamento do perfil de carga</li> <li>• Maior integração de fontes renováveis intermitentes e estocásticas</li> <li>• Postergação de investimentos na rede</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desbalanceamento em função do rápido aumento da demanda de eletricidade consumida por veículos</li> <li>• Possível sobrecarga de transformadores e linhas</li> <li>• Possíveis perdas de tensão</li> <li>• Requer participação do usuário</li> </ul>  |
| Recarga inteligente (preenchimento do vale)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Provisão de serviços auxiliares</li> <li>• Achatamento do perfil de carga</li> <li>• Maior integração de fontes renováveis intermitentes e estocásticas</li> <li>• Postergação de investimentos na rede</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementação mais complexa</li> <li>• Necessidade de sistemas de tecnologias da informação (TI)</li> <li>• Requer participação do usuário</li> </ul>   |
| Recarga inteligente (economia no pico de carga) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Provisão de serviços auxiliares</li> <li>• Redução do pico de carga</li> <li>• Integração ótima de fontes renováveis intermitentes e estocásticas</li> <li>• Redução da intensidade de CO<sub>2</sub></li> <li>• Menos investimentos no reforço da rede</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementação muito complexa</li> <li>• Necessidade de sistemas de tecnologias da informação (TI)</li> <li>• Requer participação do usuário</li> <li>• Degradação prematura de baterias em função do fornecimento de energia para a rede (V2G)</li> <li>• Perdas de energia em transmissões entre a rede e a bateria nos dois sentidos</li> </ul> |

Fonte: García-Villalobos *et al.* (2014)

Conforme sugerido no Quadro 2-2, sistemas de recarga inteligente permitem não somente a otimização no fornecimento de eletricidade do grid para o veículo, como também que os veículos também funcionem como sistemas distribuídos de armazenagem e geração de eletricidade, mecanismo conhecido como *vehicle-to-grid* (V2G). De modo geral, no V2G, a bateria do veículo pode armazenar eletricidade em momentos de excesso de oferta, e suprir esta eletricidade estocada para o sistema em momentos de pico de demanda (IEA, 2012).

Segundo Borba (2012), diversos estudos (Sovacool e Hirsh, 2009, Kempton e Tomic, 2005, Kempton *et al.*, 2001, Kempton e Kubo, 2000, Kempton e Letendre, 1997) apontam que o V2G é menos adequado para a geração de base, mas pode apresentar vantagens significativas para a geração de ponta, reserva girante e serviços de regulação. Deste modo, o V2G pode auxiliar no atendimento do pico de carga e prestar assistência aos operadores de redes, por exemplo, mantendo a confiabilidade e normas de funcionamento do sistema. Tanto BEVs quanto PHEVs poderiam servir ao V2G.

Estas propriedades tornam o V2G especialmente interessante para acomodar uma entrada representativa de fontes renováveis intermitentes e estocásticas. A seção a seguir apresenta as particularidades desta integração.

#### *2.2.2 - O papel do smart grid e V2G na integração de veículos elétricos e fontes renováveis de eletricidade*

No Brasil e no resto do mundo, as fontes renováveis de eletricidade terão um papel central nos esforços de mitigação das emissões de GEE. Uma das principais barreiras à penetração de algumas das principais fontes renováveis de eletricidade, tais como a energia eólica, solar ou das marés, corresponde à insegurança que estas impõem ao sistema. A geração de eletricidade a partir destas fontes depende da disponibilidade de vento e da incidência solar, recursos não estocáveis e cuja previsibilidade é estocástica. Isto implica que o padrão de oferta de eletricidade ao longo de determinado período dificilmente coincidirá perfeitamente com o padrão de demanda (Denholm e Hand 2011, Wilson *et al.* 2011).

Cabe ressaltar que este perfil não abrange todas as fontes renováveis de eletricidade. Hidrelétricas com reservatório e de termelétricas a biomassa, por exemplo, correspondem a tecnologias de geração de eletricidade mais flexíveis, passíveis serem aplicadas para atender grandes variações de demanda de carga. Assim, algumas dessas tecnologias permitem um melhor ajuste entre a oferta e a demanda de eletricidade (Lucena, 2010). Por outro lado,

tecnologias de geração eólica ou solar (e.g. fotovoltaica ou concentradores solares – CSP) são tipicamente caracterizadas como fontes variáveis ou intermitentes.

Uma das alternativas atualmente disponíveis para mitigar este descasamento entre a demanda e a oferta de fontes renováveis de eletricidade é a introdução de tecnologias de estocagem de eletricidade (Wilson *et al.* 2011). Tecnologias de geração de eletricidade incluem estocagem via bombeamento de energia hidrelétrica (*pumped hydroelectric energy storage*), estocagem via ar comprimido, sistema armazenador de energia cinética (*flywheel kinetic energy*), além de tipos diversos de baterias (Ferreira *et al.*, 2013).

Neste contexto, o V2G vem emergindo como uma alternativa para a estocagem da eletricidade de fontes renováveis. Conforme já destacado, uma alta penetração de veículos elétricos recarregáveis (PHEVs e BEVs) tem o potencial de impactar o sistema elétrico de geração, em função do aumento na demanda de energia (Liu *et al.*, 2015) bem como da demanda de carga (Oliveira *et al.*, 2013). A integração inteligente entre a penetração de veículos eletrificados e a penetração de fontes renováveis permitiria que a bateria dos veículos elétricos atuasse como um *buffer*, absorvendo o excesso de eletricidade gerado pelas fontes de variáveis de eletricidade (Borba, 2012). Ao mesmo tempo, esta configuração contribuiria para um menor impacto dos veículos elétricos, que seriam recarregados com eletricidade de fontes renováveis e, portanto, apresentariam uma menor emissão de GEEs sob uma perspectiva dita *well-to-wheel*. Existem diversos trabalhos que estudam configurações de integração entre veículos elétricos e fontes renováveis de eletricidade no sistema elétrico.

CLEMENT-NYNS *et al.* (2010) avaliam os impactos da penetração de PHEVs no sistema de distribuição de eletricidade, em termos de sobrecarga. O sistema elétrico avaliado é um sistema de geração distribuída, composto por painéis fotovoltaicos, central de geração elétrica com cogeração e turbinas eólicas de pequena escala. Os autores contrapõem um cenário em que não há qualquer controle de descarga e recarga de PHEVs a um cenário em que se estabelece um controle de voltagem no ponto de recarga dos veículos. Esta comparação permite concluir que o percentual de sobrecarga do sistema é reduzido significativamente quando se implementa sistemas de controle de carga nos PHEVs.

Em Borba (2012), as interações entre os veículos elétricos e fontes eólicas de eletricidade são exploradas. Em particular, o autor avalia a geração eólica no nordeste do Brasil, onde a entrada de plantas eólicas vem sendo expressiva. Com um sistema elétrico nacional progressivamente inflexível, em função da instalação da usina nuclear de Angra III no Sudeste, a entrada em grande escala de usinas eólicas no Nordeste pode provocar um

descasamento entre geração e demanda, com excesso de produção de energia eólica. Assim, um sistema de baterias para armazenamento do excesso de energia, incluindo baterias de veículos elétricos, poderia representar uma alternativa para a maior integração de usinas eólicas no sistema elétrico. O autor destaca que o período em que haveria maior excesso de energia eólica seria durante a madrugada. Isto faria com que a utilização das baterias dos veículos para regularização do sistema fosse ainda mais atrativa, uma vez que este é tipicamente o momento em que os veículos não estão sendo utilizados. O estudo conclui que, em 2040, uma frota de mais de 1.5 milhão de veículos poderia ser abastecida durante metade do ano no período da madrugada, a partir do excedente de eletricidade gerado por uma maior penetração de turbinas eólicas (Borba, 2012).

No caso da interação entre veículos eletrificados e tecnologias de aproveitamento de energia solar, como painéis fotovoltaicos, FATTORI *et al.* (2014) avaliam cem (100) casos de penetração combinada de veículos eletrificados e painéis fotovoltaicos dentro de três cenários de recarga, a saber: recarga sem controle, recarga inteligente e V2G. No artigo, os autores concluem que uma alta penetração de veículos eletrificados e de painéis fotovoltaicos tende a provocar uma demanda adicional por fontes de eletricidade alternativas à fotovoltaica. Isto ocorre pois, diferente do que ocorre no caso da eólica no estudo de BORBA (2012), existe um descasamento entre a curva de recarga dos veículos eletrificados e a geração por meio dos painéis fotovoltaicos. Por outro lado, os autores destacam que sistemas de recarga inteligente ou V2G têm o potencial de reduzir a demanda adicional por eletricidade, em caso de baixos níveis de penetração de veículos eletrificados (Fattori *et al.*, 2014).

### *2.2.3 - Veículos eletrificados e o setor sucroalcooleiro*

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de etanol, competindo com os Estados Unidos e China (REN21, 2015). Na safra de 2014/2015, a produção brasileira de etanol atingiu mais de 26 mil metros cúbicos (UNICA, 2015a), dos quais 0,5% foram exportados (UNICA, 2015b). Além disto, um dos subprodutos da produção de etanol, o bagaço, é amplamente utilizado para a geração de eletricidade na destilaria, contribuindo para a redução da demanda por outras fontes de eletricidade e permitindo, eventualmente, a exportação do excedente produzido. Estima-se que, na safra de 2009/2010, cerca de 20 TWh tenham sido gerados por unidades termelétricas (UTEs) a bagaço (Bressan Filho, 2011). Em janeiro de 2016, a potência total outorgada para UTEs a bagaço era de 10.9 GW, representando 7.5% da potência outorgada no país (UNICA, 2016)

Nos últimos anos o setor sucroalcooleiro foi afetado por uma crise, iniciada em 2008. Desde então, mais de 80 usinas sucroalcooleiras tiveram suas atividades encerradas no Brasil. Apenas em 2015, acredita-se que dez usinas da região centro-sul tenham encerrado suas atividades, enquanto outras 67 encontram-se em recuperação judicial. Hoje, restam ainda 371 usinas em operação (UNICA, 2015c). Em termos de empregos, estima-se que as perdas tenham sido de 22 mil postos de trabalho diretos e indiretos em 2013 e 2014, apenas em São Paulo (Fredo, 2015)<sup>13</sup>.

As razões por trás desta crise foram múltiplas. De acordo com BRESSAN FILHO (2009), a crise no setor sucroalcooleiro pode ser atribuída a três fatores centrais, a saber:

- (i) Crescente necessidade de capital de giro para a formação de estoques de etanol e garantia de oferta do produto na entressafra. O estudo estima em cerca de R\$ 5,4 bilhões o capital de giro demandado para estocagem – com o objetivo de regularizar a oferta – na safra de 2008-09. O autor destaca que esta estocagem foi financiada por meio de capital próprio e que esta demanda de capital se soma a outras, como a necessidade de capital fixo para expandir a produção. Ademais, cabe destacar que a demanda por capital de giro se soma ainda a custos de operação e manutenção da armazenagem, que foi estimada em R\$ 717,2 milhões para a safra de 2008-09;
- (ii) Baixa taxa de remuneração da atividade alcooleira nas safras de 2007/08 e 2008/09, comprometendo a sustentabilidade financeira da atividade. A receita líquida para a safra de 2008/09 foi estimada em R\$ 1.177.264,50, nível inferior àquele atingido em 2004. Isto representou uma taxa de retorno sobre o capital investido de 2,6% ao ano nessa safra. A análise evidenciou que isto se deve à estrutura da cadeira de distribuição do etanol, a qual é construída de modo que os elos não são remunerados de acordo com a sua contribuição para a agregação de valor ao produto.
- (iii) Postura passiva do setor produtivo, que não dispõe de mecanismos comerciais para interferir na formação das margens de comercialização e na competitividade do etanol frente a seu concorrente fóssil, a gasolina. A fim de estimar o quanto que as

---

<sup>13</sup> Estes valores referem empregos formais. Referindo-se a todo o país, a UNICA (2015c) apresenta um balanço ainda pior: mais de 100 mil empregos diretos e 50 mil indiretos tenham sido perdidos nos últimos dois anos. Contudo, dada a discrepância e também por falta de fontes para verificar estes números, optou-se por manter apenas os valores obtidos por FREDO (2015).

destilarias estão deixando de receber em função da estrutura desfavorável da comercialização do etanol, o comparou as margens efetivas dos elos da cadeia de produção e distribuição de etanol – destilaria, distribuidora, postos de revenda – com aquela que poderia estar sendo cobrada – dados o preço no posto de revenda e os custos ao longo da cadeia de distribuição. Os resultados desta análise evidenciaram que, na média, a destilaria obtém uma margem 7% inferior àquela que seria considerada justa (equivalente à perda de R\$ 1,52 bilhões). Esta margem, na realidade, acaba sendo apropriada pelo elo de comercialização do etanol.

Adicionalmente aos fatores destacados por BRESSAN FILHO (2009), cabe salientar a recente política nacional de controle de preços da gasolina. Esta política, implementada com o objetivo de conter riscos inflacionários no país (Cavalcanti 2011, Cunha, 2015), teve como um de seus impactos a perda de competitividade do etanol combustível. Ainda que não se tenha identificado estudos reforçando a hipótese da causalidade deste efeito sobre a queda na demanda por etanol, é de se esperar que os impactos negativos tenham sido sensíveis e que tenham contribuído para a crescente fragilidade do setor.

Cabe destacar que a persistência da crise do setor sucroalcooleiro poderia ter impactos significativos sobre a competitividade do setor. Especialmente frente aos seus competidores, os Estados Unidos e a China. Sabe-se, por exemplo, que na safra de 2011/12 houve uma queda no rendimento em cana por hectare plantado, de 80,9 tcana/ha em 2010/11 para 69,3 tcana/ha em 2011/12 (MME/EPE, 2012).

Acredita-se, no entanto, que ações conjuntas do governo com o setor privado vêm ajudando a recuperar o setor. Na safra 2013/2014, por exemplo, a produtividade do setor se elevou para 74,8 tcana/ha. Ainda que consideravelmente distante do nível máximo histórico de 81,6 tcana/ha, este incremento é significativo (MME/EPE, 2015). Já na safra 2014/15 o setor sofreu impactos da seca, de modo que este índice retrocedeu para 70,5 tcana/ha (MME/EPE, 2015).

De forma ou de outra, fica evidente que o setor é consideravelmente vulnerável. Como toda atividade embasada na agricultura, o setor sucroalcooleiro sofre com incertezas acerca do sucesso das safras, em função de imprevisibilidades climáticas, tal como a seca de 2014, ou naturais, como pragas. Além disto, o fato de cerca de dois terços das destilarias brasileiras corresponderem a destilarias anexas<sup>14</sup> (MAPA/CGAE/DCAA, 2013) determina uma grande

---

<sup>14</sup> Destilarias aptas a produzir tanto etanol quanto açúcar.

flexibilidade no direcionamento da produção entre etanol e açúcar (Goldemberg *et al.*, 2014). Deste modo, em fases em que o preço do açúcar apresenta vantagens significativas frente ao etanol, poderá haver sensíveis reduções na oferta de etanol.

BRESSAN FILHO (2009) também destaca que a atividade sucroalcooleira sofre com a sazonalidade da produção de sua matéria prima. Isto porque, ainda que haja complementaridade temporal entre as safras da região centro-sul (sudeste, sul e centro-oeste) e as safras da região nordeste do país, a região centro-sul concentra cerca de 90% da produção (ANP, 2013). Logo, a produção do Nordeste não é suficiente para fazer frente aos meses de entressafra do Sudeste. Com isto, frente a uma demanda que por sua vez não sofre sazonalidade ao longo do ano, de modo que o setor é forçado a formar estoques da produção, para regularizar a oferta.

Tendo em vista estas incertezas, diferentes autores sustentam a necessidade da criação de mecanismos que permitam garantir uma maior segurança ao setor, com o objetivo de assegurar o suprimento de etanol. BRESSAN FILHO (2009), por exemplo, destaca a necessidade de se criar companhias regionais de comércio, responsáveis por unificar os pequenos produtores e fortalecer seu poder de mercado na cadeia de produção e comercialização. Além disto, em associação a estas companhias, o autor propõe a criação de um agente financeiro, formado com recursos dos próprios membros, responsável por socorrer membros com problemas de liquidez.

Por sua vez, GOLDENBERG *et al.* (2014) propõem a criação de um fundo com o objetivo de assegurar o fornecimento de etanol, financiado por meio da destinação de uma parcela das receitas advindas das rendas da exploração do petróleo no Brasil (incluindo o pré-sal). Os autores estimam que estariam disponíveis para o setor pelo menos US\$ 124 milhões ao ano entre 2014-2020 em rendas do petróleo e um total de US\$ 1.401 milhões entre 2021 e 2030. De acordo com NOGUEIRA *et al.* (2014), a penetração de veículos elétricos teria o potencial de prejudicar ainda mais o setor sucroalcooleiro. Pode-se esperar que, com uma parcela significativa da demanda energética dos veículos leves sendo atendida por eletricidade, haveria uma redução equivalente na demanda por combustíveis líquidos, inclusive por etanol. Assim, existe um receio no setor sucroalcooleiro de que a entrada de veículos eletrificados faça reviver a crise deste setor.

Cabe ressaltar que, assumindo que uma redução na demanda de etanol levaria à queda na produção de cana, a penetração de veículos eletrificados levaria indiretamente à redução da produção de eletricidade por bagaço de cana. Portanto, uma maior penetração de veículos

eletrificados na frota nacional tenderia a contribuir duplamente para a redução da participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira, ao reduzir o consumo de etanol por veículos e ao reduzir a quantidade de bagaço disponível para a geração de eletricidade.

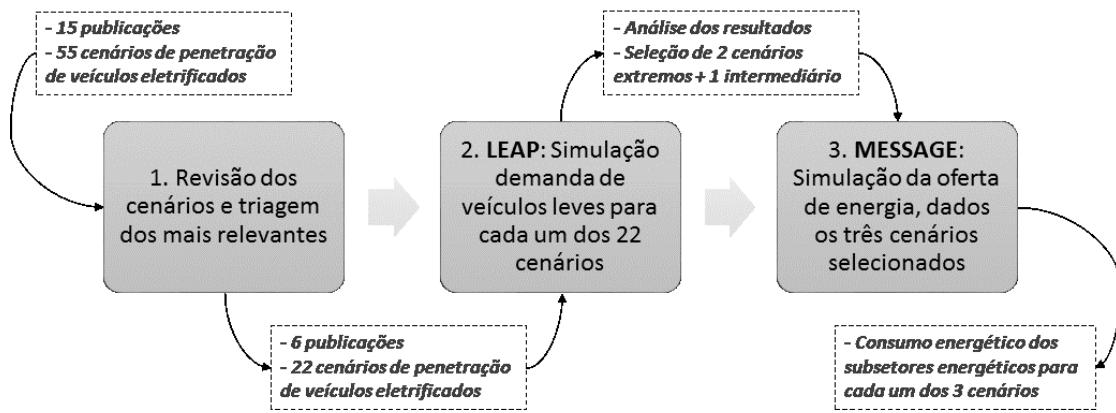
A intensidade do impacto da entrada de veículos eletrificados sobre o setor sucroalcooleiro dependerá naturalmente do nível e do perfil tecnológico de penetração dos veículos elétricos. Em particular, pode-se esperar que para um dado nível de penetração de PHEVs, o impacto seja maior caso estes PHEVs admitam apenas gasolina. Até o momento, PHEVs com a tecnologia *flex fuel* não estão comercialmente disponíveis. Contudo, há indícios de que o Governo Federal trabalhará para que os PHEVs a serem comercializados no Brasil tenham seus motores adaptados para serem abastecidos com qualquer mistura de etanol e gasolina. Por exemplo, a nota técnica DEA 13/14 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que apresenta as premissas a serem consideradas no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), considera que os PHEVs contarão com a tecnologia *flex fuel* (MME/EPE, 2014c). Além disto, em meados de 2014 houve rumores de que o INOVAR-AUTO, programa de incentivo a inovações tecnológicas no setor automotivo, incluiria um programa de estímulo a veículos eletrificados, mas que o mesmo exigiria a adaptação dos motores dos veículos (EXAME 2014).

Adicionalmente, cabe ressaltar que o nível de consumo também depende do preço relativo da gasolina. O consumidor tipicamente será indiferente entre o consumo de etanol ou de gasolina quando o preço por litro deste corresponder a 70% do preço da gasolina. Contudo, acima deste patamar, a maior parte dos consumidores usuários de veículos flex tenderá a optar pela gasolina. Nos últimos anos, o preço médio do etanol no Brasil ficou acima dos 70%, de modo que, em diversas regiões, este combustível vem sendo preterido. Portanto, políticas futuras que forneçam suporte ao setor poderiam contribuir para mitigar os impactos da entrada de veículos elétricos.

## **3 - REVISÃO DE CENÁRIOS DE PENETRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

A taxa de penetração de uma dada tecnologia depende de fatores diversos. Do lado da oferta, pode-se citar o nível de investimento em PD&I para esta tecnologia e a coordenação existente na sua cadeia de valor. Do lado da demanda, os fatores que contribuem para a penetração de uma dada tecnologia incluem seu custo, seu desempenho e também o comportamento do consumidor. Existe hoje uma vasta literatura que aplica modelos econométricos a fim de determinar a penetração futura de veículos eletrificados. Não é o intuito deste capítulo determinar a taxa provável de penetração de tais veículos, mas sim encontrar um cone de possibilidades para a penetração de veículos leves, com foco no consumo energético associado a cada cenário.

A fim de obter uma maior compreensão das trajetórias possíveis de penetração de veículos elétricos na frota nacional, foi realizada uma revisão da literatura nacional e internacional de cenários para veículos elétricos. Esta revisão de cenários também permitiu identificar os cenários de penetração de veículos elétricos na frota nacional que foram rodados no LEAP, o modelo de projeção de demanda de energia selecionado para este estudo. Os resultados deste modelo foram então introduzidos no MESSAGE Brasil, um modelo integrado de otimização do sistema energético nacional, que permite investigar os impactos da demanda adicional de energia sobre o sistema energético como um todo. Uma descrição detalhada da metodologia deste estudo é apresentada no capítulo 4.



**Figura 3-1 – Metodologia de análise**

Fonte: Elaboração própria

As publicações incluídas na revisão bibliográfica foram selecionadas de acordo com sua relevância. Especificamente, considerou-se o ano da publicação – o cenário mais antigo data de 2007 – o respaldo da instituição responsável pela publicação e o escopo geográfico.

Ainda que existam alguns cenários de penetração de veículos elétricos para o Brasil, considerou-se que este estudo se beneficiaria de uma gama maior de cenários, de modo que o critério de escopo geográfico foi expandido, a fim de abranger cenários que possam ser representativos das tendências de evolução das tecnologias de veículos leves no Brasil. Assim, as publicações incluídas nesta primeira seleção incluem cenários para a Europa, os Estados Unidos e a China, bem como cenários globais. De um lado, cenários globais, para a Europa e os Estados Unidos correspondem a tendências que devem ser seguidas por países como o Brasil, ainda que com um certo atraso temporal. De outro, cenários para a China foram incluídos, apesar das diferenças em termos de proporção do crescimento econômico projetado, mas em função de similaridades com o Brasil em termos da dimensão territorial e nível presente de desenvolvimento social.

A visão geral das publicações analisadas sob este estudo é apresentada na próxima seção. Em seguida, as publicações que foram aproveitadas sob este estudo e seus respectivos cenários são descritos em detalhes na seção 3.2. Por fim é feita uma análise geral dos cenários aplicados nas publicações analisadas.

### 3.1 - Visão geral das publicações

A Tabela 3-1 sumariza a revisão bibliográfica dos cenários. São evidenciados o ano da publicação, o horizonte temporal considerado, seu escopo geográfico e os parâmetros utilizados para construir os cenários. Este último critério é relevante uma vez que, no presente estudo, os cenários foram construídos com base em parâmetros de vendas de veículos leves. Assim, com base nesta análise foi feita uma primeira triagem dos cenários que seriam considerados na etapa seguinte de modelagem (análise de demanda do setor de transportes), que será discutida em detalhes no capítulo 4.

**Tabela 3-1 – Publicações incluídas na revisão bibliográfica de cenários**

| #         | Título   | Autores/<br>Instituição                             | Ano  | Parâmetros<br>dos cenários         | Escopo     | Horizonte<br>temporal |
|-----------|--|---|------|------------------------------------|------------|-----------------------|
| <b>1</b>  | Transport, Energy and CO <sub>2</sub> - Moving toward sustainability   | IEA   | 2009 | Distribuição das vendas            | Global     | 2050                  |
| <b>2</b>  | Demanda de Energia 2050. NOTA TÉCNICA DEA 13/14  | MME/EPE   | 2014 | Distribuição das vendas            | Brasil     | 2050                  |
| <b>3</b>  | The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption                            | Baran, R, Legey, L. F. L.                           | 2012 | Distribuição da frota              | Brasil     | 2030                  |
| <b>4</b>  | EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050: reference scenario 2013   | Capros <i>et al.</i>                                | 2013 | Distribuição da frota              | Europa     | 2050                  |
| <b>5</b>  | Annual Energy Outlook 2014   | US EIA  | 2014 | Distribuição das vendas            | EUA        | 2040                  |
| <b>6</b>  | Energy consumption and CO <sub>2</sub> emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China | Wu <i>et al.</i>                                    | 2012 | Distribuição das vendas            | China      | 2030                  |
| <b>7</b>  | Global Energy Assessment   | IIASA   | 2012 | Distribuição das vendas            | Global     | 2050                  |
| <b>8</b>  | Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles   | EPRI  | 2007 | Distribuição das vendas            | EUA        | 2050                  |
| <b>9</b>  | ITS - Sustainable Transportation Pathways. Cap. 8  | Christopher Yang, David McCollum, and Wayne Leighty | 2011 | Distribuição das vendas e da frota | Califórnia | 2050                  |
| <b>10</b> | ITS - Sustainable Transportation Pathways. Cap. 9  | Joan Ogden, Christopher Yang, and Nathan Parker     | 2011 | Distribuição da frota              | EUA        | 2050                  |
| <b>11</b> | ITS - Sustainable Transportation Pathways. Cap. 10   | Sonia Yeh and David McCollum                        | 2011 | Distância viajada por tecnologia   | EUA        | 2050                  |

| #         | Título  | Autores/<br>Instituição | Ano  | Parâmetros<br>dos cenários       | Escopo                       | Horizonte<br>temporal |
|-----------|---|-------------------------|------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| <b>12</b> | On the Road to 2035   | MIT                     | 2008 | Distribuição das vendas          | EUA e alguns países europeus | 2035                  |
| <b>13</b> | Sustainable global automobile transport in the 21st century   | Turton                  | 2006 | Distância viajada por tecnologia | Global                       | 2100                  |
| <b>14</b> | The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System | Dias et. al.            | 2013 | Distribuição da frota            | São Paulo                    | 2035                  |

Fonte: Elaboração própria

Uma vez que a projeção de demanda de energia por veículos leves do presente estudo é realizada com base em dados de projeção de vendas (conforme será detalhado no capítulo 4 -), os cenários apresentados em algumas das publicações analisadas foram eliminados da etapa seguinte de estimativa de demanda, por não apresentarem valores de projeção com base nas vendas. No total, doze cenários, associados a cinco publicações, foram excluídos da análise por falta de dados de vendas futuras de veículos leves, conforme listado abaixo.

1. Baran & Legey (2012) - The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption
  - Business-as-usual
  - PHEV 25%
  - PHEV 50%
  - PHEV 75%
2. EC (2013) - EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050: reference scenario 2013
3. ITS (2011) - Sustainable Transportation Pathways. Capítulos 9 e 10
  - Capítulo 9: Reference, Efficiency Scenario, Biofuels Scenario, PHEV success scenario, FCV success scenario e Portfolio Scenario

- Capítulo 10: Reference Scenario, 10% Economy-wide + Transp Cap, 20% Economy-wide + Transp Cap, 30% Economy-wide + Transp Cap, 40% Economy-wide + Transp Cap, 50% Economy-wide + Transp Cap
4. Turton (2006) - Sustainable global automobile transport in the 21st century
  5. EXCEN (2013) - The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System
    - Linha de Base
    - Cenário 1
    - Cenário 2
    - Cenário Compulsório

Além destas publicações, duas outras não foram consideradas na etapa seguinte da análise, a saber, o oitavo capítulo do relatório do ITS e o relatório do MIT. O capítulo do relatório do ITS não foi aproveitado, uma vez que os cenários para os quais são apresentados valores de vendas de veículos leves no fim do horizonte são limitados ao estado norte-americano da Califórnia. Adicionalmente, os cenários foram construídos de modo a assegurar uma redução de 80% das emissões do estado. Considerou-se que, concebidos desta forma, os cenários são demasiado específicos para Califórnia e que não haveria lógica em replicá-los para o Brasil. Por fim, ainda que os cenários do MIT (2008) tenham sido construídos de forma consistente, eles não procuram retratar os possíveis desenvolvimentos futuros dos veículos elétricos. Estes cenários são construídos de forma paramétrica, prevendo penetrações elevadas de determinadas tecnologias a fim de compreender seu potencial em termos de redução de demanda energética e de emissões de GEE. Assim, optou-se por não os considerar na presente análise.

Após esta triagem inicial dos cenários identificados na revisão bibliográfica, as seguintes publicações, representando 22 cenários, foram consideradas.

1. IEA (2009) - Transport, Energy and CO2 - Moving toward sustainability
  - Baseline - 2050
  - High Baseline

- BLUE Shifts
  - BLUE Map
  - BLUE Map/Shifts
  - BLUE EV/Shifts
2. EPE (2014) - Demanda de Energia 2050. NOTA TÉCNICA DEA 13/14
  3. EIA (2014) - Annual Energy Outlook 2014 [AEO 2014]
  4. Wu *et al.* (2012) – Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China
    - Cenário 1
    - Cenário 2
    - Cenário 3
    - Cenário 4
  5. IIASA (2012) - Global Energy Assessment [GEA 2012]
    - GEA - Reference
    - GEA - Supply
    - GEA - Mix
    - GEA - Efficiency
  6. EPRI (2007) - Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles
    - EPRI - Low PHEV
    - EPRI - Medium PHEV
    - EPRI - High PHEV
    - EPRI - Low PHEV - Base case

- EPRI - Medium PHEV - Base case
- EPRI - High PHEV - Base case

O detalhamento de como estes cenários foram aproveitados na presente análise será feito no capítulo 4, que visa descrever a abordagem metodológica aplicada no presente estudo.

### **3.2 - Descrição dos cenários utilizados**

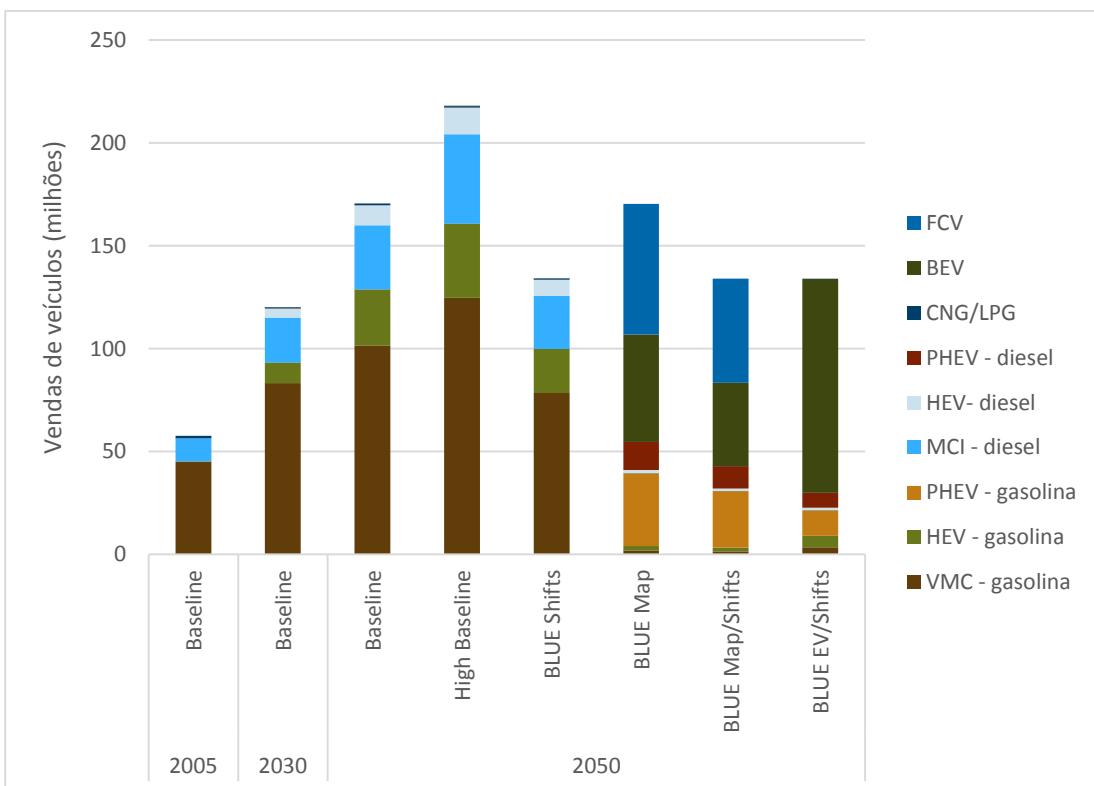
A fim de obter um maior entendimento sobre os cenários de penetração de veículos elétricos sugeridos pela literatura, foi realizado um mapeamento de publicações relevantes e dos cenários aplicados. Um total de quinze publicações, representando cinquenta e cinco cenários de introdução de veículos elétricos foram analisadas. Destas, seis publicações, representando vinte e dois cenários, foram triadas para o passo seguinte (simulação de demanda no LEAP), com base em critérios como sua adequabilidade para a simulação e para o contexto nacional. A descrição destas seis publicações é apresentada a seguir. As nove publicações que não foram aproveitadas na etapa seguinte estão descritas no Anexo I.

#### *3.2.1 - IEA (2009) - Transport, Energy and CO<sub>2</sub> - Moving toward sustainability*

Essa publicação da Agência Internacional de Energia parte da recomendação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, na sigla em inglês), de que é preciso uma redução de 50% nas emissões globais das emissões de GEE até 2050 para que seja possível evitar um aumento superior a 2 graus Celsius na temperatura média global. Admitindo a importância do setor de transportes para que se alcance este objetivo, a publicação visa delinear cenários de redução de emissões que descrevam diferentes narrativas de evolução das políticas e das tecnologias e suas implicações em termos de aproximação ou distanciamento dos 50% de redução de emissões. Os cenários abrangem todo o setor de transportes, incluindo o transporte terrestre, ferroviário, hidroviário e aéreo e têm por base os cenários apresentados no IEA World Energy Outlook 2008 (IEA, 2009).

São apresentados seis cenários distintos, para todos os setores:

- Baseline – baseia-se no cenário de referência de World Energy Outlook 2008 (WEO, 2008) até 2030 e o estende até 2050. Este cenário reflete tendências presentes e futuras na ausência de novas políticas.
- High Baseline – esse cenário considera um aumento superior na posse de veículos, nas viagens aéreas e no transporte de carga até 2050, em comparação com o cenário Baseline.
- BLUE CO<sub>2</sub> – esses cenários, também baseados nos cenários apresentados no WEO (2008), são construídos visando atingir o máximo de reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transportes até 2050.
  - BLUE Map: esse cenário apresenta uma redução de 30% nas emissões de CO<sub>2</sub> até 2050. Tal redução é atingida a partir de significativas melhorias na eficiência dos veículos VMC e da introdução de veículos eletrificados e a célula combustível (FCV). Esse cenário não prevê alterações no padrão de modais utilizados no transporte de passageiros ou de cargas. Por exemplo, não são consideradas transições para uma maior representatividade do transporte público sobre o transporte privado de passageiros.
  - BLUE EV/Shifts: este cenário é similar ao Blue Map, com uma mesma redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Contudo, neste cenário, considera-se que haverá uma significativa redução nos custos dos veículos eletrificados, de modo que estes atingem uma maior penetração, liderando as vendas de veículos leves em 2050. Neste cenário admite-se que não há vendas de FCV.
  - BLUE Shifts: este cenário se baseia em uma mudança nos modais utilizados em viagens de passageiros e no transporte de carga atingir uma maior redução de emissões. Viagens aéreas e de veículos leves apresentam um crescimento 25% inferior ao do *Baseline*, enquanto que o transporte de carga por caminhões cresce 50% menos. Os transportes apresentam uma transição para modais mais eficientes e da demanda de viagens de passageiros é reduzida a partir de um melhor planejamento urbano, um melhor uso de tecnologias da informação e outras medidas voltadas à redução da demanda por transporte motorizado. Em comparação ao *Baseline*, o Blue Shifts apresenta um consumo de energia e emissões 20% menores em 2050.
  - BLUE Map/Shifts: este cenário combina o BLUE Map e BLUE Shifts, obtendo maiores reduções de emissões de CO<sub>2</sub> a partir de melhorias na eficiência energética, novas tecnologias de veículos e a partir de mudanças nos modais.



