

RICARDO EMILIO DA SILVA

Proposta de método de auxílio à decisão para planejamento e otimização da inserção de veículos elétricos na matriz do modal rodoviário brasileiro

Ricardo Emilio da Silva

Proposta de método de auxílio à decisão para planejamento e otimização da inserção de veículos elétricos na matriz do modal rodoviário brasileiro

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Co-orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá - SP
2018

S586p Silva, Ricardo Emilio da
Proposta de método de auxílio à decisão para planejamento e otimização da inserção de veículos elétricos na matriz do modal rodoviário brasileiro / Ricardo Emilio da Silva. – Guaratinguetá, 2018.
231 f : il.
Bibliografia: f. 208-223

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Coorientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

1. Veículos elétricos. 2. Processo decisório por critério múltiplo 3. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

CDU 621.337 (043)

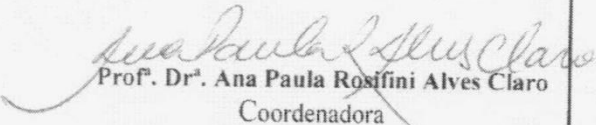

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

RICARDO EMILIO DA SILVA


ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
UNESP/FEG


Prof. Dr. OSIRIS CANGILIERI JÚNIOR
PUC/PR


Prof. Dr. JAMIL HADDAD
UNIFEI

Agosto de 2018

DADOS CURRICULARES

RICARDO EMILIO DA SILVA

NASCIMENTO	29.05.1983 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	José Afonso da Silva Expedita Rafael da Silva
2002/2006	Curso de Graduação Engenharia Elétrica Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
2010/2012	Curso de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

à minha filha Isabella e à minha esposa Talita,
pelo carinho e apoio durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e concedido saúde e força de vontade para superar as dificuldades ao longo do caminho. Agradeço pela minha vida, minha família e meus amigos.

à minha filha, pelos momentos de alegria ao seu lado.

à minha esposa, pelo incentivo durante a realização deste trabalho.

aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado e incentivaram meus estudos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho*, pela motivação e confiança em mim depositada. Sem sua disponibilidade e suporte, esta importante conquista poderia não ter se concretizado.

à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG/UNESP e a todos que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho, em especial ao *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri*, pela disponibilização do *software* necessário ao desenvolvimento dos modelos matemáticos.

“A adversidade desperta em nós capacidades que, em circunstâncias favoráveis, teriam ficado adormecidas.”

Horácio

RESUMO

O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera tem causado grande preocupação na comunidade científica e levado lideranças do mundo todo a discutir maneiras de enfrentar as causas e efeitos deste fenômeno de escala mundial. Neste contexto, a integração de meios de transporte ambientalmente amigáveis, na frota de veículos, é um anseio de toda a sociedade. Neste trabalho, propõe-se um novo método de otimização e decisão, que visa colaborar para a solução do problema da introdução de veículos elétricos *plug-in* nas cidades brasileiras, sendo adotada uma abordagem baseada nos conceitos dos métodos AUGMECON e BWM. O problema é modelado considerando os aspectos econômicos, ambientais, energéticos e sociais mais relevantes para a correta avaliação do tema, bem como equaciona e avalia o conflito entre os múltiplos objetivos envolvidos. A estrutura hierárquica de decisão é composta por quatro critérios principais e treze subcritérios, além de um conjunto de alternativas que representam os níveis de inserção *leve (1%)*, *moderado (3%)*, *elevado (5%)*, *massivo (10%)* e a *não-inserção* de veículos elétricos na frota. A validação da consistência e utilidade do método proposto foi realizada a partir da aplicação do mesmo nas cidades de São Paulo e Brasília, sendo que os resultados apontam a melhor alternativa de inserção dos veículos elétricos, sob a perspectiva do tomador de decisão, considerando dois cenários distintos. No cenário I, que prioriza apenas os critérios econômicos do problema, a implementação do método indicou que a melhor alternativa para as cidades de São Paulo e Brasília, sob a percepção do tomador de decisão, é *não incentivar* a introdução dos veículos elétricos na frota. No cenário II, que prioriza igualmente os critérios econômicos e ambientais, de forma a obter um resultado mais harmonizado e que atenda aos anseios da sociedade, a melhor alternativa para a cidade de São Paulo é a *inserção leve* dos veículos elétricos na frota, enquanto que, para a cidade de Brasília, a melhor opção é a *inserção elevada* dos veículos elétricos. Os resultados da pesquisa apontam que a *inserção massiva* de veículos elétricos nas frotas das cidades de São Paulo e Brasília ainda é uma realidade distante, uma vez que, a partir dos dados considerados, os modelos não encontraram soluções factíveis para tal nível de inserção de veículos elétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos. Planejamento energético. Tomada de decisão por múltiplos objetivos. Análise de decisão multicritério. Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

The increase of greenhouse gases concentration in the atmosphere has caused great concern in the scientific community and led global leaders to discuss ways to tackle the causes and effects of this global phenomenon. In this context, the integration of environmentally friendly means of transportation in the vehicle fleet is a yearning of the whole society. In this work, a new method of optimization and decision is proposed, which aims to collaborate for solving the problem of plug-in electric vehicles integration in Brazilian cities, adopting an approach based on the concepts of AUGMECON and BWM methods. The problem is modelled considering the economic, environmental, energy and social aspects most relevant to the correct evaluation of the issue, as well as equates and assesses the trade-off between the multiple objectives involved. The hierarchical decision structure consists of four main criteria and thirteen sub-criteria, as well as a set of alternatives that represent the deployment levels *light (1%)*, *moderate (3%)*, *high (5%)*, *massive (10%)* and the *non-adoption* of electric vehicles in the fleet. The validation of the consistency and usefulness of the proposed method was performed from applying such a method in the cities of São Paulo and Brasília, and the results point the best electric vehicles integration alternative, from the decision maker perspective, considering two different scenarios. In scenario I, which prioritizes only the economic criteria of the problem, the implementation of the method pointed that the best alternative for the cities of São Paulo and Brasília, on the decision maker point of view, is *not to incentivate* the integration of electric vehicles in the fleet. In scenario II, which equally prioritizes the economic and environmental criteria, in order to get a more harmonized result, that meets the wishes of society, the best alternative for the city of São Paulo is the *light deployment* of electric vehicles in the fleet, while, for the city of Brasília, the best option is the *high deployment* of electric vehicles. The research findings indicate that the *massive deployment* of electric vehicles in the fleets of São Paulo and Brasília cities is still a distant reality, since, based on the data considered, the models did not find feasible solutions for such deployment level of electric vehicles.

KEYWORDS: Electric vehicles. Energy planning. Multiple objective decision making. Multiple criteria decision making. Sustainable development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação Qualis dos artigos identificados nas pesquisas bibliográficas sobre os métodos AUGMECON e BWM.....	30
Quadro 1 - Principais características das diferentes tecnologias automotivas disponíveis atualmente no mercado mundial	37
Figura 2 - Quantidade de veículos elétricos vendidos e divisão de mercado entre os veículos BEV e PHEV nos Estados Unidos no período de 2010 a 2017	38
Figura 3 - Quantidade de veículos elétricos vendidos e divisão de mercado entre os veículos BEV e PHEV na Europa no período de 2011 a 2016	39
Figura 4 - Quantidade de veículos elétricos vendidos na China no período de 2011 a 2016 ..	40
Figura 5 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades norte-americanas	54
Figura 6 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades europeias	59
Figura 7 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades chinesas.....	64
Figura 8 - Evolução histórica dos preços da energia elétrica residencial no Brasil e em cinco cidades selecionadas	65
Figura 9 - Evolução histórica dos preços da gasolina no Brasil e em cinco cidades selecionadas.....	66
Figura 10 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos em cidades norte-americanas, europeias e chinesas no ano de 2014	71
Figura 11 - Principais tópicos avaliados na análise dos impactos ambientais, epidemiológicos, energéticos e infraestruturais em decorrência do uso de veículos elétricos.....	73
Figura 12 - Relação entre a média móvel de três anos do quarto maior valor diário da concentração de MP ₁₀ e a média móvel de três anos da emissão veicular anual de MP ₁₀ entre os anos de 2008/2010 e 2013/2015 na RMSP	83
Figura 13 - Relação entre a média móvel de três anos do número de dias de ultrapassagem do padrão estadual de O ₃ e a média móvel de três anos do quarto maior valor diário da concentração de O ₃ entre os anos de 2006/2008 e 2013/2015 na RMSP	86
Figura 14 - Relação entre a redução da concentração de O ₃ e a diminuição das emissões de COV na cidade de São Paulo	88

Figura 15 - Evolução da concentração média anual de SO ₂ na RMSP.....	89
Figura 16 - Evolução da emissão veicular anual de SO ₂ na RMSP.....	89
Figura 17 - Risco relativo de internação em função do incremento na concentração de CO na atmosfera.....	91
Figura 18 - Relação entre a média móvel de três anos das médias anuais das concentrações máximas diárias de CO e a média móvel de três anos da emissão veicular anual de CO entre os anos de 2006/2008 e 2013/2015 na RMSP.....	92
Figura 19 - Relação entre a quantidade específica de estações públicas de recarga e a participação dos veículos PEV na frota de cidades europeias no ano de 2014.....	95
Figura 20 - Relação entre o VPL das estações públicas de recarga por veículo PEV e a participação dos veículos PEV nas vendas anuais na RMSP.....	99
Figura 21 - Exemplo de dominância de Pareto.....	101
Figura 22 - Exemplo de mapeamento das variáveis de decisão em problemas de otimização multiobjetivo	102
Figura 23 - Exemplo de fronteira de Pareto para um MOP com duas variáveis de decisão e duas funções objetivo.....	103
Quadro 2 - Principais características e vantagens do método AUGMECON frente aos métodos da soma ponderada e das ϵ -restrições	111
Figura 24 - Modelo hierárquico de um processo MCDA de tomada de decisão	115
Figura 25 - Fluxograma do método AUGMECON-BWM proposto neste trabalho	130
Figura 26 - Curvas da participação dos veículos PEV no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos em cidades norte-americanas, europeias, chinesas e brasileiras	131
Figura 27 - Comportamento do VPL_{PEV} como uma função linear do valor máximo entre VPL_{BEV} e VPL_{PHEV} em cidades norte-americanas, europeias e chinesas no ano de 2014	133
Figura 28 - Curva da função logística para determinação da participação dos veículos BEV no mercado.....	135
Figura 29 - Estrutura hierárquica do problema na aplicação do método BWM linear	162
Quadro 3 - Identificação dos critérios e subcritérios do método BWM linear	163
Figura 30 - Fronteira de Pareto da cidade de São Paulo para um nível de inserção de 1% ...	170
Figura 31 - Fronteira de Pareto da cidade de São Paulo para um nível de inserção de 3% ...	170
Figura 32 - Fronteira de Pareto da cidade de São Paulo para um nível de inserção de 5% ...	170
Figura 33 - Fronteira de Pareto da cidade de Brasília para um nível de inserção de 1%.....	171

Figura 34 - Fronteira de Pareto da cidade de Brasília para um nível de inserção de 3%.....	171
Figura 35 - Fronteira de Pareto da cidade de Brasília para um nível de inserção de 5%.....	171
Figura 36 - <i>Ranking</i> de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de São Paulo no cenário I.....	191
Figura 37 - <i>Ranking</i> de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de Brasília no cenário I.....	192
Figura 38 - Desempenho das duas alternativas melhores classificadas no cenário I de São Paulo em cada subcritério.....	193
Figura 39 - Desempenho das duas alternativas melhores classificadas no cenário I de Brasília em cada subcritério.....	193
Figura 40 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final das duas alternativas melhores classificadas em São Paulo no cenário I.....	193
Figura 41 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final das duas alternativas melhores classificadas em Brasília no cenário I.....	194
Figura 42 - <i>Ranking</i> de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de São Paulo no cenário II.....	197
Figura 43 - <i>Ranking</i> de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de Brasília no cenário II.....	198
Figura 44 - Desempenho dos dois níveis de inserção melhores classificados no cenário II de São Paulo em cada subcritério.....	199
Figura 45 - Desempenho das duas alternativas melhores classificadas no cenário II de Brasília em cada subcritério.....	199
Figura 46 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final dos dois níveis de inserção melhores classificados em São Paulo no cenário II.....	200
Figura 47 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final das duas alternativas melhores classificadas em Brasília no cenário II.....	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Preços de veículos elétricos e veículos convencionais similares nos Estados Unidos no ano de 2014	48
Tabela 2 - Participação de mercado dos modelos de veículos BEV e PHEV novos comercializados nos Estados Unidos no ano de 2014	48
Tabela 3 - Incentivos financeiros concedidos pelos governos federal e estadual na compra de veículos elétricos nos Estados Unidos no ano de 2014	49
Tabela 4 - Custo do investimento na aquisição de um veículo elétrico em cidades norte-americanas no ano de 2014	49
Tabela 5 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares vendidos nos Estados Unidos no ano de 2014	50
Tabela 6 - Preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em cidades norte-americanas	50
Tabela 7 - Diferenças nos valores dos impostos anuais entre veículos elétricos e seus respectivos veículos ICEV similares em 2014 nos Estados Unidos.....	51
Tabela 8 - Outros benefícios financeiros anuais concedidos aos veículos elétricos no ano de 2014 em cidades norte-americanas.....	51
Tabela 9 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados nos Estados Unidos	52
Tabela 10 - Valores do período de retorno simples e do valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades norte-americanas	53
Tabela 11 - Participação dos veículos PEV, BEV e PHEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014 em cidades norte-americanas.....	53
Tabela 12 - Valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV, PHEV e PEV no ano de 2014 em cidades norte-americanas	54
Tabela 13 - Preços finais de veículos elétricos e veículos convencionais similares no ano de 2014 em cidades europeias.....	55
Tabela 14 - Custo do investimento na aquisição de um veículo elétrico em cidades europeias no ano de 2014	56
Tabela 15 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares vendidos na Europa no ano de 2014	56
Tabela 16 - Preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em cidades europeias	57