**Figura 3-2 – IEA 2008 - Cenários de vendas de veículos de passageiros em IEA 2009, em milhões de veículos (2005-2050)**

Fonte: Elaboração própria com base em IEA (2009)

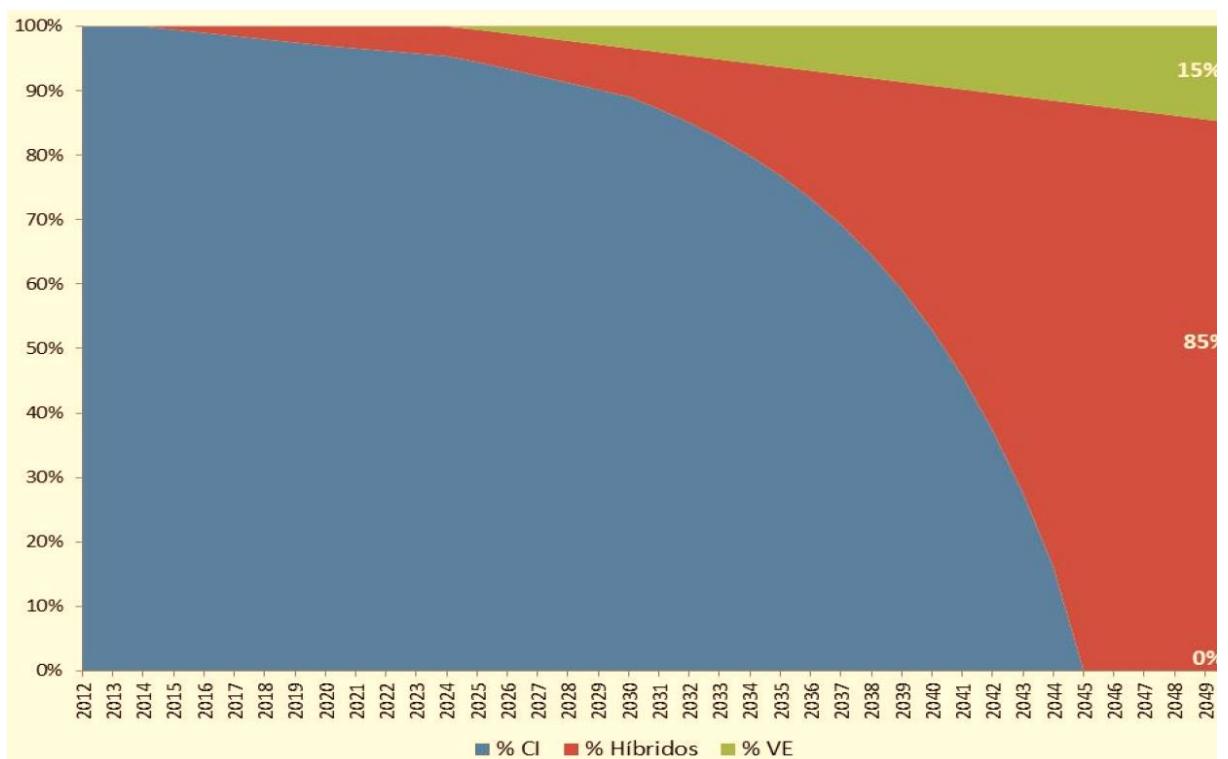
### 3.2.2 - EPE (2014) - Demanda de Energia 2050. NOTA TÉCNICA DEA 13/14

Esta nota técnica EPE foi desenvolvida para ser base para as simulações de demanda de energia do PNE 2050<sup>15</sup> (MME/EPE, 2014c). Nela constam as principais premissas adotadas para a projeção de demanda de energia no país, para todos os setores da economia. Assim, são incluídos nesta publicação: o setor industrial, de serviços, domicílios e transportes. As premissas apresentadas, contudo, referem-se apenas ao cenário de referência de longo prazo

<sup>15</sup> Cabe destacar que, no momento da conclusão deste trabalho, o PNE 2050 ainda não havia sido publicado. Há indícios de que sua preparação sofreu atrasos em função das alterações das circunstâncias político-econômicas que ocorreram entre a publicação da Nota Técnica e a data para a qual estava prevista a publicação do PNE 2050. É provável que tais alterações tenham motivado uma decisão de se rever as premissas da publicação, o que justificaria seu atraso. De toda forma, por ser o cenário oficial mais atual disponível na literatura, optou-se por manter o cenário da Nota Técnica na revisão bibliográfica e, conforme se verá adiante, nas etapas subsequentes deste estudo.

para o país. De forma equivalente, para o setor de transporte de passageiros por veículos leves, apenas o cenário de referência para a evolução das vendas de veículos é apresentado.

A Figura 3-3 evidencia a evolução projetada para a composição dos licenciamentos de veículos leves (uma *proxy* para o total de vendas) até 2050. Nota-se uma grande penetração de veículos híbridos até o fim do horizonte.



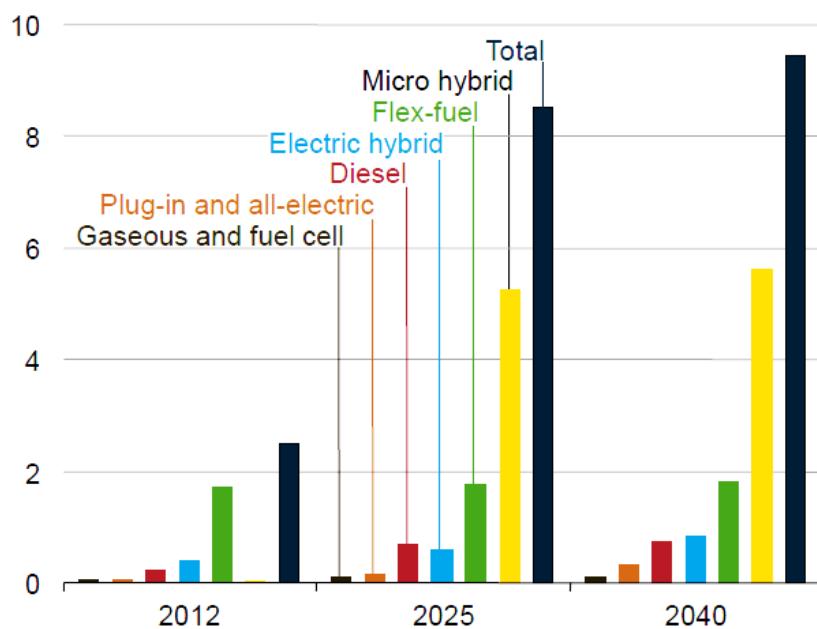
**Figura 3-3 – EPE 2014 – Composição das vendas de veículos de passageiros (2012-2050)**

Fonte: MME/EPE (2014c)

### 3.2.3 - US EIA (2014) - Annual Energy Outlook 2014

O Annual Energy Outlook (AEO) da *Energy Information Administration* do governo norte-americano (US EIA), apresenta projeções de longo prazo para o setor de energia norte-americano, abrangendo os segmentos industrial, comercial, residencial, de transportes, a indústria de óleo e gás e a indústria de eletricidade (tratadas separadamente das demais indústrias). Assim como a publicação da Comissão Europeia, a publicação da US EIA apresenta apenas o cenário de referência. Conforme evidenciado na Figura 3-4, este cenário

prevê uma elevada penetração de micro híbridos, definidos como veículos que possuem um motor elétrico que é ativado quando o veículo está parado. Esta tecnologia permite um ganho considerável na eficiência energética, especialmente no ambiente urbano, onde congestionamentos tendem a ser um dos principais determinantes da perda de eficiência dos veículos. Contudo, no que tange a veículos plenamente híbridos (chamados de *hybrid electric* na Figura 3-4) e demais veículos eletrificados, seu ganho de mercado no cenário do AEO é muito pouco significativo. Por este motivo, este cenário pode ser considerado um dos mais conservadores da literatura. Cabe ressaltar que a Figura 3-4 apresenta apenas as tecnologias avançadas de propulsão (i.e., todas as tecnologias exceto os VMCs), as quais passam a representar 55% das vendas em 2040.



**Figura 3-4 – AEO 2014 - Vendas de veículos leves de tecnologias avançadas no cenário de referência, em milhões de veículos (2012-2040)**

Fonte: US EIA (2014)

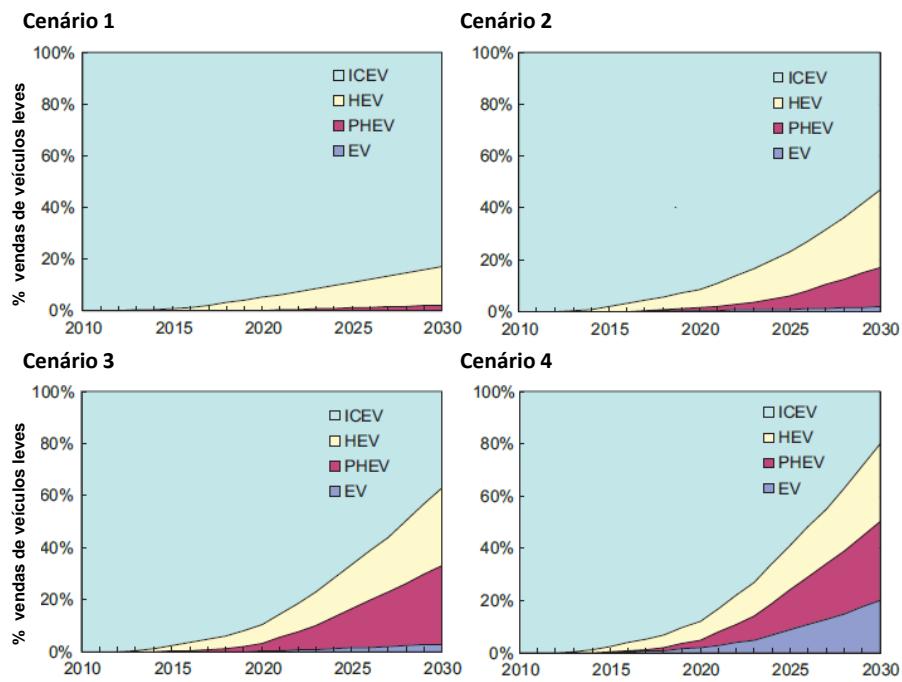
### 3.2.4 - Wu et al. (2012)

Neste artigo, Wu et al. (2012) constroem quatro cenários descritivos da penetração de veículos elétricos, a fim de determinar seus impactos em termos de consumo energético e emissões de GEE. Cada um dos cenários é aplicado a três regiões chinesas que apresentam

profundas diferenças entre si no que se refere ao perfil de seus setores elétricos. Nos cenários, considera-se a entrada de HEVs, PHEVs e BEVs até 2030.

O cenário 1 representa uma situação em que a penetração de veículos eletrificados é determinada unicamente pelas forças do mercado. Assim, neste cenário, assume-se que avanços tecnológicos e a consequente queda dos custos permitem que os HEVs atinjam 1% das vendas em 2015 e 15% até 2030. PHEVs e BEVs apresentam uma penetração mínima, de 2% e 0.1%, respectivamente, até 2030. Estes percentuais foram adotados em linha com o cenário estabelecido pelo AEO 2009 (EIA, 2009). No cenário 2, a participação de HEVs, PHEVs e BEVs nas vendas atinge, respectivamente, 30%, 15% e 2% até 2030. Neste cenário, assume-se que uma maior limitação aos avanços nas baterias e nas tecnologias de recarga termina por causar uma demora na entrada dos veículos eletrificados.

Os cenários 3 e 4 foram construídos a fim de simular uma situação de maiores incentivos a estas tecnologias, tal qual já ocorre atualmente na China. O cenário 3 assume que a comercialização de PHEVs teria início cinco anos após a entrada de HEVs no mercado, mas atingiria a mesma participação nas vendas (30%) que os HEVs até 2030. Já o cenário 4 representa uma situação ideal em que as barreiras para a comercialização dos BEVs são rapidamente superadas pelos fabricantes e a implementação da infraestrutura de recarga já está avançada. Neste cenário os BEVs atingem 20% das vendas até 2030, enquanto os percentuais de vendas dos HEVs e dos PHEVs permanecem os mesmos presumidos no cenário 3. A Figura 3-5 ilustra estes cenários.



**Figura 3-5 – Wu et al. 2012 – Composição das vendas de veículos leves nos cenários 1-4 (2010-2030)**

Fonte: Wu et al. (2012)

Nota: ICEV no gráfico corresponde aos VMCs, conforme definidos neste trabalho.

### 3.2.5 - IIASA (2012) - Global Energy Assessment [GEA 2012]

O *Global Energy Assessment* (GEA) do International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), busca propor cenários consistentes do setor de energia que atendam de forma holística a quatro objetivos de desenvolvimento, a saber:

- Estabilizar a elevação das temperaturas globais no século XXI em 2ºC em relação aos níveis pré-industriais;
- Elevar a segurança energética, através da diversificação e da resiliência da oferta de energia;
- Eliminar a poluição do ar ambiente e a poluição do ar nos domicílios;
- Acesso universal aos serviços modernos de energia até 2030

Em seu capítulo voltado ao setor de transportes, o GEA 2012 investiga os quatro cenários para as opções de desenvolvimento sustentável de longo prazo para o setor. A análise abrange os transportes rodoviário, ferroviário, aéreo e hidroviário. Os quatro cenários construídos são o cenário de referência, o GEA-Supply, GEA-Efficiency e o GEA-Mix. No setor de veículos leves, estes cenários diferenciam-se em função do nível de atividade, das tecnologias de propulsão e dos combustíveis consumidos.

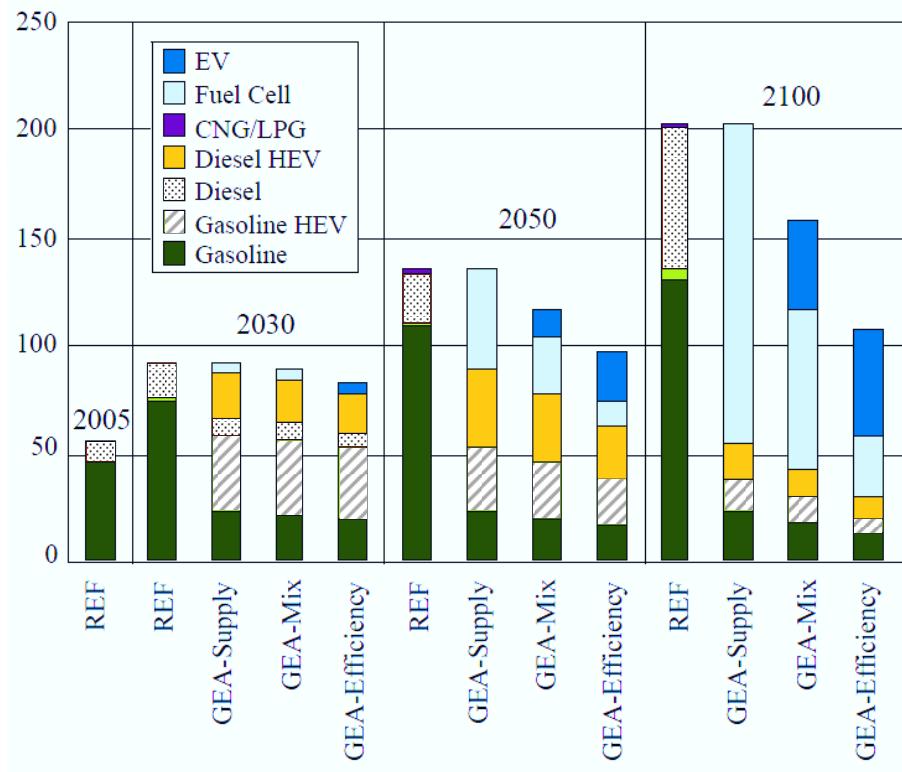
No cenário de referência, os veículos convencionais compõem a maior parte da frota.

Por sua vez, o cenário GEA-Efficiency admite um foco central uma ênfase eficiência energética, de modo que a eficiência dos veículos aumenta duas vezes mais que a média histórica. Assim, neste cenário, observa-se uma maior eletrificação da frota bem como uma menor demanda de energia ao longo dos anos.

Já o cenário GEA-Supply apresenta um foco maior em expandir rapidamente a oferta de energia, e um foco menor no aumento da eficiência energética. Com isto, o ganho de eficiência do setor de transportes segue a tendência histórica, de modo que sua demanda energética é equivalente à demanda observada no cenário de referência. As diferenças entre o cenário Gea Efficiency e GEA Supply estão na composição das vendas de veículos leves, que apresenta uma predominância de HEVs e FCVs.

Por fim, o cenário GEA-Mix representa uma alternativa intermediária entre os cenários GEA-Supply e GEA-Efficiency. Neste cenário há uma ênfase na diversidade das alternativas energéticas, de modo a assegurar a resiliência do sistema contra eventuais fracassos dos esforços de inovação e choques tecnológicos. No setor de veículos leves isto se reflete em uma maior diversidade das fontes de energia, abrangendo-se tanto eletricidade, como biocombustíveis de segunda geração.

A Figura 3-6 ilustra a evolução de longo prazo destes quatro cenários.



**Figura 3-6 – GEA 2012 - Cenários de vendas de veículos, em milhões de veículos (2005 – 2100)**

Fonte: Kahn Ribeiro et al. (2012)

### 3.2.6 - EPRI (2007) - Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles

Esta publicação, do Electric Power Research Institute (EPRI) tem por objetivo avaliar os impactos ambientais – em termos de emissões de GEE e de qualidade do ar – associados à introdução de PHEVs na frota norte-americana. São avaliados dois grupos de três cenários – perfazendo um total de seis cenários – com horizonte temporal de 2010-2050. No primeiro grupo, trabalha-se com três cenários de penetração de PHEVs: alta, média e baixa. Já no segundo grupo, consideram-se cenários em que não há entrada de PHEVs e em que as vendas de veículos leves dividem-se entre veículos convencionais e HEVs. A Tabela 3-2 e a Tabela 3-3 apresentam os percentuais considerados em cada cenário enquanto a Figura 3-7 apresenta um exemplo de evolução das vendas de veículos leves no cenário de média penetração de PHEVs.

**Tabela 3-2 - Composição das vendas de veículos leves em 2050, cenários com PHEVs**

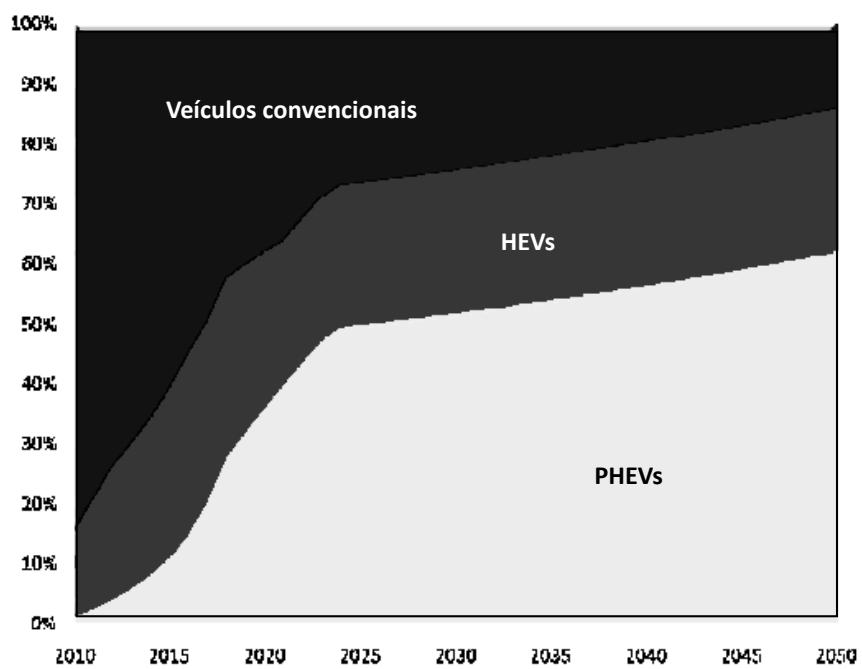
| Cenário de Penetração | Tipo de veículo |     |      |
|-----------------------|-----------------|-----|------|
|                       | Convencional    | HEV | PHEV |
| Baixa                 | 56%             | 24% | 20%  |
| Média                 | 14%             | 24% | 62%  |
| Alta                  | 5%              | 15% | 80%  |

Fonte: EPRI (2007)

**Tabela 3-3 - EPRI 2007 – Composição das vendas de veículos leves em 2050, cenários sem PHEVs**

| Cenário de Penetração | Tipo de veículo |     |      |
|-----------------------|-----------------|-----|------|
|                       | Convencional    | HEV | PHEV |
| Baixa                 | 70%             | 30% | 0%   |
| Média                 | 37%             | 63% | 0%   |
| Alta                  | 25%             | 75% | 0%   |

Fonte: EPRI (2007)

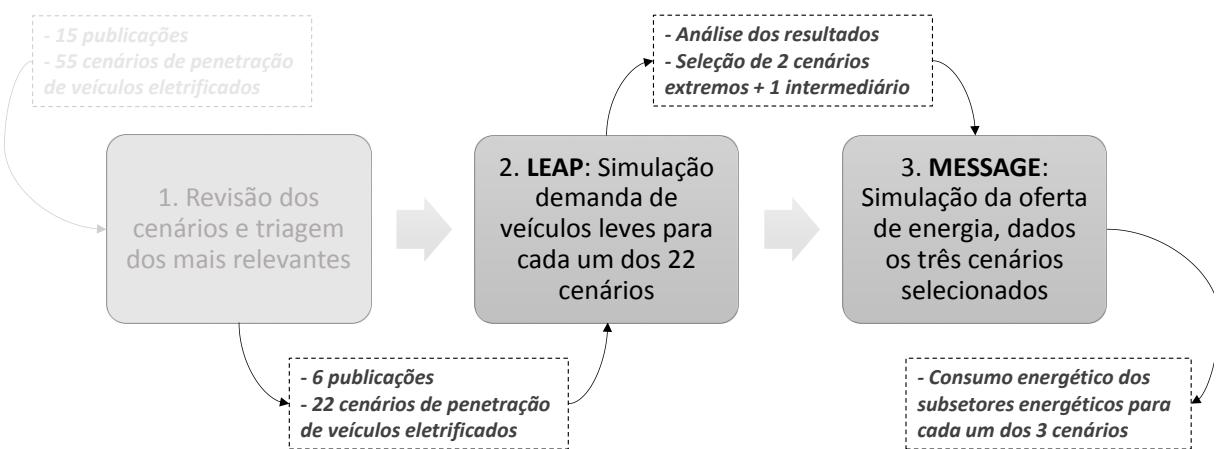


**Figura 3-7 – EPRI 2007 – Composição das vendas de veículos leves no cenário de penetração média de PHEVs (2010-2050)**

Fonte: Adaptado de EPRI (2007)

## 4 - METODOLOGIA

O presente capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia aplicada para analisar os impactos da penetração de veículos leves sobre a demanda de energia dos veículos leves e sobre perfil do setor energético como um todo. Conforme introduzido no capítulo 3, a metodologia de análise foi dividida em três etapas. As etapas abordadas neste capítulo estão destacadas na Figura 4-1.



**Figura 4-1 – Metodologia de análise**

Fonte: Elaboração própria

A primeira etapa correspondeu à revisão bibliográfica descrita no capítulo 3. Nesta etapa, um total de 15 publicações, representando 55 cenários, foi analisado. Após uma criteriosa revisão das publicações, foram selecionadas para a etapa seguinte 6 publicações que totalizaram 22 cenários de evolução das vendas de veículos leves aplicáveis ao Brasil.

Na segunda etapa, estes 22 cenários foram rodados no *Long-range Energy Alternatives Planning* – LEAP, um modelo paramétrico de simulação de demanda, a fim de determinar a demanda energética por veículos leves associada a cada um dos cenários. Com base nos resultados obtidos, 3 cenários foram selecionados para a etapa final de simulação sob o MESSAGE Brasil, de acordo com seu nível de consumo de eletricidade e etanol. O objetivo foi selecionar cenários que representassem condições extremas para o setor energético, a fim de determinar o cone de possibilidades de resposta do setor. Dois dos cenários selecionados corresponderam, respectivamente, àqueles que representavam um alto consumo de eletricidade combinado a um baixo consumo de etanol, e um alto consumo de etanol combinado a um baixo consumo de eletricidade. O terceiro cenário correspondeu a um cenário intermediário de consumo de eletricidade e de etanol pelo setor.

Por fim, estes três cenários de demanda energética foram rodados no MESSAGE Brasil, um modelo energético integrado de otimização desenvolvido no CENERGIA/PPE/COPPE/UFRJ, a partir de uma versão inicial do modelo MESSAGE disponibilizado no começo dos anos 2000 pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Este modelo abrange todos os segmentos do setor energético e, dado um perfil tecnológico e a disponibilidade de recursos, busca otimizar a oferta de energia para uma determinada demanda de energia. Para esta etapa, partiu-se do cenário de referência da versão MESSAGE BRAZIL v.1.3 (MSB-300), elaborada sob o projeto iNoPa da CAPES (Menezes *et al.*, 2015) e sob SORIA *et al.* (Manuscrito). Este cenário assume que não há qualquer esforço para mitigar as emissões de GEE pelo setor energético brasileiro. Nele, o sistema energético brasileiro segue uma trajetória de menor custo, sem considerar quaisquer restrições ao setor energético exceto as restrições de disponibilidade de recursos.

No presente trabalho, esta versão foi ligeiramente adaptada. Em especial, o vetor de demanda foi modificado, removendo-se a demanda exógena de energia por veículos leves, e introduzindo-se a demanda de energia final associada a cada um dos três cenários de penetração de veículos eletrificados, obtida nas rodadas do LEAP. Os resultados das três rodadas do MESSAGE (uma para cada cenário de penetração de veículos leves) evidenciam como o consumo de energia dos demais setores da economia reagiriam a diferentes

configurações de entrada de veículos elétricos. A comparação entre estes cenários viabiliza uma análise integrada dos possíveis desdobramentos da penetração de veículos elétricos na frota brasileira de veículos leves.

A primeira seção deste capítulo evidencia os ajustes feitos aos cenários de penetração de veículos selecionados para a segunda etapa da análise. Na seção seguinte, o modelo de projeção de demanda de energia do LEAP é detalhado e são apresentados a lógica central do modelo, os parâmetros de entrada considerados e as premissas adotadas. Por fim, a terceira seção objetiva descrever o MESSAGE. Os resultados destas análises são apresentados no capítulo subsequente.

#### **4.1 - Adaptação dos cenários de penetração de tecnologias**

Conforme já destacado, 22 cenários de penetração de tecnologias de propulsão de veículos leves, provenientes de seis publicações, foram modelados no LEAP a fim de construir os cenários de demanda de energia. Em linha com o escopo da segunda etapa desta metodologia de análise, procurou-se construir cenários de penetração de FFVs, HEVs, PHEVs e BEVs entre 2010 e 2050, com taxas anuais de participação destas tecnologias nas vendas anuais de veículos leves. Uma vez que a maior parte dos cenários extraídos da literatura possui um corte temporal, geográfico e/ou tecnológico distinto do vislumbrado para este estudo, foi necessário implementar uma série de adaptações a estes cenários. O Quadro 4-1 evidencia os cortes adotados no presente estudo, em termos de tempo, geografia e tecnologia, aos quais os cenários foram adaptados.

**Quadro 4-1– Cortes do estudo**

| Parâmetro              | Corte adotado                   |
|------------------------|---------------------------------|
| Horizonte temporal     | 2010-2050                       |
| Intervalos             | 1 ano                           |
| Abrangência geográfica | Brasil                          |
| Tecnologias            | VMC*, GNV*, FFV, HEV, PHEV, BEV |

Fonte: Elaboração própria

Nota: \* Esta tecnologia é apenas considerada nos anos iniciais. Considera-se que ela será descontinuada no horizonte do estudo.

Em sua maioria, as publicações consideradas não apresentam valores anuais de taxa de penetração de tecnologias de veículos leves, mas apenas a distribuição das vendas no fim do horizonte de análise. Em alguns casos, as publicações apresentam também valores em pontos intermediários do período de análise (vide, por exemplo, IEA (2011)). Por este motivo, para quase todos os cenários fez-se uma interpolação dos valores inicial e final de vendas de cada tecnologia a cada período a fim de se obter os valores anuais de penetração. Cabe ressaltar que, ao realizar este exercício para todas as tecnologias, é necessário manter uma das tecnologias como variável de ajuste, de modo a assegurar que, anualmente, a soma das taxas de penetração seja 100%. Assim, tomou-se os FFVs como tecnologia de ajuste de modo que, a cada ano, sua taxa de penetração pode ser expressa conforme descrito na Equação 4-1:

$$\text{Equação 4-1} \quad R_{FFV}^t = 1 - \sum_i^0 R_{X_i}^t$$

Onde:  
 $R_{FFV}^t$  corresponde à taxa de penetração da tecnologia FFV, no ano  $t$   
 $X_i$  corresponde à tecnologia de propulsão  $i$   
 $R_{X_i}^t$  corresponde à taxa de penetração da tecnologia  $X_i$  no ano  $t$   
 $t$  corresponde ao ano em questão

O cenário de penetração de veículos do AEO 2014 foi o único que dispensou este ajuste, uma vez que foi possível obter os valores anuais de penetração por tecnologia.

Algumas das publicações consideradas não evidenciavam claramente os valores exatos de penetração de cada tecnologia (e.g., apresentavam os valores apenas em gráficos, e não em tabelas). Nestes casos, procurou-se entrar em contato com os autores e, na eventualidade de

não se obter uma resposta satisfatória, os valores foram deduzidos a partir dos gráficos apresentados na publicação.

A fim de adaptar o contexto internacional para a realidade brasileira, no caso dos cenários globais e americanos, foi aplicado um atraso de cinco anos às taxas de penetração sugeridas. Assume-se com isso que a indústria e o mercado consumidor nacionais acompanham a tendência do mercado automotivo internacional, mas com um pequeno atraso.

Por fim, poucas publicações internacionais consideram os FFVs, mas apenas a tecnologia VMC em seus cenários. Dada a alta penetração de veículos *flex-fuel* no mercado brasileiro e o consistente declínio das vendas de VMCs a gasolina no mercado nacional (ANFAVEA, 2015), adotou-se uma premissa simplificadora de que 100% das taxas de penetração de VMCs dadas nos cenários internacionais corresponderiam a taxas de penetração de FFVs no Brasil. Na eventualidade de algum cenário prever tanto a penetração de VMCs a gasolina quanto de FFVs, as taxas de penetração adotadas para estas tecnologias foram somadas para perfazer a taxa de penetração de FFVs ajustada. Deste modo, nenhum dos cenários considera a penetração de VMCs no horizonte de análise. O mesmo ocorre com a tecnologia GNV. Nos poucos cenários que distinguiam a penetração de veículos a GNV, esta foi agregada sob a penetração de FFVs. Deste modo, forçou-se um descomissionamento destas tecnologias no modelo.

Todas as publicações tiveram que ser adaptadas seguindo os procedimentos descritos acima. As subseções a seguir descrevem estas e outras adaptações realizadas às taxas de penetração sugeridas na literatura e apresentam as taxas resultantes destas adaptações.

#### **a) IEA (2009) - *Transport, Energy and CO<sub>2</sub> - Moving toward sustainability***

Conforme já destacado, esta publicação apresenta seis cenários de penetração de veículos eletrificados. Os valores exatos de penetração considerados em cada cenário foram fornecidos pela IEA, e são apresentados na Tabela 4-1 abaixo.

**Tabela 4-1 – IEA 2009 – Taxa de penetração de tecnologias de propulsão de veículos leves entre 2005 – 2050 (%)**

| Ano  | Cenário            | VMC<br>gasolina | HEV<br>gasolina | PHEV<br>gasolina | CIE<br>diesel | HEV<br>diesel | PHEV<br>diesel | GNV/<br>LPG | BEV | FCV<br>H <sub>2</sub> |
|------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|----------------|-------------|-----|-----------------------|
| 2005 | Baseline           | 78              | 0               | 0                | 19            | 0             | 0              | 2           | 0   | 0                     |
| 2030 | Baseline           | 69              | 8               | 0                | 18            | 4             | 0              | 0           | 0   | 0                     |
|      | Baseline           | 60              | 16              | 0                | 18            | 6             | 0              | 0           | 0   | 0                     |
|      | High<br>Baseline   | 57              | 17              | 0                | 20            | 6             | 0              | 0           | 0   | 0                     |
| 2050 | BLUE<br>Shifts     | 59              | 16              | 0                | 19            | 6             | 0              | 0           | 0   | 0                     |
|      | BLUE Map           | 1               | 1               | 21               | 0             | 1             | 8              | 0           | 31  | 37                    |
|      | BLUE<br>Map/Shifts | 1               | 1               | 21               | 0             | 1             | 8              | 0           | 30  | 38                    |
|      | BLUE<br>EV/Shifts  | 3               | 4               | 9                | 0             | 1             | 5              | 0           | 78  | 0                     |

Fonte: Elaboração própria com base em IEA (2009)

Conforme destacado previamente, veículos leves com motor a ignição por compressão – isto é, veículos movidos a diesel - estão desconsiderados da análise de projeção da demanda de energia. Com isto, o esforço de adaptação deste cenário envolveu a supressão dos veículos a diesel, bem como dos veículos a célula combustível. A Tabela 4-2 explicita os valores finais de penetração de tecnologias de propulsão considerados neste cenário.

**Tabela 4-2 – IEA 2009 - Cenários adaptados de penetração de tecnologias (%)**

| Cenários<br>adaptados  | Ano  | FFV | HEV | PHEV | BEV |
|------------------------|------|-----|-----|------|-----|
| Baseline               | 2035 | 89  | 11  | 0    | 0   |
|                        | 2050 | 82  | 18  | 0    | 0   |
| High Baseline          | 2050 | 79  | 20  | 0    | 0   |
| BLUE Shifts            | 2050 | 80  | 19  | 0    | 0   |
|                        | 2025 | 90  | 4   | 3    | 3   |
| BLUE Map <sup>16</sup> | 2035 | 49  | 23  | 21   | 8   |
|                        | 2050 | 14  | 7   | 34   | 45  |
| BLUE Map/Shifts        | 2050 | 12  | 2   | 34   | 50  |
| BLUE EV/Shifts         | 2050 | 13  | 4   | 9    | 73  |

Fonte: Elaboração própria

---

<sup>16</sup> No caso do cenário BLUE Map, a sua adaptação também foi baseada em valores explicitados em IEA (2011), que reavaliou alguns dos cenários considerados sob IEA (2009) e que explicita valores de penetração de tecnologias de veículos leves em 2020 e 2030. Uma vez que foi aplicado um *delay* a estes dados, aqui, são apresentados valores de penetração para 2025 e 2035.

**b) EPE (2014) - Demanda de Energia 2050. NOTA TÉCNICA DEA 13/14**

A Nota Técnica DEA 13/14 (doravante referida apenas como Nota Técnica) apresenta apenas o cenário de referência de demanda nacional de energia. Em seu cenário de transportes, subsetor de veículos leves, a EPE considera que os HEVs começam a entrar no mercado brasileiro em 2015, enquanto que os BEVs passam a ser comercializados no mercado nacional apenas em meados da década de 2020. Contudo, considera-se que, a partir de meados da década de 2030, uma ruptura tecnológica permitirá uma maior penetração de veículos elétricos. A partir deste ponto, os veículos eletrificados passam a tomar rapidamente o lugar dos veículos *flex* no mercado nacional até atingirem 100% das vendas em 2050. Os HEVs representam 85% deste total e o restante é dominado por BEVs.

Nota-se que este cenário não considera a entrada de PHEVs no mercado nacional. Por um lado, nota-se que esta premissa é pouco coerente, dado que a conversão de um HEV em PHEV é um procedimento razoavelmente simples, e que permite ao usuário uma maior flexibilidade. Contudo, optou-se por manter a entrada de veículos eletrificados restrita a HEVs e BEVs. Tal premissa pode retratar, por exemplo, um cenário em que os elevados preços das baterias mantenham as vendas de PHEVs e BEVs suficientemente próximas de zero e que uma dada ruptura tecnológica provoca a redução do custo da bateria e o estabelecimento de uma infraestrutura suficientemente ampla para recarga rápida. Neste cenário, o PHEV tende a perder a atratividade, dado o baixo preço da bateria (menor custo de investimento) e a maior flexibilidade de recarga, proporcionada pela recarga rápida.

No presente estudo, ajusta-se a premissa de que os HEVs entram no mercado nacional em 2015 com uma participação de 0.5% nas vendas de veículos leves, uma vez que, em 2014, a participação desta tecnologia nas vendas era de apenas 0.01% ou equivalente a 842 veículos vendidos (ANFAVEA, 2015). Assim, aplicou-se um atraso no modelo original da EPE, de modo que os HEVs passam a representar 0.5% das vendas apenas em 2018. Entre 2014 e 2018, este parâmetro cresce linearmente de 0.01% até 0.5%. A partir de então a participação destes veículos nas vendas totais de veículos leves passa a crescer meio ponto percentual ao ano até 2022 e atinge 4.2% das vendas em 2026. Isto está em linha com o Plano Decenal de Energia 2023 (PDE 2023), ainda que com o referido atraso de três anos introduzido no presente estudo (MME/EPE 2014d). De modo a refletir uma expansão mais acelerada em um primeiro momento, com uma desaceleração a partir do momento em que a tecnologia já se encontra estabelecida, considera-se que a partir de 2026 as vendas de HEVs crescem linearmente até atingirem 40% em 2030, 80% em 2040 e, finalmente, 85% em 2050.