Tabela 17 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados na Europa.....	57
Tabela 18 - Valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades europeias.....	58
Tabela 19 - Participação dos veículos PEV, BEV e PHEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014 em cidades europeias	58
Tabela 20 - Valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV, PHEV e PEV no ano de 2014 em cidades europeias.....	59
Tabela 21 - Preços de veículos elétricos e veículos convencionais similares na China no ano de 2014.....	60
Tabela 22 - Participação de mercado dos modelos de veículos BEV e PHEV novos comercializados na China no ano de 2014.....	60
Tabela 23 - Incentivos financeiros concedidos pelos governos federal e municipal na compra de veículos elétricos na China no ano de 2014	61
Tabela 24 - Custo do investimento na aquisição de um veículo elétrico em cidades chinesas no ano de 2014	61
Tabela 25 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares vendidos na China no ano de 2014	62
Tabela 26 - Preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em Pequim e Xangai.....	62
Tabela 27 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados na China.....	62
Tabela 28 - Valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades chinesas.....	63
Tabela 29 - Participação dos veículos PEV, BEV e PHEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014 em cidades chinesas	63
Tabela 30 - Valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV, PHEV e PEV no ano de 2014 em cidades chinesas	64
Tabela 31 - Premissas de preços de veículos e de custos de investimento para aquisição de veículos elétricos no Brasil no ano de 2017.....	67
Tabela 32 - Alíquotas do imposto anual e valores percentuais do desconto concedido aos veículos elétricos no pagamento do imposto anual nas capitais brasileiras.....	67
Tabela 33 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares no ano de 2017.....	68

Tabela 34 - Desvalorização percentual dos veículos elétricos e dos veículos convencionais similares de acordo com a idade dos veículos.....	68
Tabela 35 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados no Brasil	68
Tabela 36 - Preços dos energéticos e diferenças nos valores dos impostos anuais nas capitais brasileiras no ano de 2017.....	69
Tabela 37 - Valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2017 em cidades brasileiras.....	70
Tabela 38 - Alternativas de inserção dos veículos elétricos.....	74
Tabela 39 - Frota total de automóveis, média anual da quantidade de veículos novos vendidos, população total e taxas de motorização nas capitais brasileiras	75
Tabela 40 - Quantidade anual de veículos elétricos novos vendidos em cada cidade para diferentes níveis de inserção dos veículos elétricos	76
Tabela 41 - Principais gases de efeito estufa na utilização de veículos automotores leves	77
Tabela 42 - Valores dos Fatores de Emissão de GEE das emissões de escapamento de veículos automotores	78
Tabela 43 - Valores dos Fatores de Emissão de poluentes atmosféricos das emissões de escapamento de veículos automotores.....	79
Tabela 44 - Valores dos Fatores de Emissão de NMHC de veículos automotores leves a gasolina decorrentes das emissões evaporativa e de abastecimento.....	79
Tabela 45 - Histórico dos valores do fator de emissão pelo uso de energia elétrica proveniente do Sistema Interligado Nacional	80
Tabela 46 - Impacto esperado na redução da concentração de MP ₁₀ na atmosfera a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP.....	84
Tabela 47 - Redução das emissões de CO, COV e NO _x a partir da inserção de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP	87
Tabela 48 - Valores de risco relativo de internação por doenças respiratórias e infarto do miocárdio decorrente do incremento da concentração de CO na atmosfera	90
Tabela 49 - Impacto esperado na redução da concentração de CO na atmosfera a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP.....	92
Tabela 50 - Riscos relativos, quantidades e custos anuais com internações por doenças respiratórias e infarto do miocárdio que poderiam ser evitadas na RMSP com a redução da concentração do CO na atmosfera	93

Tabela 51 - Impacto no consumo de energia elétrica e gasolina a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP.....	94
Tabela 52 - Análise da implantação de estações públicas de recarga na RMSP.....	97
Tabela 53 - Análise econômica da instalação de estações públicas de recarga na RMSP.....	98
Tabela 54 - Valores do Índice de Consistência	122
Tabela 55 - Resultados obtidos para as soluções <i>A</i> a <i>F</i> das fronteiras de Pareto da cidade de São Paulo.....	173
Tabela 56 - Resultados obtidos para as soluções <i>G</i> a <i>K</i> das fronteiras de Pareto da cidade de Brasília	174
Tabela 57 - Alternativas do método BWM na integração de PEVs em São Paulo e Brasília	175
Tabela 58 - Valores não-normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de São Paulo	176
Tabela 59 - Valores não-normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de Brasília	177
Tabela 60 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de São Paulo	178
Tabela 61 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de Brasília	179
Tabela 62 - Desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos	179
Tabela 63 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo T3 para a cidade de São Paulo.....	180
Tabela 64 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo T4 para a cidade de São Paulo.....	180
Tabela 65 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S1 para a cidade de São Paulo.....	181
Tabela 66 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S2 para a cidade de São Paulo.....	181
Tabela 67 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S3 para a cidade de São Paulo.....	181
Tabela 68 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S4 para a cidade de São Paulo.....	182
Tabela 69 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos para a cidade de São Paulo	183

Tabela 70 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos para a cidade de Brasília	184
Tabela 71 - Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) das alternativas em relação aos subcritérios qualitativos	184
Tabela 72 - Matriz de decisão para a cidade de São Paulo	185
Tabela 73 - Matriz de decisão para a cidade de Brasília	186
Tabela 74 - Comparação por pares dos critérios principais em relação ao objetivo principal do problema no cenário I	187
Tabela 75 - Comparação por pares dos subcritérios técnicos em relação ao critério técnico	187
Tabela 76 - Comparação por pares dos subcritérios econômicos em relação ao critério econômico	188
Tabela 77 - Comparação por pares dos subcritérios ambientais em relação ao critério ambiental.....	188
Tabela 78 - Comparação por pares dos subcritérios sócio-políticos em relação ao critério sócio-político	188
Tabela 79 - Valores dos pesos dos critérios principais e dos pesos locais e globais dos subcritérios no cenário I.....	189
Tabela 80 - Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) dos critérios principais e dos subcritérios no cenário I.....	190
Tabela 81 - Comparação por pares dos critérios principais em relação ao objetivo principal do problema no cenário II.....	195
Tabela 82 - Valores dos pesos dos critérios principais e dos pesos locais e globais dos subcritérios no cenário II.....	196
Tabela 83 - Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) dos critérios principais e dos subcritérios no cenário II.....	196
Tabela 84 - Valores das variáveis de decisão da solução do modelo AUGMECON correspondente à melhor alternativa apontada pelo método BWM linear no cenário II para as cidades de São Paulo e Brasília.....	201
Tabela 85 - Valores finais de isenção do pagamento anual do IPVA para inserção leve de veículos elétricos na cidade de São Paulo e inserção elevada em Brasília	203

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Processo Analítico Hierárquico (do inglês <i>Analytic Hierarchy Process</i>)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AUGMECON	Método das ε -restrições aumentado (do inglês <i>Augmented ε-constraint method</i>)
BEV	Veículo Elétrico a Bateria (do inglês <i>Battery Electric Vehicle</i>)
BWM	<i>Best-Worst Method</i>
CD	Redução de Carga (do inglês <i>Charge Depleting</i>)
CI	Índice de Consistência (do inglês <i>Consistency Index</i>)
CR	Razão de Consistência (do inglês <i>Consistency Ratio</i>)
CS	Manutenção de Carga (do inglês <i>Charge Sustaining</i>)
EREV	Veículo Elétrico de Autonomia estendida (do inglês <i>Extended Range Electric Vehicle</i>)
EV	Veículo Elétrico (do inglês <i>Electric Vehicle</i>)
FCV	Veículo a Célula de Combustível (do inglês <i>Fuel Cell Vehicle</i>)
FE	Fator de Emissão
GEE	Gás de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global (do inglês <i>Global Warming Potential</i>)
HEV	Veículo Elétrico Híbrido (do inglês <i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
HFC	Hidrofluorcarbono
HOV	Veículo com Alta Ocupação (do inglês <i>High-Occupancy Vehicle</i>)
ICEV	Veículo convencional (do inglês <i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>)
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
LEAP	<i>Long range Energy Alternatives Planning system</i>
MCDA	Análise de Decisão Multicritério (do inglês <i>Multiple Criteria Decision Analysis</i>)
MCI	Motor de Combustão Interna
MESSAGE	<i>Model for Energy Supply Systems And their General Environmental impact</i>
MODM	Tomada de Decisão por Múltiplos Objetivos (do inglês <i>Multiple Objective Decision Making</i>)
MOP	Problema de Otimização Multiobjetivo (do inglês <i>Multiobjective Optimization Problem</i>)
MP	Material Particulado
NMHC	Hidrocarbonetos Não-Metano (do inglês <i>Non-Methane Hydrocarbon</i>)
PEV	Veículo Elétrico <i>Plug-in</i> (do inglês <i>Plug-in Electric Vehicle</i>)
PFC	Perfluorcarbono
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i> (do inglês <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
PPP	Paridade do Poder de Compra (do inglês <i>Purchasing Power Parity</i>)
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RR	Risco Relativo
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOC	Nível de Carga (do inglês <i>State of Charge</i>)
TCO	Custo Total de Propriedade (do inglês <i>Total Cost of Ownership</i>)
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (do inglês <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
VOC	Composto Orgânico Volátil (do inglês <i>Volatile Organic Compound</i>)
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DE PESQUISA	21
1.2	OBJETIVOS E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	25
1.3	JUSTIFICATIVAS	26
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	31
2	O MERCADO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	33
2.1	TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS	33
2.1.1	Veículos convencionais (ICEV)	33
2.1.2	Veículos elétricos (EV).....	33
2.1.2.1	Veículos elétricos híbridos (HEV).....	34
2.1.2.2	Veículos elétricos <i>plug-in</i> (PEV).....	34
2.1.2.2.1	<i>Veículos elétricos a bateria (BEV)</i>	35
2.1.2.2.2	<i>Veículos elétricos híbridos plug-in (PHEV)</i>.....	35
2.1.2.3	Veículos a célula de combustível (FCV)	36
2.2	VEÍCULOS ELÉTRICOS NO MUNDO	37
2.2.1	O mercado norte-americano.....	38
2.2.2	O mercado europeu	38
2.2.3	O mercado chinês.....	39
2.3	ANÁLISE ECONÔMICA DA AQUISIÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	41
2.3.1	Equacionamento da análise econômica.....	41
2.3.1.1	Veículos elétricos a bateria (BEV)	41
2.3.1.2	Veículos elétricos híbridos <i>plug-in</i> (PHEV)	43
2.3.1.3	Veículos elétricos de autonomia estendida (EREV).....	45
2.3.2	Resultados da análise econômica.....	47
2.3.2.1	Estados Unidos	48
2.3.2.2	Europa	55
2.3.2.3	China	60
2.3.2.4	Brasil	65
2.3.3	Principais resultados do capítulo	71
3	IMPACTO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL ...	73
3.1	NÍVEL DE INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	73
3.2	ANÁLISE AMBIENTAL	76
3.2.1	Efeito estufa.....	76
3.2.2	Emissão de gases de efeito estufa de veículos convencionais	77

3.2.2.1	Emissão de escapamento.....	77
3.2.3	Emissão de poluentes atmosféricos de veículos convencionais.....	78
3.2.3.1	Emissão de escapamento.....	78
3.2.3.2	Emissão evaporativa e emissão de abastecimento.....	79
3.2.4	Emissão de gases de efeito estufa de veículos elétricos <i>plug-in</i>.....	80
3.3	ANÁLISE EPIDEMIOLÓGICA.....	80
3.3.1	Risco à saúde atribuído à poluição do ar	81
3.3.2	Material particulado	82
3.3.3	Ozônio	85
3.3.4	Dióxido de enxofre	88
3.3.5	Monóxido de carbono	90
3.4	ANÁLISE ENERGÉTICA.....	94
3.5	ANÁLISE DA INFRAESTRUTURA DE RECARGA.....	95
4	MÉTODOS DE AUXÍLIO À DECISÃO	100
4.1	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	100
4.1.1	Pareto-otimalidade.....	100
4.1.2	Métodos para solução de problemas de otimização multiobjetivo.....	104
4.1.2.1	Métodos <i>à posteriori</i>	107
4.1.2.1.1	<i>Método da soma ponderada</i>	<i>107</i>
4.1.2.1.2	<i>Método das ε-restrições</i>	<i>109</i>
4.1.2.1.3	<i>Método das ε-restrições aumentado</i>	<i>110</i>
4.1.3	Principais aspectos dos métodos MODM abordados	113
4.2	ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	114
4.2.1	Método BWM.....	118
4.2.1.1	BWM com intervalos de pesos.....	123
4.2.1.2	BWM linear.....	124
4.3	PRINCIPAIS RESULTADOS DO CAPÍTULO	126
5	MODELO PROPOSTO PARA OS VEÍCULOS ELÉTRICOS	127
5.1	ABORDAGEM PROPOSTA E IDENTIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	127
5.2	EQUAÇÕES AUXILIARES PARA O MODELO	131
5.2.1	Equação da participação dos veículos PEV no mercado	131
5.2.2	Equação do valor presente líquido dos veículos PEV	132
5.2.3	Equações da participação dos veículos BEV e PHEV no mercado	133
5.2.4	Equação da quantidade específica de pontos de recarga por veículo PEV..	135
5.3	FORMULAÇÃO DO MODELO AUGMECON-BWM	135
5.3.1	Modelagem AUGMECON.....	136
5.3.2	Seleção da solução do problema com BWM	162

5.3.2.1	Estruturação do problema	162
5.3.2.2	Construção da matriz de decisão	165
5.3.2.3	Geração do vetor de prioridade	167
5.3.2.4	Determinação do <i>ranking</i> de decisão	168
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	169
6.1	SOLUÇÃO DO MODELO AUGMECON.....	169
6.2	MATRIZ DE DECISÃO DO MÉTODO BWM	175
6.3	CENÁRIOS DE DECISÃO DO MÉTODO BWM.....	186
6.3.1	Cenário I: Priorização de critérios econômicos	186
6.3.1.1	Vetor de prioridade	187
6.3.1.2	Vetor de decisão	190
6.3.1.3	Análise dos resultados.....	192
6.3.2	Cenário II: Priorização de critérios econômicos e ambientais.....	194
6.3.2.1	Vetor de prioridade	195
6.3.2.2	Vetor de decisão	197
6.3.2.3	Análise dos resultados.....	198
7	CONCLUSÕES.....	204
7.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DE PESQUISA.....	204
7.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	205
7.3	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	206
	REFERÊNCIAS.....	208
	APÊNDICE A – Distância percorrida em cada modo de operação nos veículos PHEV	226
	APÊNDICE B – Exemplo da estrutura de programação do modelo BWM linear.....	229
	APÊNDICE C – Produção bibliográfica	231
	ANEXO A – Características técnicas de veículos automotores.....	232

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização do problema, as questões de pesquisa, os objetivos, as justificativas e os materiais e métodos. Por fim, a estrutura da tese é apresentada.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DE PESQUISA

Questões ambientais e de dependência ao uso de combustíveis fósseis têm sido discutidos por diversos setores da sociedade. A forte vinculação do estilo de vida dos países desenvolvidos e em desenvolvimento ao petróleo e seus derivados torna inevitável a busca por meios alternativos de prover energia, com baixo custo ambiental e econômico.

O planeta Terra deve irradiar energia para o espaço na mesma proporção em que a absorve do sol. Este processo natural de retenção de parte da energia solar é fundamental para manter o equilíbrio térmico e as condições para a existência de vida em nosso planeta.

Parte da radiação solar incidente sobre o planeta Terra é refletida de volta para o espaço, porém a maior parte atinge a superfície terrestre, principalmente na forma de luz visível; esta energia é então absorvida, e reemitida como radiação térmica por raios infravermelhos (FLORIDES; CHRISTODOULIDES; MESSARITIS, 2013).

A atmosfera terrestre é constituída por diversos gases que não são transparentes à radiação térmica, e é justamente este fato que faz com que parte da radiação térmica na forma de raios infravermelhos seja reemitida de volta para a superfície. Os gases presentes na atmosfera que apresentam a propriedade física de absorver e reemitir a energia refletida pela superfície terrestre são chamados de gases de efeito estufa (GEE), sejam eles resultantes de fontes naturais ou antrópicas, e são eles os responsáveis pelo comportamento de estufa do planeta (LUEKING; COLE, 2017).

Os principais GEE decorrentes de atividades antrópicas são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), além do hexafluoreto de enxofre (SF_6), dos hidrofluorcarbonos (HFCs) e dos perfluorocarbonos (PFCs) (RAMACHANDRA; AITHAL; SREEJITH, 2015).

O uso de combustíveis fósseis em veículos convencionais, que são aqueles que convertem a energia de combustíveis líquidos, tais como o diesel e a gasolina, em energia mecânica, por meio de um motor de combustão interna (MCI), tem elevado os níveis de gases de efeito estufa e outros poluentes na atmosfera terrestre, sendo que, atualmente, o caso mais crítico refere-se ao dióxido de carbono, no qual foi observado um aumento de 40% em sua

concentração na atmosfera, passando de 280 ppm no período de pré revolução industrial para 391 ppm no ano de 2011, com uma taxa de crescimento médio de $2,0 \pm 0,1$ ppm/ano no período entre 2002 e 2011. Em termos de emissões anuais de GEE no mundo, o incremento foi de 27 Gt CO₂eq/ano para 49 Gt CO₂eq/ano entre 1970 e 2010, correspondendo a um aumento de aproximadamente 81%, sendo que as emissões do setor de transportes representaram 14% do total de emissões de GEE no ano de 2010, com aproximadamente 6,9 Gt CO₂eq/ano (IPCC, 2014a).

Mesmo sendo considerado um assunto politicamente controverso em alguns países, representantes de governos e órgãos supranacionais em todo o mundo têm discutido e avaliado como limitar e reduzir as emissões de GEE. Por intermédio do Acordo de Paris, aprovado em 2015 no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC¹), todas as nações expressaram seu compromisso de assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais (FRIDSTRØM; ØSTLI, 2017).

No Brasil, as emissões totais de GEE foram de 1,2 Gt CO₂eq em 2012, com o setor de transportes sendo responsável por 16,7% destas emissões, o que corresponde a 0,2 Gt CO₂eq no ano. Se for levado em conta apenas o setor de transportes rodoviários, as emissões foram de 0,18 Gt CO₂eq em 2012, representando 15% do total de emissões do país (BRASIL, 2014a).

Com relação aos poluentes atmosféricos danosos à saúde humana encontrados nas emissões diretas de automóveis convencionais, destacam-se o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos não metano (NMHC), os aldeídos (RCHO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o material particulado (MP), o metano (CH₄), o dióxido de carbono (CO₂) e o dióxido de enxofre (SO₂) (BRASIL, 2011).

Além das emissões veiculares diretas, há ainda as indiretas, em que o poluente não é emitido diretamente para a atmosfera, mas sim produzido pela reação química dos poluentes de emissões diretas com a radiação solar ou outros gases presentes naturalmente na atmosfera. Um exemplo de emissão veicular indireta é o ozônio (O₃), que é produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (CETESB, 2014), sendo um gás de efeito estufa, além de ser um poluente tóxico, que causa danos à vegetação e ao sistema respiratório (SILVA, 2012).

Vários estudos, em diversas partes do mundo, têm demonstrado que a poluição atmosférica está associada ao excesso de mortes e internações hospitalares, em particular por

¹ UNFCCC do inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*

doenças respiratórias e cardiovasculares, além de outras enfermidades como o câncer, as malformações congênitas, a restrição do crescimento intrauterino e distúrbios da fertilidade.

Segundo Freitas et al. (2013), há uma forte correlação entre as ocorrências de doenças respiratórias e cardiovasculares e a concentração de material particulado (MP_{10}) na atmosfera, sendo que a faixa etária mais afetada é a de menores de cinco anos de idade.

Pesquisas realizadas por Nardocci et al. (2013) indicam uma relação direta entre a poluição atmosférica e a quantidade de internações por doenças respiratórias e cardiovasculares em residentes do município de Cubatão, localizado no Estado de São Paulo.

Os autores do trabalho analisaram as concentrações diárias de material particulado (MP_{10}), dióxido de enxofre (SO_2) e ozônio (O_3), utilizando como variáveis de controle a temperatura, umidade, dias da semana e feriados. Para cada incremento de $10 \mu g/m^3$ de MP_{10} , encontrou-se um excesso de internações de 4,25%, 5,74% e 2,29% para doenças respiratórias totais, doenças respiratórias em menores de cinco anos e doenças cardiovasculares em maiores de 39 anos, respectivamente.

No mesmo estudo, Nardocci et al. (2013) constataram que o SO_2 apresentou relação com as doenças cardiovasculares em maiores de 39 anos de 3,51%. No caso do O_3 , foi observada relação de 2,85% com as doenças cardiovasculares em maiores de 39 anos e de 3,91% com as doenças respiratórias em menores de cinco anos.

Segundo Shah et al. (2013), a associação entre poluição atmosférica e insuficiência cardíaca revelou uma correlação positiva entre o aumento do nível de poluentes gasosos e particulados no curto prazo com o risco de hospitalização e mortes decorrentes de insuficiência cardíaca congestiva, sendo que o aumento observado no risco foi de 3,52% para o monóxido de carbono (CO), 2,36% para o dióxido de enxofre (SO_2), 1,70% para o dióxido de nitrogênio (NO_2), 0,46% para o ozônio (O_3), 2,12% para o $MP_{2,5}$ e 1,63% para o MP_{10} .

Tendo em vista a significativa participação do setor de transportes nas emissões, meios de transporte que reduzam as emissões de GEE e poluentes atmosféricos no planeta devem ser priorizados, e neste sentido as tecnologias de veículos elétricos têm papel crucial.

Além de contribuir com a redução da concentração de poluentes gasosos e particulados na atmosfera, a inserção dos veículos elétricos em um país propicia a geração de empregos e a possibilidade de diversificação da matriz energética, bem como a redução do nível de ruído urbano, encontrado principalmente nas grandes cidades.

Estudos realizados por Kälsch et al. (2014) apontam que pessoas expostas ao ruído proveniente da proximidade de tráfego rodoviário intenso por longos períodos têm maior

chance de desenvolver a aterosclerose, que é uma condição em que ocorre o acúmulo de placas de gordura, colesterol e outras substâncias nas paredes das artérias.

Segundo Sørensen et al. (2011), a exposição ao ruído do tráfego rodoviário em áreas residenciais está associada com o aumento do risco de infarto nas pessoas com idade superior a 64,5 anos.

Apesar de todos os nítidos benefícios dos veículos elétricos e híbridos, o mercado brasileiro ainda não deslanchou. O Brasil é o oitavo maior produtor de veículos do mundo e o quarto maior mercado consumidor, no entanto foram licenciados somente 1.085 automóveis elétricos e híbridos novos no ano de 2016, o que representa apenas 0,06% do total de automóveis licenciados no país (ANFAVEA, 2017a).

Isto demonstra que ainda não foram criadas as condições necessárias para a integração dos veículos elétricos no país, e que ainda há espaço para o estudo de políticas que auxiliem na inserção de tais veículos na matriz do modal rodoviário brasileiro, assim como tem sido feito em outros países.

A nova política automotiva brasileira, intitulada *Rota 2030* (BRASIL, 2018), entrou em vigor no ano de 2018, com o intuito de substituir o *Inovar-Auto* (BRASIL, 2012). Nela, são definidas metas de segurança veicular, eficiência energética e emissões de dióxido de carbono para produtores e importadores de veículos. A política compreende três ciclos de cinco anos cada, totalizando quinze anos. Apesar de prever diversos avanços no planejamento da mobilidade urbana do país, o *Rota 2030* não contempla uma política específica para automóveis elétricos; o único ponto mencionado é a isenção parcial de IPI para veículos elétricos e híbridos.

Diversos fatores podem estar relacionados à baixa inserção de veículos elétricos no país, tais como o custo de aquisição superior ao dos automóveis convencionais, a expressiva carga tributária dos modelos elétricos, a concorrência com o etanol, a falta de infraestrutura de recarga para os veículos elétricos, ou até mesmo fatores culturais.

O fato é que, diante do exposto, torna-se imprescindível para o Estado brasileiro a busca por uma solução que transpasse o problema da viabilidade econômica de inserção dos veículos elétricos no modal rodoviário brasileiro, haja vista a relevância do tema e todos os benefícios que a inserção dos veículos elétricos pode acarretar para o país.

A viabilização da introdução dos veículos elétricos no país depende da inter-relação de uma série de fatores. De um lado, há os interesses econômicos das montadoras de veículos, de outro os interesses do governo em manter o nível de arrecadação de impostos, além dos

interesses econômicos dos consumidores, que somente sentir-se-ão atraídos a adquirir um veículo elétrico caso os mesmos apresentem uma viabilidade econômica aceitável.

Além dos aspectos econômicos, que são explícitos, há ainda questões de ordem ambiental, energética e social, cuja responsabilidade de planejamento cabe ao próprio governo; desta forma, pode-se falar em interesses ambientais, energéticos e sociais.

Diante do exposto, este trabalho procura responder às seguintes questões de pesquisa:

- Qual o melhor caminho para estímulo aos veículos elétricos no Brasil?
- Quais são os reais gargalos que atualmente impedem a venda expressiva desses veículos no país?
- O que deve ser feito, de fato, para permitir a integração dos veículos elétricos no mercado?
- Como equacionar os interesses dos consumidores, das montadoras e do governo a fim de encontrar a melhor solução sob a perspectiva do legislador?