Com relação aos BEVs, ao invés de se considerar uma entrada gradativa desta tecnologia a partir de 2025 até 2050, tal qual é feito na Nota Técnica, considera-se que, a partir de 2010, a participação dos BEVs nas vendas de veículos leves no Brasil cresce linearmente até atingir 1% das vendas em 2036. Este ajuste visa refletir um cenário de rompimento tecnológico em 2036. A partir deste ponto, a participação dos BEVs nas vendas passa a crescer um ponto percentual ao ano até atingir 15% em 2050.

A Tabela 4-3 explicita os valores finais de penetração de tecnologias de propulsão considerados no cenário PNE adaptado.

**Tabela 4-3 – EPE 2014 – Cenário adaptado (%)**

| Ano  | FFV | HEV | BEV |
|------|-----|-----|-----|
| 2026 | 95  | 4   | 0   |
| 2030 | 75  | 25  | 0   |
| 2036 | 47  | 52  | 1   |
| 2040 | 27  | 68  | 5   |
| 2050 | 0   | 85  | 15  |

Fonte: Elaboração própria

### **c) EIA (2014) - Annual Energy Outlook 2014 [AEO 2014]**

O relatório AEO 2014 da agência norte-americana de energia apresenta somente um cenário de referência para a economia como um todo. O cenário de veículos leves abrange o período de 2012 a 2040 e cobre as seguintes tecnologias:

1. VMC a gasolina
2. Micro híbridos<sup>17</sup>
3. Veículos Flex
4. HEV
5. Diesel

---

<sup>17</sup> Micro híbridos são definidos nesta no AEO 2014 como veículos convencionais a gasolina com sistemas híbridos que permitem que o motor a combustão interna seja desligado quando o veículo está parado (e.g. em engarrafamentos, sinais de trânsito, etc.). Esta configuração permite uma maior eficiência do veículo, embora não faça dele um veículo híbrido propriamente dito.

6. PHEV
7. BEV
8. FCV

Excepcionalmente para este cenário foi possível obter valores anuais de penetração de cada uma destas tecnologias. Com isto, os únicos ajustes que necessários a este cenário foram relativos ao horizonte temporal e às tecnologias abrangidas.

Uma vez que o cenário do AEO se refere ao mercado norte americano, foi aplicado um *atraso* de cinco anos a este cenário. Os valores de vendas para os cinco anos restantes foram estimados considerando-se a taxa média de crescimento da participação nas vendas, no caso dos veículos eletrificados. Os veículos *flex* foram mantidos como variável de ajuste.

No que se refere às tecnologias, foram desconsiderados os veículos a diesel e os FCVs. Adicionalmente, tanto os VMC quanto os micro híbridos a gasolina foram incluídos sob a tecnologia *flex*. A Tabela 4-4 evidencia os valores de penetração resultantes destes ajustes.

**Tabela 4-4 – US EIA 2014 – Cenário adaptado (%)**

| Ano  | FFV | HEV | PHEV | EV |
|------|-----|-----|------|----|
| 2020 | 96  | 3   | 1    | 0  |
| 2025 | 96  | 3   | 0    | 0  |
| 2030 | 95  | 4   | 1    | 0  |
| 2035 | 94  | 5   | 1    | 0  |
| 2040 | 93  | 5   | 1    | 1  |
| 2045 | 93  | 5   | 1    | 1  |
| 2050 | 92  | 6   | 1    | 1  |

Fonte: EIA (2014)

**d) Wu et al. (2012) – Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China**

Wu et al. constroem quatro cenários paramétricos possíveis para a penetração de veículos leves na China. Os cenários se estendem de 2010 a 2030 e abrangem VMCs, HEVs, PHEVs e BEVs. A fim de ampliar a extensão dos cenários, admitiu-se que os valores finais de penetração considerados no estudo ocorrem apenas em 2050. Optou-se por esta abordagem uma vez que admitiu-se ser otimista a consideração de uma penetração significativa de veículos eletrificados até 2030. Com relação às tecnologias, a única adaptação foi a

consideração de que todos os VMCs correspondem a FFVs. Também neste caso foi aplicado um *delay* na entrada de veículos eletrificados, de modo que se admite que o mercado brasileiro de veículos leves será mais lento que o chinês na incorporação de veículos eletrificados. A Tabela 4-5 apresenta os percentuais considerados neste estudo, para cada cenário.

**Tabela 4-5 – Wu et al. 2012 – Cenários adaptados (%)**

| Ano  | Cenário | FFV | HEV | PHEV | EV |
|------|---------|-----|-----|------|----|
| 2050 | China 1 | 83  | 13  | 2    | 0  |
|      | China 2 | 57  | 26  | 13   | 2  |
|      | China 3 | 44  | 26  | 26   | 2  |
|      | China 4 | 28  | 26  | 26   | 18 |

Fonte: Elaboração própria com base em Wu et al. (2012)

#### e) IIASA (2012) - Global Energy Assessment [GEA 2012]

O GEA 2012 avalia um total de quatro cenários de penetração de veículos leves, que se estendem de 2005 a 2100. Esta publicação especifica valores de penetração por tecnologia para 2030, 2050 e 2100. Foi necessário, portanto, restringir o horizonte a 2050. Contudo, dado que estes cenários se referem a um escopo global, também aqui aplicou-se um *delay* de cinco anos.

As tecnologias avaliadas abrangem VMCs, HEVs (gasolina), Motores Diesel, HEVs (diesel), CNG/LPG, FCVs e BEVs. Conforme realizado para os demais cenários, o ajuste dos cenários do GEA dispensou as tecnologias a diesel e os FCVs. A Tabela 4-6 apresenta os valores de penetração considerados para 2035, 2045 e 2050 sob cada cenário.

**Tabela 4-6 – GEA 2012 - Cenários adaptados de penetração de tecnologias (%)**

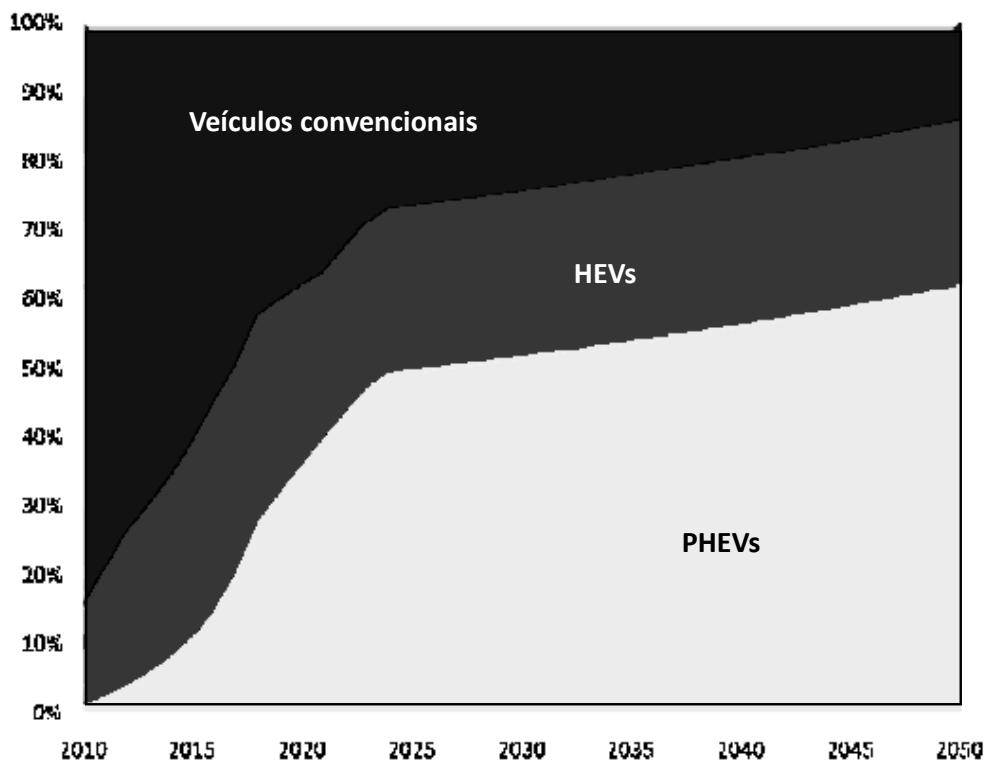
| Cenários adaptados | Ano  | FFV | HEV | PHEV | BEV |
|--------------------|------|-----|-----|------|-----|
| GEA – Ref          | 2035 | 99  | 1   | 0    | 0   |
|                    | 2040 | 99  | 1   | 0    | 0   |
|                    | 2045 | 99  | 1   | 0    | 0   |
|                    | 2050 | 99  | 1   | 0    | 0   |
| GEA - Supply       | 2035 | 46  | 54  | 0    | 0   |
|                    | 2040 | 45  | 55  | 0    | 0   |
|                    | 2045 | 45  | 55  | 0    | 0   |
|                    | 2050 | 45  | 55  | 0    | 0   |
| GEA - Efficiency   | 2035 | 31  | 51  | 0    | 19  |
|                    | 2040 | 29  | 45  | 0    | 26  |
|                    | 2045 | 28  | 41  | 0    | 31  |
|                    | 2050 | 28  | 37  | 0    | 35  |
| GEA - Mix          | 2035 | 35  | 57  | 0    | 7   |
|                    | 2040 | 33  | 54  | 0    | 13  |
|                    | 2045 | 33  | 50  | 0    | 17  |
|                    | 2050 | 33  | 47  | 0    | 20  |

Fonte: Elaboração própria

**f) EPRI (2007) - Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles**

Nesta publicação do EPRI são construídos seis cenários alternativos de penetração de PHEVs e HEVs, entre 2010 e 2050. Os valores de penetração por tecnologia são apenas explicitados para o último ano da análise. Contudo, para um dos cenários (EPRI-Med) é apresentado um gráfico ilustrando a penetração das tecnologias (vide Figura 4-2). A fim de que os cenários ajustados fossem tão próximos quanto possível dos cenários considerados na publicação, partiu-se de uma análise visual deste gráfico para conceber os cenários ajustados.

Conforme evidenciado na Figura 4-2, as vendas de PHEVs apresentam um crescimento expressivo até aproximadamente 2017 quando a velocidade da penetração desta tecnologia deixa de aumentar e passa a ser constante. Em 2025, ocorre uma segunda inflexão, a partir da qual a entrada de PHEVs torna-se mais lenta e a participação de HEVs nas vendas fica praticamente estagnada.



**Figura 4-2 – EPRI 2007 – Composição das vendas de veículos leves no cenário de penetração média de PHEVs (2010-2050)**

Fonte: Adaptado de EPRI (2007)

Pontos de inflexão semelhantes são aplicados em todos os cenários ajustados. Contudo, uma vez que os cenários desta publicação são focados nos Estados Unidos, assume-se novamente que, os pontos de inflexão ocorrem com um *delay* de cinco anos, i.e., em 2023 e 2030. Tabela 4-7 evidencia os valores de penetração de PHEVs e HEVs considerados em 2023, 2030 e 2050.

**Tabela 4-7 – EPRI 2007 - Cenários adaptados de penetração de tecnologias (%)**

| Cenários adaptados     | Ano  | FFV | HEV | PHEV |
|------------------------|------|-----|-----|------|
| EPRI - Low             | 2023 | 78  | 10  | 12   |
|                        | 2030 | 70  | 15  | 15   |
|                        | 2050 | 57  | 23  | 20   |
| EPRI - Medium          | 2023 | 43  | 30  | 27   |
|                        | 2030 | 30  | 20  | 50   |
|                        | 2050 | 14  | 24  | 62   |
| EPRI - High            | 2023 | 63  | 10  | 27   |
|                        | 2030 | 38  | 12  | 50   |
|                        | 2050 | 7   | 15  | 78   |
| EPRI – Low Baseline    | 2023 | 90  | 10  | 0    |
|                        | 2030 | 85  | 15  | 0    |
|                        | 2050 | 71  | 29  | 0    |
| EPRI – Medium Baseline | 2023 | 70  | 30  | 0    |
|                        | 2030 | 49  | 51  | 0    |
|                        | 2050 | 41  | 59  | 0    |
| EPRI – High Baseline   | 2023 | 63  | 37  | 0    |
|                        | 2030 | 38  | 62  | 0    |
|                        | 2050 | 25  | 75  | 0    |

Fonte: Adaptado de EPRI (2007)

## 4.2 - LEAP: Metodologia para a projeção da demanda de energia

Cada um dos cenários descritos na seção anterior foi rodado no LEAP a fim de se determinar o perfil da demanda de energia associado a cada cenário. Conforme destacado na abertura deste capítulo, o objetivo desta etapa foi determinar os cenários que representavam situações extremas de demanda de eletricidade e etanol pelos veículos leves.

O LEAP é um modelo paramétrico de projeção de demanda e também de oferta de energia para setores diversos. A demanda de energia no setor de transporte pode ser feita seja com base na projeção de passageiros-quilômetro ou da frota futura. No presente estudo, optou-se pela projeção de frota. Por esta metodologia, a demanda por dado combustível em um dado ano é estimada de acordo com a Equação 4-2.

**Equação 4-2**

$$D_{y_j}^t = \sum_{i=1}^8 \left( c_{y_j, x_i} \times F_{x_i}^t \times K_{x_i}^t \times \eta_{x_i, y_j}^t \right)$$

Onde:  $D_{y_j}^t$  Representa a demanda do combustível  $y_j$  no ano  $t$  (GJ)

$c_{y_j, x_i}$  Representa a proporção de consumo do combustível  $y_j$  pela tecnologia de veículo leve  $x_i$  (%), fixa ao longo dos anos

$F_{x_i}^t$  Representa a frota total da tecnologia de veículos leves  $x_i$  no ano  $t$  (# veículos)

$K_{x_i}^t$  Representa a quilometragem total percorrida por veículos da tecnologia  $x_i$  no ano  $t$  (km)

$\eta_{x_i, y_j}^t$  Representa a eficiência associada à tecnologia  $x_i$ , rodando com o combustível  $y_j$  no ano  $t$  (km/GJ)

Por sua vez a frota de veículos leves por tecnologia foi projetada com base na Equação 4-3.

**Equação 4-3**

$$F_{x_i}^t = F_{x_i}^{t-1} + p_{x_i}^t V^t - \sum_{k=1}^{40} (S_{x_i}^{k,t} \times F_{x_i}^{t-1,k})$$

Onde:  $F_{x_i}^{t-1}$  Representa a frota de veículos da tecnologia  $x_i$  em circulação no ano  $t - 1$  (# veículos)

$p_{x_i}^t$  Representa a penetração de veículos da tecnologia  $x_i$  no ano  $t$  (%)

$V^t$  Representa as vendas totais de veículos leves no ano  $t$  (# veículos)

$S_{x_i}^{t,k}$  Representa o percentual de veículos da idade  $k$  e da tecnologia  $x_i$  que são sucateados no ano  $t$  (%)

$F_{x_i}^{t-1,k}$  Representa a frota de veículos da idade  $k$  e da tecnologia  $x_i$  em circulação no ano  $t - 1$  (# veículos)

Os itens a seguir descrevem as premissas adotadas para cada um dos parâmetros explicitados nas equações acima. Cabe ressaltar que, conforme destacado previamente, o horizonte de análise deste estudo se estendeu de 2010 a 2050. Ainda, são abrangidos VMCs, FFVs, GNVs, HEVs, PHEVs e BEVs.

#### 4.2.1 - Frota nacional, vendas no ano base e projeção de vendas

Os dados de frota e vendas de VMCs e FFVs entre 2010 e 2014 foram extraídos do 2º inventário nacional de veículos leves. Por sua vez, a frota total de veículos GNV para este período em 2010 foi obtida a partir de IBP (2014). A estimativa da conversão anual de veículos

a GNV em 2010 foi estimada com base no incremento na frota destes veículos observado entre 2009 e 2010. Cabe ressaltar que tanto no caso da frota de veículos quanto das vendas, considerou-se que apenas FFVs eram convertidos a GNV. Deste modo, o total de frota e vendas de GNVs foi descontado do total de frota e venda de FFVs.

A frota de veículos elétricos (HEVs, PHEVs e BEVs) entre os anos 2010 e 2014 foi derivada de dados de vendas destes veículos, disponíveis no Anuário da ANFAVEA (ANFAVEA, 2015). O primeiro ano de vendas de veículos elétricos, de acordo com ANFAVEA (2015) foi 2006. A fim de estimar a frota de veículos elétricos até 2014, admite-se que nenhum dos veículos vendidos entre 2006 e 2014 foi sucateado. Uma vez não havia dados desagregados por tecnologia de veículos elétricos, optou-se por adotar uma premissa simplificadora de que a frota atual se divide igualmente entre HEVs, PHEVs e BEVs. Considera-se que, dado a pequena participação destes veículos atualmente na frota nacional, esta premissa teria pouco impacto nos resultados e que, portanto, um maior detalhamento da proporção de tecnologias de veículos elétricos no ano inicial da análise representaria um esforço injustificado.

#### *4.2.2 - Percentual de consumo de combustível por tecnologia*

As tecnologias consideradas no presente estudo consomem múltiplas fontes de energia. Por exemplo, os FFVs admitem o consumo de etanol e gasolina e os PHEVs, o consumo de eletricidade, gasolina e etanol. A Tabela 4-8 abaixo explicita os combustíveis consumidos por cada tecnologia. Por simplificação, considerou-se que todos os veículos convertidos a GNV consomem somente GNV.

**Tabela 4-8 – Combustíveis consumidos por cada tecnologia**

| Tecnologia | Gasolina C | Etanol | GNV | Eletricidade |
|------------|------------|--------|-----|--------------|
| VMC-E      |            | ✓      |     |              |
| VMC-G      | ✓          |        |     |              |
| FFV        | ✓          | ✓      |     |              |
| GNV        |            |        | ✓   |              |
| HEV        | ✓          | ✓      |     |              |
| PHEV       | ✓          | ✓      |     | ✓            |
| BEV        |            |        |     | ✓            |

Fonte: Elaboração própria

Para lidar com as diferentes configurações possíveis de escolha do usuário, foram consideradas três tipologias de macro cenários, cada qual com uma configuração por

tecnologia, sob as quais os 22 cenários de penetração foram rodados, conforme explicitado na Tabela 4-9 abaixo. Esses macro cenários variam de acordo com a proporção de consumo de etanol nos FFVs, HEVs e PHEVs e com a proporção de eletricidade nos PHEVs, informações não disponíveis nos estudos originais.

Conforme destacado no capítulo 1, uma das hipóteses que este estudo busca avaliar é a de que os veículos eletrificados podem ter impactos sobre a indústria brasileira de etanol. Portanto, os três macro cenários foram estruturados de modo a simular situações extremas de consumo de etanol.

Assim, no *macro cenário A*, simula-se uma situação de consumo máximo de etanol. Neste macro cenário, 61% do consumo de combustível líquido por FFVs, HEVs e PHEVs corresponde a etanol, enquanto que, em média, os PHEVs rodam 50% do tempo com a bateria em modo de depleção de carga, isto é, consumindo unicamente eletricidade. No outro extremo, o *macro cenário C* corresponde a uma situação em que os usuários de FFVs, HEVs e PHEVs consomem etanol apenas 29% das vezes em que consomem combustível líquido. No caso dos PHEVs, estes rodam com a bateria em modo de depleção 90% das vezes, de modo que a participação do etanol no consumo total de energéticos por estes veículos cai para apenas 3%<sup>18</sup>.

**Tabela 4-9 – Tipologias de macro cenários (%)**

| Macro cenário          | Proporção de consumo de etanol por FFV e HEV (A) | Proporção de consumo de eletricidade por PHEV (B) | Proporção de consumo de etanol por PHEV (A)*[1-(B)] |
|------------------------|--|---|---|
| <b>Macro cenário A</b> | 61   | 50  | 30  |
| <b>Macro cenário B</b> | 49   | 70  | 15  |
| <b>Macro cenário C</b> | 29   | 90  | 3   |

Fonte: Elaboração própria

Os valores referentes à proporção de consumo de etanol por veículos bicompostível foram determinados com base nos dados históricos de proporção de distribuição do consumo entre etanol e gasolina por usuários de veículos *flex* entre 2004 e 2013, obtidos a partir do anuário da ANP (MME/ANP, 2014). Os valores adotados correspondem aos valores máximo, mínimo e médio anuais encontrados nas estatísticas. Optou-se por trabalhar com médias anuais, e não mensais, uma vez que o consumo de etanol apresenta sazonalidades ao longo de um ano – em função das variações de preço que acompanham os períodos de safra e entressafra

---

<sup>18</sup> Isto corresponde a 29% multiplicado pelo percentual de participação de combustíveis líquidos por estes veículos, que é igual a 10%.

(Bressan Filho, 2009). Ou seja, adotar valores máximos e mínimos com base na sequência histórica mensal seria uma premissa pouco acurada, por refletir uma sazonalidade e não uma tendência anual.

Por sua vez a faixa de variação de consumo de eletricidade por PHEVs foi estabelecida com base na autonomia mínima disponível atualmente no mercado e em uma premissa acerca de distância percorrida em média entre recargas. De acordo com IEA (2011) a autonomia típica dos PHEVs reside atualmente entre 20 km e 80 km. Ademais, com base nas premissas de deslocamento anual de veículos por idade disponíveis em MMA (2014), verificou-se que a quilometragem média da frota nacional de veículos é cerca de 10,000 km/ano, de modo que a quilometragem diária poderia ser estimada em cerca de 40 km/dia<sup>19</sup>.

A faixa de variação de consumo de eletricidade aplicada neste trabalho está em linha com os resultados de diversos estudos que buscaram determinar o fator de utilização do motor elétrico nos PHEVs. SMART *et al.* (2014), por exemplo, encontraram fatores de utilidade de 72% e 74% em uma frota privada de veículos, dotada de recarga domiciliar e de alguns pontos públicos de recarga.

#### 4.2.3 - Perfil da frota

A caracterização do perfil de idade da frota é necessária a fim de se determinar a quilometragem anual percorrida com cada fonte energética por veículos leves. Parte-se, portanto, da premissa de que, em média, os veículos mais antigos percorrem uma distância menor. O perfil da frota de VMCs a gasolina e a etanol e da frota de FFVs e GNVs foi determinado com base em dados de frota circulante por idade da CETESB (2014) para o estado de São Paulo. Assumiu-se que o perfil de idade da frota nacional era o mesmo que o perfil da frota de São Paulo.

Os dados referentes ao estado de São Paulo foram replicados para toda a frota nacional uma vez que este estado concentra mais de um terço de toda a frota nacional de veículos (DENATRAN, 2015) e que os dados disponíveis para São Paulo foram os mais acurados

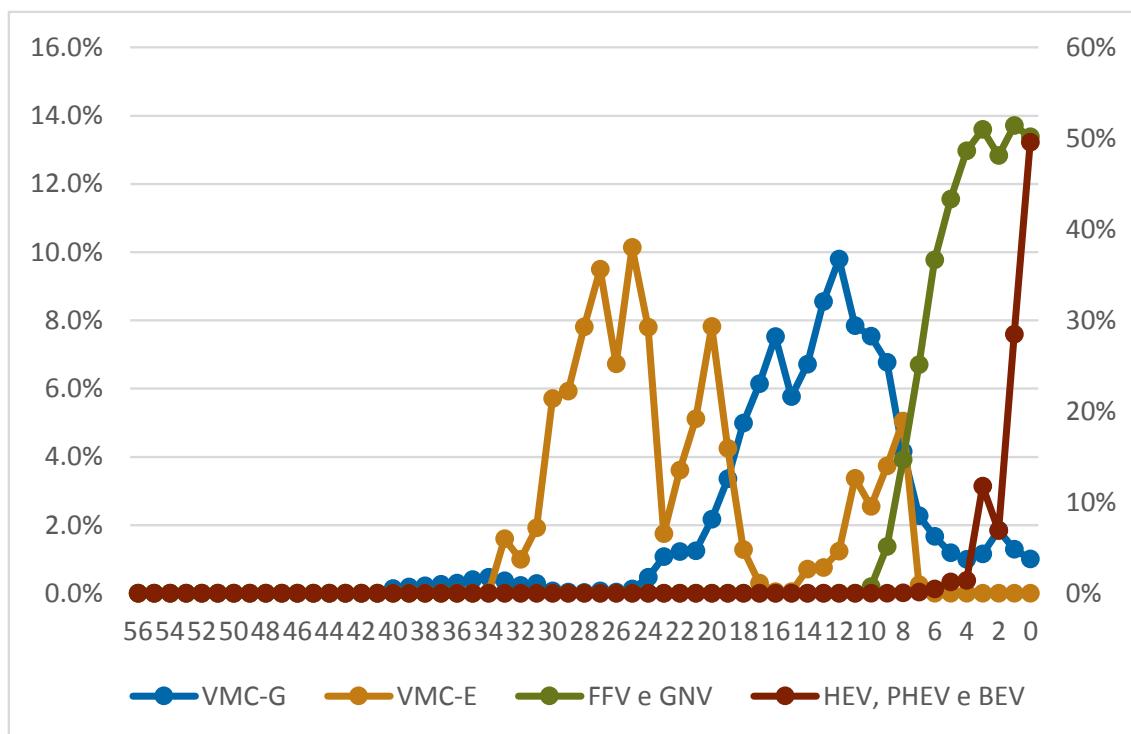
---

<sup>19</sup> Para chegar a este valor, admitiu-se que os veículos são utilizados apenas nos dias de semana, de modo que a quilometragem anual foi dividida por 240 (5 dias úteis/semana x 4 semanas/mês x 12 meses/ano), e não por 365.

encontrados para o país<sup>20</sup>. Cabe ressaltar que estes dados são referentes a 2013 e que a CETESB não disponibiliza em sua página os dados de perfil de idade de frota referentes a 2010. Dado que a idade média dos veículos verificada nos dados de 2013 (13 anos para VMC a gasolina, 22 para VMC a etanol e 4 para FFVs) não difere significativamente da verificada no inventário de emissões de São Paulo referente a 2011 (CETESB, 2012), optou-se por assumir que o perfil de idade da frota não se alterou consideravelmente entre 2010 e 2013. Desta maneira, o perfil da frota dado em CETESB (2014) foi adotado sem qualquer ajuste adicional.

Por sua vez, o perfil da frota de veículos eletrificados foi determinado com base nos dados de venda de veículos eletrificados (vide ANFAVEA, 2015, conforme descrito anteriormente).

A Figura 4-3 evidencia os perfis de idade considerados, por tecnologia.



**Figura 4-3 – Perfil de idade da frota, por tecnologia**

Fonte: Elaboração própria, com base em CETESB (2014) e ANFAVEA (2015)

<sup>20</sup> O Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013 (MMA 2014) apresenta um detalhamento da frota circulante de veículos por fase do PRONCOVE. Uma vez que cada fase teve uma duração de três a cinco anos, considerou-se preferível adotar uma distribuição mais contínua da frota por idade.

Por fim, foi necessário estimar a distância percorrida anualmente pela frota circulante, com base na distância média percorrida pelos veículos pertencentes a cada faixa de idade. Estes valores foram extraídos de MMA (2014) e estão evidenciados na Tabela 4-10.

**Tabela 4-10– Quilometragem média percorrida por veículos**

| Idade dos veículos | Quilometragem - Automóveis | Idade dos veículos | Quilometragem - Automóveis |
|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| 0                  | 10,000.00                  | 21                 | 7,400.00                   |
| 1                  | 19,400.00                  | 22                 | 6,800.00                   |
| 2                  | 18,800.00                  | 23                 | 6,200.00                   |
| 3                  | 18,200.00                  | 24                 | 5,600.00                   |
| 4                  | 17,600.00                  | 25                 | 5,000.00                   |
| 5                  | 17,000.00                  | 26                 | 4,400.00                   |
| 6                  | 16,400.00                  | 27                 | 3,800.00                   |
| 7                  | 15,800.00                  | 28                 | 3,200.00                   |
| 8                  | 15,200.00                  | 29                 | 2,600.00                   |
| 9                  | 14,600.00                  | 30                 | 2,000.00                   |
| 10                 | 14,000.00                  | 31                 | 2,000.00                   |
| 11                 | 13,400.00                  | 32                 | 2,000.00                   |
| 12                 | 12,800.00                  | 33                 | 2,000.00                   |
| 13                 | 12,200.00                  | 34                 | 2,000.00                   |
| 14                 | 11,600.00                  | 35                 | 2,000.00                   |
| 15                 | 11,000.00                  | 36                 | 2,000.00                   |
| 16                 | 10,400.00                  | 37                 | 2,000.00                   |
| 17                 | 9,800.00                   | 38                 | 2,000.00                   |
| 18                 | 9,200.00                   | 39                 | 2,000.00                   |
| 19                 | 8,600.00                   | 40                 | 2,000.00                   |
| 20                 | 8,000.00                   |                    |                            |

Fonte: Elaboração própria com base em MMA (2014)

#### 4.2.4 - Curvas de sucateamento

As curvas de sucateamento descrevem a probabilidade de sucateamento de veículos típicos de cada idade. A determinação das curvas de sucateamento de cada tecnologia é necessária para estimar o acréscimo líquido de veículos à frota a cada ano (vide Equação 4-3) apresentada anteriormente.

Neste estudo, a curva de sucateamento adotada para todas as tecnologias é a mesma aplicada em numerosos estudos do setor de veículos leves (vide, por exemplo, MCTI, 2006, MMA, 2014, dentre diversos outros artigos acadêmicos) e é a curva utilizada pelo Serviço de

Planejamento da Petrobras (MMA, 2014). Esta curva foi primeiramente publicada em MATTOS e CORREIA (1996) e é baseada em dados da Pesquisa Nacional de Domicílio (PNAD) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 1988. Deste modo, é provável que esta curva esteja obsoleta, dada a evolução da frota em termos de idade média e taxa de sucateamento (Schmitt, 2010). Contudo, na medida em que não foram identificados estudos mais recentes com curvas atualizadas para o Brasil, a curva apresentada por MATTOS e CORREIA (1996) foi a utilizada neste estudo.

Esta curva de sucateamento é uma função de Gompertz e pode ser escrita da seguinte forma:

**Equação 4-4**

$$S_{x_i}^{t,k} = 1 - a \times \exp(b \times \exp(c + dt))$$

Onde:  $S_{x_i}^{t,k}$  Corresponde à fração de veículos remanecentes, ainda não sucateados, de no ano  $t$ , tecnologia  $x_i$  e idade  $k$   
 $a, b, c, d$  São constantes

Considerando-se  $a = 1$  e  $b = -1$ , tem-se:

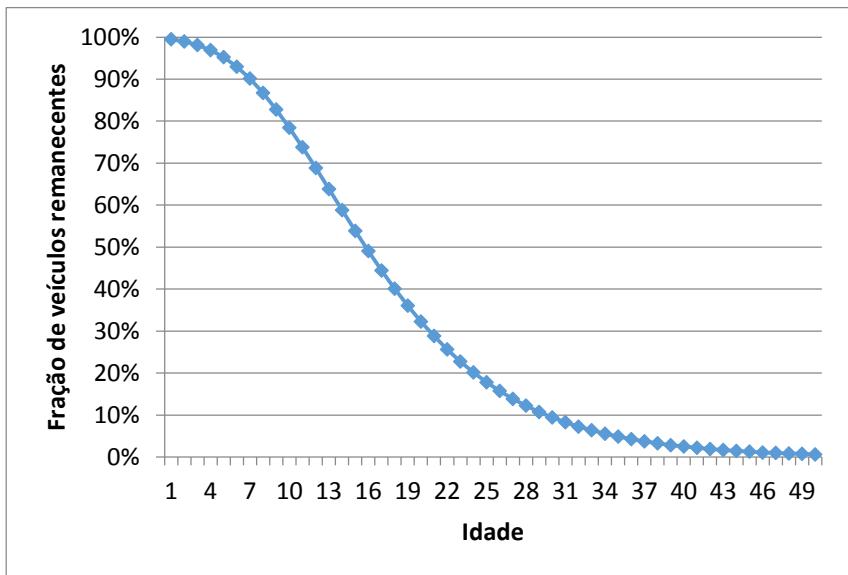
**Equação 4-5**

$$S_{x_i}^{t,k} = 1 - \exp(-\exp(c + dt))$$

Em linha com MMA (2014), considera-se os seguintes valores para  $a$  e  $b$ :

- $c = 1,798$
- $d = -0,137$

A Figura 4-4 ilustra a curva de sucateamento considerada para todas as tecnologias englobadas no presente estudo.



**Figura 4-4 – Curva de sucateamento**

Fonte: Elaboração própria, com base em MATTOS & CORREIA (1996) MMA (2014)

#### 4.2.5 - Projeção de vendas

Em linha com MME/EPE (2014c), considerou-se que a frota nacional se expandiria a uma taxa de 2.4% ao ano. Para se projetar as vendas anuais por tecnologia sob cada cenário, os percentuais de penetração por tecnologia dados nos 22 cenários foram aplicados a esta expansão, conforme detalhado na seção 3-1.

#### 4.2.6 - Eficiência

Os valores de eficiência energética para VMCs e FFVs foram extraídos de CETESB (2014), publicação que apresenta valores específicos para o estado de São Paulo. Os valores obtidos para o Estado de São Paulo foram assumidos equivalentes ao restante do país. A eficiência dos veículos a GNV foi extraída de MMA (2014).

Por sua vez, os dados de eficiência de veículos elétricos foram derivados dos dados históricos de eficiência energética disponíveis no banco de dados de veículos do departamento norte-americano de energia (US DOE) (DOE & EPA, 2015). Este banco de dados agrupa os resultados dos testes de desempenho realizados pela agência norte-americana de meio ambiente (US EPA) e fornece informações de eficiência energética por combustível para todos

os modelos de veículos disponíveis no mercado norte-americano. São disponibilizadas tanto informações de eficiência energética desagregadas por uso – i.e. ciclo urbano ou ciclo de estrada – quanto agregadas. Adicionalmente, estão disponíveis tanto dados de eficiência energética obtidos diretamente em testes em condições de laboratório quanto dados ajustados para refletir condições reais de direção – e.g., tráfego, comportamento do condutor, condições da estrada, etc.

Neste estudo, a fim de derivar a eficiência energética de cada tecnologia dos veículos elétricos, foram aplicados os dados ajustados para condições reais e agregados (ciclo urbano e ciclo de estrada). A eficiência energética do consumo de cada combustível sob cada tecnologia foi obtida aplicando-se a eficiência média entre os modelos de veículos pertencentes àquela tecnologia. Cabe ressaltar que os valores de eficiência das tecnologias eletrificadas foram ajustados para contemplar as diferenças entre a gasolina americana e a gasolina brasileira (com cerca 25% de etanol anidro na mistura).

Por fim, os valores de eficiência encontrados para os PHEVs e BEVs foram ajustados para contemplar as perdas de energia associadas à recarga dos veículos. De acordo com Pollet *et al.* (2012), um veículo do modelo Mitsubishi i-MiEV, ao ser recarregado em uma tomada caseira comum apresenta perdas de cerca de 10%, enquanto que a sua recarga em potências de cerca de 50 kW (condizente com uma recarga ultra-rápida) pode implicar perdas de até 40%, em função da energia dispendida para arrefecer a bateria. Cabe ressaltar que os dados do US DOE já consideram as perdas decorrentes da recarga normal<sup>21</sup>. Portanto foi necessário apenas ajustar os valores de eficiência para considerar as perdas com a recarga ultra-rápida.

O ajuste para considerar as perdas da recarga nos PHEVs e BEVs foi realizado considerando-se que estes veículos seriam recarregados em pontos de recarga ultra-rápida apenas quando percorressem distâncias superiores a 20km. Este limite foi estabelecido por ser tipicamente o limite inferior de autonomia dos PHEVs (IEA 2011). Uma vez que uma parcela não desprezível de PHEVs e BEVs têm uma autonomia superior a 20km, pode-se concluir que esta é uma premissa conservadora, na medida em que irá subestimar a eficiência dos BEVs. Não foi possível identificar na literatura o percentual de viagens por veículos leves que superam os 20 km no Brasil. A revisão da literatura permitiu identificar apenas dois países que monitoram este parâmetro: EUA (NHTS, 2009) e Reino Unido (Department for Transport, 2015). Optou-

---

<sup>21</sup> Nos testes realizados pela EPA, os valores da energia elétrica consumida pelo veículo são coletados em um ponto tal que a energia da recarga é incluída no valor da eficiência final. Nestes testes, os veículos são recarregados de acordo com as especificações do fabricante, que tipicamente corresponde a um sistema de 240V.

se, portanto, por adotar a média entre os valores fornecidos para estes dois países, que corresponde a 25%.

A Tabela 4-11 sumariza os valores de eficiência considerados no presente estudo.

**Tabela 4-11 – Eficiência energética por tecnologia de propulsão**

| Tecnologia  | Valor | Unidade           |
|-------------|-------|-------------------|
| VMC-G       | 11.19 | km/l              |
| VMC-E       | 8.24  | km/l              |
| FFV-G       | 11.92 | km/l              |
| FFV-E       | 8.10  | km/l              |
| GNV         | 12.00 | km/m <sup>3</sup> |
| HEV-G       | 13.15 | km/l              |
| HEV-E       | 9.41  | km/l              |
| PHEV-G      | 13.67 | km/l              |
| PHEV-E      | 9.78  | km/l              |
| PHEV-Eletr. | 29.19 | kWh/100km         |
| BEV         | 27.40 | kWh/100km         |

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2014), MMA (2014) e DOE & EPA (2015)

Nota: As letras G e E indicam a eficiência do veículo rodando com gasolina C e etanol, respectivamente.

Por simplificação, estes valores foram considerados constantes ao longo do período de análise, muito embora reconheça-se que a eficiência dos veículos leves não permanecerá de fato constante. Esta simplificação se deveu à ausência de um estudo de projeção da eficiência dos veículos que abrangesse de uma só vez todas as tecnologias de veículos leves tratadas no presente estudo. Julgou-se que, ao selecionar valores de eficiência futura a partir de diferentes estudos, se estaria incorrendo no risco de os resultados serem influenciados pelo o que seria, na realidade, diferenças entre premissas desses estudos de referência. Assim, preferiu-se preservar a atual proporção entre as eficiências das tecnologias ora abrangidas e, de certa forma, incorrer em uma pequena superestimação dos resultados, a arriscar influenciar os resultados da análise em função de parâmetros que não são centrais à mesma.

#### **4.3 - Descrição do MESSAGE<sup>22</sup>**

O MESSAGE (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts*) é um software de otimização de sistemas energéticos que foi desenvolvido pelo *International Institute for Applied System Analysis* (IIASA). O MESSAGE é amplamente aplicado no desenvolvimento de estudos na área de políticas públicas de planejamento energético de médio e longo prazos, tendo sido inclusive utilizado para o IPCC Fifth Assessment Report (AR5) (IPCC, 2014), para simular um dos Cenários Representativos de Concentração (RCPs, na sigla em inglês<sup>23</sup>) de GEE. De acordo com BORBA (2012), outros estudos de destaque recentes que aplicaram o MESSAGE incluem KLAASSEN e RIAHI (2007); LUI *et al.* (2009); SARADHI *et al.* (2009); HAINOUN *et al.* (2010); MOHAPATRA e MOHANAKRISHNAN (2010).

Diversas versões do modelo já foram elaboradas, para adequar-se a diferentes realidades (Energy Plan, 2009). No presente estudo recorreu-se ao MESSAGE-Brasil para a realização das simulações de oferta ótima de energia para atender a demanda de energia de veículos leves estimada no LEAP. O MESSAGE-Brasil é uma versão do MESSAGE elaborada pelo CENERGIA/PPE/COPPE de modo a adaptar as tecnologias e os parâmetros do modelo original à realidade brasileira (Schaeffer *et al.*, 2015). A primeira versão do MESSAGE-Brasil foi elaborada para a *International Atomic Energy Agency*, 2006 (IAEA, 2006) e desde então vem sendo aplicada a uma série de estudos tais como: SCHAEFFER *et al.* (2004), SCHAEFFER *et al.* (2008a), SCHAEFFER *et al.* (2008b), LUCENA *et al.* (2010), BORBA (2012), MALAGUETA *et al.* (2013), MALAGUETA (2013), SORIA *et al.* (Manuscrito), PORTUGAL-PEREIRA *et al.* (2016).

O MESSAGE é um modelo de otimização da oferta de energia de um sistema, dadas restrições de oferta de energéticos, investimentos, restrições ambientais, preços, penetração de novas tecnologias, dentre outras. (Keppo e Strubegger 2010, Lucena, 2010). O software parte de valores demanda energética determinados exogenamente e estima o perfil de oferta de energia que minimiza o custo de atendimento desta demanda, levando-se em consideração parâmetros técnico-econômicos do sistema energético e outras restrições aplicáveis (Nogueira *et al.*, 2014).

---

<sup>22</sup> Esta seção está fortemente baseada em BORBA (2012), NOGUEIRA *et al.* (2014) e SCHAEFFER *et al.* (2015)

<sup>23</sup> Representative concentration pathways.

A estrutura fundamental do MESSAGE corresponde à descrição técnico-econômica do sistema em questão. Isto abrange uma descrição das formas de energia consideradas, (energia final, primária, útil, etc.), dos insumos e das tecnologias de transformação destes combustíveis (IAEA, 2006, Schaeffer *et al.*, 2015). Nesta estrutura, são descritos os fluxos de energia do sistema energético, desde a fonte primária de energia, passando pelas tecnologias de extração e transformação secundária e chegando à demanda de energia final. Conforme destacado, os dados de demanda são exógenos ao modelo e podem ser inseridos tanto em termos de energia final como em termos de energia útil (Hainoun *et al.*, 2010).

Objetivamente, o princípio de operação do modelo é a otimização de uma função objetivo (e.g., menor custo, menor impacto ambiental, etc.) dada uma série de restrições, tais quais as citadas acima. Borba (2012) propõe a Equação 4-6 abaixo a fim de descrever de forma simplificada a operação do MESSAGE. Nesta equação, busca-se minimizar a função objetivo considerando cada recurso energético, os custos de sua extração, da instalação de unidades de transformação (conversão, transporte e distribuição) e da operação e manutenção destas unidades. A função objetivo, que realiza o somatório dos custos a cada ano, é sujeita a (s.a.) uma série de restrições, entre as quais: a oferta de dado recurso não deve ser superior à sua demanda em dado ano; a geração de energia com este recurso deve obedecer aos limites da capacidade instalada; a quantidade total extraída do recurso em ao longo do período analisado não poderá ser superior às suas reservas.

**Equação 4-6**

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^k \left[ \sum_{j=1}^m \frac{(R_j \cdot CE_j)_t}{(1+d)^{(k-t)}} + \sum_{i=1}^n \frac{(P_i \cdot CI_i)_t + (E_i \cdot COM_i)_t}{(1+d)^{(k-t)}} \right]$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^n E_{i,l,t} \geq D_{l,t} \quad (l = 1, \dots, a) (t = 1, \dots, k)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$E_i^{\min} \leq E_i \leq E_i^{\max} \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n R_{j,t} \geq R_j^{\text{total}} \quad (j = 1, \dots, m)$$

$$E_i \leq P_i \cdot FC \quad (i = 1, \dots, n)$$

Onde:

Z: custo total do sistema;

k: período de análise;

m: quantidade de recursos disponíveis;

n: quantidade de tecnologias de conversão, transporte e distribuição;  
d: taxa de desconto;  
R: quantidade do recurso j extraída, em termos de energia, no ano k;  
CE: custo unitário de extração do recurso j no ano k;  
P: potência instalada da tecnologia i no ano k;  
CI: custo unitário de instalação da tecnologia i no ano k;  
E: energia produzida pela tecnologia i no ano k;  
COM: custo unitário de operação e manutenção da tecnologia i no ano k;  
D: demanda final pelo energético I no ano k;  
a: quantidade de energéticos utilizados em sua forma final;  
FC: fator de capacidade da tecnologia i no ano k.

Cabe ressaltar que o MESSAGE visa otimizar não a operação de segmentos específicos, como o setor elétrico, mas o sistema energético como um todo. Ele visa obter, para uma dada demanda de energia final ou útil, o mínimo custo ao longo de todas as cadeias energéticas, ao longo de todo o período analisado. Deste modo, os resultados obtidos através do modelo representam o ótimo global do sistema para dado cenário de demanda energética, e não apenas o ótimo setorial (Borba, 2012).

O MESSAGE também permite determinar as emissões de GEE associadas ao cenário ótimo do setor energético. Para isto, associa-se um coeficiente de emissões de carbono por unidade de energia produzida a cada etapa do processo energético (Schaeffer et al., 2015). As emissões associadas ao cenário ótimo do setor energético são, então, calculadas multiplicando-se tais coeficientes pela atividade de cada tecnologia. Cabe ressaltar que se consideram apenas as emissões provenientes de fontes fósseis, uma vez que o carbono emitido pela queima de fontes renováveis (e.g. biomassa, biogás) é considerado parte do ciclo natural do carbono (carbono biogênico).

A seguir, é fornecido um panorama simplificado da estrutura do MESSAGE Brasil e, logo adiante, das premissas adotadas. Para uma descrição mais detalhada destes dois tópicos, vide SCHAEFFER et al. (2015), BORBA (2012) ou IAEA (2006).

#### *4.3.1 - Estrutura do MESSAGE Brasil*

As tecnologias incluídas no MESSAGE são definidas conforme os insumos e produtos, a eficiência e o grau de variação, para o caso de tecnologias que admitem mais de um insumo ou que geram mais que um produto (por exemplo, refinarias) (IAEA, 2006). Dito de outra forma, a tecnologias descritas no MESSAGE correspondem a fluxos de energia, ao longo dos quais a energia primária é transformada em energia final, por meio de processos de extração, transformação e transporte (Borba, 2012). A Figura 4-5 descreve de forma simplificada os fluxos de energia incluídos no MESSAGE Brasil a fim de descrever o sistema energético brasileiro. As linhas horizontais correspondem a formas de energia (e.g. combustíveis líquidos, energia eólica) enquanto as linhas verticais correspondem às tecnologias de conversão.

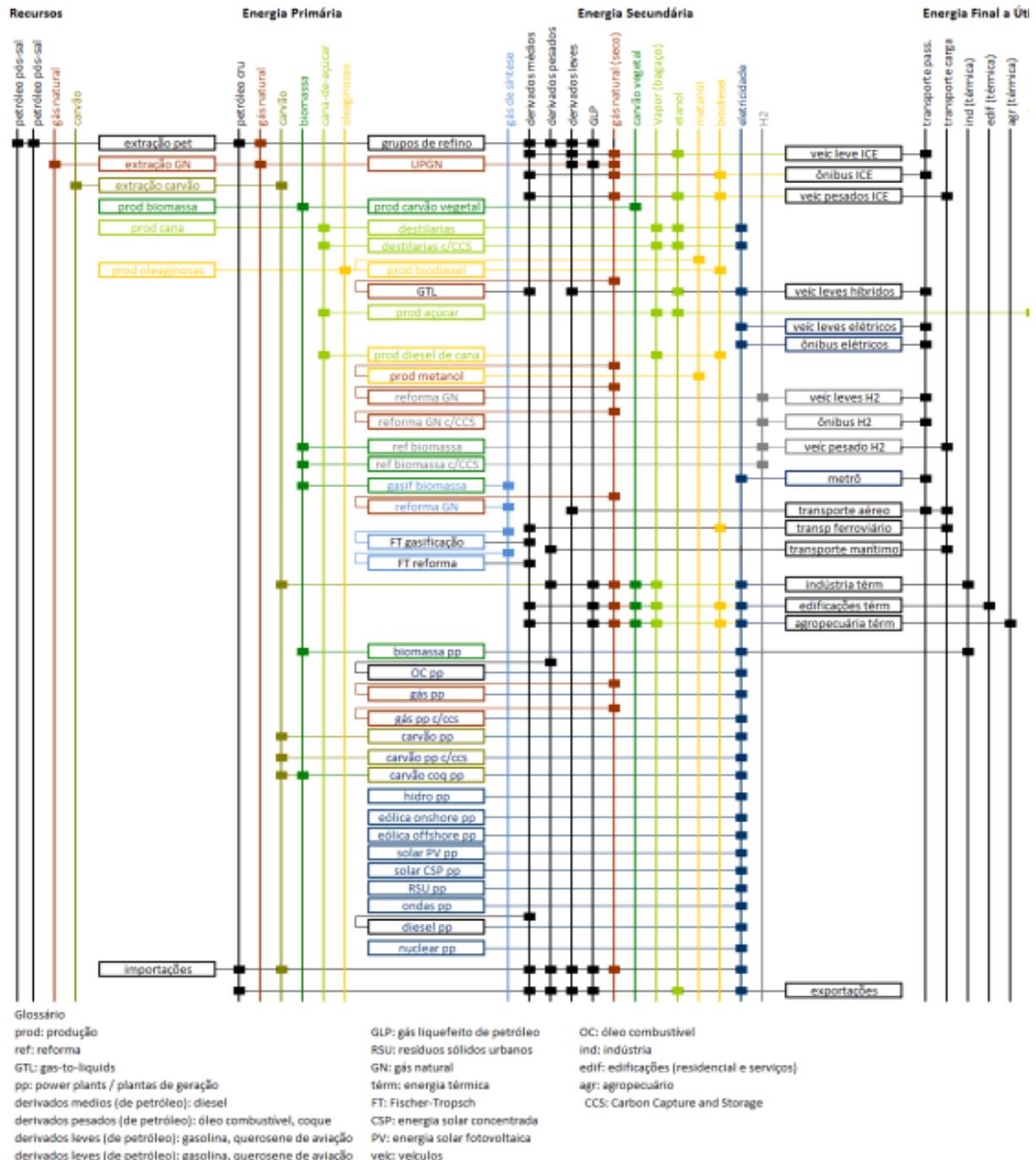


Figura 4-5 - Fluxograma Simplificado das Cadeias Energéticas no MESSAGE Brasil

Fonte: Schaeffer *et al.* (2015)

Conforme ilustrado na Figura 4-5, são estipulados cinco níveis de energia, conforme descrito a seguir:

**Recurso.** Este é o primeiro nível energético do modelo e inclui unicamente recursos não renováveis. Recursos renováveis (tais como a biomassa) não são incluídos uma vez que estes não estão sujeitos à restrição de reservas. Portanto, neste nível estão incluídos o óleo, o gás natural e o carvão disponíveis nas reservas do país. Cabe ressaltar que na versão aplicada no presente estudo, o recurso óleo está dividido entre petróleo cru da camada pós-sal e petróleo cru da camada pré-sal (Schaeffer *et al.*, 2015).

**Energia primária.** Este nível define as fontes primárias de energia disponíveis após sua extração. São abrangidos, portanto, óleo cru e gás natural (associado e não-associado) após a extração em plataformas, carvão após a extração de minas, biomassa, cana-de-açúcar e oleaginosas após a colheita do solo. As formas de energia descritas neste nível são destinadas a centros de conversão, tais como refinarias, unidades de liquefação, unidades de gaseificação, etc. (Schaeffer *et al.*, 2015).

**Energia secundária.** Neste nível são descritas as formas de energia resultantes dos processos de transformação de energia primária ou de energia secundária. Estão incluídos os derivados de petróleo provenientes do refino, o GLP vindo do processo de liquefação, o carvão vegetal após beneficiamento, o etanol e o bagaço advindos das destilarias, a eletricidade proveniente das termo e hidrelétricas, dentre outros (Schaeffer *et al.*, 2015).

**Energia final.** Este nível descreve as formas de energia que já passaram por todos os processos de transformação e transporte e estão prontas para o consumo final como energia útil. Deste modo, são incluídos neste nível: os combustíveis líquidos para consumo por veículos, já de acordo com as especificações relevantes, a eletricidade distribuída para cada uma das regiões do país, etanol, entre outros (Schaeffer *et al.*, 2015).

**Energia útil.** Este corresponde ao último nível do modelo, que descreve o uso da energia final. Ele representa a demanda – estabelecida exogenamente – que deverá ser atendida pelo sistema a um mínimo custo. Portanto, este nível inclui a demanda de energia motriz para os veículos, demanda de energia térmica para cocção e para processos industriais, demanda de energia elétrica para iluminação, dentre outros (Schaeffer *et al.*, 2015). Cabe ressaltar que a demanda de energia útil do setor de transportes individual (veículos leves) foi desabilitada na versão do MESSAGE utilizada neste estudo, sendo substituída por um vetor de energia final resultante da modelagem no LEAP.

Ao longo dos fluxos de energia descritos no MESSAGE, a transição entre dois níveis de energia (e.g., do recurso para a energia primária) deve ser definida por meio das suas

características tecnico-econômicas a fim de que o modelo possa otimizar o atendimento à demanda de energia final. As características tecnico-econômicas relevantes para a definição destas transições incluem os custos de instalação e de operação e manutenção da tecnologia, a eficiência de conversão, capacidade instalada, entre outras (Borba, 2012).

Cabe ressaltar que alguns elementos não energéticos, tais como o açúcar e o nafta, são considerados no modelo, uma vez que correspondem a produtos possíveis em processos energéticos – a saber, o processamento da cana e o refino de óleo cru (Borba, 2012). O MESSAGE-Brasil contempla ainda a possibilidade de importação e exportação de energia do sistema.

A Figura 4-6 apresenta um corte no fluxograma de cadeias energéticas de maior relevância para este estudo. Esta figura explicita como o vetor de demanda estimado através do LEAP (“Demanda (LEAP)” na figura) interage com o restante do modelo. Cabe ressaltar que, neste fluxograma, a transição entre o nível “energia final” e “demanda” tem eficiência de 100%.

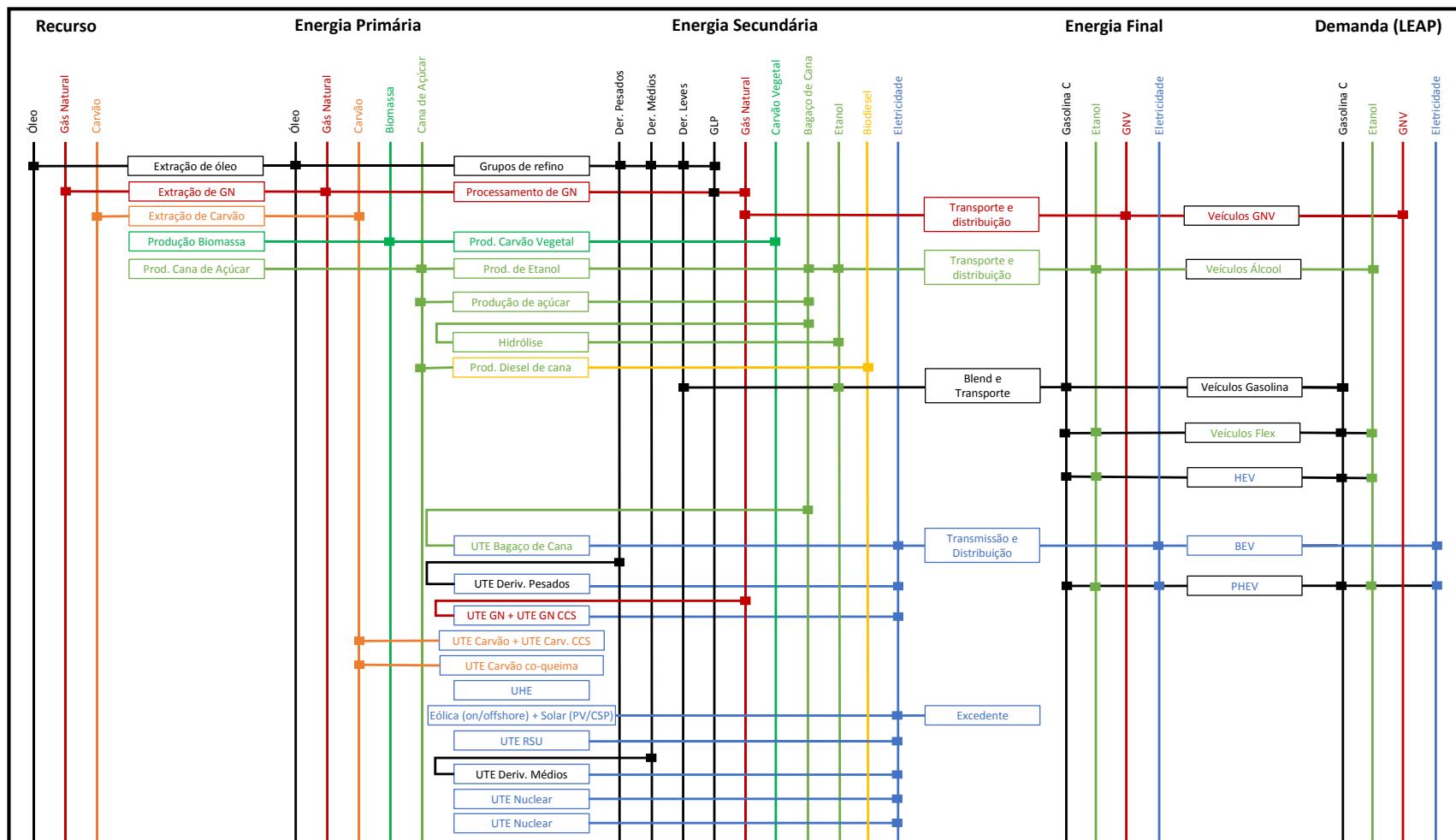


Figura 4-6 - Fluxograma Simplificado das Cadeias Energéticas no MESSAGE Brasil – Veículos elétricos

Fonte: Elaboração própria com base em Borba (2012)

Notas: GN – Gás Natural; Prod – Produção; UTE – Usina Termelétrica; UHE – Usina Hidroelétrica; RSU – Resíduo Sólido Urbano; Deriv – Derivados; BEV – Veículo elétrico a bateria; PHEV – Veículo elétrico híbrido plug-in.

Nota-se que, além de evidenciar a cadeia dos veículos leves, este fluxograma enfoca no setor sucroalcooleiro e na cadeia do setor elétrico. Conforme se argumentou na seção 192.2 -, estes são os segmentos que serão explorados neste estudo em termos dos impactos provocados pela entrada dos veículos elétricos.

#### *Cadeia energética do setor sucroalcooleiro*

A cadeia do setor sucroalcooleiro é dividida entre produção da matéria prima (insumo agrícola), processamento da cana em seus produtos, distribuição e uso final (Borba, 2012). Os produtos do processamento da cana incluem o açúcar, o etanol de primeira e segunda geração e o diesel, além do bagaço. O etanol de primeira geração é produzido a partir da fermentação do caldo da cana, enquanto o etanol de segunda geração, também conhecido como etanol celulósico, é obtido a partir da hidrólise do bagaço da cana. Por sua vez, a produção do diesel ocorre por meio da pirólise<sup>24</sup> do bagaço e refino do bio-óleo resultante. Também é possível sintetizar o óleo por meio da gasificação do bagaço seguida da sintetização do gás por meio de um processo de Fischer-Tropsch (BTL). (Machado, 2013) O gás de síntese pode também ser aplicado à geração elétrica na destilaria. Contudo, a rota mais comum para a geração no setor é a cogeração de eletricidade e energia térmica a partir da queima direta do bagaço. As tecnologias de geração de eletricidade na destilaria são descritas logo a seguir (Schaeffer *et al.*, 2014).

#### *Cadeias energéticas do setor elétrico*

As cadeias do setor elétrico são alimentadas por derivados de petróleo, carvão mineral, biomassa e por fontes renováveis de energia. As tecnologias de produção de energia primária (exploração de óleo e gás, extração de carvão, etc.) não são detalhadas aqui, mas uma descrição detalhada destes processos pode ser encontrada em SCHAEFFER *et al.* (2015).

Dentre as renováveis convencionais encontram-se as termelétricas a biomassa, a biogás de resíduos sólidos urbanos, caldeiras a bagaço de cana-de-açúcar, e hidrelétricas de pequeno, médio e grande porte. Entre as fontes não convencionais de energia renovável estão os painéis fotovoltaicos (larga escala e geração distribuída), os sistemas de concentração solar (CSP na sigla em inglês), a energia eólica (onshore e offshore), e a geração elétrica por meio

---

<sup>24</sup> A pirólise consiste na decomposição térmica da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Os produtos provenientes deste processo são o carvão e um gás, que contém vapores condensáveis, a partir do qual um líquido, chamado bio-óleo, pode ser recuperado. A proporção em que estes produtos são gerados depende da temperatura e velocidade em que a pirólise ocorre. (Machado 2013)

de ondas. Deste modo, as seguintes tecnologias de geração de eletricidade são consideradas no MESSAGE Brasil:

**Hidrelétrica.** Conforme apresentado no capítulo 1, as unidades hidrelétricas respondem pela maior parcela da geração elétrica do país. Contudo, as configurações são variadas em termos de porte e em termos da presença ou não de reservatório. O MESSAGE Brasil considera três variações desta tecnologia: unidades pequenas, médias e grandes. As grandes hidrelétricas correspondem a unidades com reservatório e capacidade de superior a 300 MW; as hidrelétricas médias têm capacidade entre 300 MW e 30 MW e, por fim; as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) correspondem àquelas de capacidade inferior a 30 MW (Schaeffer et al., 2015).

**Unidade termelétrica (UTE) a combustíveis fósseis.** O modelo considera as UTEs a óleo combustível, gás natural e carvão mineral. Entre as térmicas a carvão são consideradas as térmicas a carvão pulverizado e ciclo combinado com gaseificação integrada (PC e IGCC, respectivamente, na sigla em inglês). No caso das plantas IGCC introduz-se uma limitação à velocidade de entrada destas usinas de 1MW/ano. Esta restrição a uma penetração média de 5 MW a cada cinco anos, o que é condizente com uma tecnologia que, atualmente, ainda atingiu viabilidade comercial. Cabe ressaltar que se considera também a co-queima do carvão mineral com até 30% de biomassa para a geração de eletricidade. Já entre as térmicas a gás natural são consideradas tanto usinas a ciclo aberto quanto usinas a ciclo combinado. Contudo, admite-se que a expansão da capacidade instalada se daria apenas através de usinas a ciclo combinado (Schaeffer et al., 2015).

**UTEs com CCS.** São admitidas também UTEs a carvão e a gás natural dotadas de tecnologia de captura e estocagem de carbono (CCS<sup>25</sup>, na sigla em inglês). Contudo, conforme se verá na subseção 4.3.2 -, os custos associados a geração a partir desta tecnologia são elevados (Schaeffer et al., 2015).

**UTEs a biomassa de cana.** O bagaço, bem como a palha e as pontas, corresponde a um subproduto das destilarias de etanol, tipicamente utilizados para a co-geração de energia térmica e elétrica para suprir as demandas da destilaria. Em geral, a energia fornecida pela biomassa da cana é suficiente para suprir a demanda da destilaria e, em alguns casos, a destilaria gera um excedente de eletricidade para a rede (Horta Nogueira et al., 2008). Em

---

<sup>25</sup> Carbon Capture and Storage.

linha com Borba (2012), considera-se quatro opções de tecnologias de geração de eletricidade a partir do bagaço.

- a. Turbinas de contrapressão (CP) em 22 bar, que correspondem à tecnologia mais utilizada no país atualmente. Tipicamente destilarias com turbinas CP são autossuficientes em termos de eletricidade (Horta Nogueira *et al.*, 2008).
- b. Turbinas a vapor de extração e condensação (CEST), em usinas novas. O CEST é uma tecnologia comercial, mas de emprego limitado nas unidades processam cana de açúcar no Brasil.
- c. Turbinas a vapor de extração e condensação (CEST) em usinas existentes, modernizadas para contar com esta tecnologia.
- d. Turbinas BIG/GT, que consistem em um sistema de gasificação de biomassa acoplado a uma turbina a gás. Uma vez que esta tecnologia ainda não é disponível comercialmente hoje, ela é admitida como uma opção para o modelo apenas a partir de 2020 (Schaeffer *et al.*, 2015).

**UTE nuclear.** O MESSAGE Brasil considera as usinas existentes de Angra 1 e Angra 2. A opção de expansão nuclear também é permitida ao modelo (Schaeffer *et al.*, 2015).

**UTE a resíduos sólidos urbanos.** O MESSAGE Brasil também admite a possibilidade de geração de eletricidade com o biogás produzido a partir de resíduos sólidos urbanos, em aterros controlados (Schaeffer *et al.*, 2015).

**Eólica.** A geração de eletricidade a partir da energia eólica compreende a utilização de turbinas *onshore* e *offshore*. Devido à maior disponibilidade de dados o perfil da geração *onshore*, incluindo seus custos, o potencial eólico e a sazonalidade de geração, está mais bem definido que o perfil da geração *offshore* (Schaeffer *et al.*, 2015).

**Solar.** A geração de eletricidade a partir da energia solar compreende a tecnologia de geração através de painéis fotovoltaicos e a geração termo-solar (CSP – concentrated solar power).

#### 4.3.2 - Premissas do MESSAGE Brasil

As premissas aplicadas no MESSAGE Brasil incluem considerações acerca do contexto econômico do país e do perfil técnico-econômico das tecnologias, incluindo a situação das

reservas nacionais de fontes não-renováveis, seu o ritmo de exploração e o potencial de fontes renováveis. Nesta seção algumas das premissas relevantes para este estudo são detalhadas. Para uma descrição completa das premissas do MESSAGE Brasil, vide SCHAEFFER *et al.* (2014), BORBA (2012) e NOGUEIRA (2014).

**Demanda de energia.** Conforme previamente descrito, a demanda no MESSAGE Brasil é determinada exogenamente por meio de modelos setoriais. De modo geral a demanda de energia útil se baseia nas projeções de crescimento econômico e demográfico do país (Schaeffer *et al.*, 2014). A exceção é a demanda de combustíveis por veículos leves a qual foi estimada à parte, no LEAP, conforme descrito na seção 4-2.

**Oferta de combustíveis.** Dentre as restrições à oferta de combustíveis cabe destacar a restrição imposta à importação de carvão. Atualmente, o Brasil importa carvão para atender a indústria e usinas termelétricas. Apesar de o país produzir uma quantidade considerável de carvão, sua qualidade é mais baixa que a do carvão importado, de modo que a grande parte da oferta futura de carvão disponível para as UTEs é de importação. Dado o baixo preço do carvão no mercado internacional e a ausência de políticas de mitigação, caso não haja restrição alguma, o modelo tende a uma solução de canto, importando carvão para abastecer a demanda elétrica do país. Cabe ressaltar, contudo, que a importação irrestrita de carvão prevista como solução do modelo não constitui um cenário realista, em função de restrições de infraestrutura portuária para importação desse combustível (Schaeffer *et al.*, 2014).

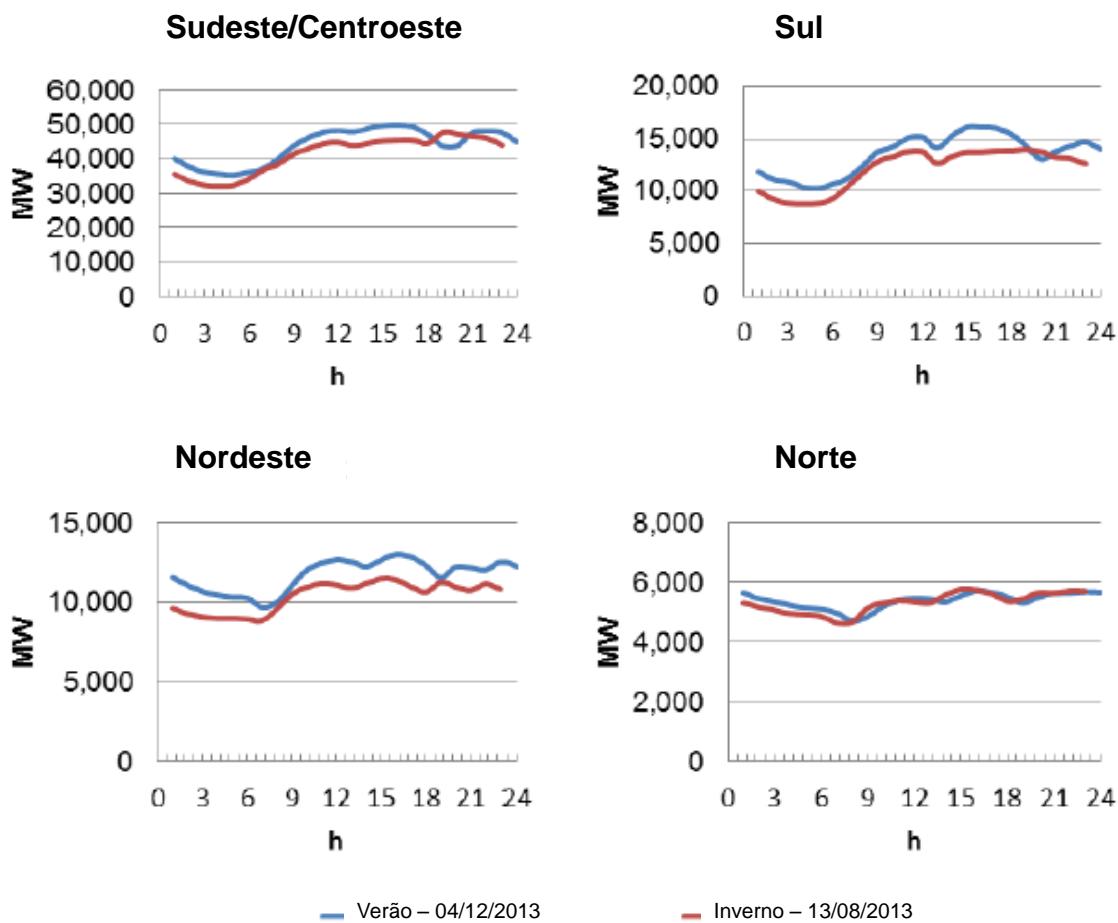
Atualmente, os portos brasileiros têm capacidade de importar 25.6 milhões de toneladas (Mt) de carvão ao ano e a previsão é que esta capacidade seja expandida em uma média de 5.6% ao ano até 2030 (BNDES, 2012). Cabe ressaltar que parte desta capacidade (76%) é destinada à importação de carvão metalúrgico (BNDES, 2012). Assumindo-se que esta proporção permaneça constante ao longo dos anos, admitiu-se que os portos terão um limite de importação de 18.4 Mt de carvão mineral em 2030, 31.8 em 2040 e 54.8 em 2050 (Schaeffer *et al.*, 2014).

**Curva de carga.** A curva de carga considerada no MESSAGE Brasil está ilustrada na Figura 4-7. Nota-se que a curva de carga está mais plana já foi no passado, com picos menos bruscos e com a demanda máxima ocorrendo fora do horário de ponta típico<sup>26</sup> em alguns subsistemas, nomeadamente no Sudeste/Centro-Oeste e no Sul (MME/EPE, 2015). Cabe ressaltar que não

---

<sup>26</sup> O horário de ponta ocorre tipicamente entre 18h e 21h.

foi modelada, neste estudo, a dinâmica de recarga dos veículos elétricos. Apesar de isso ser uma limitação da modelagem, foge ao escopo deste estudo uma análise do impacto dos veículos elétricos sobre a curva de carga do sistema elétrico brasileiro. Contudo, segundo BORBA (2012), dada a tendência de a curva de carga nacional tornar-se progressivamente mais plana, a entrada de veículos elétricos, mesmo se estes sejam todos recarregados no horário de ponta típico, teria pouco impacto sobre a curva de carga.



**Figura 4-7 – Perfil de carga por região e por estação do ano (dias de carga máxima de pico)**

Fonte: Adaptado de Soria *et al.* (Manuscrito) e Portugal-Pereira *et al.* (2016)

**Custos das tecnologias.** A Tabela 4-12 evidencia os valores de custo de capital, fixos e de operação e manutenção (O&M) de cada uma das tecnologias de geração elétrica consideradas no modelo, no início e no final do horizonte de análise. Percebe-se que termelétricas a gás natural com ciclo aberto e as turbinas de bagaço a contrapressão

apresentam os menores custos de capital. Em termos de custos de O&M, excluindo custos com combustíveis, as tecnologias de geração a gás apresentem os menores custos.