1.2 OBJETIVOS E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Para responder às questões de pesquisa elencadas, este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um método de otimização e decisão para auxiliar na solução do problema da viabilidade de inserção de veículos elétricos na matriz do modal rodoviário das cidades brasileiras.

Os objetivos específicos incluem:

- Avaliar a viabilidade econômica da aquisição de veículos elétricos no Brasil na visão dos consumidores.
- Identificar os impactos ambientais, epidemiológicos e energéticos decorrentes da introdução dos veículos elétricos no país.
- Avaliar os aspectos econômicos da instalação de estações públicas de recarga para veículos elétricos.
- Desenvolver um novo método de otimização e decisão embasado na teoria dos métodos de Tomada de Decisão por Múltiplos Objetivos (MODM²) e dos métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA³).
- Aplicar o método de otimização e decisão elaborado neste trabalho em duas cidades brasileiras, a fim de validar a consistência e utilidade do mesmo.

² MODM do inglês *Multiple Objective Decision Making*

³ MCDA do inglês *Multiple Criteria Decision Analysis*

- Determinar a melhor alternativa de inserção dos veículos elétricos, sob a perspectiva do legislador, nas duas cidades brasileiras avaliadas.

- Sugerir ações e políticas governamentais que podem ser desenvolvidas pelos legisladores de modo a viabilizar a introdução dos veículos elétricos nas duas cidades analisadas.

Segundo Marconi e Lakatos (2010), nem sempre há necessidade de indicar a delimitação da pesquisa, pois o próprio assunto e seus objetivos podem estabelecer limites.

Neste trabalho, os objetivos estabelecem de forma clara os limites relacionados ao objeto de estudo. Entretanto, vale apontar que esta pesquisa apresenta uma delimitação temporal, uma vez que o trabalho foi finalizado no ano de 2018, sendo as fases de preparação e execução da pesquisa realizadas nos anos precedentes.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Diversos estudos relacionados aos veículos elétricos têm sido elaborados no Brasil e no mundo. Dias et al. (2014) avaliaram o impacto na demanda de energia elétrica e nas emissões em decorrência da introdução de veículos elétricos no Estado de São Paulo utilizando a ferramenta de simulação “*Long range Energy Alternatives Planning System*” (LEAP).

Em termos energéticos, os autores constataram que, se o governo do Estado de São Paulo estipulasse de forma compulsória que 100% da frota de automóveis fosse composta de veículos elétricos no ano de 2035, haveria um aumento de 40 TWh no consumo de energia elétrica no ano de 2035 comparado com o cenário base do estudo, enquanto que em termos ambientais, tal iniciativa reduziria em 17,3 milhões de toneladas as emissões de CO₂eq.

Segundo Baran e Legey (2013), o uso de energia elétrica para o transporte individual poderia reduzir em até 40,7% o consumo de gasolina no Brasil no ano de 2030 e aumentar o consumo de energia elétrica em 31,3% em relação às projeções oficiais, o que representaria uma redução de 28,9% no consumo total de energia pela frota nacional, ou aproximadamente $24,6 \cdot 10^6$ tep/ano.

Na China, a penetração de veículos elétricos poderia auxiliar na mitigação do uso de petróleo por quilômetro percorrido de forma significativa. Em termos de emissões equivalentes de CO₂, a redução poderia atingir 43% a 56% no ano de 2030 (WU et al., 2012).

Lima, Lourenço e Filho (2012) estudaram o impacto da recarga de veículos elétricos nos alimentadores residenciais, utilizando uma metodologia baseada na simulação de Monte Carlo

com cálculo de fluxo de potência pelo método da soma de potências. Os resultados das simulações indicaram a necessidade de revisão nos planejamentos das redes e a possibilidade de se obter benefícios com o uso de veículos elétricos como reserva de energia para os horários de pico.

Ainda segundo os autores, com apenas 10% de participação de veículos elétricos no mercado seria possível evitar a queda de tensão em alimentadores atualmente sobrecarregados e redução de até 30% das perdas nos alimentadores em horário de pico. No mesmo estudo, os autores sugerem a necessidade de se introduzir, na regulamentação do sistema elétrico brasileiro, a conexão dos veículos elétricos à rede de distribuição, seja como carga, seja como elemento de reserva de energia ou geração distribuída residencial.

Borba (2012) elaborou um método para análise integrada da penetração de veículos elétricos no Brasil utilizando um modelo de otimização na plataforma MESSAGE (*Model for Energy Supply Systems And their General Environmental impact*), que é um *software* de Programação Linear estruturado para a otimização de modelos de sistemas energéticos.

O autor do trabalho analisou o comportamento do sistema elétrico no longo prazo com a entrada de diferentes taxas hipotéticas de penetração de veículos elétricos, no qual foi constatado que, para um perfil da curva de carga no Brasil sem a presença de picos acentuados após as 18h, a inserção dos veículos elétricos é totalmente absorvida pelo sistema elétrico, mesmo para penetrações extremas destes veículos, sem a necessidade de implementação de uma rede elétrica inteligente.

O método de decisão multicriterial AHP (Processo Analítico Hierárquico⁴) foi utilizado no planejamento de redes de distribuição de energia para veículos elétricos em estudos realizados por Li e Chang (2011). O método AHP foi aplicado em dois estágios, sendo o primeiro para definir a ordem de prioridade das localidades que deveriam receber as estações de recarga, e o segundo para determinar a prioridade de construção das estações de recarga em cada localidade distinta.

Com o intuito de identificar a existência de artigos científicos relacionados ao estudo de métodos de otimização e auxílio à decisão na introdução de veículos elétricos no mercado, foram realizadas pesquisas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Foram utilizados os seguintes termos na pesquisa:

⁴ Processo Analítico Hierárquico do inglês *Analytic Hierarchy Process*

(TITLE-ABS-KEY((deployment w/3 “electric vehicle”) OR (integration w/3 “electric vehicle”) OR (introduction w/3 “electric vehicle”) OR (insertion w/3 “electric vehicle”) OR (adoption w/3 “electric vehicle”) OR (market w/3 “electric vehicle”)))
AND (TITLE-ABS-KEY(“decision making” OR “decision maker” OR “multiple criteria decision analysis” OR “multiple criteria decision making” OR “MCDA” OR “MCDM”))
AND (TITLE-ABS-KEY(“MODM” OR “optimization problem” OR “optimization model” OR “optimization modeling” OR “optimization modelling”))
AND DOCTYPE(ar OR re)

Os resultados da pesquisa bibliográfica nas duas bases de dados indicaram a existência de oito artigos que atendiam aos termos da busca. Entretanto, nenhum deles trata da elaboração de estratégias para a inserção dos veículos elétricos no mercado, tampouco propõem métodos para a determinação da melhor solução, em um conjunto de soluções factíveis, para o problema da viabilidade de inserção de veículos elétricos em dada localidade.

Desta forma, a presente pesquisa utiliza técnicas de otimização e de análise de decisão para tratar de um problema complexo, que envolve planejamento energético, saúde pública, desenvolvimento sustentável, diversificação da matriz energética e política energética aplicada a veículos elétricos, uma vez que a literatura acadêmica consultada falha em determinar a solução ótima ou a mais aceitável para o problema em questão, de forma que a pesquisa contribuirá para que os tomadores de decisão implementem as ações e políticas governamentais necessárias para encaminhamento do assunto no país.

O método proposto visa trazer uma contribuição metodológica para o equacionamento das questões que envolvem os veículos elétricos não só no Brasil, mas também em outras cidades do mundo, de forma a, de fato, suportar as pesquisas e decisões relacionadas ao tema.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta tese, o problema da inserção de veículos elétricos em determinada cidade é modelado como um problema de Programação Não-Linear com múltiplos objetivos (CUI et al., 2017; FAUVEL et al., 2018), em que são considerados os aspectos econômicos, técnicos, ambientais e energéticos mais relevantes para a correta avaliação do tema. A resolução do modelo matemático dá-se por meio do método AUGMECON⁵ (MAVROTAS, 2009).

⁵ Método AUGMECON do inglês *Augmented ε -constraint method*

Posteriormente, utilizando conceitos do método de análise de decisão multicritério BWM⁶ (REZAEI, 2015, 2016), a melhor alternativa de inserção dos veículos elétricos é selecionada sob a perspectiva do tomador de decisão (inserção *leve, moderada, elevada, massiva* ou a *não-inserção*), considerando dois cenários distintos.

Com base na solução obtida do modelo AUGMECON da alternativa apontada pelo método de decisão multicritério BWM, são identificadas as similaridades e ações que devem ser incentivadas pelo poder público de modo a alavancar a entrada de tais veículos no mercado.

Ao final do trabalho, a solução apresentada deve contribuir para que os tomadores de decisão em âmbito federal, estadual e municipal desenvolvam políticas e leis que transpasse as atuais restrições econômicas para inserção dos veículos elétricos no Brasil, ou seja, o resultado da pesquisa indicará o melhor caminho a ser seguido, considerando cenários distintos de tomada de decisão.

Este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa de natureza *aplicada* (GIL; LÓPEZ, 2014; LARSEN, 2011), caracterizada por objetivos *exploratório-descritivos*, uma vez que descreve o comportamento e especifica as características importantes dos fenômenos, quantifica as variáveis e possibilita ao pesquisador construir hipóteses mais adequadas e maximizar seu conhecimento acerca de determinado tema ou problemática (BRUCHÉZ et al., 2015; PARRY et al., 2014; SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2006).

Com relação à abordagem, a pesquisa é *quali-quantitativa* (SALOMON et al., 2010; SINUFF; COOK; GIACOMINI, 2007), sendo utilizados o *estudo de caso* e a *modelagem matemática* como métodos de pesquisa (ANSARI; KANT, 2017; MIGUEL et al., 2012; ZOU et al., 2018).

Com o intuito de identificar a existência de artigos científicos relacionados à integração dos métodos AUGMECON e BWM na literatura, foram realizadas pesquisas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Foram utilizados os seguintes termos nas pesquisas:

- Pesquisa 1: *TITLE-ABS-KEY*("AUGMECON" OR "augmented ε -constraint method" OR "augmented constraint method") AND *DOCTYPE*(ar OR re)

⁶ BWM do inglês *Best-Worst Method*

- **Pesquisa 2:** TITLE-ABS-KEY(“best-worst method” OR “best worst method” OR “BW method” OR “B-W method”) AND DOCTYPE(ar OR re) AND (AUTHLASTNAME(rezaei) OR REF(rezaei))

- **Pesquisa 3:**

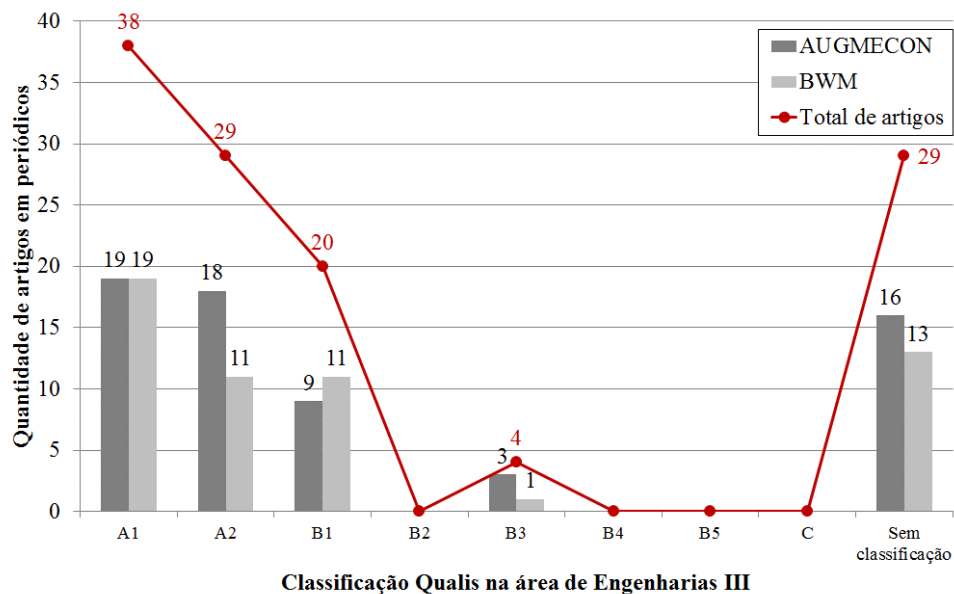
(TITLE-ABS-KEY(“AUGMECON” OR “augmented ε -constraint method” OR “augmented constraint method”) AND DOCTYPE(ar OR re))

AND (TITLE-ABS-KEY(“best-worst method” OR “best worst method” OR “BW method” OR “B-W method”) AND DOCTYPE(ar OR re) AND (AUTHLASTNAME(rezaei) OR REF(rezaei)))

Os resultados das três pesquisas bibliográficas nas duas bases de dados indicaram a existência de 65 artigos relacionados ao método AUGMECON, publicados no período entre jul. 2009 e abr. 2018 (*pesquisa 1*), e de 55 artigos relacionados ao método BWM, publicados entre jun. 2015 e abr. 2018 (*pesquisa 2*). Com relação à integração dos métodos AUGMECON e BWM em um mesmo trabalho (*pesquisa 3*), nenhum artigo foi encontrado.