**Tabela 4-12 - Características técnico-econômicas das opções de geração elétrica no MESSAGE-Brasil**

| Tecnologias de geração de eletricidade | Custo de Capital (US\$/kW) |       | Custo variável de O&M (US\$/MWh) |      | Custo fixo de O&M (US\$/kW/ano) |      | Eficiência de conversão |      | Disponibilidade |
|--|----------------------------|-------|----------------------------------|------|---------------------------------|------|-------------------------|------|-----------------|
|  | 2010                       | 2050  | 2010                             | 2050 | 2010                            | 2050 | 2010                    | 2050 |                 |
| <b>Carvão</b>                          |                            |       |                                  |      |                                 |      |                         |      |                 |
| Doméstico - Leito fluidizado           | 3,690                      | 2,500 | 4.6                              | 3.1  | 39                              | 26   | 0.38                    | 0.42 | 0.85            |
| Leito fluidizado com CCS               | 4,190                      | 3,000 | 8.1                              | 6.2  | 91                              | 78   | 0.22                    | 0.34 | 0.85            |
| Importado - Pulverizado                | 2,000                      | 2,000 | 5.6                              | 5.6  | 38                              | 38   | 0.4                     | 0.45 | 0.85            |
| Pulverizado com CCS                    | 2,500                      | 2,500 | 9.1                              | 9.1  | 90                              | 90   | 0.23                    | 0.36 | 0.85            |
| Importado - IGCC                       | 2,400                      | 2,400 | 3.5                              | 3.5  | 28                              | 28   | 0.4                     | 0.48 | 0.85            |
| IGCC com CCS                           | 2,600                      | 2,600 | 7.1                              | 7.1  | 54                              | 54   | 0.35                    | 0.42 | 0.85            |
| Co-queima                              | 3,690                      | 2,500 | 4.6                              | 3.1  | 39                              | 26   | 0.35                    | 0.4  | 0.85            |
| <b>Gás natural</b>                     |                            |       |                                  |      |                                 |      |                         |      |                 |
| Ciclo aberto                           | 800                        | 600   | 3.5                              | 3.5  | 20                              | 15   | 0.35                    | 0.38 | 0.9             |
| Ciclo combinado                        | 1,190                      | 1,000 | 3.5                              | 3.5  | 13                              | 11   | 0.5                     | 0.55 | 0.85            |
| Ciclo combinado com CCS                | 3,090                      | 3,090 | 3.5                              | 3.5  | 23                              | 23   | 0.43                    | 0.43 | 0.85            |
| Ciclo combinado - flexível             | 1,300                      | 1,300 | 3.5                              | 3.5  | 13                              | 13   | 0.55                    | 0.58 | 0.85            |
| <b>Hidroelétricas</b>                  |                            |       |                                  |      |                                 |      |                         |      |                 |
| Pequeno porte (<30MW)                  | 2,936                      | 2,936 | -                                | -    | 65                              | 65   | -                       | -    | *               |
| Médio porte (<300MW)                   | 2,513                      | 2,513 | -                                | -    | 58                              | 58   | -                       | -    | *               |
| Grande porte (>300MW)                  | 2,091                      | 2,091 | -                                | -    | 52                              | 52   | -                       | -    | *               |
| <b>Nuclear</b>                         |                            |       |                                  |      |                                 |      |                         |      |                 |
| <b>Bagaço</b>                          |                            |       |                                  |      |                                 |      |                         |      |                 |
| Turbina a contrapressão (22 bar)       | 800                        | 800   | 5.6                              | 5.6  | -                               | -    | 0.25                    | 0.25 | 0.9             |
| CEST - existentes                      | 959                        | 959   | 4.8                              | 4.8  | -                               | -    | 0.25                    | 0.25 | 0.9             |

| Tecnologias de geração de eletricidade | Custo de Capital (US\$/kW) |       | Custo variável de O&M (US\$/MWh) |      | Custo fixo de O&M (US\$/kW/ano ) |      | Eficiência de conversão |      | Disponibilidade |
|--|----------------------------|-------|----------------------------------|------|----------------------------------|------|-------------------------|------|-----------------|
|  | 2010                       | 2050  | 2010                             | 2050 | 2010                             | 2050 | 2010                    | 2050 |                 |
| CEST - novas                           | 2,712                      | 2,392 | 4.6                              | 4.6  | -                                | -    | 0.3                     | 0.3  | 0.9             |
| BIG-GT                                 | 1,009                      | 1,009 | 4.8                              | 4.8  | -                                | -    | 0.4                     | 0.4  | 0.8             |
| <b>Biomassa - outros</b>               |                            |       |                                  |      |                                  |      |                         |      |                 |
| Turbina a vapor                        | 3,600                      | 2,500 | 6.3                              | 6.3  | 50                               | 50   | 0.28                    | 0.28 | 0.6             |
| RSU                                    | 7,050                      | 6,210 | -                                | -    | 211                              | 186  | 0.28                    | 0.28 | 0.74            |
| Diesel                                 | 1,000                      | 1,000 | 14.3                             | 14.3 | -                                | -    | 0.35                    | 0.35 | 0.35            |
| Óleo combustível                       | 1,070                      | 1,070 | 14.3                             | 14.3 | -                                | -    | 0.3                     | 0.33 | 0.55            |
| <b>Renováveis não convencionais</b>    |                            |       |                                  |      |                                  |      |                         |      |                 |
| PV-Larga escala                        | 4,300                      | 1,300 | -                                | -    | 51                               | 15   | -                       | -    | 0.17            |
| PV-Distribuída                         | 5,300                      | 2,000 | -                                | -    | 22                               | 8    | -                       | -    | 0.17            |
| Eólica - onshore                       | 1,810                      | 1,547 | -                                | -    | 42                               | 36   | -                       | -    | 0.35            |
| Eólica - offshore                      | 5,000                      | 3,000 | -                                | -    | 60                               | 36   | -                       | -    | 0.4             |
| Ondas                                  | 6,000                      | 4,500 | -                                | -    | 20                               | 20   | -                       | -    | 0.15            |
| CSP-4h termo-acumulação                | 5,208                      | 3,315 | -                                | -    | 85                               | 54   | -                       | -    | 0.32            |
| CSP-8h termo-acumulação                | 6,312                      | 3,912 | -                                | -    | 103                              | 64   | -                       | -    | 0.37            |
| CSP-12h termo-acumulação               | 7,254                      | 4,422 | -                                | -    | 118                              | 72   | -                       | -    | 0.42            |
| CSP-BIOi                               | 5,856                      | 3,641 | 5                                | 5    | 65                               | 65   | 0.57                    | 0.57 | 0.51            |

Fonte: Soria *et al.* (Manuscrito) e Portugal-Pereira *et al.* (2016)

## **5 -RESULTADOS: DEMANDA DE ENERGIA POR VEÍCULOS LEVES E IMPACTOS SOBRE O SETOR ENERGÉTICO**

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com base nas modelagens feitas no LEAP e no MESSAGE-Brasil a fim de estimar a demanda de energia dos cenários de penetração de veículos elétricos e os impactos destes cenários sobre o sistema energético como um todo. Em particular, estes resultados permitem identificar os impactos sobre o setor elétrico e o setor sucroalcooleiro.

### **5.1 - Resultados do LEAP: demanda de energia por veículos leves (2010-2050)**

#### *5.1.1 - Demanda de energia para 22 cenários*

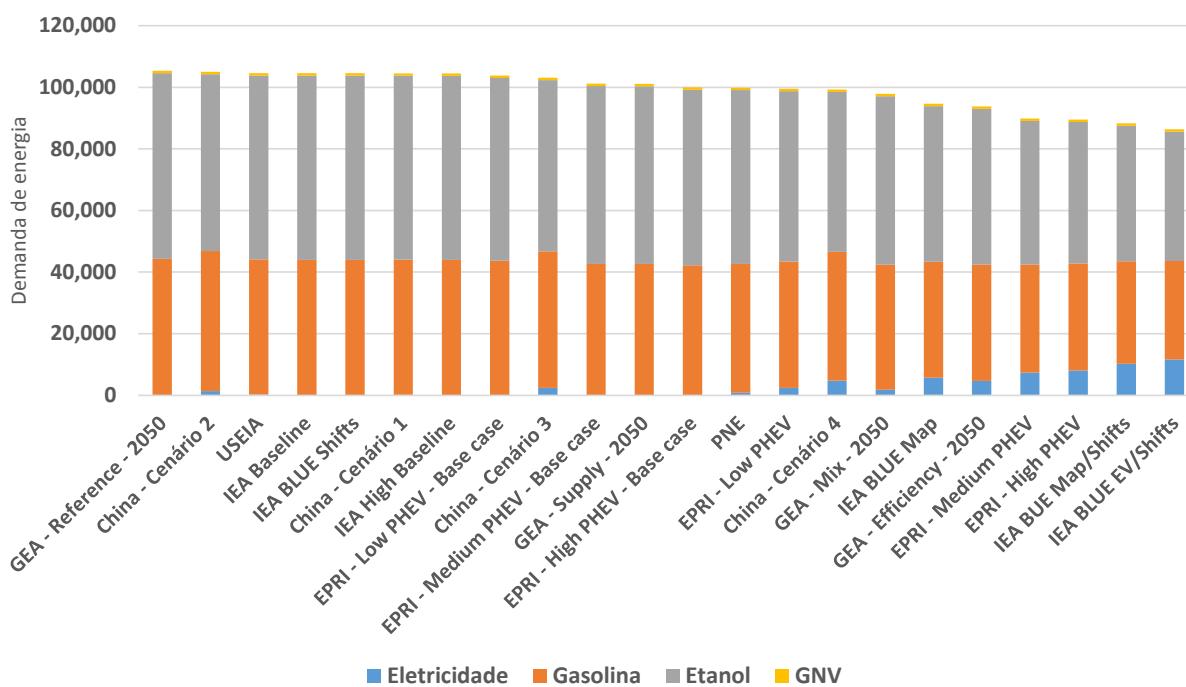
Esta seção apresenta os resultados de demanda de energia final por veículos leves acumulada ao longo do horizonte de análise, projetados no LEAP. Conforme destacado na seção 4.2 - LEAP: Metodologia para a projeção da demanda de energia, cada um dos 22 cenários foi rodado sob uma tipologia de macro cenário – a saber, macro cenários A, B e C – representando três configurações diferentes de proporção de consumo de eletricidade por PHEVs e de consumo de etanol por FFVs. Estas configurações são apresentadas novamente na Tabela 5-1.

**Tabela 5-1 – Tipologias de macro cenários (%)**

| Macro cenário          | Proporção de consumo de etanol por FFV e HEV (A) | Proporção de consumo de eletricidade por PHEV (B) | Proporção de consumo de etanol por PHEV (A)*[1-(B)] |
|------------------------|--|---|---|
| <b>Macro cenário A</b> | 61   | 50  | 30  |
| <b>Macro cenário B</b> | 49   | 70  | 15  |
| <b>Macro cenário C</b> | 29   | 90  | 3   |

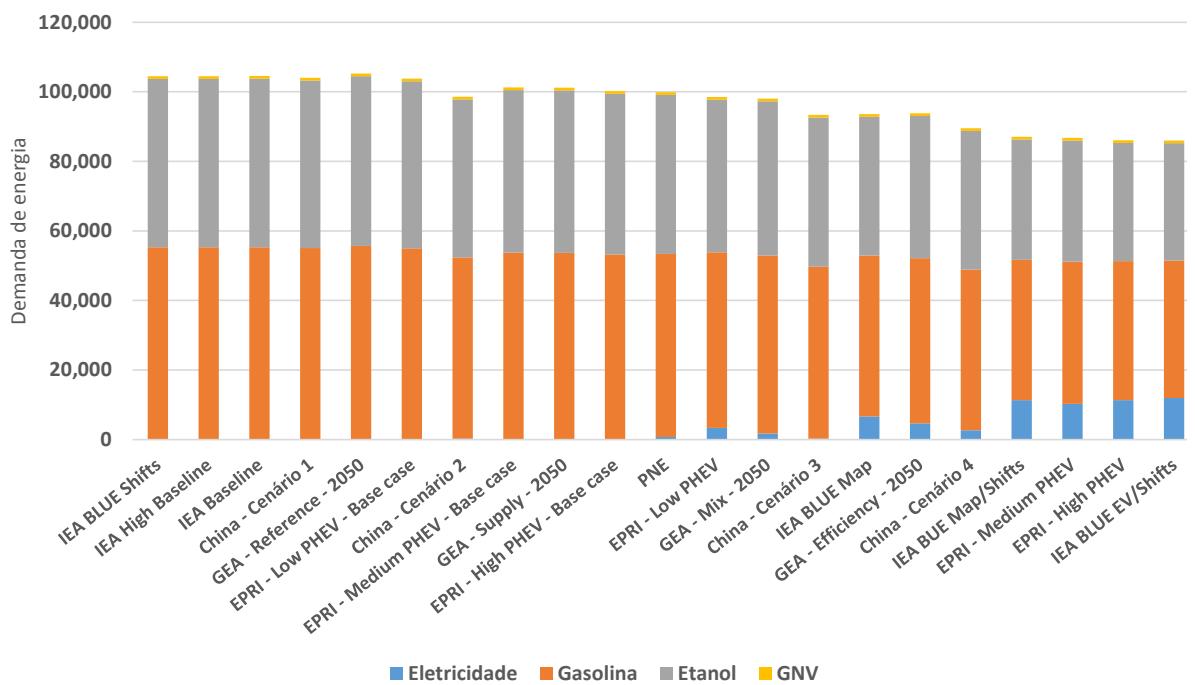
Fonte: Elaboração própria

Em linha com esta tipologia, os resultados a seguir são apresentados em três gráficos, cada qual representando um macro cenário. Cabe destacar que os resultados são apresentados em termos de demanda de energia final acumulada ao longo do horizonte de análise. Esta perspectiva permite contemplar as diferenças entre cenários no que se refere à data de entrada de veículos elétricos na frota nacional.



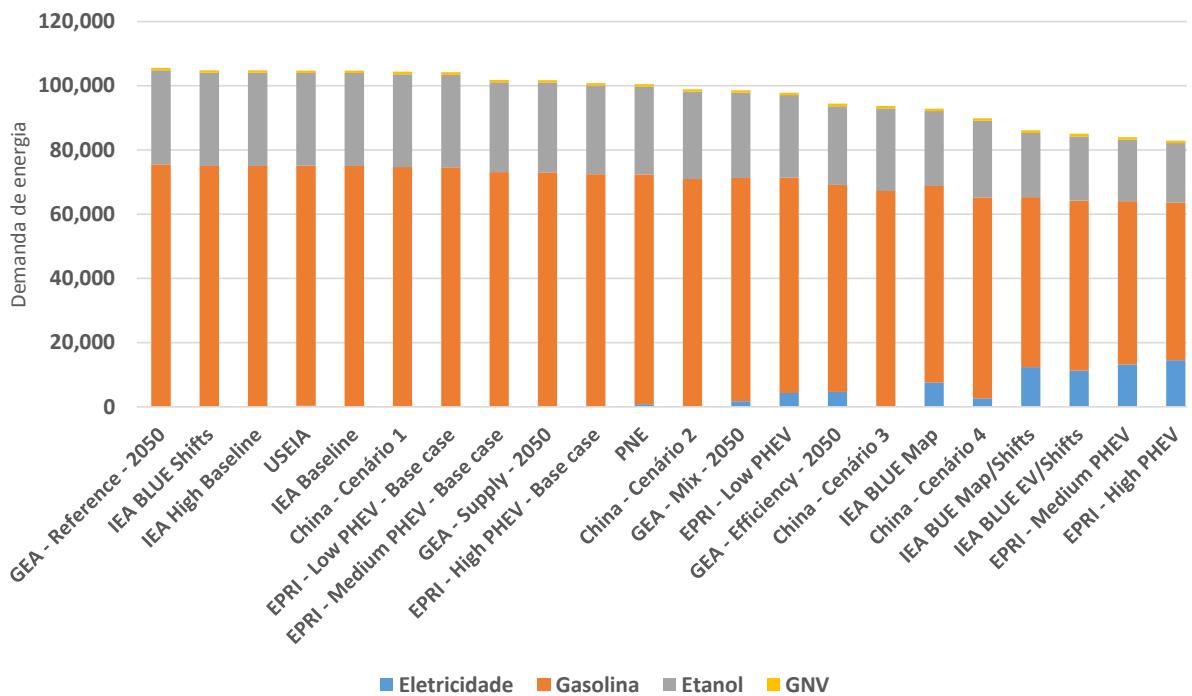
**Figura 5-1 – Macro cenário A: Demanda de energia final acumulada – 2010-2050 (TJ)**

Fonte: Elaboração própria



**Figura 5-2 – Macro cenário B: Demanda de energia final acumulada – 2010-2050 (TJ)**

Fonte: Elaboração própria



**Figura 5-3 – Macro cenário C: Demanda de energia final acumulada – 2010-2050 (TJ)**

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que, nos três macro cenários, o cenário de maior consumo de energia final acumulada é o cenário de referência do GEA, sob o qual praticamente não há penetração de veículos eletrificados e no qual predominam os FFVs. Neste cenário, o consumo de energia por veículos leves atinge 3.9 mil terajoules (TJ) em 2050. Isto representa um aumento de cerca de 260% (ou 2.4%, em média, ao ano) em comparação com consumo de energia estimado para o início do horizonte de estudo (2010). Ao longo do horizonte, o consumo ultrapassa os 100 mil TJ sob este cenário.

Por sua vez, o cenário de menor consumo de energia final foi o EPRI – High PHEV (alta penetração de PHEVs) rodado sob o macro cenário C. Sob este cenário, a penetração de PHEVs atinge 80% em 2050 e não há penetração de BEVs. O consumo de energia atinge 2.2 milhões de TJ em 2050, representando uma economia de 45% em relação ao cenário GEA – Reference, e um crescimento de apenas 0.9% ao ano. Ao longo do horizonte, o consumo de energia totaliza 80 mil TJ sob este cenário (20% a menos que no cenário de referência do GEA).

O cenário IEA BLUE EV/Shifts e o cenário de penetração média de PHEVs do EPRI (macro cenário C) também apresentam alguns dos menores níveis de consumo de energia final entre os cenários analisados. Nestes dois cenários, a penetração combinada de PHEVs e BEVs atinge, respectivamente, 93% e 62% em 2050. Em comparação com o GEA Reference, estes cenários representam uma economia de 39% e 46% de energia final em 2050 e de 22% e 20% no acumulado do período de análise.

Finalmente, os cenários IEA e o cenário EPRI High PHEV (macro cenário C) são os cenários que apresentam a menor demanda de gasolina. No acumulado, a demanda de gasolina em termos de energia final nestes cenários é cerca de 50%-58% menor que nos cenários de menor penetração de veículos leves.

Em contrapartida, o cenário EPRI High PHEV (macro cenário C) é também o cenário em que se observa a menor demanda de etanol – apenas 18 mil TJ, ou pouco mais de 20% do consumo de energia acumulado neste cenário. O cenário da IEA, de alta penetração de BEVs também está associado com um consumo baixo de etanol (20 mil TJ). Por sua vez, o cenário de referência do GEA rodado sob o macro cenário A foi o de maior consumo acumulado de etanol, o qual responde por 57% (60 mil TJ) do consumo de energia final no horizonte de análise. Trata-se de uma diferença de quase 70% dos dois cenários de menor para o de maior consumo de etanol.

No que tange ao consumo de eletricidade apenas, os três cenários do EPRI de baixa penetração de HEVs (EPRI – base case), rodados sob o macro cenário A, foram os que apresentaram o menor consumo de eletricidade acumulado, equivalente a 0.3 mil TJ. O cenário EPRI High PHEV (macro cenário C) foi o que apresentou maior consumo de eletricidade, acumulando um total de 12 mil TJ em 2050. No cenário IEA BLUE EV/Shifts, o consumo elétrico estimado foi um pouco menor, equivalente a 10 mil TJ.

A aproximação observada entre os cenários EPRI High PHEV e IEA BLUE EV/Shifts não é surpreendente. No macro cenário A os PHEVs rodam com eletricidade 90% das vezes, de modo que eles estão suficientemente próximos de um BEV a ponto de um cenário de alta penetração de PHEVs apresentar resultados equivalentes àqueles de um cenário de alta penetração de BEVs. Contudo, cabe aqui ressaltar que a demanda acumulada de energia final associada ao cenário EPRI High PHEV, rodado sob o macro cenário A (onde o PHEV roda apenas 50% do tempo com eletricidade) é apenas 5% superior àquela associada ao cenário da IEA. Isto indica certa intercambiabilidade entre a promoção de PHEVs e BEVs no que tange à redução da demanda de energia final por veículos leves.

De modo geral, percebe-se que os cenários de maior penetração de veículos elétricos, em especial, de PHEVs e BEVs, correspondem ao menor consumo de energia final. Estes cenários também correspondem aos cenários de menor demanda de etanol. Isto ocorre não somente porque a eletricidade tende a deslocar o consumo de combustíveis líquidos, mas também porque, conforme destacado anteriormente, estes cenários foram estressados, atribuindo-se a eles o menor percentual de consumo de etanol entre veículos flex.

O fato de os cenários de maior penetração de veículos elétricos apresentarem os menores níveis de demanda de energia final ser atribuído à maior eficiência de conversão dos veículos eletrificados, conforme descrito na seção 2.1 e evidenciado na Tabela 5-2.

**Tabela 5-2 - Eficiência energética por tecnologia de propulsão (km/TJ)**

| Tecnologia  | Eficiência |
|-------------|------------|
| VMC-G       | 0.37       |
| VMC-E       | 0.39       |
| FFV-G       | 0.39       |
| FFV-E       | 0.38       |
| GNV         | 0.33       |
| HEV-G       | 0.43       |
| HEV-E       | 0.44       |
| PHEV-G      | 0.45       |
| PHEV-E      | 0.46       |
| PHEV-Eletr. | 0.95       |
| BEV         | 1.01       |

Fonte: Elaboração própria com base em CETESB (2014), MMA (2014) e DOE & EPA (2015)

Nota: As letras G e E indicam a eficiência do veículo rodando com gasolina C e etanol, respectivamente.

Contudo, do ponto de vista da energia primária, a vantagem dos veículos elétricos frente aos veículos convencionais não é tão clara. O consumo total de energia primária pelos veículos elétricos irá depender principalmente da origem da eletricidade que alimenta suas baterias. Ou seja, a eficiência da conversão da energia primária em eletricidade final a ser consumida nos veículos elétricos irá influenciar diretamente o que se pode chamar de “eficiência global” dos veículos, isto é a eficiência sob a perspectiva *well-to-wheel*. Analogamente, as emissões de GEE associadas a estes veículos também irão depender da matriz elétrica que os alimenta.

Assim, conforme descrito no capítulo 4, o passo seguinte foi introduzir os dados de demanda de energia final pelos veículos elétricos no MESSAGE, um modelo integrado de otimização

do sistema energético, a fim de determinar a composição do sistema energético que resulta da introdução destes veículos.

### 5.1.2 - Seleção de 3 cenários para o MESSAGE-Brasil

Com o objetivo de realizar a análise a partir do MESSAGE-Brasil foi necessário selecionar três cenários representativos do cone de possibilidades de penetração de veículos eletrificados em termos de consumo energético. Em especial, foram analisados os cenários que representassem situações extremas de consumo de eletricidade e etanol. A Tabela explicita os cenários de máximo, mínimo e mediano em termos de consumo de eletricidade e etanol acumulados entre 2010-2050. Por sua vez, a Tabela 5-4 evidencia os níveis de penetração de veículos elétricos associados a cada cenário.

**Tabela 5-3– Consumo nos cenários extremos ( $10^6$  GJ) – seleção restrita**

| Categoria     | Cenário                  | Eletricidade<br>(2010-2050) | Eletricidade<br>(2050) | Etanol<br>(2010-2050) | Etanol<br>(2050) |
|---------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------|
| Mín. Eletr. + | <b>GEA Reference</b>     | 0.97                        | 0.0001                 | 60,307.12             | 2,345.35         |
| Máx. Etanol   |                          |                             |                        |                       |                  |
| Med Eletr. +  | <b>China – Cenário 2</b> | 219.35                      | 17.53                  | 45,475.36             | 1,624.73         |
| Med. Etanol   |                          |                             |                        |                       |                  |
| Máx. Eletr. + | <b>EPRI - High PHEV</b>  | 12,005.15                   | 847.7                  | 18,447.93             | 375.81           |
| Mín.Etanol    |                          |                             |                        |                       |                  |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 5-4– Perfil de vendas em 2050 nos cenários extremos ( $10^6$  GJ) – seleção restrita**

| Categoria     | Cenário                  | VMC   | HEV   | PHEV  | BEV  |
|---------------|--------------------------|-------|-------|-------|------|
| Mín. Eletr. + | <b>GEA Reference</b>     |       |       |       |      |
| Máx. Etanol   |                          | 88.7% | 8.2%  | 2.0%  | 1.1% |
| Med Eletr. +  | <b>China - Cenário 2</b> |       |       |       |      |
| Med. Etanol   |                          | 53.0% | 30.0% | 15.0% | 2.0% |
| Máx. Eletr. + | <b>EPRI - High PHEV</b>  |       |       |       |      |
| Mín.Etanol    |                          | 5.0%  | 15.0% | 80.0% | 0.0% |

Fonte: Elaboração própria

Ainda que estes tenham sido os cenários extremos identificados, os resultados apontaram que, dentre os cenários rodados no LEAP, havia cenários cuja inclusão no passo seguinte da análise (modelagem integrada) era mais interessante e cujos perfis de demanda de energia eram suficientemente próximos daqueles identificados nos cenários da Tabela 5-3.

Assim, o cenário China – Cenário 2 foi substituído pelo PNE 2050, por se julgar interessante que um dos resultados deste estudo refletisse o planejamento energético oficial de longo

prazo para o país<sup>27</sup>. Por sua vez, o cenário EPRI - High PHEV foi substituído pelo cenário IEA BLUE EV/Shifts, por este ser mais recente (publicado em 2011, em oposição a 2007, quando o cenário do EPRI foi publicado) e ser referente a um escopo global, enquanto o cenário do EPRI tem um foco no mercado norte-americano. O cenário GEA Reference foi mantido na seleção ajustada. A Tabela 5-5 evidencia a demanda por etanol e eletricidade acumulada e no fim do horizonte e a Tabela 5-6 evidencia os níveis de penetração de veículos elétricos nos cenários da seleção ajustada.

**Tabela 5-5 - Consumo nos cenários extremos (10<sup>6</sup> GJ) – seleção ajustada**

| Categoria      | Cenário              | Eletricidade<br>(2010-2050) | Eletricidade<br>(2050) | Etanol<br>(2010-<br>2050) | Etanol<br>(2050) |
|----------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|------------------|
| Menor Eletr. + | <b>GEA Reference</b> | 0.97                        | 0.0001                 | 60,307.12                 | 2,345.35         |
| Maior Etanol   |                      |                             |                        |                           |                  |
| Med Eletr. +   | <b>PNE 2050</b>      | 677.97                      | 104.46                 | 45,748.01                 | 1,554.40         |
| Med Etanol     |                      |                             |                        |                           |                  |
| Maior Eletr. + | <b>IEA BLUE</b>      | 10,066.51                   | 808.90                 | 20,057.53                 | 396.18           |
| Menor Etanol   | <b>EV/Shifts</b>     |                             |                        |                           |                  |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 5-6 - Perfil de vendas em 2050 nos cenários extremos (10<sup>6</sup> GJ) – seleção ajustada**

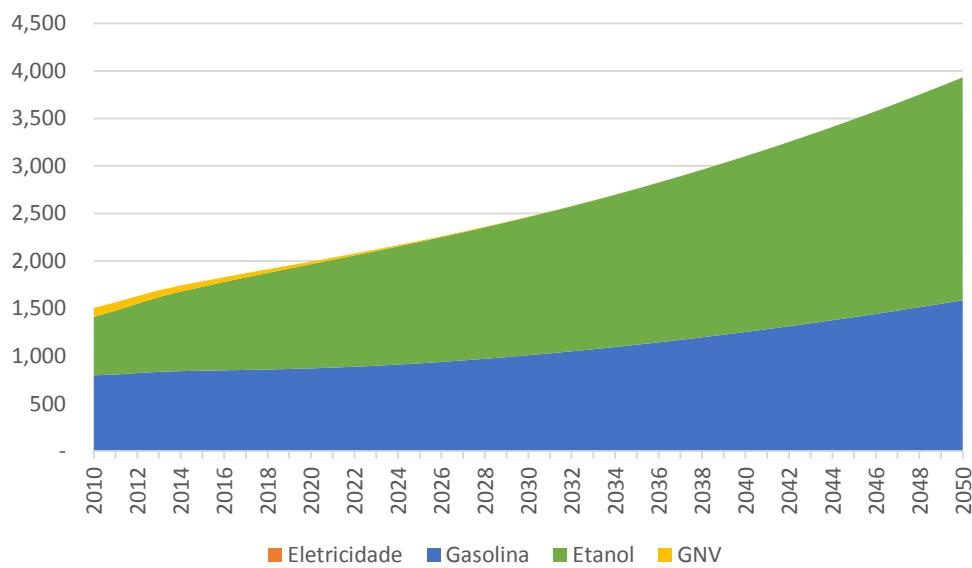
| Categoria      | Cenários             | VMC   | HEV   | PHEV | BEV   |
|----------------|----------------------|-------|-------|------|-------|
| Menor Eletr. + | <b>GEA Reference</b> |       |       |      |       |
| Maior Etanol   |                      | 99.1% | 0.9%  | 0.0% | 0.0%  |
| Med Eletr. +   | <b>PNE 2050</b>      |       |       |      |       |
| Med Etanol     |                      | 0.0%  | 85.0% | 0.0% | 15.0% |
| Maior Eletr. + | <b>IEA BLUE</b>      |       |       |      |       |
| Menor Etanol   | <b>EV/Shifts</b>     | 2.8%  | 4.4%  | 9.9% | 82.9% |

Fonte: Elaboração própria

Os gráficos a seguir apresentam a evolução do consumo de fontes energéticas por veículos leves por cada um destes cenários.

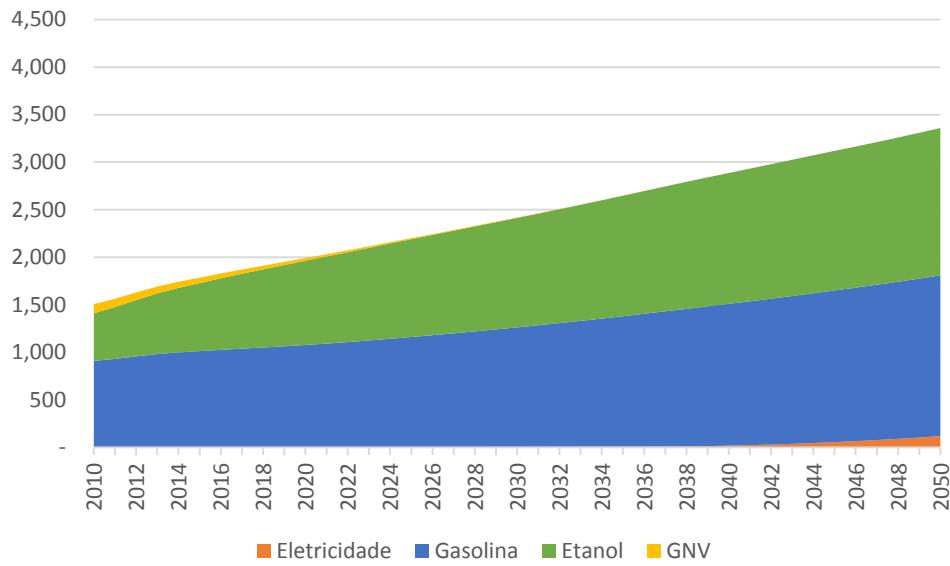
---

<sup>27</sup> Conforme já destacado, reconhece-se que a versão atual das premissas de demanda de energia do PNE está sujeita a alterações. Não obstante, reconhece-se também a importância de considerar-se no presente estudo o cenário indicado nesta publicação (cenário PNE 2050), por ser o cenário de longo prazo oficial mais recente publicado para o Brasil.



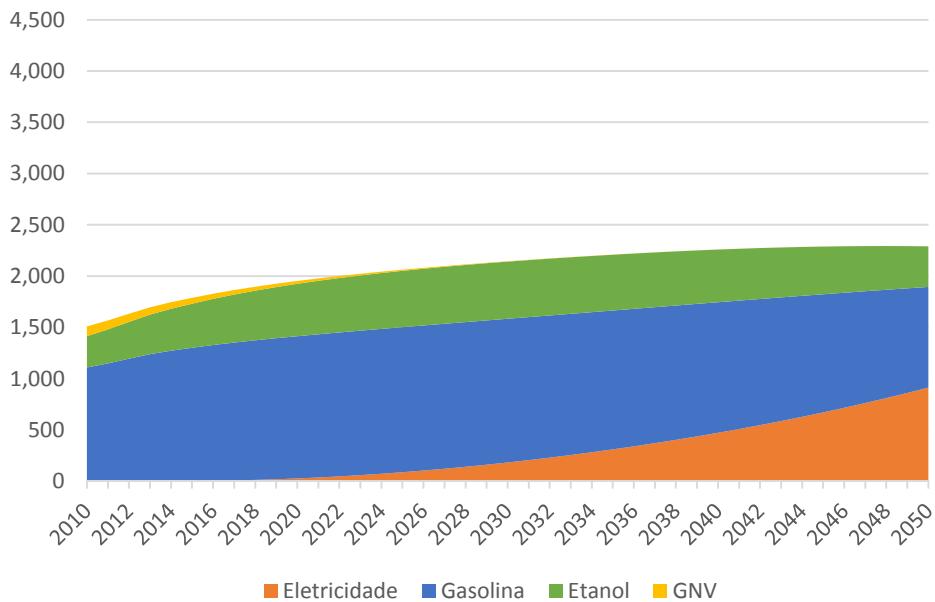
**Figura 5-4 – Consumo de energia final - GEA Reference (10<sup>6</sup> GJ)**

Fonte: Elaboração própria



**Figura 5-5 – Consumo de energia final – PNE 2050 (10<sup>6</sup> GJ)**

Fonte: Elaboração própria



**Figura 5-6 – Consumo de energia final – IEA BLUE E/Shifts (10<sup>6</sup> GJ)**

Fonte: Elaboração própria

### 5.1.3 - Ajustes nos resultados de demanda

Antes de avançar para a etapa seguinte, que envolve rodar estes cenários no MESSAGE, realizou-se um ajuste nos resultados obtidos para 2010, de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional 2015 (ano-base 2014) (MME/EPE, 2015). Em particular, os valores de demanda de gasolina, etanol e GNV constantes no BEN 2015 para o setor de transporte foram adotados para os anos de 2010 a 2014 em todos os cenários. Para os anos seguintes, o consumo de dada fonte de energia no ano  $t$  foi estimado com base na taxa anual de variação no consumo daquela fonte, conforme estimado no LEAP. A Equação 5-1 ilustra o ajuste que foi realizado para os anos seguintes.

**Equação 5-1**

$$D'_{y_j}^t = \frac{D_{y_j}^t}{D_{y_j}^{t-1}} \times D'_{y_j}^{t-1}$$

Onde:  $D'_{y_j}^t$  Representa a demanda ajustada do combustível  $y_j$  no ano  $t$  (GJ)

$D_{y_j}^t$  Representa a demanda do combustível  $y_j$  no ano  $t$ , conforme estimado

*no LEAP (GJ)*

$D_{y_j}^t$  *Representa a demanda do combustível  $y_j$  no ano  $t - 1$ , conforme estimado no LEAP (GJ)*

$D'^{t-1}_{y_j}$  *Representa A demanda ajustada do combustível  $y_j$  no ano  $t - 1$ ; no ano de 2015,  $D'^{t-1}_{y_j}$  será igual o consumo do combustível  $y_j$  em 2014, segundo o BEN 2014*

As tabelas (Tabela 5-7, Tabela 5-8 e Tabela 5-9) abaixo evidenciam os valores finais de demanda considerados para cada cenário. Cabe ressaltar que, a fim de ajustar os cenários para o MESSAGE, foi necessário desagregar o consumo de eletricidade por região do Brasil. Para tanto, esta desagregação foi realizada de forma proporcional à distribuição da atual frota nacional, conforme dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN)<sup>28</sup>. Com isto, admite-se a distribuição da frota nacional entre as regiões do país permanecerá aproximadamente constante no horizonte analisado e, ainda, que a frota de veículos eletrificados se distribuirá de forma equivalente ao restante da frota nacional de veículos leves.

---

<sup>28</sup> Foram aplicados dados referentes a fevereiro de 2015.

**Tabela 5-7 -- Demanda de energia ajustada – GEA Reference (TWh)**

| Combustível         | 2010          | 2015          | 2020          | 2025          | 2030          | 2035          | 2040          | 2045            | 2050            |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| <b>Eletricidade</b> | -             | 0.01          | 0.01          | 0.02          | 0.01          | 0.01          | 0.00          | 0.00            | 0.00            |
| <b>S/SE/CO</b>      | -             | 0.01          | 0.01          | 0.01          | 0.01          | 0.00          | 0.00          | 0.00            | 0.00            |
| <b>N/NE</b>         | -             | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00            | 0.00            |
| <b>Gasolina</b>     | 203.69        | 300.17        | 308.85        | 327.68        | 357.76        | 397.16        | 444.80        | 500.11          | 563.04          |
| <b>Etanol</b>       | 183.90        | 231.56        | 287.54        | 335.34        | 381.43        | 430.45        | 485.09        | 546.33          | 615.31          |
| <b>GNV</b>          | 20.53         | 16.44         | 8.02          | 3.21          | 1.00          | 0.28          | 0.13          | 0.07            | 0.03            |
| <b>Total</b>        | <b>408.12</b> | <b>548.19</b> | <b>604.44</b> | <b>666.25</b> | <b>740.22</b> | <b>827.91</b> | <b>930.02</b> | <b>1,046.50</b> | <b>1,178.39</b> |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 5-8 - Demanda de energia ajustada – PNE 2050 (TWh)**

| Combustível         | 2010          | 2015          | 2020          | 2025          | 2030          | 2035          | 2040          | 2045          | 2050            |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| <b>Eletricidade</b> | -             | 0.02          | 0.23          | 0.69          | 1.31          | 2.01          | 5.04          | 15.26         | 32.71           |
| <b>S/SE/CO</b>      | -             | 0.01          | 0.18          | 0.54          | 1.03          | 1.58          | 3.96          | 11.98         | 25.68           |
| <b>N/NE</b>         | -             | 0.00          | 0.05          | 0.15          | 0.28          | 0.43          | 1.08          | 3.28          | 7.02            |
| <b>Gasolina</b>     | 203.69        | 302.61        | 321.69        | 346.16        | 375.82        | 410.24        | 445.77        | 476.90        | 505.43          |
| <b>Etanol</b>       | 183.90        | 231.41        | 286.54        | 332.78        | 372.42        | 409.81        | 445.13        | 474.74        | 501.39          |
| <b>GNV</b>          | 20.53         | 16.44         | 8.02          | 3.21          | 1.00          | 0.28          | 0.13          | 0.07          | 0.03            |
| <b>Total</b>        | <b>408.12</b> | <b>550.50</b> | <b>616.71</b> | <b>683.53</b> | <b>751.86</b> | <b>824.36</b> | <b>901.12</b> | <b>982.22</b> | <b>1,072.26</b> |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 5-9 -- Demanda de energia ajustada – IEA BLUE EV/Shifts (TWh)**

| Combustível         | 2010          | 2015          | 2020          | 2025          | 2030          | 2035          | 2040          | 2045          | 2050          |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Eletricidade</b> | -             | 0.23          | 7.77          | 26.20         | 55.07         | 93.93         | 143.07        | 203.54        | 277.10        |
| <b>S/SE/CO</b>      | -             | 0.18          | 6.10          | 20.57         | 43.24         | 73.76         | 112.34        | 159.83        | 217.59        |
| <b>N/NE</b>         | -             | 0.05          | 1.67          | 5.63          | 11.83         | 20.17         | 30.73         | 43.72         | 59.52         |
| <b>Gasolina</b>     | 203.69        | 305.00        | 325.64        | 332.14        | 329.07        | 317.99        | 298.99        | 270.54        | 230.47        |
| <b>Etanol</b>       | 183.90        | 230.77        | 274.35        | 294.93        | 299.17        | 292.08        | 275.79        | 249.73        | 212.55        |
| <b>GNV</b>          | 20.53         | 16.44         | 8.02          | 3.21          | 1.00          | 0.28          | 0.13          | 0.07          | 0.03          |
| <b>Total</b>        | <b>408.12</b> | <b>552.67</b> | <b>623.55</b> | <b>682.68</b> | <b>739.37</b> | <b>798.21</b> | <b>861.04</b> | <b>927.42</b> | <b>997.26</b> |

Fonte: Elaboração própria

## **5.2 - Resultados do MESSAGE-Brasil: impacto sobre o setor energético**

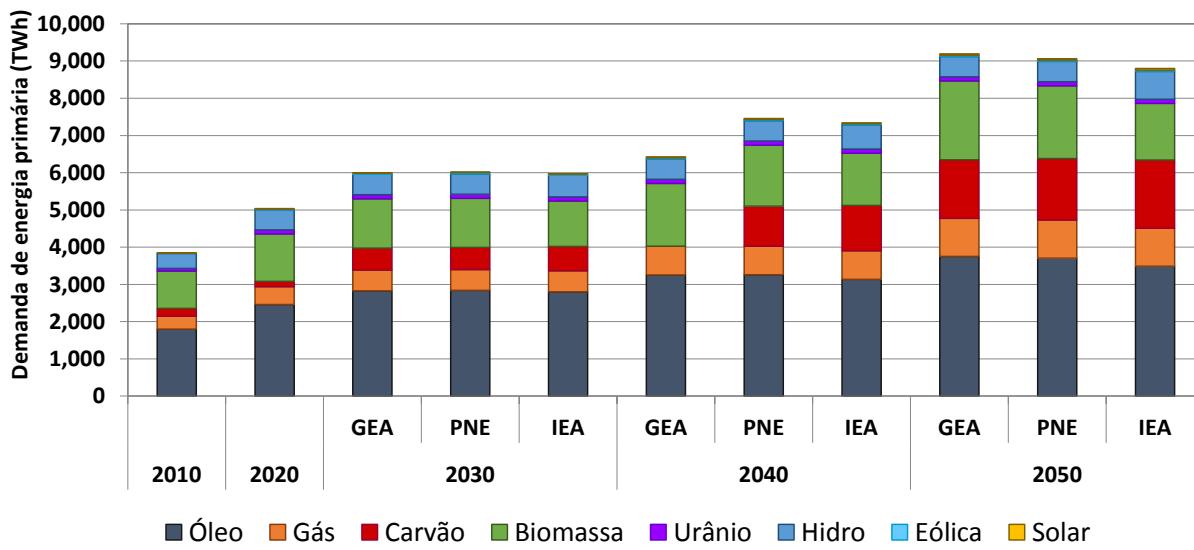
Os resultados obtidos a partir do MESSAGE-Brasil permitem verificar os impactos da entrada dos veículos elétricos sobre o perfil de consumo de combustível dos demais setores. Conforme destacado na seção 5-1, os dados de demanda de energia pela frota de veículos leves foram introduzidos em um cenário de referência para o setor elétrico. Neste cenário, o modelo estima o perfil de geração de energia para todo o sistema que permite atender a demanda ao menor custo e não são impostas quaisquer limitações a este sistema em termos de emissões de GEE, poluentes locais ou de uso de recursos.

O cenário GEA representa o cenário de menor penetração de veículos elétricos. Deste modo, a utilização deste cenário como base de comparação permite inferir os efeitos da entrada de veículos elétricos no sistema energético nacional.

### *5.2.1 - Impactos sobre o consumo de energia primária*

A Figura 5-7 exibe os resultados da análise com base no consumo de energia primária no sistema. Pode-se perceber que o cenário IEA é o que proporciona o menor consumo de energia primária ao longo de todo o período analisado, enquanto há pouca diferença entre o consumo de energia primária entre os cenários GEA e PNE. O consumo de energia primária estimado para o cenário da IEA é 4% menor que o consumo estimado para o cenário do GEA, onde a penetração de veículos elétricos corresponde apenas a HEVs e é mínima (99% dos veículos leves vendidos em 2050 são VMC). No caso do cenário do PNE, esta diferença é de apenas 1%.

Conforme destacado na seção 5.1.1, a demanda por gasolina nos cenários de maior penetração de veículos elétricos é significativamente menor que aquela dos cenários de menor penetração. No caso do IEA a demanda por gasolina – em termos de energia final – é 30% menor que a demanda no cenário GEA Reference. No sistema energético como um todo, a implicação é que a demanda por óleo cru no IEA (em termos de energia primária) é 6-7% menor que nos cenários PNE e GEA, como evidencia a Figura 5-7.



**Figura 5-7 – Consumo de Energia Primária (TWh)**

Fonte: Elaboração própria

Dado que o cenário do PNE é principalmente caracterizado pela alta penetração de HEVs (80%), este resultado sugere que uma transição da frota leve que tenha como foco a transição para HEVs seria insuficiente para promover uma redução sensível no consumo de energia primária do país.

Por sua vez, o menor consumo de energia primária no cenário IEA sugere que uma entrada mais ambiciosa de veículos elétricos (neste cenário a penetração de veículos elétricos é de 83% de BEVs e 10% de PHEVs) proporcionaria uma maior eficiência de conversão de energia que nos demais cenários. Conforme destacado no fechamento da subseção 5.1.1, a eficiência global dos veículos elétricos depende não somente da eficiência da conversão *tank-to-wheel* – isto é, da conversão da eletricidade armazenada na bateria em energia cinética útil – como também da eficiência da conversão da fonte primária de energia em energia elétrica, nas usinas de geração que compõem o SIN.

A Figura 5-8 evidencia os resultados de consumo de energia primária, por fontes renováveis, fósseis e nuclear. Nota-se que, apesar de o cenário IEA proporcionar um consumo de energia primária sensivelmente inferior ao dos demais cenários, a participação de fontes fósseis neste cenário é superior em 3 p.p. (pontos percentuais) ao cenário GEA e em 2 p.p. em relação ao PNE. Esta diferença se dá em especial pelo maior consumo de carvão no cenário IEA, para atender a demanda de eletricidade dos veículos elétricos, conforme se verá na próxima subseção.

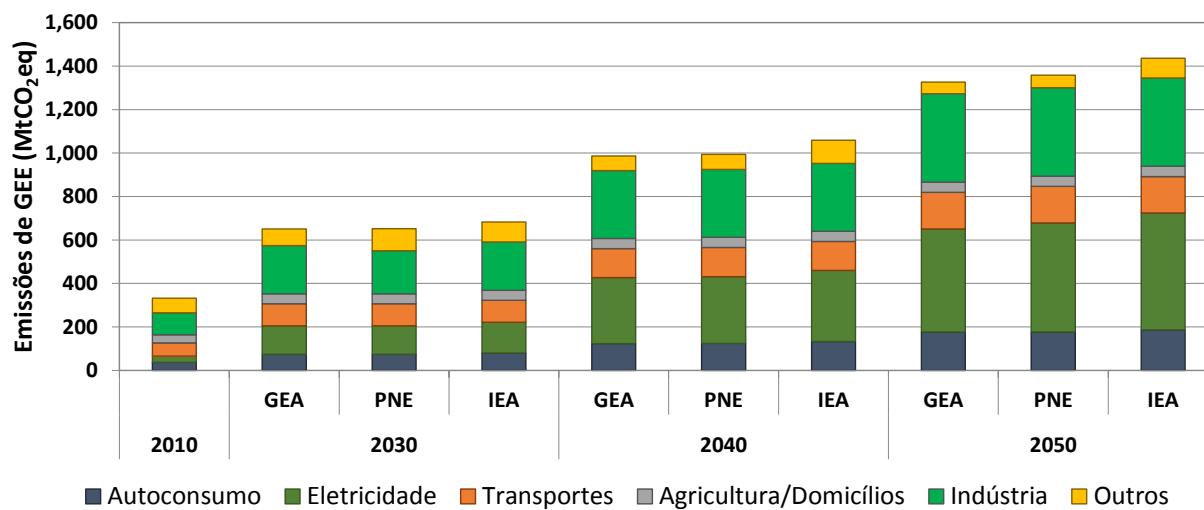
**Figura 5-8 – Consumo de Energia Primária – Renováveis versus não-renováveis (%)**

| Cenários | Óleo | Gás | Carvão | Biomassa | Hidro | Eólica | Solar | Urâni o | Fóssil | Renováve I | Nuclea r |
|----------|------|-----|--------|----------|-------|--------|-------|---------|--------|------------|----------|
| 2010     | 47   | 9   | 5      | 26       | 10    | 0      | 0     | 2       | 61     | 37         | 2        |
| GEA      | 47   | 9   | 10     | 22       | 9     | 1      | 0     | 2       | 66     | 32         | 2        |
| 2030 PNE | 47   | 9   | 10     | 22       | 9     | 1      | 0     | 2       | 66     | 32         | 2        |
| IEA      | 47   | 9   | 11     | 20       | 10    | 1      | 0     | 2       | 67     | 31         | 2        |
| GEA      | 43   | 10  | 14     | 23       | 7     | 0      | 1     | 1       | 68     | 31         | 1        |
| 2040 PNE | 44   | 10  | 14     | 22       | 7     | 0      | 1     | 2       | 68     | 30         | 2        |
| IEA      | 43   | 10  | 17     | 19       | 9     | 0      | 1     | 2       | 70     | 29         | 2        |
| GEA      | 41   | 11  | 17     | 23       | 6     | 0      | 1     | 1       | 69     | 30         | 1        |
| 2050 PNE | 41   | 11  | 18     | 21       | 6     | 0      | 1     | 1       | 70     | 29         | 1        |
| IEA      | 39   | 12  | 21     | 17       | 8     | 0      | 1     | 1       | 72     | 27         | 1        |

Fonte: Elaboração própria

Dada a maior demanda por combustíveis fósseis e, em especial, por carvão, o cenário IEA é também o cenário de maiores emissões de GEE, conforme evidenciado na Figura 5-9. As emissões de GEE associadas a este cenário são 8% maiores que aquelas associadas ao GEA. No caso do PNE, as emissões sob este cenário são 6% maiores que as emissões sob o GEA. É possível notar este resultado é principalmente devido às emissões nos setores de eletricidade, autoconsumo do setor energético e “outros”. É interessante notar que a entrada dos veículos elétricos não provoca impactos significativos sobre a indústria. Conforme se verá, isto se deve ao fato de a maior demanda de eletricidade ser atendida por carvão e usinas hidrelétricas. Isto faz com que a oferta de energéticos tipicamente aplicados à indústria, como derivados médios de petróleo e gás natural, não é impactada pela entrada dos veículos elétricos.

Os impactos da entrada de veículos elétricos sobre o setor elétrico serão explorados na próxima seção.



**Figura 5-9 – Emissões de GEE (MtCO<sub>2</sub>eq)**

Fonte: Elaboração própria

### 5.2.2 - Impactos sobre o setor elétrico

A Figura 5-10 evidencia a evolução estimada para a matriz elétrica do país para cada um dos cenários estudados.

Conforme sugerido na subseção anterior, o cenário IEA apresenta um aumento consistente no consumo de eletricidade ao longo do horizonte analisado. Entre 2010 e 2050, a demanda por eletricidade neste setor mais que dobra e atinge a marca de 1,393 TWh, em comparação com os 548 TWh em 2050. Comparado com os cenários GEA e PNE, a demanda por eletricidade em 2050 é 23% e 21% maior.

Nos cenários GEA e PNE, o aumento na demanda de eletricidade é atendido principalmente por meio de térmicas a carvão pulverizado, caldeiras a bagaço de cana e geração a carvão pulverizado. Já no cenário do IEA, há uma redução da geração por bagaço – devida principalmente à queda na demanda de etanol<sup>29</sup> - e um aumento significativo da geração por

---

<sup>29</sup> Os detalhes desta interação serão melhor explorados na próxima subseção.

hidrelétricas de médio porte e por térmicas a carvão, que passam a representar, respectivamente 26% e 31% da geração elétrica nacional.

A entrada de térmicas a carvão em lugar, por exemplo de térmicas a gás, está associada ao fato de este cenário de referência otimizar o sistema para obter o menor custo. Dado o menor custo do combustível, térmicas a carvão passam a substituir térmicas a gás a partir de 2030, quando as térmicas a gás em operação atualmente são sucateadas. Ademais, no MESSAGE-Brasil, há diversos usos cativos para o gás natural, como na indústria e nas edificações, que têm prioridade no modelo. Assim, o gás natural possui um maior custo de oportunidade no modelo integrado, quando comparado a outros combustíveis, como o carvão.

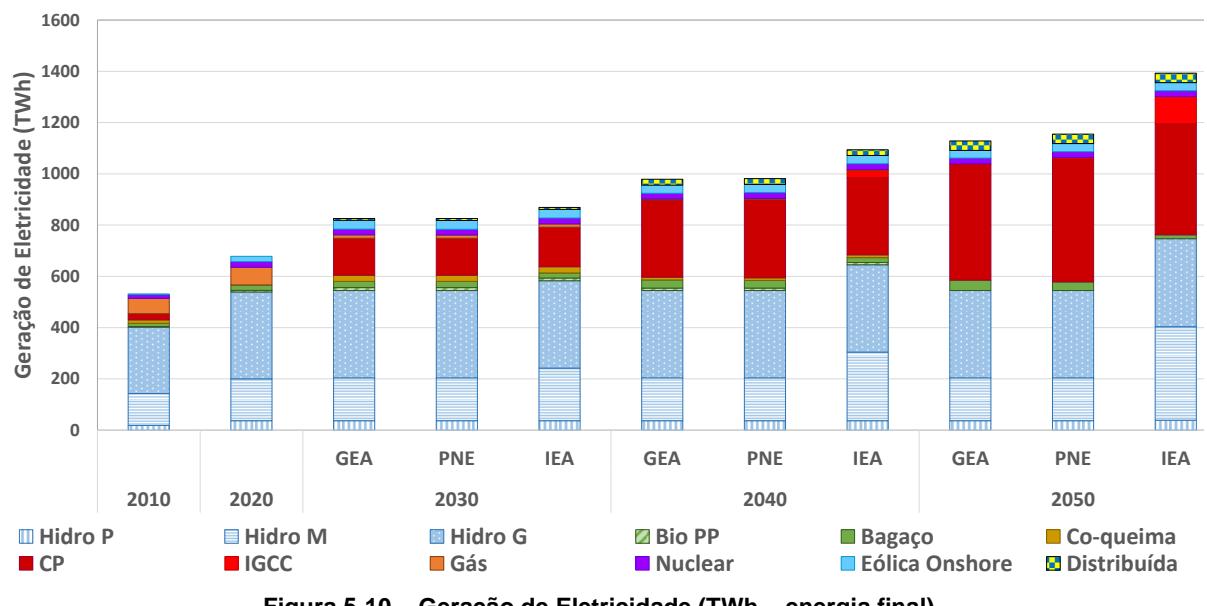
Cabe ressaltar que no cenário IEA parte da demanda elétrica (8%) é atendida por termelétricas a carvão aplicando a tecnologia IGCC. Uma vez que a demanda de eletricidade neste cenário é consideravelmente maior que nos demais, a demanda por carvão excede a capacidade nacional de produção, de modo que o modelo opta pela importação de carvão. Contudo, conforme descrito na seção 4.3.2, o modelo inclui uma restrição às importações de carvão, condizente com a evolução prevista para a capacidade dos portos brasileiros para este combustível (BNDES, 2012). Desta forma, a fim de atender a demanda de eletricidade ao menor custo com uma quantidade restrita de carvão, o modelo opta por uma tecnologia mais eficiente de geração, que é o IGCC, gerando, dessa forma, mais eletricidade a partir da mesma quantidade de carvão disponível.

A Tabela 5-10 evidencia o percentual de eletricidade proveniente de fontes renováveis em cada cenário<sup>30</sup>. Nota-se que, embora o carvão tenha um papel de destaque para o atendimento da demanda adicional por eletricidade dos veículos elétricos, o cenário IEA gera uma matriz elétrica menos intensiva em fontes fósseis que o cenário GEA e o PNE. No entanto, ao se comparar o cenário PNE ao GEA, nota-se que o percentual de fontes fósseis na matriz elétrica do cenário PNE é superior ao GEA. Isto ocorre pois, para um aumento moderado na elevação da demanda por eletricidade (como ocorre no PNE), o modelo em um primeiro momento opta por termelétricas a carvão pulverizado e conforme o aumento da demanda se torna mais pronunciado (caso do IEA), o modelo migra para o IGCC. Contudo, dado que há uma restrição à entrada de IGCC no setor elétrico (vide a sessão 4.3.2 para mais

---

<sup>30</sup> Em linha com as premissas previamente apresentadas, considera-se que 30% da co-queima corresponde a carvão vegetal renovável.

detalhes), a instalação de novas centrais hidrelétricas de médio porte se expande a fim de atender a demanda remanescente por eletricidade.



**Figura 5-10 – Geração de Eletricidade (TWh – energia final)**

Fonte: Elaboração própria

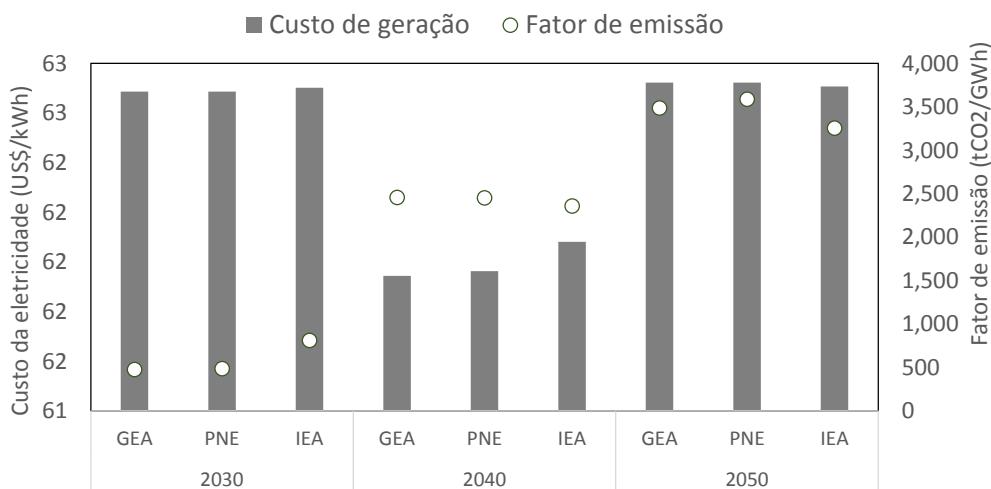
**Tabela 5-10 – Consumo de Energia Primária – Renováveis versus não-renováveis (%)**

| Cenários | Hidro | Biom. | Bagaço | Co-queima | Carvão | Gás | Óleo | Nuclear | Eólica | Distrib. | Fóssil | Renov. | Nuclear |   |
|----------|-------|-------|--------|-----------|--------|-----|------|---------|--------|----------|--------|--------|---------|---|
| 2010     | 73    | 0     | 2      | 2         | 4      | 11  | 3    | 3       | 0      | 0        | 20     | 77     | 2       |   |
| 2020     | 79    | 1     | 3      | 0         | 0      | 10  | 0    | 3       | 3      | 0        | 10     | 87     | 0       |   |
| 2030     | GEA   | 66    | 1      | 3         | 3      | 17  | 2    | 0       | 3      | 4        | 1      | 21     | 76      | 3 |
|          | PNE   | 66    | 1      | 3         | 3      | 17  | 2    | 0       | 3      | 4        | 1      | 21     | 76      | 3 |
|          | IEA   | 67    | 1      | 2         | 3      | 18  | 2    | 0       | 3      | 4        | 1      | 21     | 76      | 3 |
| 2040     | GEA   | 56    | 1      | 3         | 1      | 31  | 0    | 0       | 2      | 3        | 2      | 32     | 66      | 1 |
|          | PNE   | 56    | 1      | 3         | 1      | 31  | 0    | 0       | 2      | 3        | 2      | 32     | 65      | 1 |
|          | IEA   | 59    | 1      | 2         | 1      | 30  | 0    | 0       | 2      | 3        | 2      | 31     | 67      | 1 |
| 2050     | GEA   | 48    | 0      | 4         | 0      | 40  | 0    | 0       | 2      | 3        | 3      | 40     | 58      | 0 |
|          | PNE   | 47    | 0      | 3         | 0      | 42  | 0    | 0       | 2      | 3        | 3      | 42     | 56      | 0 |
|          | IEA   | 54    | 0      | 1         | 0      | 39  | 0    | 0       | 2      | 2        | 3      | 39     | 60      | 0 |

Fonte: Elaboração própria

Conforme se poderia esperar, o fato de a matriz elétrica no IEA apresentar um maior percentual de renováveis faz com que o fator de emissão do SIN no final do horizonte seja menor neste cenário. Mais especificamente, o fator de emissão do IEA no fim do horizonte é 9% e 7% menor que os fatores do GEA e do PNE, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 5-11.

A Figura 5-11 também evidencia a variação interessante no custo da eletricidade ao longo do período. Nota-se que o custo tem um comportamento inesperado, caindo entre 2030 e 2040 voltando a subir em 2050. Isto ocorre porque o resultado relativo a 2030 não representa o resultado ótimo do modelo. No curto prazo, os empreendimentos existentes e em construção ou são adicionados ao modelos sem que a escolha seja feita endogenamente, não necessariamente refletindo a escolha ótima, mas refletindo a realidade. Por este motivo, até 2030, há uma geração considerável em UTEs a gás natural, dada a capacidade atual de UTEs a gás natural. No entanto, conforme estas usinas são sendo sucateadas, o consumo de gás natural no setor elétrico é extinto e vai sendo substituído pelo carvão. Isso, por sua vez, aumenta o fator de emissão da eletricidade. A partir de 2040, com a entrada do carvão, cai novamente o custo de geração. Este custo sobre apenas em 2050, a partir da entrada de UTEs IGCC a carvão importado e de hidrelétricas de médio porte.



**Figura 5-11 – Geração elétrica: fator de emissão e custo**

Fonte: Elaboração própria

### 5.2.3 - Impactos sobre o setor sucroalcooleiro

Na subseção 5.1.3 foi apresentada a evolução da demanda de combustíveis sob cada cenário. Conforme destacado, os cenários foram selecionados de modo a representar situações extremas de consumo de eletricidade e etanol. Em particular, o cenário IEA representa um cenário de consumo elevado de eletricidade e reduzido de etanol. Em contraste, o cenário GEA corresponde a um cenário de demanda quase nula de eletricidade e alta demanda de etanol.

Estas diferenças entre os cenários selecionados permitem avaliar como o setor energético, em especial o setor sucroalcooleiro responderia a configurações extremas de entrada de veículos eletrificados.

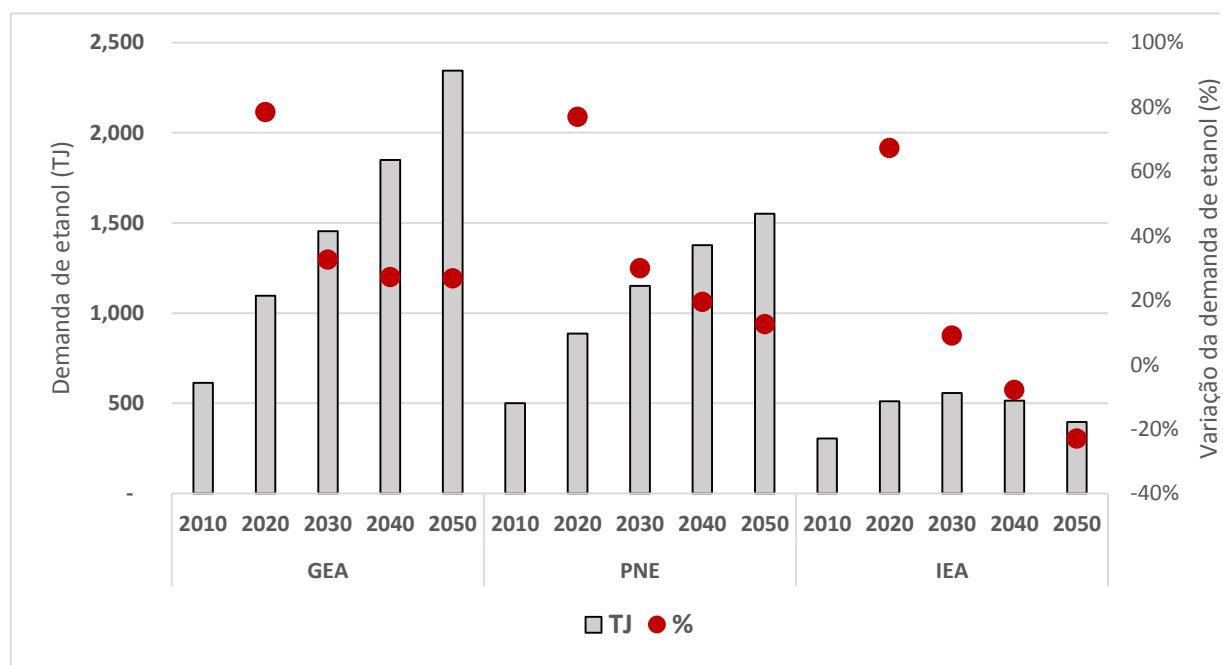
A Figura 5-12 evidencia como varia a demanda de etanol ao longo dos anos em cada cenário – as barras representam a demanda absoluta de etanol (em TJ de energia final) e as porcentagens, o quanto que variou a demanda ao longo do cenário em questão. Fica evidente que a entrada de veículos eletrificados na frota nacional tem o potencial de impactar significativamente o setor sucroalcooleiro.

Mesmo com uma entrada relativamente pouco ambiciosa como a que ocorre no cenário PNE, a projeção estimada de crescimento do setor até 2050 é 25% (ou 72 pontos percentuais) inferior à demanda no cenário de maior consumo (GEA), o que pode ser considerada uma

variação significativa em termos de planejamento de longo prazo. No caso do cenário do IEA, de entrada mais ambiciosa de veículos elétricos, a diferença de crescimento é de 85% (ou 252 pontos percentuais), uma variação ainda mais drástica.

Nos cenários GEA e PNE, a variação da demanda por etanol ao longo do horizonte de análise fica acima dos 200%, enquanto no cenário IEA este valor é equivalente a 30%. Em termos de expansão anual, isto é equivalente a um crescimento médio de 3.4%, 2.9% e 0.7% ao ano, respectivamente. Enquanto a projeção do PNE está aproximadamente coerente com a projeção estabelecida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estima uma expansão anual de 2.3% na produção de cana até 2025 (MAPA, 2015), os cenários GEA e IEA distanciam-se (em direções opostas) dessa projeção oficial.

Em termos absolutos, a demanda de etanol no fim do horizonte de análise é estimada em 396 milhões, 1,554 mil e 2,345 mil TJ em 2050 nos cenários IEA, PNE e GEA respectivamente. No cenário IEA, a demanda é crescente entre 2010 e 2030, quando atinge o pico de 558 mil TJ, e a partir de então inicia uma trajetória decrescente.



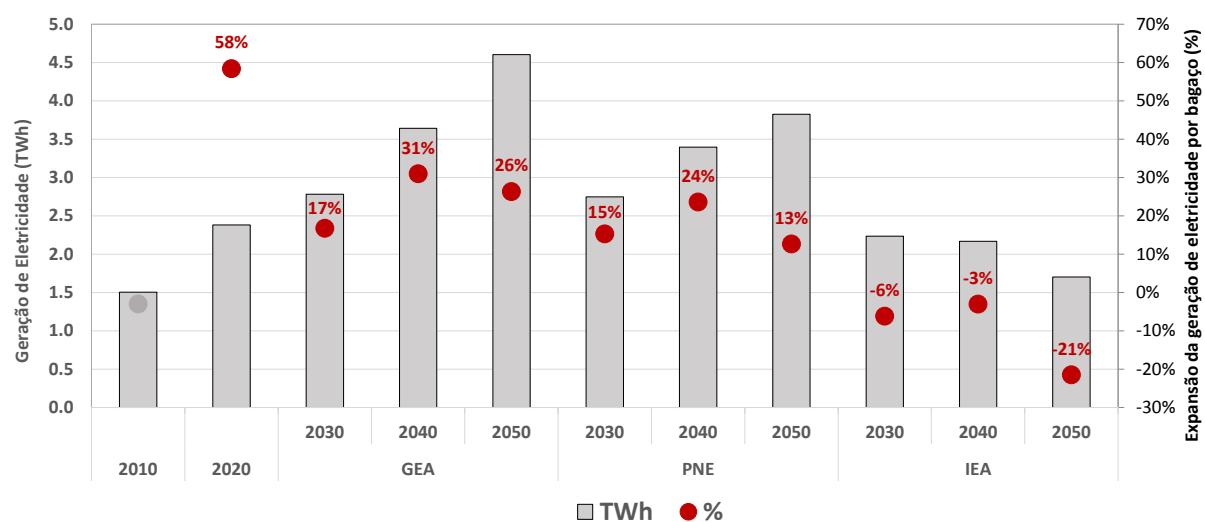
**Figura 5-12 – Demanda de etanol nos cenários (TJ)**

Fonte: Elaboração própria

A Figura 5-13 evidencia como a redução na demanda de etanol impacta a geração de eletricidade por bagaço ao longo dos anos. As barras representam a geração total, enquanto

as porcentagens representam como variou a geração a cada período retratado, dentro de cada cenário. Em linha com a trajetória da demanda de etanol, a geração elétrica com bagaço no cenário IEA é crescente até 2030, quando passa a decrescer. A variação total acumulada entre 2010 e 2050, no entanto, é positiva neste cenário e equivalente a 13%. No caso dos cenários GEA e PNE, esta variação é de 154 e 206%.

No cenário IEA a geração com bagaço em 2050 é 63% e 56% menor que nos cenários GEA e PNE, respectivamente. Na comparação entre o PNE e o GEA, esta diferença fica em 17%. Fica evidente a que a entrada de veículos eletrificados, ao reduzir a demanda por etanol, teria impactos negativos significativos sobre a produção de eletricidade por bagaço de cana.



**Figura 5-13 – Geração de eletricidade por bagaço (TWh)**

Fonte: Elaboração própria

### 5.3 - Sumário e discussão

Este capítulo apresentou os resultados da modelagem da demanda de energia associada à penetração de veículos elétricos e da resposta do setor energético aos cenários de demanda de energia por veículos leves.

O cenário IEA, de maior penetração de veículos elétricos, foi também o cenário que apresentou o menor consumo de energia primária, seguido do cenário PNE e pelo cenário GEA Reference. Isto sugere que os veículos elétricos não apenas são mais eficientes do ponto de vista *tank-to-wheel*, mas também sob o ponto de vista *well-to-wheel* – i.e. do ponto de vista da conversão de energia primária a energia motriz. Por outro lado, a participação de fontes

fósseis no consumo de energia primária no cenário IEA é superior em 3 p.p. (pontos percentuais) à participação destas fontes no cenário GEA e em 2 p.p. em relação ao PNE.

Sob a perspectiva da demanda de energia final, os impactos sobre o setor elétrico e sucroalcooleiro são significativos. Nos cenários de alta penetração de veículos elétricos, a demanda de eletricidade por estes veículos chega a atingir 290 TWh em 2050, representando 16% da demanda total de eletricidade naquele ano. Por outro lado, o consumo de etanol nestes cenários é mínimo, chegando a cerca de 200 TWh, 70% a menos que nos outros dois cenários analisados. Com isto, a expansão anual média do setor sucroalcooleiro no cenário IEA é de 0.7%, em oposição à expansão de 3.4% no cenário GEA Reference (onde os FFVs predominam).

Esta demanda reduzida provoca uma diminuição significativa na geração de eletricidade por bagaço: em 2050, a geração com bagaço cenário de maior penetração de veículos elétricos é 63% e 56% menor que nos cenários GEA Reference e PNE (de alta penetração de HEVs e penetração de 15% de BEVs), respectivamente<sup>31</sup>.

Conforme descrito na seção 2.2.3, o setor sucroalcooleiro é extremamente vulnerável a condições econômicas relacionadas ao preço da gasolina e a eventos climáticos. Recentemente, o setor enfrentou uma crise severa que comprometeu diversas destilarias e, com elas, empregos diretos e indiretos (Bressan Filho, 2009, UNICA, 2015c). Políticas de preço do governo nacional e eventos climáticos desfavoráveis ajudaram a reforçar tal crise, da qual apenas recentemente o setor começou a se recuperar (Cavalcanti, 2011).

Dado este panorama, recomenda-se que uma entrada de veículos elétricos na frota nacional seja acompanhada de políticas consistentes de suporte ao setor sucroalcooleiro, a fim de preparar o setor e evitar perdas significativas. A baixa taxa de crescimento da demanda de etanol, por exemplo, poderia comprometer o retorno esperado de investimentos ou mesmo a produtividade e competitividade do setor como um todo.

Conforme sugerido por BRESSAN FILHO (2009), políticas de suporte ao setor poderiam incluir o apoio à criação de companhias regionais de comércio, a fim de fortalecer o poder de mercado de pequenos produtores e a criação de um agente financeiro responsável por socorrer membros com problemas de liquidez. Por sua vez, GOLDENBERG *et al.* (2014)

---

<sup>31</sup> Estes resultados são coerentes com a forma que este estudo foi desenhado, estressando o sistema para consumos extremos de etanol e de eletricidade nos cenários estudados.

propõem a criação de um fundo com o objetivo de assegurar o fornecimento de etanol. Políticas de subsídio ao etanol (ou taxação da gasolina) também favoreceriam o etanol diretamente, incentivando motoristas a optar por este combustível. Alternativamente, pode-se considerar iniciativas voltadas ao estímulo à demanda de etanol energético por outros setores, como o transporte público de passageiros (ônibus municipais movidos a etanol) ou a geração elétrica flexível, para auxiliar na regularização da oferta de fontes intermitentes de energia (Körbele *et al.*, 2015).

No que tange à geração de eletricidade, no cenário de maior entrada de veículos elétricos, a demanda por eletricidade é 23% superior à demanda do cenário de menor entrada de veículos elétricos. Ao longo de todo o horizonte de análise, a expansão da geração elétrica é de 154% no cenário IEA. Isto gera impactos sensíveis sobre o perfil tecnológico do setor elétrico.

Nos anos iniciais da análise, a demanda crescente por eletricidade sob o cenário IEA é atendida principalmente pela expansão da geração por hidrelétricas, principalmente as de grande porte. Contudo a partir do esgotamento do potencial hidrelétrico de grande porte, a importância do carvão para o atendimento da demanda é crescente. Dadas restrições impostas no modelo à importação de carvão, o modelo gradualmente desloca a geração para plantas IGCC, mais eficientes que aquelas a carvão pulverizado. Em paralelo, a expansão da geração hidrelétrica por plantas de médio porte complementa a geração a carvão no cenário de maior penetração de veículos elétricos.

Percebe-se que, a despeito da tendência de a matriz elétrica nacional tornar-se progressivamente mais fóssil (conforme apontado em SCHAEFFER *et al.*, 2015, NOGUEIRA *et al.*, 2014, LUCENA *et al.*, 2015), ao estressar-se suficientemente o modelo, ele migra para hidrelétricas, principalmente devido às restrições à importação de carvão e à instalação de plantas IGCC. Desta forma, os resultados sugerem que dada uma entrada de veículos elétricos suficientemente ampla (no caso do cenário IEA, PHEVs e BEVs representam 82% das vendas em 2050), o sistema migraria novamente para fontes renováveis de energia<sup>32</sup>.