A classificação Qualis dos artigos identificados nas pesquisas bibliográficas *pesquisa 1* e *pesquisa 2* é exibida na Figura 1.

Figura 1 - Classificação Qualis dos artigos identificados nas pesquisas bibliográficas sobre os métodos AUGMECON e BWM



Fonte: Produção do próprio autor.

Por meio das pesquisas bibliográficas realizadas, destaca-se que o modelo de otimização e decisão proposto nesta pesquisa, que integra as abordagens dos métodos AUGMECON e BWM, é único na literatura, e pode ser replicado em outros trabalhos das mais diversas áreas do conhecimento, sendo uma das contribuições desta tese.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em mais seis capítulos, que estão organizados da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são apresentadas as tecnologias automotivas disponíveis atualmente no mercado, com foco nos veículos elétricos. Posteriormente, o panorama da venda de veículos elétricos no mundo é exibido, com a apresentação dos principais mercados. Finalmente, propõe-se a análise dos aspectos econômicos relacionados à aquisição de veículos elétricos a partir do desenvolvimento matemático de equações para o cálculo da viabilidade econômica de aquisição de tais veículos por parte dos consumidores. Os resultados da análise econômica são mostrados no mesmo capítulo.
- No Capítulo 3 são avaliados os impactos ambientais, epidemiológicos e energéticos, bem como na infraestrutura de recarga, decorrentes da introdução de veículos elétricos no Brasil. As análises são conduzidas considerando diferentes níveis de inserção dos veículos elétricos em uma determinada região, sendo que os objetivos são estimar em que extensão os veículos elétricos podem, de fato, contribuir com a melhoria das condições ambientais e epidemiológicas da cidade, além de apurar as consequências energéticas e estruturais desta tecnologia nas cidades brasileiras.
- O Capítulo 4 aborda a fundamentação teórica dos métodos de Tomada de Decisão por Múltiplos Objetivos (MODM) e dos métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA), destacando os elementos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.
- O Capítulo 5 apresenta o problema da introdução dos veículos elétricos nas cidades brasileiras sob a ótica da tomada de decisão e descreve uma proposta de método, baseado na modelagem AUGMECON-BWM do problema, que visa indicar a melhor solução para a inserção dos veículos elétricos na frota de determinada cidade.

- No Capítulo 6, a fim de validar a utilidade e robustez do método elaborado nesta tese, o mesmo é aplicado no problema do planejamento e otimização da integração de veículos elétricos *plug-in* nas cidades de São Paulo e Brasília, sendo que dois cenários distintos são considerados nesta fase, um que prioriza os critérios econômicos e outro que prioriza igualmente os critérios econômicos e ambientais. A partir dos resultados obtidos na aplicação do método, são sugeridas ações e políticas governamentais que podem ser desenvolvidas pelos legisladores de modo a alcançar a melhor eficiência financeira na inserção dos veículos elétricos na frota das cidades avaliadas.

- As conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 7, sendo seguidas das referências bibliográficas utilizadas neste texto e dos Apêndices.

2 O MERCADO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Este capítulo apresenta um panorama das tecnologias automotivas disponíveis atualmente no mercado e da venda de veículos elétricos no mundo. Também são abordados os aspectos financeiros da aquisição de veículos elétricos a partir do equacionamento da viabilidade econômica de aquisição de tais veículos por parte dos consumidores, com foco nos mercados norte-americano, europeu, chinês e brasileiro.

2.1 TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS

Esta seção descreve as principais características e conceitos relacionados às tecnologias automotivas, com foco nos veículos elétricos. Os termos e definições aqui apresentados são adotados em todo o trabalho.

2.1.1 Veículos convencionais (ICEV)

Os veículos convencionais (ICEV⁷) são aqueles que apresentam um motor de combustão interna para converter a energia de combustíveis líquidos, tais como a gasolina, o etanol e o diesel, em energia mecânica. A eficiência na conversão da energia química do combustível em energia útil para um automóvel convencional é de apenas 16-17% (BARAN, 2012), sendo que mais de 60% das perdas de energia do motor ocorre na forma de perdas térmicas (SHABASHEVICH et al., 2015).

2.1.2 Veículos elétricos (EV)

A tecnologia de veículos elétricos é conhecida desde meados do início do século XIX, tendo a França e a Inglaterra como seus primeiros desenvolvedores, sendo que no final do século XIX e início do século XX, o mercado de automóveis se dividia entre o carro elétrico, a vapor e a gasolina. Entretanto, diversos fatores, tais como a queda no preço da gasolina, a invenção da partida elétrica em 1912 para os motores dos veículos a gasolina e o início da produção em série dos veículos com MCI por Henry Ford tornou estes veículos mais baratos e acessíveis de tal forma que em 1912 um carro a gasolina já custava menos da metade de um veículo elétrico (DIAS, 2013).

⁷ ICEV do inglês *Internal Combustion Engine Vehicle*

O termo veículo elétrico (EV⁸) abrange os veículos elétricos híbridos e os veículos elétricos *plug-in*.

2.1.2.1 Veículos elétricos híbridos (HEV)

Os veículos elétricos híbridos utilizam um motor elétrico, movido pela energia armazenada em baterias, e um motor de combustão interna, sendo que tais veículos não usam eletricidade de nenhuma fonte externa, ou seja, as baterias não podem ser recarregadas diretamente na rede de distribuição de energia. As baterias são recarregadas pelo sistema de frenagem regenerativa e pelo MCI, como parte da operação normal do veículo (JOŠEVSKI; ABEL, 2015).

Ainda com relação às baterias, os veículos HEV⁹ operam no *modo de manutenção de carga* (modo CS¹⁰), que é caracterizado pelo fato de as baterias manterem um nível de carga (SOC¹¹) pré-determinado, sem que haja uma redução excessiva no nível de carga das mesmas (POULLIKKAS, 2015).

Quando comparados com os veículos convencionais, os HEV apresentam menor consumo de combustível fóssil, uma vez que durante as baixas demandas de potência o veículo opera somente com as baterias e o motor elétrico (SULAIMAN et al., 2015).

São exemplos de veículos HEV atuais o *Toyota Prius*, o *Ford Fusion Hybrid* e o *Lexus CT*.

2.1.2.2 Veículos elétricos *plug-in* (PEV)

O termo veículo elétrico *plug-in* (PEV¹²) é utilizado para designar todos os veículos que podem ser recarregados diretamente na rede de distribuição de energia elétrica, independentemente de apresentarem apenas propulsão elétrica ou outros tipos de propulsão.

Os veículos PEV são divididos em veículos elétricos híbridos *plug-in* (PHEV¹³) e em veículos elétricos a bateria (BEV¹⁴), sendo que os PHEV apresentam ambos os motores,

⁸ EV do inglês *Electric Vehicle*

⁹ HEV do inglês *Hybrid Electric Vehicle*

¹⁰ Modo CS do inglês *Charge Sustaining mode*

¹¹ SOC do inglês *State Of Charge*

¹² PEV do inglês *Plug-in Electric Vehicle*

¹³ PHEV do inglês *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*

¹⁴ BEV do inglês *Battery Electric Vehicle*

elétrico e de combustão interna, enquanto que os BEV apresentam apenas propulsão elétrica (BONGES III; LUSK, 2016).

2.1.2.2.1 Veículos elétricos a bateria (BEV)

Os veículos puramente elétricos, chamados de veículos elétricos a bateria, como o próprio nome sugere, utilizam baterias para o fornecimento de energia a um motor elétrico. Tais veículos são recarregados diretamente na rede de distribuição de energia e não utilizam outro tipo de combustível a não ser a energia elétrica.

Pelo fato de apresentarem apenas as baterias como fonte de energia, todos os BEV operam integralmente no *modo de redução de carga* (modo CD¹⁵), que é caracterizado pela redução constante da carga das baterias conforme o uso do veículo (POULLIKKAS, 2015).

Como vantagem, apresentam menor complexidade do mecanismo de funcionamento em comparação com os automóveis com MCI, sem a existência, por exemplo, de caixa de marchas, motor de arranque, equipamentos do sistema de exaustão e do sistema de arrefecimento. Além disso, o motor do BEV opera com um alto rendimento, usualmente superior a 90%, o que, juntamente com a frenagem regenerativa, tornam a eficiência dos BEV maior que as outras categorias de veículos (BORBA, 2012).

Como desvantagem, apresentam autonomia limitada, tipicamente entre 120 e 200 km, porém alguns modelos alcançam valores que variam de 400 a 500 km (ESTADOS UNIDOS, 2017a). Adicionalmente, como a vida útil das baterias é de aproximadamente 11 anos (EVTC, 2014), a disposição final das mesmas pode ser motivo de preocupação ambiental no futuro. Letmathe e Soares (2017) sugerem que as baterias usadas sejam reutilizadas em sistemas de geração de energia elétrica de fontes renováveis e, posteriormente, recicladas.

O *Nissan LEAF*, o *Tesla Model S*, o *BMW i3*, o *Renault Zoe* e o *Kia Soul EV* são exemplos de veículos BEV atualmente disponíveis no mercado mundial.

2.1.2.2.2 Veículos elétricos híbridos plug-in (PHEV)

Os veículos elétricos híbridos *plug-in*, tal como os HEV, utilizam um motor elétrico, movido pela energia armazenada em baterias, e um motor de combustão interna; entretanto, diferentemente dos HEV, tipicamente apresentam baterias de maior capacidade, podem ser recarregados na rede de distribuição da concessionária de energia e oferecem dois modos

¹⁵ Modo CD do inglês *Charge Depleting mode*

distintos de operação das baterias: o *modo de redução de carga* e o *modo de manutenção de carga* (POULLIKKAS, 2015).

Nos veículos PHEV operando no modo de redução de carga, quando o nível de carga da bateria atinge um limite inferior pré-definido, o motor de combustão interna assume o veículo e o mesmo passa a operar no modo de manutenção de carga, comportando-se de forma similar a um veículo HEV. Ainda nos veículos PHEV operando no modo de redução de carga, nas condições de aceleração brusca o motor de combustão interna assume o veículo temporariamente, até que o estado de alta necessidade de potência seja interrompido.

Os veículos elétricos de autonomia estendida (EREV¹⁶) são um tipo especial de PHEV com uma bateria de maior capacidade que propulsiona o veículo no modo de operação CD até que a bateria esteja descarregada, sem qualquer uso do MCI, mesmo em condições de aceleração brusca; exaurida a carga da bateria, o veículo é chaveado para o modo de operação com motor de combustão interna (modo CS), e o mesmo passa a comportar-se como um HEV. Portanto, veículos PHEV consomem gasolina durante o período de descarga da bateria (modo CD), enquanto que veículos EREV não consomem (NOORI; GARDNER; TATARI, 2015).

Como exemplos atuais de veículos PHEV pode-se citar o *Chevrolet Volt*, o *Ford Fusion Energi* e o *Mitsubishi Outlander PHEV*, sendo que o Chevrolet Volt é considerado um veículo EREV.

2.1.2.3 Veículos a célula de combustível (FCV)

Enquanto os veículos elétricos *plug-in* armazenam energia elétrica em uma bateria alocada no veículo para acionar o motor elétrico, os FCV¹⁷ utilizam uma célula de combustível para converter o hidrogênio armazenado no veículo em eletricidade para operar o motor elétrico (DELUCCHI et al., 2014).

De maneira análoga aos veículos convencionais, os FCV podem apresentar autonomia superior a 500 km com um único tanque de hidrogênio e podem ser reabastecidos em menos de cinco minutos (ESTADOS UNIDOS, 2016). Entretanto, como desvantagens, necessitam de infraestrutura de abastecimento própria para o hidrogênio e apresentam custo de aquisição, em média, 2,94 vezes superior aos veículos convencionais a gasolina e 1,32 vezes superior aos BEV (SHAFIEI et al., 2017).

¹⁶ EREV do inglês *Extended Range Electric Vehicle*

¹⁷ FCV do inglês *Fuel Cell Vehicle*

São exemplos atuais de veículos FCV o *Honda Clarity Fuel Cell*, o *Hyundai Tucson Fuel Cell* e o *Toyota Mirai*.

A fim de sintetizar as informações descritas nesta seção, o Quadro 1 apresenta de forma resumida as principais características das diferentes tecnologias automotivas disponíveis atualmente no mercado mundial.

Quadro 1 - Principais características das diferentes tecnologias automotivas disponíveis atualmente no mercado mundial

	ICEV	HEV	BEV	PHEV	FCV
Apresenta motor de combustão	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Apresenta motor elétrico	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Apresenta célula a combustível	Não	Não	Não	Não	Sim
Frenagem regenerativa	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Recarga na rede elétrica	Não	Não	Sim	Sim	Não
Capacidade da bateria	-	Pequena	Grande	Média	Pequena

Fonte: Produção do próprio autor.

No Anexo A são apresentadas as características técnicas de alguns modelos de veículos ICEV, HEV, BEV, PHEV e FCV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017.