Esta maior penetração é responsável pelo cenário da IEA apresentar a menor intensidade de emissões do SIN dentre os cenários analisados. Contudo, apesar desta a menor intensidade, o benefício climático da penetração de veículos elétricos é discutível. Em 2050, as emissões

---

<sup>32</sup> Cabe ressaltar que os benefícios de se ter uma maior penetração de hidrelétricas no sistema elétrico nacional são discutíveis quando analisados sob uma ótica mais ampla de impactos socio-ambientais. (Lima, 2015, Carvalho, 2014)

totais de GEE associadas a este cenário são 8% maiores que aquelas associadas ao GEA. Isto é devido principalmente ao nível de atividade do setor elétrico neste cenário, em que a geração elétrica mais que dobra ao longo do período de análise.

Deste modo, nota-se que, sob o ponto de vista do planejamento energético, o nível de penetração de veículos elétricos representa um *trade-off* entre a eficiência e as emissões de GEE pelo setor energético. Por um lado, a maior penetração de veículos elétricos na frota de veículos leves proporciona um menor consumo de energia primária pelo sistema energético. Por outro, contudo, em um cenário em que políticas de mitigação paralelas não sejam adotadas, esta maior penetração provoca uma elevação no consumo de carvão e uma redução no consumo de bagaço, o que, por fim, provoca uma elevação nas emissões nacionais de GEE.

Neste sentido, este estudo sugere que a entrada de veículos elétricos é positiva do ponto de vista de gestão energética, mas que apenas seria vantajosa do ponto de vista climático se acompanhado de políticas de incentivo à produção de energia elétrica de baixa intensidade de emissões.

Algumas políticas de incentivo à redução de emissões de GEE no setor elétrico incluem introdução de uma taxação sobre as emissões de GEE, o estabelecimento de limites de emissões (eventualmente combinado a um mercado de permissões de emissão), o subsídio a fontes de baixa intensidade de emissões, além dos leilões específicos para energia renovável, que já fazem parte da política brasileira (Nogueira, *et al.* 2014, Schaeffer *et al.*, 2015, CLIMACAP, 2013). Por exemplo, de acordo com NOGUEIRA *et al.* (2014), um cenário de introdução de taxas moderadas sobre as emissões de GEE levariam o sistema elétrico a substituir plantas a carvão pulverizado por plantas a gás natural em ciclo combinado e, mais tarde, por plantas IGCC a carvão. Por sua vez, um cenário de introdução de uma taxa mais alta provoca, a partir de 2020, a substituição de todas as plantas a carvão por plantas equipadas com tecnologia CCS.

Resultados similares são obtidos por LUCENA *et al.* (2015), que também avaliam os efeitos de políticas de promoção à mitigação de emissões sobre o setor energético brasileiro. Um total de cinco cenários são analisados sob seis modelos distintos em aspectos como abordagem metodológica (otimização ou simulação), escopo geográfico (global ou local) e escopo setorial (equilíbrio geral ou parcial). Os cinco cenários analisados incluem um cenário de linha de base e outros quatro cenários de política de mitigação de emissões (taxação de emissões de GEE e estabelecimento de limites de emissões). Em todos os modelos, a

aplicação de taxas suficientemente altas promove reduções significativas no nível de emissões, em comparação com o cenário de base. Por sua vez, a imposição de limites sobre o nível de emissões é tecnologicamente viável, por meio de ações promovendo a redução da demanda de energia final, descarbonização da matriz de energia primária e da matriz elétrica, bem como por meio da introdução das tecnologias CCS e Bio CCS.

Conforme detalhado no capítulo 1, o consumo de combustíveis no setor de transportes é um vetor relevante de emissões e do consumo de energia final no Brasil. Os resultados demonstram que a penetração de veículos elétricos teria um impacto significativo sobre o perfil de demanda de energia por veículos leves, deslocando a demanda gasolina – e, consequentemente, de petróleo – para uma demanda maior de eletricidade. Contanto que acompanhada por políticas adequadas para o setor sucroalcooleiro e elétrico, a penetração de veículos elétricos pode vir a ter um papel significativo nos esforços de mitigação de emissões nacionais de GEE.

## 6 -CONCLUSÃO

Este estudo objetivou analisar até que ponto a introdução de veículos elétricos seria vantajosa do ponto de vista da eficiência energética do sistema energético nacional e do ponto de vista da estratégia nacional de mitigação de emissões de GEE. Primeiramente, cenários de penetração de veículos elétricos foram extraídos da literatura e analisados a fim de prover um maior entendimento acerca das dinâmicas de penetração consideradas na literatura nacional e internacional. Foi possível concluir que, em média, os cenários de penetração de veículos elétricos considera uma penetração maior de HEV e menor de PHEV e de BEV. Além disto, menos da metade dos cenários analisados considera qualquer entrada PHEV e menos de 30% dos cenários considera qualquer entrada de BEV.

Os cenários incluídos na revisão da literatura foram então triados e rodados em um modelo paramétrico de projeção de demanda (LEAP) a fim de determinar aqueles que representam demandas máximas e mínimas de eletricidade e etanol pela frota de veículos leves. Os cenários extremos foram então rodados em um modelo integrado de otimização, o MESSAGE Brasil, sob um cenário de referência – i.e. sem a introdução de políticas de mitigação de GEE. O objetivo desta segunda etapa foi de investigar como o setor elétrico, sucroalcooleiro e o setor energético como um todo reagem a estes cenários.

Os resultados evidenciam que, sob o ponto de vista do planejamento energético, o nível de penetração de veículos elétricos representa um *trade-off* entre eficiência e as emissões de GEE pelo setor energético. Por um lado, a maior penetração de veículos elétricos na frota de veículos leves proporciona um menor consumo de energia final pelos veículos leves e de energia primária pelo sistema energético como um todo. Por outro, a maior demanda por eletricidade associada a este cenário provoca uma elevação no consumo de carvão, enquanto a redução da demanda por etanol leva a uma queda no consumo de bagaço. Este cenário conduz por fim a um maior nível de emissões absolutas de GEE pelo setor energético, potencialmente comprometendo os objetivos de mitigação traçados na INDC brasileira.

Neste sentido, este estudo sugere que a entrada de veículos elétricos é positiva do ponto de vista de gestão energética, mas que apenas seria vantajosa do ponto de vista climático se acompanhado de políticas de incentivo à produção de energia elétrica de baixa intensidade de emissões.

Algumas políticas de incentivo à redução de emissões de GEE no setor elétrico incluem introdução de uma taxação sobre as emissões de GEE, o estabelecimento de limites de emissões (eventualmente combinado a um mercado de permissões de emissão), o subsídio a fontes de baixa intensidade de emissões, além dos leilões específicos para energia renovável, que já fazem parte da política brasileira (Nogueira *et al.*, 2014, Schaeffer *et al.*, 2015, CLIMACAP, 2013).

Uma das limitações deste trabalho está associada à premissa adotada de que a eficiência dos veículos elétricos é constante ao longo do horizonte. A opção pela manutenção desta premissa esteve associada à ausência de um estudo que reunisse projeções para a eficiência de todas as tecnologias contempladas neste estudo. Considerou-se que a adoção de projeções obtidas em diferentes estudos poderia influenciar os resultados deste estudo em função, por exemplo, do viés de determinado estudo para um avanço mais acelerado da eficiência de uma dada tecnologia. Cabe ressaltar que a implicação da adoção desta premissa é que a demanda de energia final pelos veículos leves está potencialmente superestimada, o que gera impactos sobre os resultados de oferta de energia obtidos MESSAGE Brasil.

Neste sentido, trabalhos futuros poderiam focar em superar estas limitações, a partir de um estudo abrangente que analise os cenários de progressão da eficiência destes veículos. MACHADO (2016) estabelece uma projeção consistente para a eficiência de FFVs, dados diferentes cenários de política de eficiência energética de veículos leves no Brasil. Uma ampliação desta análise para a consideração de HEVs, PHEVs e BEVs favoreceria uma projeção mais consistente dos impactos da entrada de veículos eletrificados no sistema energético nacional.

Este trabalho também não contemplou as diferentes configurações de demanda de carga pelos veículos elétricos. O perfil de recarga dos veículos teria o potencial de impactar a curva de carga e, portanto, a evolução do sistema elétrico e do setor energético como um todo. Por exemplo, assumindo que todos os usuários de veículos elétricos optem por recarregar seus veículos entre 18h e 21h, que é tipicamente o horário de pico de demanda de carga, a tendência é que usinas mais flexíveis, tais como usinas a carvão e a gás natural, sejam demandadas pelo sistema. Contudo, segundo BORBA (2012), dada a tendência de a curva de carga nacional tornar-se progressivamente mais plana, a entrada de veículos elétricos, mesmo se estes sejam todos recarregados no horário de ponta típico, teria pouco impacto sobre a curva de carga.

A análise dos impactos da penetração de veículos elétricos sobre o setor de refino tampouco fez parte do escopo desta análise, dada a complexidade deste setor. Contudo, considerando-se a queda projetada para a demanda de gasolina, os impactos sobre este setor são potencialmente significativos. Próximos trabalhos poderão explorar esta questão em detalhes, analisando sejam os impactos sobre o perfil de produção, sejam a segurança energética ou a balança comercial.

Por fim, cabe salientar que este trabalho analisou o impacto da entrada de veículos elétricos sob um cenário de referência para o sistema energético. Apesar de um cenário de alta penetração de veículos elétricos ser pouco coerente com um cenário de ausência de políticas de mitigação para o restante da economia, esta abordagem é válida para se determinar qual seria o pior cenário para a entrada de veículos elétricos. Contudo, trabalhos futuros podem explorar como que estes impactos variam conforme diferentes políticas de mitigação de emissões de GEE, tais como a taxação das emissões, os subsídios a fontes menos carbono-intensivas ou o estabelecimento de limites de emissões. Por exemplo, KÖRBELE *et al.* (2015) sugerem que em um cenário de alta restrição de emissões para o Brasil, o CCS em destilarias de etanol (BioCCS) teria um papel central nos esforços de mitigação. Seria de particular interesse avaliar como que estes resultados (incluindo o custo de mitigação) são impactados pela entrada de veículos eletrificados, levando à redução da produção de destilarias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEA. 2016. "Statistics. Trends in Car Registrations. Country Comparison Tool." ACEA - European Automobile Manufacturers Association. Disponível em: <http://www.acea.be/statistics/tag/category/country-comparison-tool>. Acesso em 10 de janeiro de 2016.
- Amjad, S., S. Neelakrishnan, e R. Rudramoorthy. 2010. "Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23 de Outubro: v.14, pp. 1104-1110.
- ANFAVEA. 2015. *Anuário da indústria automobilística brasileira 2015*. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores.
- Bandivadelkar, Anup, Kristian Bodek, Lynette Cheah, Christopher Evans, Tiffany Groode, John Heywood, Emmanuel Kasseris, Matthew Kromer, e Malcom Weiss. 2008. *On the road in 2035: reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, MIT .
- Baran, R., e L. F. L. Legey. 2012. "The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption." *Technological Forecasting & Social Change*, November: 907-917.
- Beér, J.M. 2000. "Combustion technology developments in power generation in response to Environmental Challenges." *Progress in Energy and Combustion Science*, 301–327.
- BNDES. 2012. *Análise e avaliação da organização institucional e da eficiência de gestão do setor portuário brasileiro*. São Paulo: BNDES.
- Borba, B.S.M.C. 2012. "Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro." Tese (*Doutorado em Planejamento Energético - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*).
- Bradley, Thomas H, e Andrew A. Frank. 2009. "Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.13, pp. 115-128.
- Brasil. 1988. "Decreto número 97.280, de 16 de dezembro de 1988. Altera o art. 47 do Decreto nº 41.019, de 26 de fevereiro de 1957, com a redação dada pelo art. 1º do Decreto nº73.080, de 5 de novembro de 1973." Brasil.
- Brasil. 2015. "Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima." Brasília: República Federativa do Brasil.
- Bressan Filho, Ângelo. 2011. *A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil: Análise do Desempenho da Safra 2009-2010*. CONAB.

- Bressan Filho, Ângelo. 2009. *Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil*. Superintendência de Informações do Agronegócio, CONAB, CONAB.
- Bressan Filho, Ângelo. 2009. *Os Fundamentos da Crise do Setor Sucroalcooleiro no Brasil*. CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.
- Broussely, M. 2010. "Battery requirements for HEVs, PHEVs and EVs: an overview." Em *Electric and hybrid vehicles: power sources, models, sustainability*, 305-345. Elsevier B.V.
- Carvalho, Natália Barbosa de. 2014. "Avaliação dos impactos sinérgicos e cumulativos de pequenas centrais hidrelétricas construídas em sequência." *Tese (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*. Abril.
- Cavalcanti, Marcelo Castello Branco. 2011. "Tributação relativa etanol-gasolina no Brasil: competitividade dos combustíveis, arrecadação do estado e internalização de custos de carbono." *Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*. Rio de Janeiro, Março.
- CETESB. 2014. *Dados Relatório Emissões 2013*. São Paulo: CETESB. Disponível em: <http://veicular.cetesb.sp.gov.br/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em 15 de novembro de 2015.
- CETESB. 2012. *Emissões veiculares no estado de São Paulo 2011*. São Paulo: CETESB.
- Clement-Nyns, K, E. Haesen, e J. Driesen. 2010. "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid." *Electric Power Systems Research*, 20 de agosto: 185-192.
- CLIMACAP. 2013. "Climate and Energy Policy reviews for Colombia, Brazil, Argentina and Mexico."
- Cunha, Bruno Scola Lopes da. 2015. "Análise da influência do óleo diesel e da gasolina automotiva sobre a inflação nacional." *Tese (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ*. Fevereiro.
- de Oliveira, M.E.D., B.E. Vaughan, e E.J. Rykeil Jr. 2005. "Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint." *BioScience*, 593 - 609.
- DENATRAN. 2015. *Frota Nacional (Janeiro de 2015). Frota por UF e Tipo de Veiculo*. Brasília: DENATRAN. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota2015.htm>. Acesso em 15 de janeiro de 2015.
- Denholm, Pauk, e Maureen Hand. 2011. "Grid flexibility and storage required to achieve very high penetratioin of variable renewable energy." *Energy Policy*, 11 de Janeiro: 1817-1830.
- Department for Transport. 2015. *National Statistics - National Travel Survey 2014*. 2 de setembro. <https://www.gov.uk/government/statistics/national-travel-survey-2014>. Acesso em 24 de janeiro de 2016.

- Dias, Marcos Vinícius Xavier, Jamil Haddad, Luiz Horta Nogueira, Edson da Costa Bortoni, Ricardo Alexandre Passos daCruz, Roberto Akira Yamachita, e José Luiz Gonçalves. 2013. "The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo power system." *Energy Policy*, 16 de October: 298-304.
- DOE & EPA. 2015. "Download Fuel Economy Data." Vers. Datasets for All Model Years (1984–2015). *Fuel Economy*. <https://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml>. Acesso em 30 de junho de 2015.
- DOE/EPA, United States Department of Energy / United States Environmental Protection Agency. 2014. *Fuel Economy*. Disponível em: <http://www.fueleconomy.gov/>. Acesso em 25 de setembro de 2014.
- Doucette, R.T, e M.D. McCulloch. 2011. "Modeling the prospects of plug-in hybrid electric vehicles to reduce CO<sub>2</sub> emissions." *Applied Energy*, 2315–2323.
- EC. 2013. *EU energy, transport and GHG emissions trands to 2050*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- Ehsani, Mehrdad, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, e Ali Emadi. 2004. *Modern Electric, hibrid electric and fuel cell vehicles fundamentals, theory and design*. Boca Raton, Florida: CRC Press Web.
- EIA. 2009. *Annual Energy Outlook 2009*. Washington DC: U.S. Energy Information Agency.
- EIA. 2014. *Annual Energy Outlook 2014*. Washington, DC: U.S. Energy Information Administration.
- Energy Plan. 2009. *MESSAGE*. Department of Development and Planning, Aalborg University. Disponível em: <http://www.energyplan.eu/othertools/global/message/>. Acesso em 20 de janeiro de 2016.
- EPRI. 2007. *Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles*. Electric Power Research Institute, Inc.
- EVI. 2013. *2013 Electric Vehicle Outlook*. Paris: OECD/IEA.
- EXAME. 2014. *Carro híbrido deve receber estímulo do governo federal*. 27 de setembro. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/tecnologia/noticias/carro-hibrido-deve-receber-estimulo-do-governo-federal>. Acesso em 06 de janeiro de 2015.
- Farina, Elizabeth. 2014. "Política econômica de Dilma está quebrando o etanol." *Folha de São Paulo* (Entrevista por Patrícia Campos Mello). Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/poder/161373politicaeconomicadedilmaestaquebrandoetanol>. Acesso em 7 de janeiro de 2016.
- Fattori, F., N. Angliani, e G. Muliere. 2014. "Combining photovoltaic with electric vehicles, smart charging and vehicle to grid." *Solar Energy*, 23 de outubro: 438-451.

- Ferreira, H.L., R. Garde, G. Fulli, W. Kling, e J.P. Lopes. 2013. "Characterisation of electrical energy storage technologies." *Energy*, 288-298.
- Fredo, Carlos Eduardo. 2015. *Setor Sucroalcooleiro Paulista: crise nos empregos em 2014*. Edição: Instituto de Economia Agrícola IEA. São Paulo, 31 de março. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=13637>. Acesso em 7 de janeiro de 2016.
- Friedman, David. 2003. *A New Road: The Technology and Potential of Hybrid Vehicles*. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists.
- García-Villalobos, J., I. Zamora, J. I. San Martín, F. J. Asensio, e V. Aperribay. 2014. "Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approached." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24 de Julho: 38. 717–731.
- Gerssen-Gondelach, S.J., e A.P.C. Faaij. 2012. "Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term." *Journal of Power Sources*, 10 de Abril: 212. 111-129.
- Goldemberg, J., R. Schaeffer, A. Szklo, e R. Lucchesi. 2014. "Oil and natural gas prospects in South America: Can the petroleum industry pave the way for renewables in Brazil?" *Energy Policy*, v. 64, pp. 58-70.
- Gomez, José Manoel Antelo. 2015. "Impacto dos Veículos Flex-Fuel no consumo de combustíveis no Brasil, aplicando uma metodologia conjunta de Cointegração e Filtro de Kalman." *Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*, Abril: 87 p.
- Hainoun, A., M. Seif Aldin, e S. Almoustafa. 2010. "Formulating an optimal long-term energy supply strategy for Syria using MESSAGE model." *Energy Policy*, v. 38, pp. 1707-1714.
- Hekkerta, M.P., F.H.J.F. Hendrikse, Faaijb A.P.C., e M.L. Neelisb. 2005. "Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well-to-wheel analysis and transition strategy development." *Energy Policy*, 579–594.
- Hensley, Russell, John Newman, Matt Rogers, e Mark Shahinian. 2012. *Battery technology charges ahead*. McKinsey & Company.
- Heywood, John B. 1988. *Internal combustion engines fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Horta Nogueira, L. A., J. E. A. Seabra, G. Best, M.R.L.V. Leal, e Poppe. 2008. *Bioetanol de Cana-de-Açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: BNDES.
- Hoyer, K. G. 2008. "The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars." *Utilities Policy*, (16) 63-71.
- IAEA. 2006. *Brazil: a country profile on sustainable energy development*. Vienna: The Agency.
- IBP. 2014. *Radiografia do Setor Mercado de GNV - Posição Atual*. Estatísticas – Setembro 2014, IBP.

- IEA. 2015. *Energy Technology Perspectives 2015. Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. ETP 2015, Paris: OECD/IEA.
- IEA. 2011. *Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. 2009. *Transport, Energy and CO<sub>2</sub>: moving toward sustainability*. Paris: OECD/IEA.
- IEA. 2012. *World Energy Outlook 2012*. Paris: International Energy Agency.
- IEA, International Energy Agency. 2010. *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*. Paris: OECD/IEA.
- IEA, International Energy Agency. 2011. *Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles*. Paris: International Energy Agency.
- IIASA. 2012. *Global Energy Assessment 2012 - Toward a Sustainable Future*. Cambridge, UK, New York, NY, USA e Laxenburg, Austria : Cambridge University Press e International Institute for Applied Systems Analysis.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment*. [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)], Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of the Working Group III to the Fifth Assessment Report." Technical Summary.
- IPCC. 2006. *IPCC Guidelines for National Inventories 2006*. IPCC.
- Kahn Ribeiro, S., M. J. Figueroa, F. Creutzig, C. Dubeux, J. Hupe, e S. Kobayashi. 2012. "Chapter 9 - Energy End-Use: Transport." Em *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, por iiasa, pp. 575-648. Cambridge, UK, New York, NY, USA e Laxenburg, Austria: Cambridge University Press e International Institute for Applied Systems Analysis.
- Kempton, W., e J. Tomic. 2005. "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy." *Journal of Power Sources*, v. 144, pp. 280-294.
- Kempton, W., e S.E. Letendre. 1997. "Electric vehicles as a new power source for electric utilities." *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 2, pp. 157-175.
- Kempton, W., e T. Kubo. 2000. "Electric-drive vehicles for peak power in Japan." *Energy Policy*, v. 28, pp. 9-18.

- Kempton, W., J. Tomic, S. Letendre, A. Brooks, e T., Lipman. 2001. *Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California*. Institute for Transportation Studies Report, UCD-ITS.
- Keppo, I., e M. Strubegger. 2010. "Short term decisions for long term problems – The effect of foresight on model based energy systems analysis." *Energy*, janeiro: v. 35, pp. 2033-2042.
- Klaassen, G., e K., Riahi. 2007. "Internalizing externalities of electricity generation: An analysis with MESSAGE-MACRO." *Energy Policy*, v. 35, pp. 845-827.
- Köberle, Alexandre C, Lucena, André F.P., Szklo, Alexandre S., Schaeffer, Roberto. 2015 "Prospects and challenges concerning carbon dioxide removal from the atmosphere by biomass-based capture and storage in Brazil". *Apresentação no Eight Annual Meeting of the IAMC*. Disponível em: <http://www.globalchange.umd.edu/iamc/annual-meetings/additional-materials-eighth-annual-meeting-of-the-iamc-2015/> . Acesso em 13 de janeiro de 2016.
- Liao, G. Y., T. R. Weber, e D. P. Pfaff. 2004. "Modelling and analysis of powertrain hybridization on all-wheel-drive sport utility vehicles." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part D, Journal of Automobile Engineering*, v. 218, pp. 1125-1134.
- Lima, Guilherme Rodrigues. 2015. "Compensação ambiental de usinas hidrelétricas: análise da gestão federal e propostas de aplicação." *Tese (Mestrado em Planejamento Ambiental) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*. dezembro.
- Liu, Liansheng, Fanxin Kong, Xue Liu, Yu Peng, e Qinglong Wang. 2015. "A review on electric vehicle interacting with renewable energy in smart grid." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17 de Abril: 648-661.
- Liu, Q., M. Shi, e K. Jiang. 2009. "New power generation technology options under the greenhouse gases mitigation scenario in China." *Energy Policy*, v. 37, pp. 2440-2449.
- Lucena, A.F.P. 2010. "Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas globais no setor hidroelétrico." *Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*, março.
- Lucena, A.F.P., R. Schaeffer, e A.S. Szklo. 2010. "Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system." *Global Environmental Change*, 342–350.
- Lucena, André F.P., Leon Clarke, Roberto Schaeffer, Alexandre Szklo, Pedro R.R. Rochedo, Larissa P.P. Nogueira, Kathryn Daenzer, Angelo Gurgel, Alban Kitouse, e Tom Koberf. 2015. "Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy." *Energy Economics*, 14 de fevereiro.

- Macedo, I.C., J.E.A. Seabra, e J.E.A.R. Silva. 2008. "Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020." *Biomass and Bioenergy*, 582 - 595.
- Machado, Bernardo. 2016. "Perspectivas para a política brasileira de eficiência energética veicular." *Tese (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*. março.
- Machado, Marta Albuquerque. 2013. "Produção e tratamento catalítico de bio-óleo produzido a partir da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar." *Tese (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - COPPE - UFRJ*. abril.
- Malagueta, D. C. 2013. "Avaliação de Alternativas para Introdução da Geração Elétrica Termossolar na Matriz Energética Brasileira." *Tese (doutorado) – UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético*.
- Malagueta, D., A Szklo, B.S.M.C. Borba, R. Soria, R Aragão, Schaeffer, R., e R. Dutra. 2013. "Assessing incentive policies for integrating centralized solar power generation in the Brazilian electric power system." *Energy Policy*, v. 59, pp. 198-212.
- Malfatti, Laércio. 2009. "Análise qualitativa do ciclo real e tempo de combustão em um motor padrão ASTM-CFR operando com mistura de gasolina e etanol hidratado." *Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*.
- MAPA. 2015. *Projeções do Agronegócio - Brasil 2014/15 a 2024/2025*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
- MAPA/CGAE/DCAA. 2013. *Relação de Instituições Cadastrados no Departamento de Cana de Açúcar e de Agroenergia*. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento .
- Mattos, João A Bastos, e Eduardo Luiz Correia. 1996. "Uma nova estimativa da frota de veículos automotivos no Brasil." *Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia*. p. 1267.
- Maurstad, O. 2005. *An Overview of Coal based Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technology*. Laboratory for Energy and the Environment, Boston: Massachusetts Institute of Technology.
- MCTI. 2014. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 2a ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- MCTI. 2006. *Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa*. Relatórios de referência. Emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis, no setor energético., Brasília: MCTI.
- MCTI. 2010. *Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa*. Brasília, Brasil: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- Meisl, J., K. Knapp, W. Leuckel, e S. Wittig. 1994. "Forschungsberichte Verbrennungs Kraftmaschinen FVV."

- Melo, T. C. C., S. Kronemberger, e D. A. Siqueira. 2004. "Comparação de resultados de emissões e consumo entre veículos híbridos e veículos nacionais utilizando gasolina com adição de etanol." *SAE*, 397.
- Menezes, Amanda Olímpio de, Anja Munzig, Anna Lena Mohrmann, Dominik Pieper, Ilona Daun, Juliane Dammann, Marcus Regis, e Viola Kammertöns. 2015. *The NoPa Case: new partnerships for innovation in sustainable developments. Reflections and Achievements*. New Partnerships for Innovation in Sustainable Development (NoPa).
- MIT, Massachusetts Institute of Technology. 2007. *The future of coal options for a carbon-constrained world*. Boston: MIT.
- MMA. 2014. *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013 - ano base 2012*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- MME/ANP. 2014. *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis*. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP.
- MME/EPE. 2015. *Balanço Energético Nacional 2015 - ano base 2014*. Relatório Final, Ministério de Minas e Energia.
- MME/EPE. 2014c. *Demanda de Energia 2050*. NOTA TÉCNICA DEA 13/14, Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética.
- MME/EPE. 2012. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. PDE 2023, Rio de Janeiro: MME/EPE.
- MME/EPE. 2014d. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*. PDE 2023, Rio de Janeiro: MME/EPE.
- MME/EPE. 2015. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. PDE 2024, Rio de Janeiro: MME/EPE.
- Mohapatra, D. K., e P. Mohanakrishnan. 2010. "A methodology for the assessment of nuclear power development scenario." *Energy Policy*, v. 38, pp. 4330-4338.
- NHTS. 2009. *DET - Total Travel by Selected Trip Characteristics*. Disponível em: <http://nhts.ornl.gov/det/Extraction3.aspx>. Acesso em 24 de janeiro de 2016.
- Nogueira, L.P.P., A. F. P. Lucena, R. Rathmann, P. R. R. Rochedo, A. Szklo, e R. Schaeffer. 2014. "Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil's future electric power generation?" *International Journal of Greenhouse Gas Control*, fevereiro: v. 24, pp. 115-123.
- Oliveira, D.Q., S. Zambroni, e Delboni. 2013. "Optimal plug-in hybrid electric vehicles recharge in distribution power system." *Electric Power Systems Research*, 28 de fevereiro: 77-85.

- Pérez, Laura V., Cristian H. de Angelo, e Víctor Pereyra. 2013. "Determination of the adjoint state evolution for the efficient operation of a hybrid electric vehicle." *Mathematical and Computer Modelling*, v.57 , pp. 2257-2266.
- Pollet, Bruno G., Iain Staffell, e Jin Lei Shang. 2012. "Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects." *Electrochimica Acta*, 12 de abril: 235-249.
- Portugal-Pereira, Joana, Alexandre C. Köberle, Rafael Soria, André F. P. Lucena, Alexandre Szklo, e Roberto Schaeffer. 2016. "Overlooked impacts of electricity expansion optimization modelling: the cycle side of the story." *Energy*.
- Poullikkas, Andreas. 2015. "Sustainable options for electric vehicle technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, pp. 1277-1287.
- REN21. 2015. *Renewables 2015 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Rodrigues, Bruna Rocha. 2012. "Estoques Reguladores de Etanol Combustível Frente à Introdução dos Veículos Flex Fuel na Frota Nacional." *Tese (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ*, Março: 110 p.
- Sabri, M. F. M., K. A. Danapalasingam, e M. F. Rahmat. 2015. "A review on hybrid vehicles architecture and energy management strategies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 de novembro: v. 53, pp. 1433-1442.
- Saradhi, I. V., G. G. Pandit, e V. D. Puranik. 2009. "Energy supply, demand, environmental analysis - a case study of Indian energy scenario." *International Journal of Environmental Science and Engineering*, v. 3, pp. 115-120.
- Schaeffer, R., A. S. Szklo, A. F. P. Lucena, R. R. Souza, B. S. M. C. Borba, e D. A. Castelo Branco. 2008a. *Matriz Energética de Minas Gerais 2030*. Relatório Executivo, COPPE/PPE/UFRJ.
- Schaeffer, R., A. Szklo, A. F. P. Lucena, R. R. Souza, B. S. M. C. Borba, I. V. L. Costa, A. P. Júnior, e S. H. F. Cunha. 2008b. *Economia das Mudanças Climáticas no Brasil: Segurança Energética*. Relatório Executivo. Relatório Executivo, COPPE/PPE/UFRJ.
- Schaeffer, R., A. Szklo, G. Machado, A. P. Júnior, J. B . Soares, A. Simoes, C. Achão, F. Cima, e A. Pereira. 2004. *Matriz Energética Brasileira de Longo Prazo 2003-2023*. Relatório Executivo, COPPE/PPE/UFRJ.
- Schaeffer, R., A.S. Szklo, A.F.P. Lucena, K. Rafael, B.S.M.C. Borba, P.R.R. Rochedo, L.P.P. Nogueira, et al. 2015. *Adaptação às mudanças climáticas no Brasil: cenários e alternativas. Relatório Final*. Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima, Rio de Janeiro: Secretaria de Assuntos Estratégicos.
- Schaeffer, Roberto, Alexandre Szklo, André F. P. Lucena, Pedro R. R. Rochedo, Eveline Vasquez, Larissa P. P. Nogueira, Ricardo Moreira, e Tiago Saraiva. 2014. "Construção

de Cenários para a Matriz Energética Brasileira em Função do Preço do Carbono.” Relatório Final (não publicado), Rio de Janeiro.

Schmitt, William Frederic. 2010. “Metodologia de avaliação de eficiência energética em veículos leves e seus impactos em termos de uso de combustíveis.” Tese (*Doutorado em Planejamento Energético*) - Programa de planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro.

Shao, S., M. Pipattanasomporn, e S. Rahman. 2009. “Challenges of PHEV Penetration to the Residential.” *PES General Meeting*.

Simon, Emanuel Cela. 2013. “Avaliação de impactos da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição.” Tese (*Mestrado em Planejamento Energético*) - Programa de Planejamento Energético - COPPE - UFRJ. Abril.

Smart, John, Thomas Bradley, e Shawn Salisbury. 2014. “Actual Versus Estimated Utility Factor of a Large Set of Privately Owned Chevrolet Volts.” *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4 de janeiro: 30-35.

Soria, Rafael, André F Lucena, Jan Tomaschek, Tobias Fichter, Thomas Haasz, Alexandre Szklo, Roberto Schaeffer, Pedro Rochedo, Ulrich Fahl, e Jürgen Kern. Manuscrito. *Modelling concentrated solar power (CSP) in the Brazilian energy system: a soft-linked model coupling approach*. Submetido para publicação.

Sovacool, B.K., e R.F., Hirsh. 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.

Szklo, A., e R. Schaeffer. 2007. “Fuel specification, energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in oil refineries.” *Energy*, 1075–1092.

Turton, Hal. 2006. “Sustainable global automobile transport in the 21st century: An integrated scenario analysis.” *Technologies Forecasting & Social Change*, 607-629.

UNFCCC. 2015. “Adoption of the Paris Agreement. .” *UFCCC/CP/2015/L.9/Rev.1*. 12 de Dezembro.

UNICA. 2016. *A bioeletricidade da cana em números – Janeiro de 2016*. São Paulo: União da Indústria de Cana de Açúcar.

UNICA. 2015c. *Cana de açúcar: principais números e crise no setor*. São Paulo: União da Indústria de Cana-de-açúcar.

UNICA. 2015b. *UNICA Data - Exportação Anual*. União da Indústria de Cana de Açúcar. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=24>. Acesso em 6 de janeiro de 2015.

UNICA. 2015a. *UNICA Data - Histórico de produção e moagem de etanol (etanol total)*. União da Indústria de Açúcar. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e->

Valsera-Naranjo, E., Sumper, A., Lloret-Gallego, P., Villafáfila-Robles, R., Sudria-Andreu, A. 2009. "Electrical Power Quality and Utilisation. 10th International Conference." *Electrical Vehicles: State of Art and Issues for their Connection to the Network.*

Vliet, Oscar van, Anne Sjoerd Brouwer, Takeshi Kuramochi, Machteld van den Broek, e André Faaij. 2010. "Energy use, cost and CO<sub>2</sub> emissoins of eletric cars." *Journal of Power Sources*, 8 de setembro: 2298-2310.

Wilson, I.A.G., P.G. MCGREGOR, D.G. INFIELD, e P.J. HALL. 2011. "Grid-connected renewables, storage and the UK electricity market." *Renewable Energy*, 23 de Janeiro: 2166-2170.

Wu, Ye, Zhengdong Yang, Bohong Lin, Huan Liu, Renjie Wang, Boya Zhou, e Jiming Hao. 2012. "Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission impacts of vehicle electrification." *Energy Policy*, 537–550.

Yang, Christopher, David McCollum, e Wayne Leighty. 2011. "Scenarios for deep reductions in greenhouse gas emissions." Em *Sustainable transportation energy pathways*, por Institute of Transportation Studies, 189-208. Davis, California: The Regents of the University of California, Davis campus.

Yeh, Sonia, e David McCollum. 2011. "Optimizing the Transportation Climate Mitigation Wedge." Em *Sustainable transportation pathways: a research summary for decision makers*, por Institute of Transportation Studies ITS, 234-249. Davis, California: The Regents of the University of California.

## **ANEXO I: REVISÃO DE CENÁRIOS NÃO INCLUÍDOS NA ANÁLISE DO LEAP**

Este anexo apresenta uma descrição dos cenários apresentados na publicações incluídas na revisão bibliográfica que, no entanto, não foram triadas para a etapa de simulação de demanda do LEAP.

### **A. Baran & Legey (2012) - The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption**

Neste artigo, BARAN e LEGEY (2012) aplicam um modelo de penetração de inovações técnicas para estimar a penetração de PHEVs, em quatro cenários distintos. Em cada cenário, é considerado um potencial de mercado para a adoção de PHEVs, que representa a penetração máxima possível de PHEVs na frota de veículos leves. Segundo o modelo aplicado, a dispersão desta tecnologia em dado ano dependerá do seu potencial de mercado bem como da sua presença na frota de veículos leves no ano anterior. Formalmente, o modelo pode ser descrito de forma simples pela Equação I-1<sup>33</sup>:

**Equação I-1**

$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} = p + qF(t)$$

Onde:  $f(t)$  Corresponde à fração do potencial de mercado que adota um novo produto no ano  $t$ ;

$F(t)$  corresponde à fração do potencial de mercado que adotou a tecnologia até o ano  $t$

$p$  é o coeficiente de inovação, uma constante que define a propensão dos inovadores adotarem um novo produto;

$q$  é o coeficiente de imitação, uma constante que define a taxa pela qual os imitadores adotam um novo produto

A Tabela 0-1 evidencia os resultados desta modelagem.

---

<sup>33</sup> Uma descrição mais detalhada do modelo e de suas equações de solução está disponível em Baran & Legey (2012).