2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS NO MUNDO

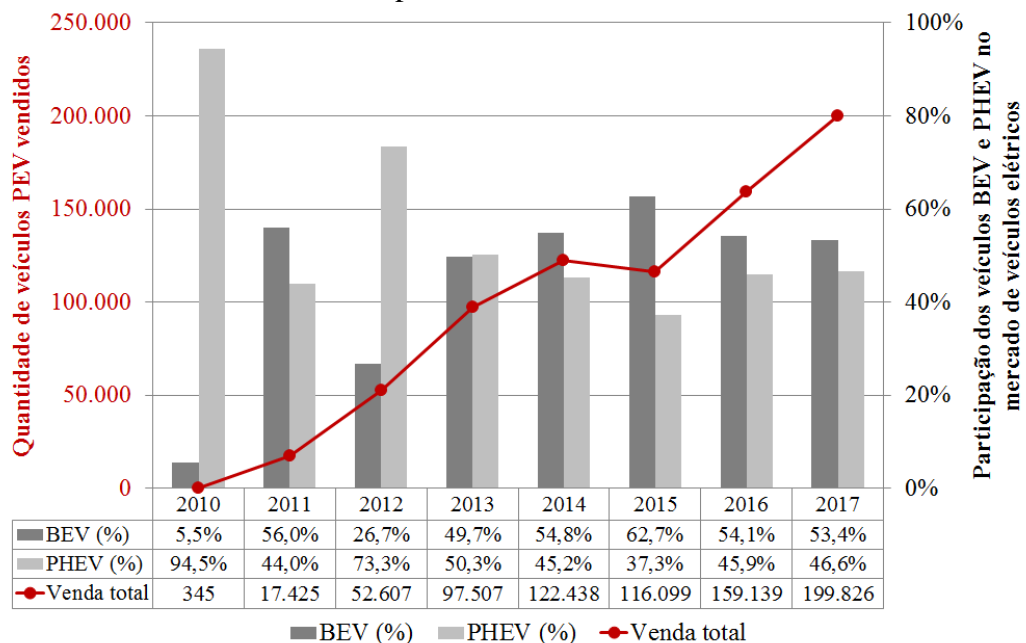
A integração de veículos elétricos nas cidades é uma estratégia bastante promissora para reduzir as emissões de GEE no setor de transporte, principalmente nos grandes centros urbanos, que concentram uma parcela significativa de veículos automotores; no entanto, enquanto o mercado de veículos elétricos continua a crescer, eles ainda representam uma pequena proporção de todos os veículos vendidos no mundo.

Em 2016, havia mais de 1,2 milhão de veículos elétricos na frota global de veículos, com destaque para a China e os Estados Unidos, que representavam os dois maiores mercados em quantidade de veículos vendidos. Em termos de participação relativa no mercado, os maiores valores foram observados na Noruega (23,3%), Holanda (9,7%), Suécia (2,4%), França (1,2%), Reino Unido (1%) e China (1%) (HIGGINS; MOHAMED; FERGUSON, 2017).

2.2.1 O mercado norte-americano

Nos Estados Unidos, o mercado de veículos elétricos começou a deslançar a partir de 2011, com os veículos *Nissan LEAF* e *Chevrolet Volt* sendo responsáveis quase que pela totalidade das vendas apuradas naquele ano. A Figura 2 apresenta a quantidade total de veículos elétricos *plug-in* vendidos nos Estados Unidos no período de 2010 a 2017, bem como a divisão de mercado entre os veículos BEV e PHEV.

Figura 2 - Quantidade de veículos elétricos vendidos e divisão de mercado entre os veículos BEV e PHEV nos Estados Unidos no período de 2010 a 2017



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de INSIDE EVS (2018).

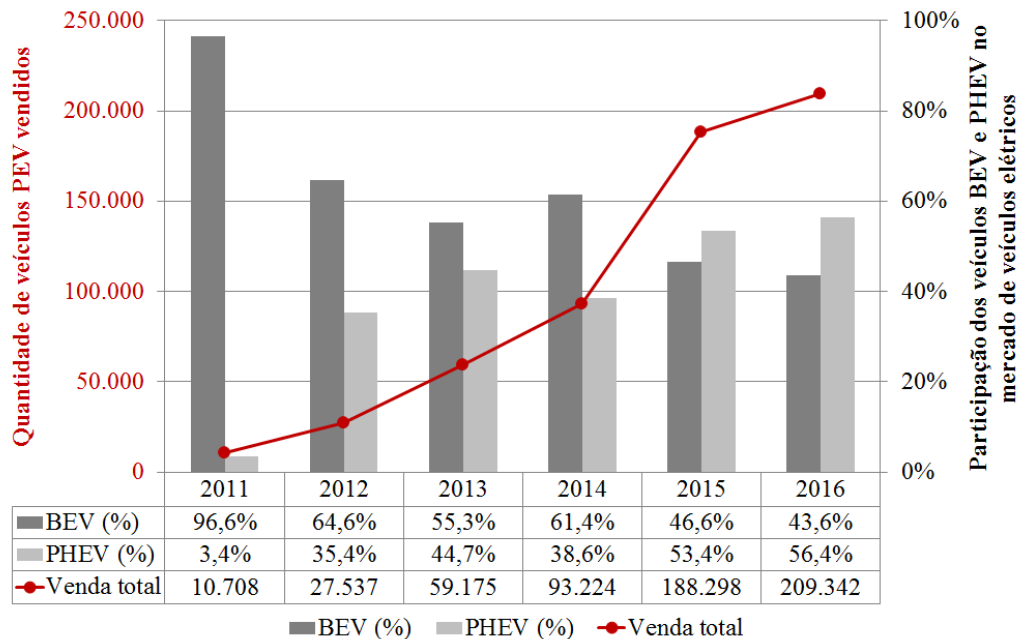
Silvia e Krause (2016) examinaram o impacto que diferentes intervenções políticas poderiam ter na adoção de veículos elétricos a bateria em regiões urbanas dos Estados Unidos, e concluíram que, embora a substituição de veículos convencionais a gasolina por veículos elétricos acarrete benefícios públicos, incluindo a redução da poluição urbana e da emissão de GEE e o aumento da segurança energética, ela não produz benefícios privados equivalentes.

2.2.2 O mercado europeu

Na Europa, o volume de vendas começou a apresentar números significativos a partir do ano de 2011, com os veículos *Mitsubishi i-MiEV*, *Peugeot iOn*, *Citroen C-Zero* e *Nissan LEAF* dividindo as vendas da categoria. A Figura 3 apresenta a quantidade total de veículos

elétricos *plug-in* vendidos na Europa no período de 2011 a 2016, bem como a divisão de mercado entre os veículos BEV e PHEV.

Figura 3 - Quantidade de veículos elétricos vendidos e divisão de mercado entre os veículos BEV e PHEV na Europa no período de 2011 a 2016



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de EAFO (2018).

Bubeck, Tomaschek e Fahl (2016) analisaram o custo total de propriedade (TCO¹⁸) de veículos elétricos de passageiros na Alemanha em 2016. Suas descobertas indicam que, mesmo sem subsídios governamentais, os veículos HEV atualmente são uma opção econômica para uma ampla gama de modelos de veículos e tipos de usuários.

No entanto, de acordo com os autores, a fim de alcançar custos competitivos para os veículos elétricos *plug-in*, seriam necessários incentivos consideráveis ao comprador, variando de cerca de € 8.600 a € 32.400 por veículo, dependendo do tamanho do veículo e do tipo de usuário. Estes números indicam que os incentivos de € 4.000 para BEVs e € 3.000 para PHEVs, adotados pelo governo alemão em maio de 2016, não podem compensar completamente o custo financeiro ao longo da vida útil de tais veículos.

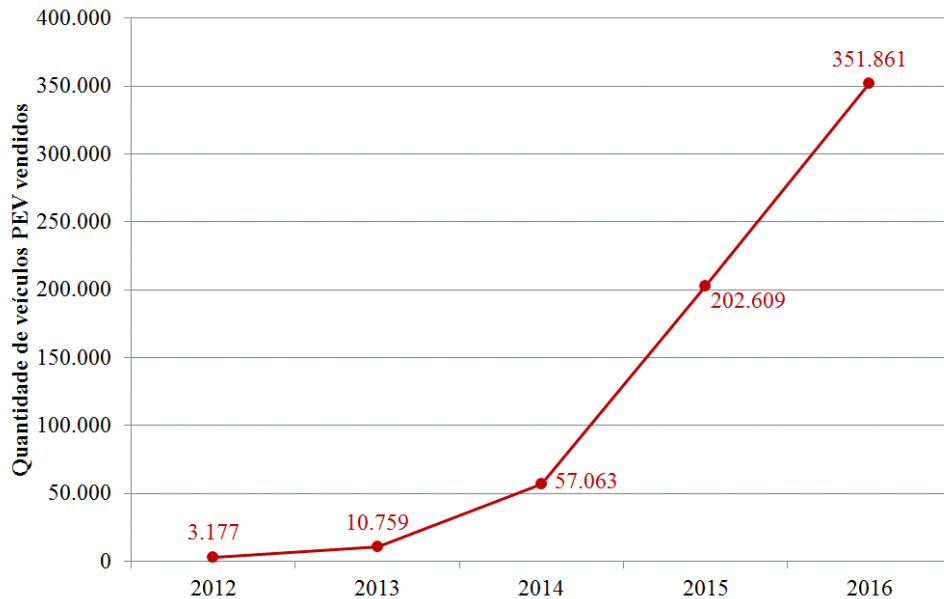
2.2.3 O mercado chinês

Na Figura 4 é exibida a evolução da quantidade total de veículos elétricos *plug-in* vendidos na China no período de 2011 a 2016. O mercado chinês começou a despontar entre

¹⁸ TCO do inglês *Total Cost of Ownership*

os anos de 2012 e 2013, com o veículo *Chery QQ3 EV* liderando o mercado com 36% das vendas, seguido pelo *BYD e6* (23%), *JAC J3 EV* (18%) e *BYD F3 DM* (16%). Em números, o mercado chinês é o maior do mundo desde o ano de 2015, ultrapassando o mercado norte-americano.

Figura 4 - Quantidade de veículos elétricos vendidos na China no período de 2011 a 2016



Fontes: Produção do próprio autor, utilizando dados de EV SALES (2013, 2014, 2015, 2016, 2017).

Wang, Li e Zhao (2017) estudaram como as medidas políticas influenciam a intenção de compra de um PEV na China, incluindo três tipos de ações políticas: ações de incentivo financeiro, ações de disseminação da informação e ações de conveniência. As ações de incentivo financeiro visam reduzir o custo de aquisição do veículo, tais como subsídios diretos, isenção de impostos e isenção do pagamento de pedágio.

As ações de disseminação da informação visam fornecer informações sobre PEVs aos consumidores, como preço, praticidade, confiabilidade, segurança, autonomia, tempo de recarga e duração da bateria, consumo de combustível e desempenho ambiental.

As ações de conveniência objetivam proporcionar conveniência aos consumidores que decidem comprar um PEV, por exemplo, facilitando a construção de infraestrutura de recarga e permitindo que os proprietários de veículos elétricos desfrutem de alguns privilégios, tais como o acesso a faixas exclusivas para veículos com alta ocupação (HOV¹⁹), espaço de estacionamento dedicado e liberação de regras relacionadas à numeração das placas dos veículos.

¹⁹ HOV do inglês *High-Occupancy Vehicle*

Os resultados da pesquisa indicaram que a preocupação ambiental fortalece os efeitos das ações de incentivo financeiro e de conveniência, no entanto, o estudo apontou que a preocupação ambiental dos consumidores desempenha um papel limitado na decisão de compra.

2.3 ANÁLISE ECONÔMICA DA AQUISIÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A análise dos aspectos econômicos da aquisição de um veículo elétrico é determinante na integração de tais veículos no modal rodoviário de qualquer região, haja vista que, sem uma viabilidade econômica aceitável, os consumidores não se sentirão atraídos a adquirir veículos elétricos.

Esta seção tem como objetivo elucidar o desenvolvimento matemático das equações utilizadas no cálculo da viabilidade econômica de aquisição de veículos elétricos por parte dos consumidores, além de expor o resultado da análise econômica para os mercados norte-americano, europeu, chinês e brasileiro.

2.3.1 Equacionamento da análise econômica

O desenvolvimento matemático das equações empregadas na avaliação econômica da aquisição de veículos BEV e PHEV, incluindo os EREV, sob o ponto de vista dos consumidores é apresentado a seguir. A análise econômica é realizada por meio do valor do período de retorno simples (*payback*) e do valor presente líquido (VPL) para cada tecnologia automotiva.