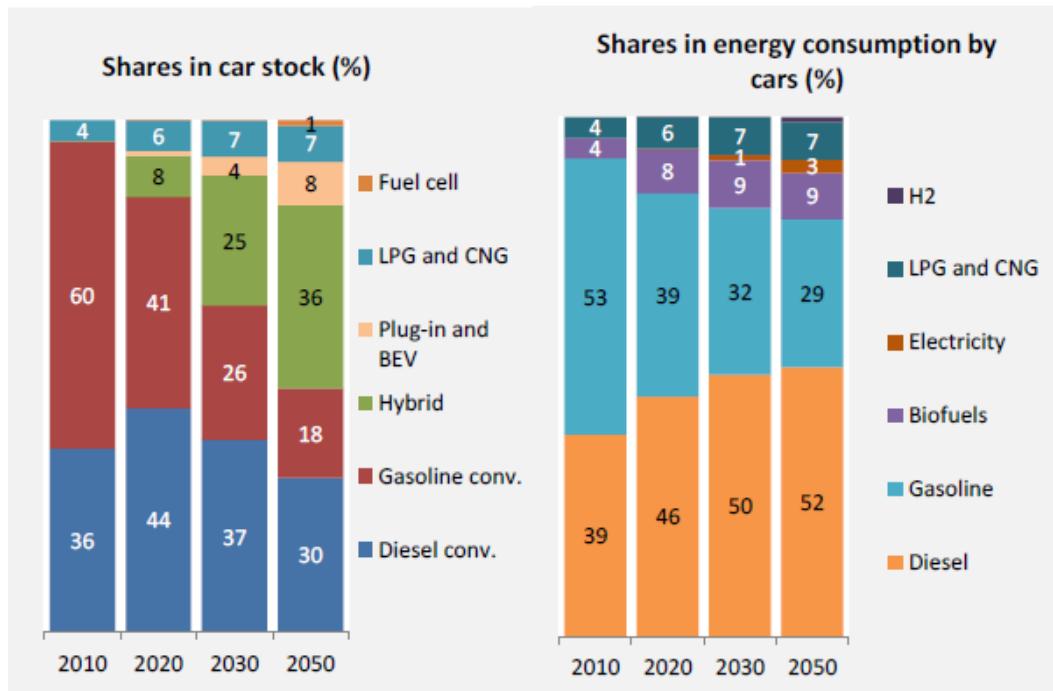
Tabela 0-1 - Penetração de PHEVs na frota brasileira de veículos leves

|                 |        | Anos       |            |            |            |
|-----------------|--------|------------|------------|------------|------------|
|                 |        | 2015       | 2020       | 2025       | 2030       |
| Frota projetada |        | 42,492,706 | 54,236,516 | 70,824,986 | 90,970,954 |
| Potencial       | PHEV25 | 0.21%      | 2.22%      | 7.69%      | 13.55%     |
|                 | PHEV50 | 0.42%      | 4.44%      | 15.37%     | 27.11%     |
|                 | PHEV75 | 0.34%      | 4.55%      | 19.37%     | 37.37%     |

Fonte: Baran & Legey (2012)

## B. EC (2013) - EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050: reference scenario 2013

Nesta publicação, a Direção Geral de Ação Climática e a Direção Geral de Mobilidade e Transportes da Comissão Europeia, (DG CLIMA/DG MOVE/EC), estabelecem um cenário de referência de longo prazo para os setores de energia e de transportes para continente europeu. Para o setor de veículos leves, considera uma maior penetração de biocombustíveis, atrelada à atual meta europeia de atingir 10% de fontes renováveis no setor de transportes até 2050. Com relação aos veículos eletrificados, admite-se que tais veículos passariam a integrar a frota a partir de 2020, em razão da aprovação de políticas europeias de estímulo a estas tecnologias. Neste cenário, os veículos eletrificados atingem 8% da frota de veículos leves na Europa em 2050. A Figura 0-1 evidencia os resultados obtidos pelo modelo para o setor de veículos leves.



**Figura 0-1 – EC 2012 - Penetração de veículos eletrificados na frota europeia de veículos leves (2010-2050)**

Fonte: EC (2013)

### C. ITS (2011) - Sustainable Transportation Pathways. Capítulos 8 a 10

Nesta publicação, o Institute of Transportation Studies – Universidade da Califórnia (ITS) reúne uma série de artigos que têm por objetivo analisar os custos e benefícios associados a diferentes tendências de desenvolvimento para o setor de transporte. Três capítulos deste relatório dedicam-se a construir diferentes cenários de evolução do setor de transportes.

No primeiro destes capítulos (capítulo 8 da publicação), propõe-se diferentes narrativas de redução profunda das emissões de GEE de todo o setor de transportes dos Estados Unidos e, em particular, do estado da Califórnia. O capítulo seguinte (capítulo 9) foca principalmente no setor de veículos leves para apresentar cenários de transição para tecnologias de baixo carbono. Por fim, o último capítulo (capítulo 10) de cenários busca construir cenários para o setor de transporte que sejam consistentes com as medidas de redução de emissões adotadas nos demais setores da economia, dados possíveis compromissos de mitigação das mudanças climáticas assumidos pelo governo norte-americano. Todos os cenários abordados nestes capítulos trabalham com um horizonte até 2050.

#### Capítulo 8 - Cenários de profundas reduções nas emissões de GEE

Neste capítulo, são construídos três grupos de cenários – *reference*, *silver bullet* e *deep reductions*. O cenário de referência descreve um futuro em que não se tenha avançado nas políticas de mitigação de emissões. Assim, a única alteração prevista para parâmetros atuais do setor de transportes é uma redução modesta de 45% (aproximadamente 1% ao ano) na intensidade de emissões dos diferentes modais no fim do horizonte.

Por sua vez, o cenário *silver bullet* representa um cenário em que uma única medida é adotada de forma rápida e generalizada, de modo que, ao fim do horizonte, todo seu potencial está sendo aproveitado.

Por fim, nos cenários de grandes reduções, admite-se que um portfólio de medidas complementares entre si será adotado a fim de atingir uma redução significativa nas emissões até 2050. Considera-se três portfólios distintos:

- *Efficient Biofuels 50in50*. Neste cenário, atinge-se uma redução de 50% das emissões através principalmente do uso de biocombustíveis, de motores a combustão interna mais eficientes e de uma redução na demanda por transportes.
- *Electric-drive 50in50*. Neste cenário, descreve-se um futuro em que FCVs e veículos elétricos compõem 66% do uso total de combustíveis.
- *Multi-estrategy 80in50*. Essencialmente, este cenário é uma combinação dos dois cenários anteriores. Neste cenário, uma ampla utilização de biocombustíveis, bem como uma ampla penetração de FCVs e BEVs provocam a quase eliminação do consumo de petróleo pelo setor.

No caso dos cenários de reduções profundas, estes foram rodados tanto para o país inteiro, quanto para o estado da Califórnia apenas.

Neste capítulo, os percentuais de penetração das tecnologias de veículos leves são apresentados unicamente em gráficos de baixa definição e apenas para os cenários de *deep reductions* construídos para a Califórnia.<sup>34</sup>

#### Capítulo 9 - Cenários de transição para o setor de veículos leves nos Estados Unidos

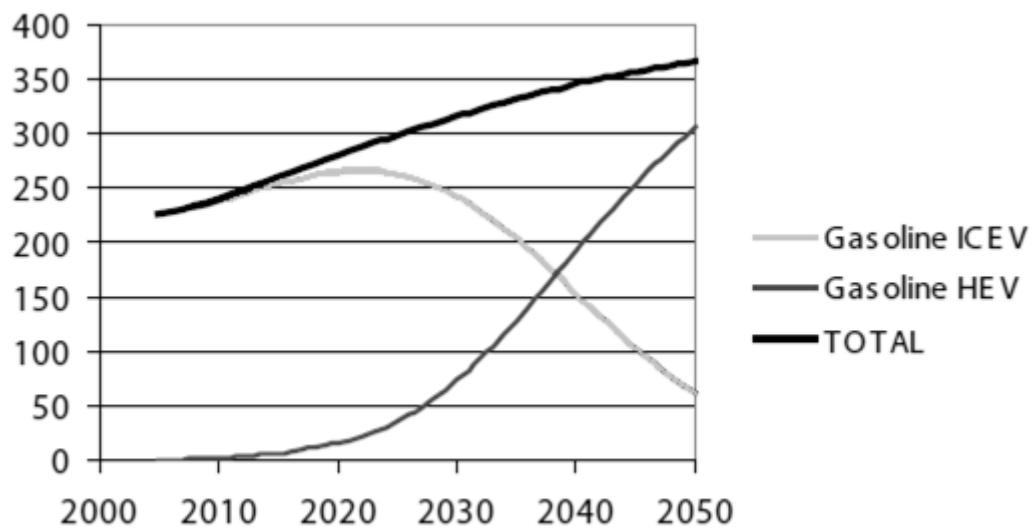
---

<sup>34</sup> Em comunicação pessoal, os autores do artigo declararam que os valores exatos de penetração aplicados para estes cenários não estão mais disponíveis.

Neste capítulo, seis cenários são construídos para o setor de veículos leves norte-americano apenas.

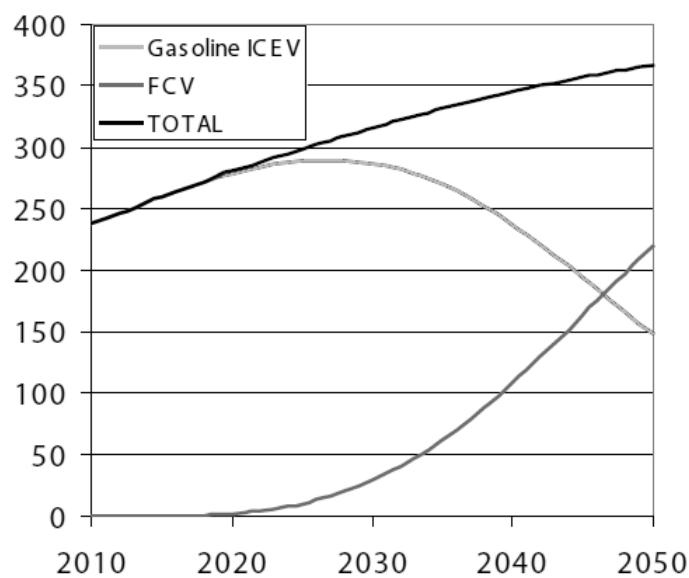
- *Referência.* Este cenário é baseado nas projeções do Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. DOE) para 2030, estendidas até 2050 assumindo taxas de crescimento constante para as duas décadas seguintes. Neste cenário, os veículos convencionais seguem dominando o setor de veículos leves, e os HEVs passam a representar 10% da frota em 2050.
- *Eficiência.* Este cenário considera a implementação das medidas atualmente viáveis de aumento da eficiência dos motores a combustão interna dos veículos convencionais e dos HEVs. Deste modo, o incremento anual na eficiência dos veículos leves é de 2.7% entre 2010 e 2025, de 1.5% entre 2026 e 2035, e de 0.5% entre 2036 até 2050. Adicionalmente, os HEVs tornam-se a tecnologia dominante em 2050, representando 80% da frota.
- *Biocombustíveis.* Este cenário admite a introdução acelerada de biocombustíveis de baixo carbono em larga escala, atingindo mais de 280 bilhões litros até 2050. O etanol celulósico (etanol de segunda geração) representa a maior parte deste total.
- *Sucesso dos PHEVs.* Neste cenário considera-se que os PHEVs são introduzidos no mercado em 2010, e passam a crescer rapidamente. A partir de 2025 eles passam a ter um papel central no setor de veículos leves e, até 2050 eles passam a representar dois terços de toda a frota de veículos leves.
- *Sucesso dos FCVs.* Neste cenário considera-se que os FCVs são introduzidos a partir de 2012, passando a representar 4% da frota em 2025. Em 2050, estes veículos atingem a marca de 60% da frota.
- *Portfólio.* Este cenário representa uma combinação dos quatro cenários anteriores, refletindo uma diversidade de políticas voltadas a incentivar o aumento da eficiência de veículos a gasolina enquanto espera-se que as tecnologias avançadas de propulsão (como os PHEVs e FCVs) estejam maduras.

As figuras abaixo representam três dos cenários ora apresentados.



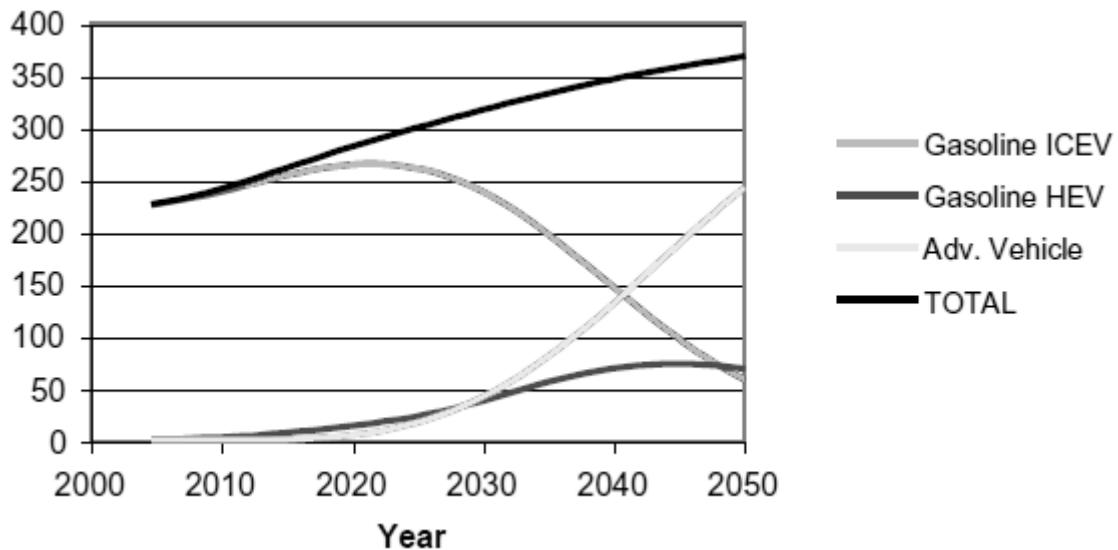
**Figura 0-2 – ITS 2011 – Cenário de Eficiência: frota de VMCs e HEVs (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Yang et al. (2011)



**Figura 0-3 – ITS 2011 – Cenário de Sucesso dos FCVs: frota de VMCs e FCVs (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Yang et al. (2011)



**Figura 0-4 – ITS 2011 – Cenário Portfolio: frota de VMCs, HEVs e tecnologias avançadas (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Yang et al. (2011)

#### Capítulo 10 – Optimizing the transportation mitigation wedge

Conforme destacado previamente, este capítulo procura traçar cenários do setor de transporte que estejam integrados com o restante da economia. Para tanto, aplica-se o modelo MARKet ALlocation (MARKAL) desenvolvido pelo Programa de Sistemas de Análise de Tecnologias de Energia (ESTAP), da IEA. Trata-se de um modelo integrado de oferta e demanda de energia, com abordagem *bottom-up*, que seleciona as combinações mais custo-efetivas de tecnologias para atender a demanda futura de energia, dadas a disponibilidade de recursos e restrições de uso de fontes energéticas, tal como a imposição de limites de emissões de GEE.

Este modelo foi aplicado para determinar os efeitos da introdução de metas de redução de emissões de 10% a 50%, aplicáveis a toda a economia e metas de 10% a 30%, aplicáveis apenas ao setor de transporte (cenários E&T), para o período de 2010-2050.

| Cenário                                   | Descrição   | Comentário  |
|---|---|---|
| <b>Referência</b>                         | Projeções do cenário de referência  | Elasticidade da demanda por viagens = -0.1<br>Taxa de desconto das tecnologias de veículos = 0.33 |
| <b>10%E, 20%E, 30%E, 40%E, 50%E</b>       | Limite 10%-50% para todos os setores  | Elasticidade da demanda por viagens = -0.3  |
| <b>10%E&amp;T, 20%E&amp;T, 30%E&amp;T</b> | Limite de 10%-30% para todos os setores + Limite de 10%-30% para o setor de transportes | Taxa de desconto das tecnologias de veículos = 0.15   |

Fonte: Adaptado de Yeh e McCollum (2011)

O Mix resultante de veículos leves está exposto na Figura 0-5 abaixo:

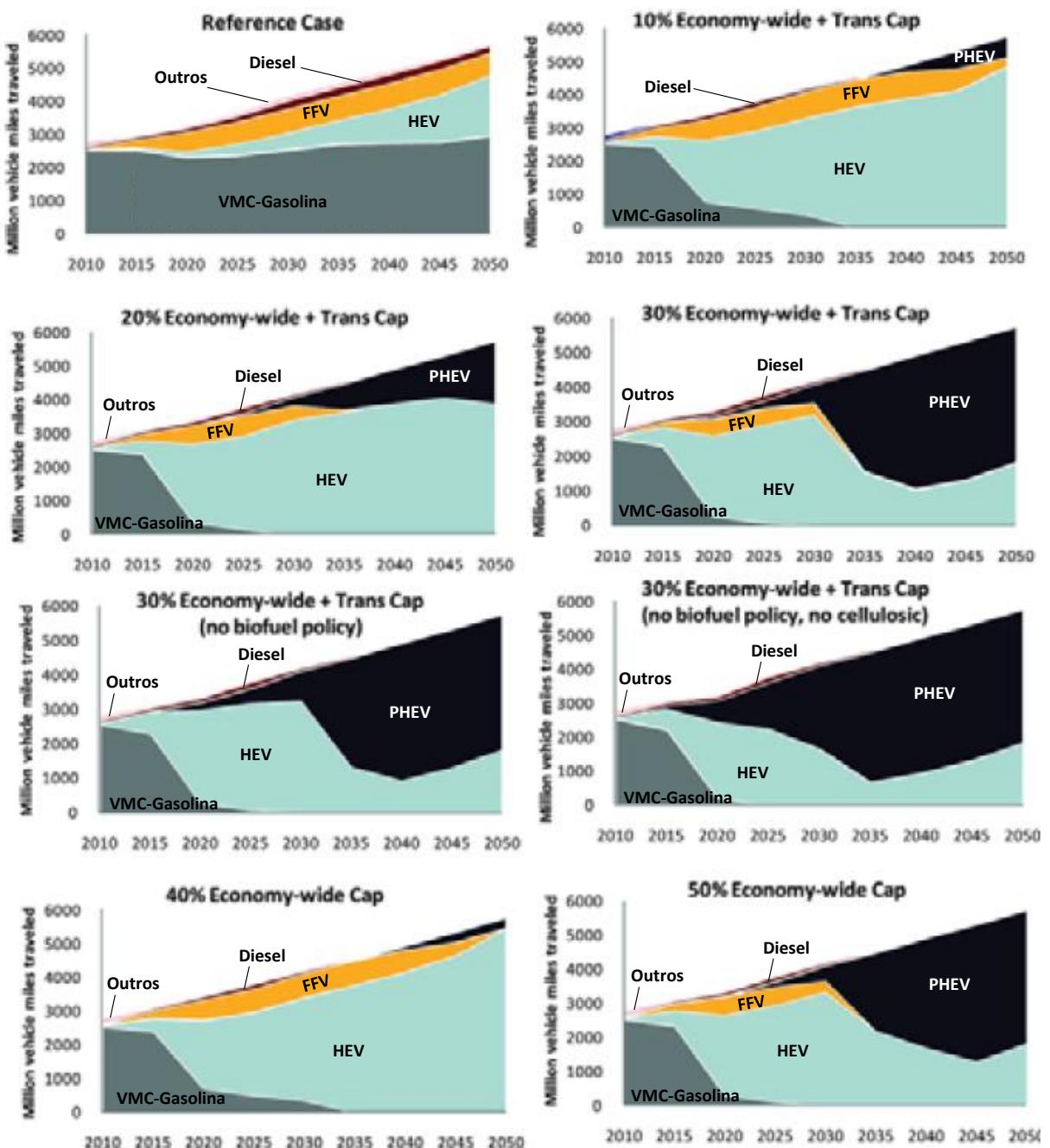


Figura 0-5 – ITS 2011- Cenários de limites de emissões: frota de veículos leves (em milhões)

Fonte: Adaptado de Yeh e McCollum (2011)

#### D. MIT (2008) - On the Road to 2035

Essa publicação, do Laboratório de Energia e Meio Ambiente do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) procura evidenciar o potencial das novas tecnologias de veículos leves em

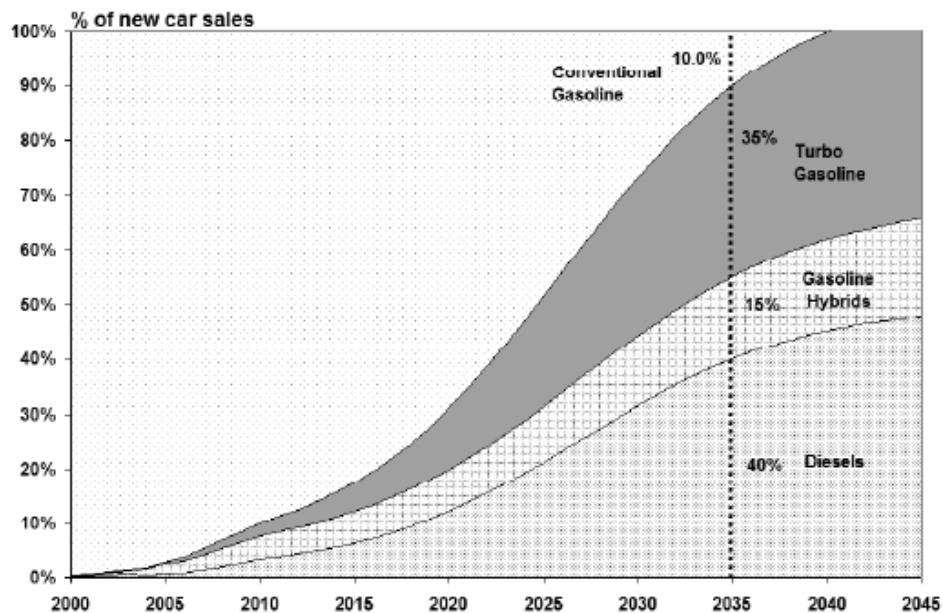
termos de redução da demanda de combustíveis fósseis e mitigação das emissões de GEE. O estudo foca sobre Estados Unidos e determinados países europeus.

O estudo foi dividido em cinco etapas. Na primeira, identificou-se alguns sistemas de propulsão e tecnologias com um potencial representativo de redução da demanda de combustíveis e de mitigação das emissões de GEE. Na segunda etapa, foi desenvolvido um modelo a fim de determinar o consumo energético, o desempenho e as emissões específicas atribuíveis às categorias de veículo estudadas. A terceira e a quarta etapa envolveram a construção de um modelo de evolução da frota em países avançados, tais como os Estados Unidos e determinados países europeus, e a determinação de alguns cenários de penetração de novos sistemas de propulsão e tecnologias. Finalmente, estes cenários foram rodados a fim de determinar o nível de consumo de combustível e as emissões associadas a cada cenário.

Neste contexto, foram construídos seis cenários de penetração de novas tecnologias de veículos leves, a saber: *Reference Scenario*, *Market Mix Scenario*, *Turbo Charged ICE Future Scenario*, *Hybrid Strong Scenario* e *Hydrogen Fuel Cell*. A publicação ressalta que o futuro dos mercados de veículos leves será determinado por escolhas entre aprimoramentos visando veículos mais ambientalmente amigáveis ou veículos com melhor desempenho, maiores e mais velozes. Assim, os cenários desenvolvidos incorporam *trade-offs* entre ganhos de eficiência, desempenho, porte do veículo e seu peso. Todos os cenários consideram um horizonte de 2010 a 2050.

- *Reference Scenario*. Sob este cenário, ao fim do horizonte toda a frota de veículos é composta de veículos convencionais. Assume-se que os avanços tecnológicos são igualmente divididos entre promover um ganho de desempenho e entre proporcionar ganhos de eficiência nos veículos leves.
- *Turbo Charged ICE Future Scenario*. Este cenário representa uma situação em que os motores a combustão interna seguem dominando o mercado, mas em que há uma ênfase significativa em veículos a gasolina com turbo compressor e veículos a diesel. Conforme descrito na Figura 0-6, neste cenário, os veículos a diesel atingem 40% do mercado até 2035 e alcançam 50% ao final do horizonte. Os veículos a gasolina com turbo compressor seguem uma tendência semelhante, de modo que, até o meio deste século, todos os veículos convencionais sejam substituídos. A medida em que o custo dos motores com turbo compressão é reduzido, a participação destes veículos no mercado também passa a crescer, substituindo os veículos convencionais

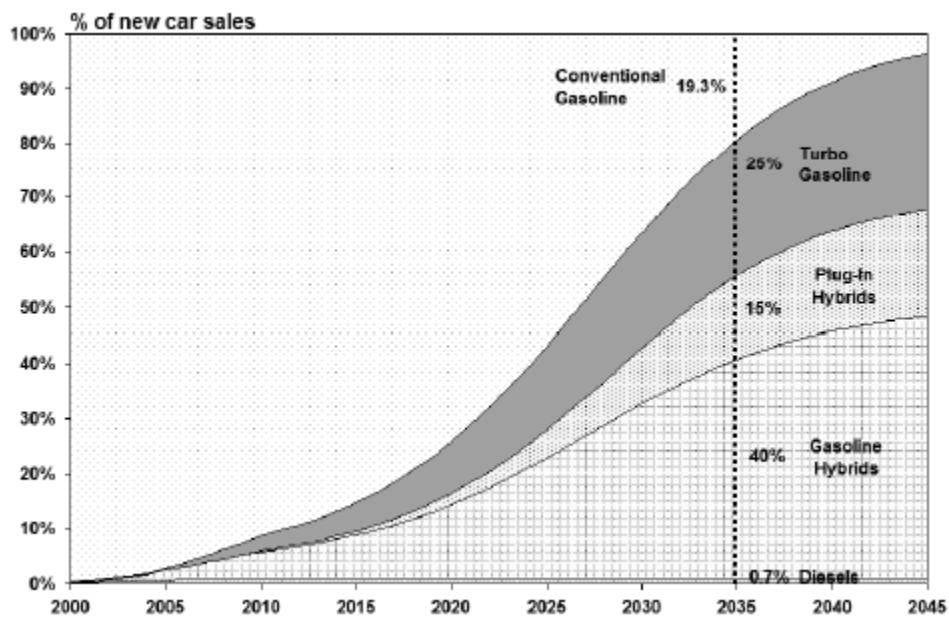
remanescentes. Com isto, até 2040, apenas 10% das vendas de veículos é composta por veículos convencionais. Também neste cenário há 50% de ênfase na melhoria do desempenho energético dos veículos.



**Figura 0-6 – MIT (2008) - Cenário Turbocharged ICE Future**

Fonte: Adaptado de Bandivadelkar *et al.* (2008)

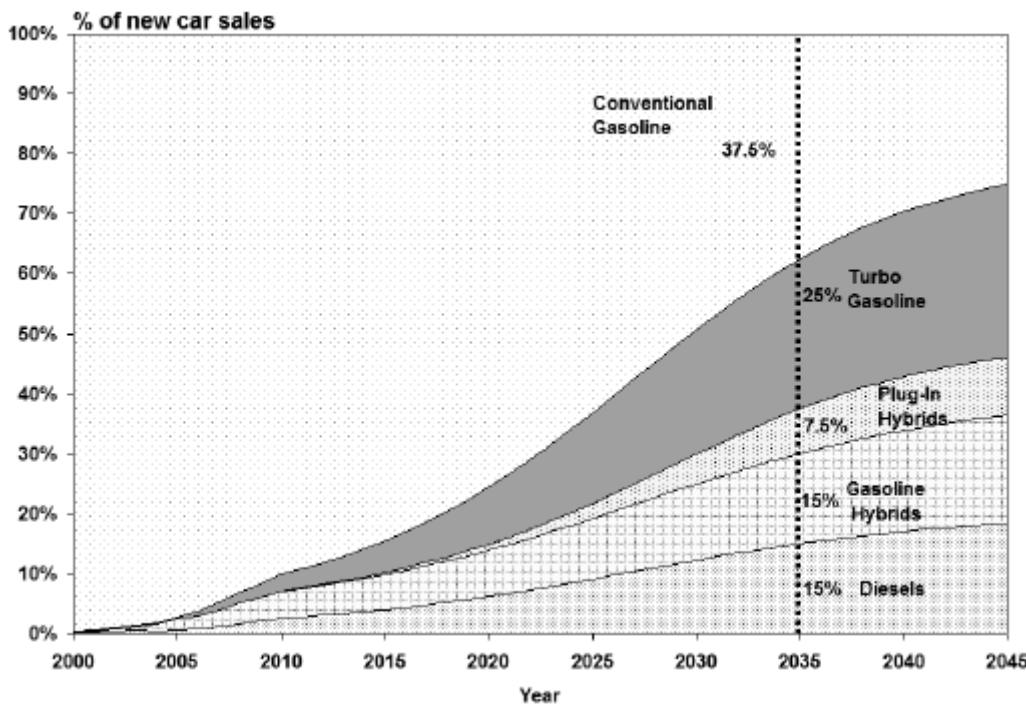
- *Hybrid Strong Scenario.* Este cenário representa uma situação onde HEVs e PHEVs emergem como as tecnologias dominantes de propulsão. Conforme descrito na Figura 0-7, os HEVs atingem 25% das vendas de veículos leves até 2025 e 50% das vendas em 2050. Por sua vez, os PHEVs passam a representar 15% das vendas em 2035 e chegam a 20% ao fim do horizonte. Assim como nos cenários anteriores, neste cenário há 50% de ênfase na melhoria do desempenho energético dos veículos.



**Figura 0-7 – MIT 2008 - Cenário *Hybrid Strong***

Fonte: Adaptado de Bandivadelkar *et al.*, (2008)

- *Market Mix Scenario*. Neste cenário, admite-se que não há uma tecnologia dominante específica ao fim do horizonte, resultando em um mix de tecnologias de propulsão no mercado de veículos leves. Em linha com a Figura 0-8, este cenário resulta de uma situação em que os elevados custos dos HEVs a gasolina e a diesel limitam a sua penetração no mercado a uma fatia moderada. Um nicho para PHEVs é estabelecido no mercado de veículos urbanos e seu crescimento acompanha o crescimento dos HEVs com um atraso de cinco anos. Juntos, HEVs, PHEVs e veículos a diesel passam a representar cerca de um terço das vendas de veículos leves até 2035, e atingem metade das vendas em 2050.



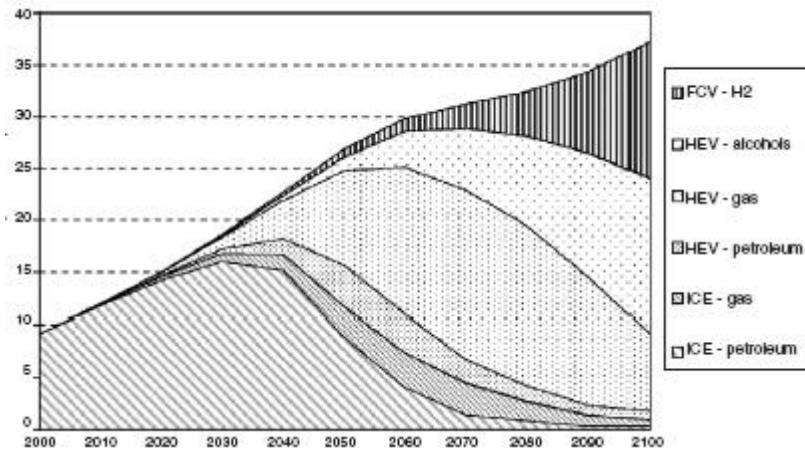
**Figura 0-8 – MIT 2008 - Cenário Market Mix**

Fonte: Adaptado de Bandivadelkar *et al.* (2008)

- *Hydrogen Fuel Cell.* Este cenário considera uma situação em que os elevados custos associados aos FCVs sejam superados, e na qual estes veículos passem a ganhar mercado progressivamente. Para a implementação dos veículos. Neste cenário, os FCVs passam a ter uma participação de 5% nas vendas dos veículos a partir de 2035.

## E. Turton (2006) - Sustainable global automobile transport in the 21<sup>st</sup> century

Neste artigo, Turton (2006) procura definir um cenário para o setor de transporte, compatíveis com o cenário B2 do Special Report on Emission Scenarios (SRES) do IPCC (IPCC, 2000). Este cenário incorpora objetivos múltiplos de desenvolvimento sustentado, tais como, crescimento econômico, a manutenção de condições necessárias para a assegurar a segurança energética, redução das emissões de gases de efeito estufa e a garantia do atendimento às demandas globais por mobilidade. No setor de veículos leves, isto se reflete em uma introdução de HEVs no lugar dos veículos VMC convencionais na primeira metade do século. A partir de 2030, os HEVs passam a representar apenas 10% de todas as viagens, se expandindo para 55% em 2050 e 78% em 2070. Os FCVs começam a entrar com mais representatividade no mercado a partir da segunda metade do século e chegam a 2100, respondendo por cerca de um terço das viagens de passageiros, conforme evidenciado na Figura 0-9.



**Figura 0-9 – Turton 2006 – Demanda de veículos leves (em milhões de km)**

Fonte: Adaptado de Turton (2006)

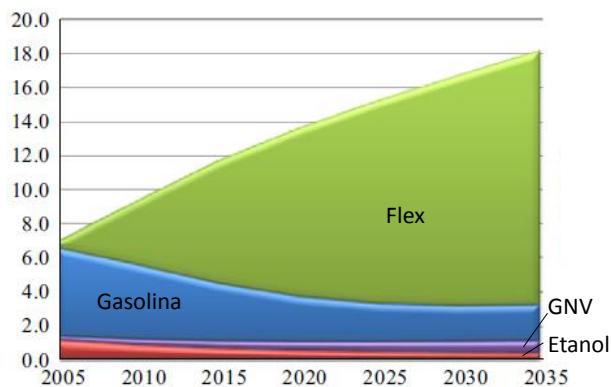
#### **F. EXCEN (2013) - The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System**

Neste artigo, pesquisadores do Centro de Excelência em eficiência energética (EXCEN) da Universidade Federal de Itaiubá, procuram determinar os impactos dos veículos elétricos na demanda de energia e nas emissões do estado de São Paulo. O estudo parte de uma simulação *bottom-up* da frota de veículos entre 2005 e 2035, com base em informações presentes e futuras sobre a dimensão da frota de veículos leves, desempenho energético, quantidade média de passageiros por veículo e milhagem média dos veículos.

São construídos quatro cenários paramétricos de penetração de BEVs. Outras tecnologias de propulsão elétrica – HEVs e PHEVs – não são consideradas. Na frota de veículos leves considera-se ainda veículos flex (propulsionados por qualquer mistura entre gasolina e etanol), a gasolina, a etanol e a GNV.

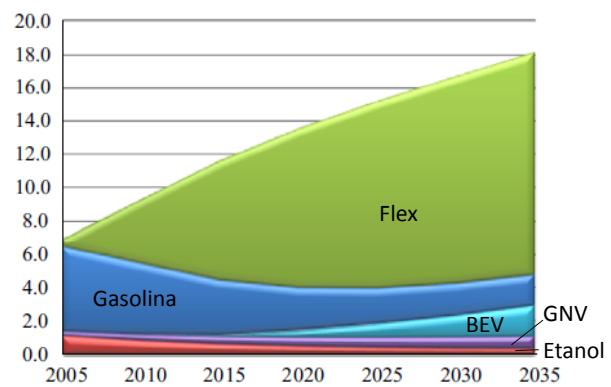
- Cenário base: a frota de veículos leves permanece constituída apenas de veículos convencionais;
- Cenário 1: até 2035, 10% da frota de veículos será composta por BEVs;
- Cenário 2: até 2035, 30% da frota de veículos será composta por BEVs;
- Cenário compulsório: até 2035, 100% da frota de veículos será composta por BEVs.

Os gráficos a seguir evidenciam a evolução da frota de veículos leves por categoria.



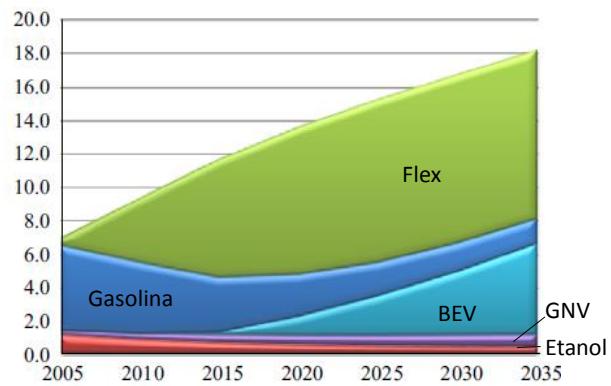
**Figura 0-10 – EXCEN 2013 – Frota de veículos leves no Cenário Base (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2013)



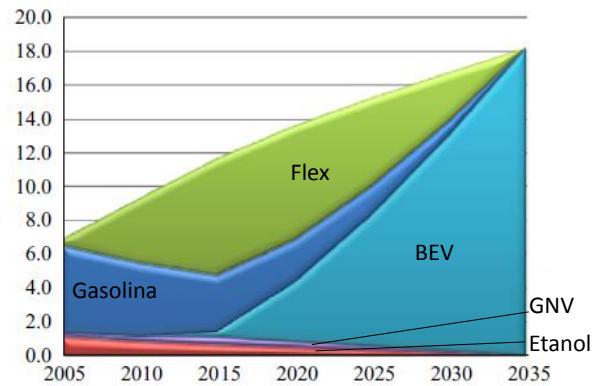
**Figura 0-11 – EXCEN 2013 – Frota de veículos leves no Cenário 1 (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2013)



**Figura 0-12 – EXCEN – Frota de veículos leves no Cenário 2 (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2013)



**Figura 0-13 – EXCEN – Frota de veículos leves no Cenário Compulsório (em milhões)**

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2013)