2.3.1.1 Veículos elétricos a bateria (BEV)

O cálculo do valor do período de retorno simples da aquisição de um veículo elétrico a bateria é realizado a partir da equação (1), adaptada de Mi et al. (2016).

$$PB_{BEV} = \frac{CI_{BEV}}{R_{BEV}} \quad (1)$$

sendo,

PB_{BEV} : o período de retorno simples para o BEV [anos]

CI_{BEV} : o custo do investimento no BEV [\\$]

R_{BEV} : a receita anual obtida com o BEV [\$/ano]

Para o desenvolvimento matemático de (1), as seguintes equações são empregadas:

$$R_{BEV} = DTA \cdot (C_{ICEV} - C_{BEV}) + (I_{ICEV} - I_{BEV}) + O_{BEV} \quad (2)$$

$$C_{ICEV} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.ICEV}} \quad (3)$$

$$C_{BEV} = \frac{W_{bat.BEV} \cdot P_{EE}}{AUT_{BEV}} \quad (4)$$

$$AUT_{BEV} = W_{bat.BEV} \cdot AUT_{EE.esp.BEV} \quad (5)$$

sendo,

DTA : a distância total percorrida anual [km/ano]

C_{ICEV} : o custo específico de utilização do veículo convencional por distância percorrida [\$/km]

C_{BEV} : o custo específico de utilização do BEV por distância percorrida [\$/km]

I_{ICEV} : o imposto anual do veículo convencional [\$/ano]

I_{BEV} : o imposto anual do BEV [\$/ano]

O_{BEV} : os outros benefícios financeiros anuais na aquisição do BEV [\$/ano]

P_{comb} : o preço da gasolina [\$/l]

$AUT_{comb.esp.ICEV}$: a autonomia específica do ICEV com gasolina [km/l]

$W_{bat.BEV}$: a energia necessária para recarregar a bateria do BEV [kWh]

P_{EE} : o preço da energia elétrica [\$/kWh]

AUT_{BEV} : a autonomia do BEV [km]

$AUT_{EE.esp.BEV}$: a autonomia específica do BEV [km/kWh]

Utilizando (2), (3), (4) e (5), o valor do período de retorno simples da aquisição de um BEV definido na equação (1) pode ser reescrito na forma da equação (6).

$$PB_{BEV} = \frac{CI_{BEV} \cdot AUT_{comb.esp.ICEV}}{DTA \cdot \left(P_{comb} - \frac{AUT_{comb.esp.ICEV}}{AUT_{EE.esp.BEV}} \cdot P_{EE} \right) + AUT_{comb.esp.ICEV} \cdot (I_{ICEV} - I_{BEV} + O_{BEV})} \quad (6)$$

Com relação ao valor presente líquido na aquisição de um BEV, adapta-se a equação do VPL definida em Orioli e Gangi (2017) para o presente estudo, conforme a equação (7).

$$VPL_{BEV} = \sum_{t=1}^N \frac{R_{BEV,t}}{(1+k)^t} - CI_{BEV} \quad (7)$$

sendo,

VPL_{BEV} : o valor presente líquido para o BEV [\\$]

N : o número total de anos da análise

t : o ano

$R_{BEV,t}$: a receita anual obtida com o BEV no ano t [\\$]

k : a taxa anual de juros [%]

CI_{BEV} : o custo do investimento no BEV [\\$]

2.3.1.2 Veículos elétricos híbridos *plug-in* (PHEV)

A equação (8) é utilizada para o cálculo do valor do período de retorno simples da aquisição de um veículo elétrico híbrido *plug-in*.

$$PB_{PHEV} = \frac{CI_{PHEV}}{R_{PHEV}} \quad (8)$$

sendo,

PB_{PHEV} : o período de retorno simples para o PHEV [anos]

CI_{PHEV} : o custo do investimento no PHEV [\\$]

R_{PHEV} : a receita anual obtida com o PHEV [\$/ano]

Para o desenvolvimento matemático de (8), empregam-se as equações (9) a (13).

$$R_{PHEV} = DTA \cdot (C_{ICEV} - C_{PHEV}) + (I_{ICEV} - I_{PHEV}) + O_{PHEV} \quad (9)$$

$$C_{ICEV} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.ICEV}} \quad (10)$$

$$C_{PHEV.CD} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.PHEV.CD}} + \frac{P_{EE}}{AUT_{EE.esp.PHEV}} \quad (11)$$

$$C_{PHEV.CS} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.PHEV.CS}} \quad (12)$$

$$C_{PHEV} = d_{CD} \cdot C_{PHEV.CD} + d_{CS} \cdot C_{PHEV.CS} \quad (13)$$

sendo,

DTA : a distância total percorrida anual [km/ano]

C_{ICEV} : o custo específico de utilização do veículo convencional por distância percorrida [\$/km]

C_{PHEV} : o custo específico de utilização do PHEV por distância percorrida [\$/km]

I_{ICEV} : o imposto anual do veículo convencional [\$/ano]

I_{PHEV} : o imposto anual do PHEV [\$/ano]

O_{PHEV} : os outros benefícios financeiros anuais na aquisição do PHEV [\$/ano]

P_{comb} : o preço da gasolina [\$/l]

$AUT_{comb.esp.ICEV}$: a autonomia específica do ICEV com gasolina [km/l]

$C_{PHEV.CD}$: o custo específico de utilização do PHEV no modo *charge depleting* por distância percorrida [\$/km]

$AUT_{comb.esp.PHEV.CD}$: a autonomia específica do PHEV com gasolina no modo *charge depleting* [km/l]

P_{EE} : o preço da energia elétrica [\$/kWh]

$AUT_{EE.esp.PHEV}$: a autonomia específica do PHEV com energia elétrica no modo *charge depleting* [km/kWh]

$C_{PHEV.CS}$: o custo específico de utilização do PHEV no modo *charge sustaining* por distância percorrida [\$/km]

$AUT_{comb.esp.PHEV.CS}$: a autonomia específica do PHEV com gasolina no modo *charge sustaining* [km/l]

d_{CD} : o percentual da distância total percorrida anual que o PHEV opera no modo *charge depleting* [%]

d_{CS} : o percentual da distância total percorrida anual que o PHEV opera no modo *charge sustaining* [%]

Utilizando (9), (10), (11), (12) e (13), o valor do período de retorno simples da aquisição de um PHEV definido na equação (8) é reescrito conforme a equação (14).

$$PB_{PHEV} = \frac{CI_{PHEV}}{DTA \cdot \left[P_{comb} \left(\frac{1}{AUT_{comb.esp.ICEV}} - \frac{d_{CD}}{AUT_{comb.esp.PHEV.CD}} - \frac{d_{CS}}{AUT_{comb.esp.PHEV.CS}} \right) - \frac{d_{CD} \cdot P_{EE}}{AUT_{EE.esp.PHEV}} \right] + (I_{ICEV} - I_{PHEV} + O_{PHEV})} \quad (14)$$

Com relação ao valor presente líquido na aquisição de um PHEV, adaptando a equação (7) apresentada anteriormente, tem-se a equação (15).

$$VPL_{PHEV} = \sum_{t=1}^N \frac{R_{PHEV,t}}{(1+k)^t} - CI_{PHEV} \quad (15)$$

sendo,

VPL_{PHEV} : o valor presente líquido para o PHEV [\$]

N : o número total de anos da análise

t : o ano

$R_{PHEV,t}$: a receita anual obtida com o PHEV no ano t [\$]

k : a taxa anual de juros [%]

CI_{PHEV} : o custo do investimento no PHEV [\$]

2.3.1.3 Veículos elétricos de autonomia estendida (EREV)

O valor do período de retorno simples da aquisição de um veículo elétrico de autonomia estendida pode ser calculado a partir da equação (16).

$$PB_{EREV} = \frac{CI_{EREV}}{R_{EREV}} \quad (16)$$

sendo,

PB_{EREV} : o período de retorno simples para o EREV [anos]

CI_{EREV} : o custo do investimento no EREV [\$]

R_{EREV} : a receita anual obtida com o EREV [\$/ano]

As equações apresentadas a seguir são empregadas para o desenvolvimento matemático de (16).

$$R_{EREV} = DTA \cdot (C_{ICEV} - C_{EREV}) + (I_{ICEV} - I_{EREV}) + O_{EREV} \quad (17)$$

$$C_{ICEV} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.ICEV}} \quad (18)$$

$$C_{EREV.CD} = \frac{P_{EE}}{AUT_{EE.esp.EREV}} \quad (19)$$

$$C_{EREV.CS} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.EREV}} \quad (20)$$

$$C_{EREV} = d_{CD} \cdot C_{EREV.CD} + d_{CS} \cdot C_{EREV.CS} \quad (21)$$

sendo,

DTA : a distância total percorrida anual [km/ano]

C_{ICEV} : o custo específico de utilização do veículo convencional por distância percorrida [\$/km]

C_{EREV} : o custo específico de utilização do EREV por distância percorrida [\$/km]

I_{ICEV} : o imposto anual do veículo convencional [\$/ano]

I_{EREV} : o imposto anual do EREV [\$/ano]

O_{EREV} : os outros benefícios financeiros anuais na aquisição do EREV [\$/ano]

P_{comb} : o preço da gasolina [\$/l]

$AUT_{comb.esp.ICEV}$: a autonomia específica do ICEV com gasolina [km/l]

$C_{EREV.CD}$: o custo específico de utilização do EREV no modo *charge depleting* por distância percorrida [\$/km]

P_{EE} : o preço da energia elétrica [\$/kWh]

$AUT_{EE.esp.EREV}$: a autonomia específica do EREV com energia elétrica no modo *charge depleting* [km/kWh]

$C_{EREV.CS}$: o custo específico de utilização do EREV no modo *charge sustaining* por distância percorrida [\$/km]

$AUT_{comb.esp.EREV}$: a autonomia específica do EREV com gasolina no modo *charge sustaining* [km/l]

d_{CD} : o percentual da distância total percorrida anual que o EREV opera no modo *charge depleting* [%]

d_{CS} : o percentual da distância total percorrida anual que o EREV opera no modo *charge sustaining* [%]

Utilizando (17), (18), (19), (20) e (21), o valor do período de retorno simples da aquisição de um EREV definido na equação (16) é reescrito na forma da equação (22):

$$PB_{EREV} = \frac{CI_{EREV}}{DTA \cdot \left[P_{comb} \cdot \left(\frac{1}{AUT_{comb.esp.ICEV}} - \frac{d_{CS}}{AUT_{comb.esp.EREV}} \right) - \frac{d_{CD} \cdot P_{EE}}{AUT_{EE.esp.EREV}} \right] + (I_{ICEV} - I_{EREV} + O_{EREV})} \quad (22)$$

Com relação ao valor presente líquido na aquisição de um EREV, adaptando a equação (7) apresentada anteriormente, tem-se a equação (23):

$$VPL_{EREV} = \sum_{t=1}^N \frac{R_{EREV,t}}{(1+k)^t} - CI_{EREV} \quad (23)$$

sendo,

VPL_{EREV} : o valor presente líquido para o EREV [\$]

N : o número total de anos da análise

t : o ano

$R_{EREV,t}$: a receita anual obtida com o EREV no ano t [\$]

k : a taxa anual de juros [%]

CI_{EREV} : o custo do investimento no EREV [\$]

2.3.2 Resultados da análise econômica

Nesta seção, são abordados os resultados da análise econômica da aquisição de veículos BEV e PHEV para consumidores dos mercados norte-americano, europeu, chinês e brasileiro. Ao final da exposição dos resultados nos quatro mercados considerados, faz-se uma comparação dos resultados dos mercados norte-americano, europeu e chinês, buscando verificar se existem similaridades, boas práticas ou quaisquer outros fatores que possam ter sido relevantes na introdução dos veículos elétricos nos mercados supracitados.

2.3.2.1 Estados Unidos

A Tabela 1 exibe os preços oficiais de compra de três veículos elétricos selecionados nos Estados Unidos no ano de 2014, além dos preços de veículos convencionais similares aos três veículos elétricos analisados. Os veículos escolhidos representaram 50,86% do total de veículos elétricos vendidos nos Estados Unidos no ano de 2014, sendo que o Nissan LEAF foi responsável por 45,01% das vendas de veículos BEV, enquanto que, dentre os veículos PHEV, o Chevrolet Volt e o Toyota Prius PHV representaram juntos 57,94% do total de vendas no país (INSIDE EVS, 2018).

Tabela 1 - Preços de veículos elétricos e veículos convencionais similares nos Estados Unidos no ano de 2014

Ano de 2014	Nissan LEAF	Chevrolet Volt	Toyota Prius PHV
Preço oficial de compra do veículo elétrico (US\$) ¹	32.000	34.185	32.448
Preço oficial de compra do ICEV similar ao VE (US\$) ^{1,2}	17.815	21.253	21.340
Diferença de preços antes dos incentivos (US\$) ³	14.185	12.933	11.108

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017a).

² Veículos ICEV similares considerados: Nissan Sentra, Chevrolet Cruze e Honda Civic.

³ Nota: Valor da diferença de preços entre o veículo elétrico e o veículo convencional similar, sem quaisquer incentivos financeiros.

A Tabela 2 apresenta os valores percentuais de participação de mercado dos modelos de veículos BEV e PHEV novos comercializados nos Estados Unidos no ano de 2014.

Tabela 2 - Participação de mercado dos modelos de veículos BEV e PHEV novos comercializados nos Estados Unidos no ano de 2014

Veículo BEV	Participação de mercado dos veículos BEV (%)	Veículo PHEV	Participação de mercado dos veículos PHEV (%)
Nissan LEAF	45,01%	Chevrolet Volt	33,98%
Tesla Model S	24,87%	Toyota Prius PHV	23,97%
BMW i3	9,08%	Ford Fusion Energi	20,87%
Fiat 500e	7,65%	Ford C-Max Energi	15,24%
Smart ED	3,87%	Cadillac ELR	2,37%
Ford Focus Electric	2,93%	Porsche Panamera S-E	1,59%
Toyota RAV4 EV	1,76%	BMW i8	1,00%
Chevrolet Spark EV	1,71%	Honda Accord PHV	0,81%
Outros	3,12%	Porsche Cayenne S-E	0,18%
TOTAL	100,00%	TOTAL	100,00%

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de INSIDE EVS (2018).

A Tabela 3 apresenta os valores dos incentivos financeiros concedidos pelos governos federal e estadual na compra dos três veículos elétricos avaliados em diversas cidades norte-americanas no ano de 2014. Tais localidades foram escolhidas por representarem importantes cidades do país e em virtude de apresentarem disponibilidade de todos os dados necessários para a análise econômica em questão.

Tabela 3 - Incentivos financeiros concedidos pelos governos federal e estadual na compra de veículos elétricos nos Estados Unidos no ano de 2014

Ano de 2014	Crédito fiscal federal do veículo elétrico (US\$) ¹			Descontos e isenções fiscais estaduais (US\$) ²		
	Nissan LEAF	Chevrolet Volt	Toyota Prius PHV	Nissan LEAF	Chevrolet Volt	Toyota Prius PHV
Atlanta	7.500	7.500	2.500	4.900	0	0
Boston	7.500	7.500	2.500	2.500	2.500	1.500
Chicago	7.500	7.500	2.500	2.898	4.000	0
Houston	7.500	7.500	2.500	2.500	2.500	0
Los Angeles	7.500	7.500	2.500	2.500	1.500	1.500
Miami	7.500	7.500	2.500	0	0	0
New York City	7.500	7.500	2.500	0	0	0
San Francisco	7.500	7.500	2.500	2.500	1.500	1.500
Seattle	7.500	7.500	2.500	1.593	1.735	1.947
Washington	7.500	7.500	2.500	0	0	0

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: INTERNAL REVENUE SERVICE (2017).

² Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017b).

A partir dos dados das Tabelas 1 e 3, calculam-se os valores dos custos de investimento na aquisição dos três veículos elétricos em cada uma das dez cidades norte-americanas no ano de 2014, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Custo do investimento na aquisição de um veículo elétrico em cidades norte-americanas no ano de 2014

Custo do investimento (US\$)	Nissan LEAF CI_{BEV}	Chevrolet Volt CI_{EREV}	Toyota Prius PHV CI_{PHEV}
Atlanta	1.785	5.433	8.608
Boston	4.185	2.933	7.108
Chicago	3.787	1.433	8.608
Houston	4.185	2.933	8.608
Los Angeles	4.185	3.933	7.108
Miami	6.685	5.433	8.608
New York City	6.685	5.433	8.608
San Francisco	4.185	3.933	7.108
Seattle	5.093	3.698	6.661
Washington	6.685	5.433	8.608

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores de autonomia específica dos veículos elétricos Nissan LEAF, Chevrolet Volt e Toyota Prius PHV, assim como de seus respectivos veículos convencionais similares, vendidos nos Estados Unidos no ano de 2014, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares vendidos nos Estados Unidos no ano de 2014

Valores de autonomia específica dos veículos avaliados com gasolina e/ou energia elétrica	Símbolo	Nissan LEAF	Chevrolet Volt	Toyota Prius PHV
Aut. especif. do BEV com energia elétrica (km/kWh)	$AUT_{EE,esp,BEV}$	5,37	-	-
Aut. especif. do EREV com gasolina no modo CS (km/l)	$AUT_{comb,esp,EREV}$	-	15,74	-
Aut. especif. do EREV com energia elétrica no modo CD (km/kWh)	$AUT_{EE,esp,EREV}$	-	4,60	-
Aut. especif. do PHEV com gasolina no modo CD (km/l)	$AUT_{comb,esp,PHEV,CD}$	-	-	212,68
Aut. especif. do PHEV com gasolina no modo CS (km/l)	$AUT_{comb,esp,PHEV,CS}$	-	-	21,27
Aut. especif. do PHEV com energia elétrica no modo CD (km/kWh)	$AUT_{EE,esp,PHEV}$	-	-	5,55
Aut. especif. do ICEV similar ao VE com gasolina (km/l)	$AUT_{comb,esp,ICEV}$	14,46	11,48	14,04

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ESTADOS UNIDOS (2017a).

Os preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em cada uma das cidades norte-americanas avaliadas são apresentados na Tabela 6. As diferenças nos valores dos impostos anuais entre o Nissan LEAF, o Chevrolet Volt e o Toyota Prius PHV e seus respectivos veículos convencionais similares no ano de 2014 são exibidas na Tabela 7.

Tabela 6 - Preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em cidades norte-americanas

Ano de 2014	Preço da energia elétrica ¹ PEE (US\$ ¢/kWh)	Preço da gasolina ² Pcomb (US\$/l)
Atlanta	9,85	0,89
Boston	16,18	0,90
Chicago	10,53	0,94
Houston	11,70	0,83
Los Angeles	18,92	1,00
Miami	11,06	0,92
New York City	15,97	0,91
San Francisco	12,01	1,00
Seattle	11,49	0,95
Washington	11,80	0,91

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ De Atlanta a Washington foram utilizadas, respectivamente, as seguintes Fontes: PSC (2016); EVERSOURCE (2016); COMMONWEALTH (2016); CENTERPOINT (2016); LADWP (2016); FPL (2016); CON EDISON (2016); PG&E (2016); SEATTLE (2016); PEPCO (2016).

² Fontes: U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2017); para as cidades de Atlanta e Washington adicionalmente foi utilizada a Fonte: GAS BUDDY (2016).

Tabela 7 - Diferenças nos valores dos impostos anuais entre veículos elétricos e seus respectivos veículos ICEV similares em 2014 nos Estados Unidos

Diferença de impostos anuais entre o ICEV similar e o VE (US\$/ano)	Nissan LEAF $I_{ICEV} - I_{BEV}$	Chevrolet Volt $I_{ICEV} - I_{EREV}$	Toyota Prius PHV $I_{ICEV} - I_{PHEV}$
Atlanta	23	23	23
Boston	0	0	0
Chicago	11	0	0
Houston	20	20	20
Los Angeles	0	26	26
Miami	0	0	0
New York City	13	13	13
San Francisco	0	26	26
Seattle	-73	11	11
Washington	-13	-13	-13

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ICCT (2015a).

Além dos incentivos quantitativos citados nas Tabelas 3 e 7, outros benefícios são previstos para os veículos elétricos em algumas cidades norte-americanas, tais como o acesso a faixas exclusivas para veículos com alta ocupação (HOV) e a disponibilização de pontos de recarga gratuitos para os veículos elétricos. Em estudo realizado pelo ICCT (2015a), valores monetários anuais médios foram atribuídos a cada um destes benefícios, de acordo com a cidade e a tecnologia de veículo elétrico, sendo que o resultado de tal estudo é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Outros benefícios financeiros anuais concedidos aos veículos elétricos no ano de 2014 em cidades norte-americanas

Outros benefícios financeiros anuais concedidos aos VE (US\$/ano)	Nissan LEAF O_{BEV}	Chevrolet Volt O_{EREV}	Toyota Prius PHV O_{PHEV}
Atlanta	181	174	174
Boston	11	0	0
Chicago	28	6	6
Houston	0	0	0
Los Angeles	416	390	390
Miami	67	67	67
New York City	58	33	33
San Francisco	330	304	304
Seattle	12	0	0
Washington	50	50	50

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ICCT (2015a).

Nesta tese, com base em diversas pesquisas (CETESB²⁰, 2009 apud DIAS et al., 2014; NHTS, 2012; PASAOGLU et al., 2014; WU et al., 2012), considera-se uma distância total percorrida anual (*DTA*) de 20.000 km por veículo.

Estudos realizados por Lin et al. (2012) apontam que a distribuição Gama é a mais indicada para utilização em pesquisas envolvendo a distância diária percorrida por veículos PHEV. Com base na distribuição Gama, a Tabela 9 apresenta as premissas dos valores percentuais da distância total percorrida anual nos modos de operação *charge depleting* e *charge sustaining* para os três veículos analisados no mercado norte-americano. O detalhamento do método utilizado para obtenção dos valores exibidos na referida tabela é descrito no Apêndice A.

Tabela 9 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados nos Estados Unidos

Percentual da distância total percorrida anual em cada modo de operação	Símbolo	Nissan LEAF (%)	Chevrolet Volt (%)	Toyota Prius PHV (%)
Operação no modo <i>charge depleting</i>	d_{CD}	100%	64%	24%
Operação no modo <i>charge sustaining</i>	d_{CS}	0%	36%	76%

Fonte: Produção do próprio autor.

Conforme observado na Tabela 9 e mencionado na seção 2.1.2.2.1 deste trabalho, os veículos BEV, tais como o Nissan LEAF, operam somente no modo *charge depleting*.

Utilizando os dados das Tabelas 1 a 9 e as equações (6), (7), (14), (15), (22) e (23), calculam-se os valores do período de retorno simples e do valor presente líquido na aquisição dos veículos Nissan LEAF, Chevrolet Volt e Toyota Prius PHV no ano de 2014 nas cidades norte-americana selecionadas, conforme apresentado na Tabela 10.

Com relação às cidades de Chicago e Houston, na Tabela 10 são exibidos os valores do período de retorno simples e do VPL apenas para os veículos elétricos híbridos *plug-in* Chevrolet Volt e Toyota Prius PHV; a justificativa é que, devido à baixa disponibilidade de modelos de veículos BEV à venda para os consumidores nestas duas cidades, qualquer comparação com outras cidades seria inconsistente, uma vez que apenas três modelos de veículos BEV tiveram vendas acima de vinte unidades em Chicago e Houston no ano de 2014 (ICCT, 2015a), de forma que a amostra é pouco significativa.

²⁰ CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2008**. São Paulo: Littera Conteúdos Editoriais, 2009. 340 p.

Tabela 10 - Valores do período de retorno simples e do valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades norte-americanas

Ano de 2014	Período de retorno simples - PB (anos)			Valor presente líquido - VPL (US\$) ¹		
	Nissan LEAF	Chevrolet Volt	Toyota Prius PHV	Nissan LEAF	Chevrolet Volt	Toyota Prius PHV
Atlanta	2	5	12	4.565	611	-4.392
Boston	6	4	15	-303	1.062	-4.321
Chicago	-	2	16	-	3.809	-5.342
Houston	-	4	18	-	1.562	-5.704
Los Angeles	4	3	7	2.323	3.487	-1.381
Miami	7	6	14	-1.172	22	-5.060
New York City	9	8	17	-2.314	-1.527	-5.641
San Francisco	3	3	8	3.343	2.974	-1.895
Seattle	6	4	11	-183	2.186	-3.157
Washington	8	6	16	-1.598	-370	-5.319

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Nota: Para o cálculo do VPL, foi considerado um horizonte de seis anos na análise e uma taxa anual de juros de 0,25% no ano de 2014 em cidades norte-americanas. Fonte: TRADING ECONOMICS (2017).

Neste ponto, é interessante verificar a relação existente entre os valores do VPL de cada tecnologia automotiva com a sua respectiva participação de mercado. A Tabela 11 exibe a participação dos veículos PEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014, estratificados por BEV e PHEV, para as cidades norte-americanas selecionadas.

Tabela 11 - Participação dos veículos PEV, BEV e PHEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014 em cidades norte-americanas

Cidade	Sigla	Participação no mercado de veículos leves (%)		
		BEV	PHEV	PEV
Atlanta	ATL	3,3%	0,2%	3,5%
Boston	BOS	0,2%	0,3%	0,5%
Chicago	CHI	0,2%	0,2%	0,4%
Houston	HOU	0,2%	0,1%	0,3%
Los Angeles	LA	1,2%	1,7%	2,9%
Miami	MIA	0,3%	0,2%	0,5%
New York City	NYC	0,2%	0,3%	0,5%
San Francisco	SF	3,2%	2,4%	5,5%
Seattle	SEA	1,7%	0,6%	2,3%
Washington	WAS	0,3%	0,4%	0,6%

Fontes: Produção do próprio autor, utilizando dados de ICCT (2015b) para os veículos BEV e ICCT (2015a) para veículos PHEV e PEV.

Utilizando os dados de VPL da Tabela 10 e os valores de participação de mercado das Tabelas 2 e 11, são calculados os valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV e PHEV no ano de 2014, além do VPL médio ponderado para os veículos elétricos *plug-in*, sendo que tais resultados são exibidos na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV, PHEV e PEV no ano de 2014 em cidades norte-americanas

Cidade	Sigla	Valor médio do VPL (US\$)		
		BEV ¹	PHEV ²	PEV ³
Atlanta	ATL	4.565	-1.459	4.251
Boston	BOS	-303	-1.164	-761
Chicago	CHI	-	24	-
Houston	HOU	-	-1.443	-
Los Angeles	LA	2.323	1.474	1.828
Miami	MIA	-1.172	-2.080	-1.547
New York City	NYC	-2.314	-3.229	-2.903
San Francisco	SF	3.343	960	2.320
Seattle	SEA	-183	-24	-143
Washington	WAS	-1.598	-2.417	-2.060

Fonte: Produção do próprio autor.

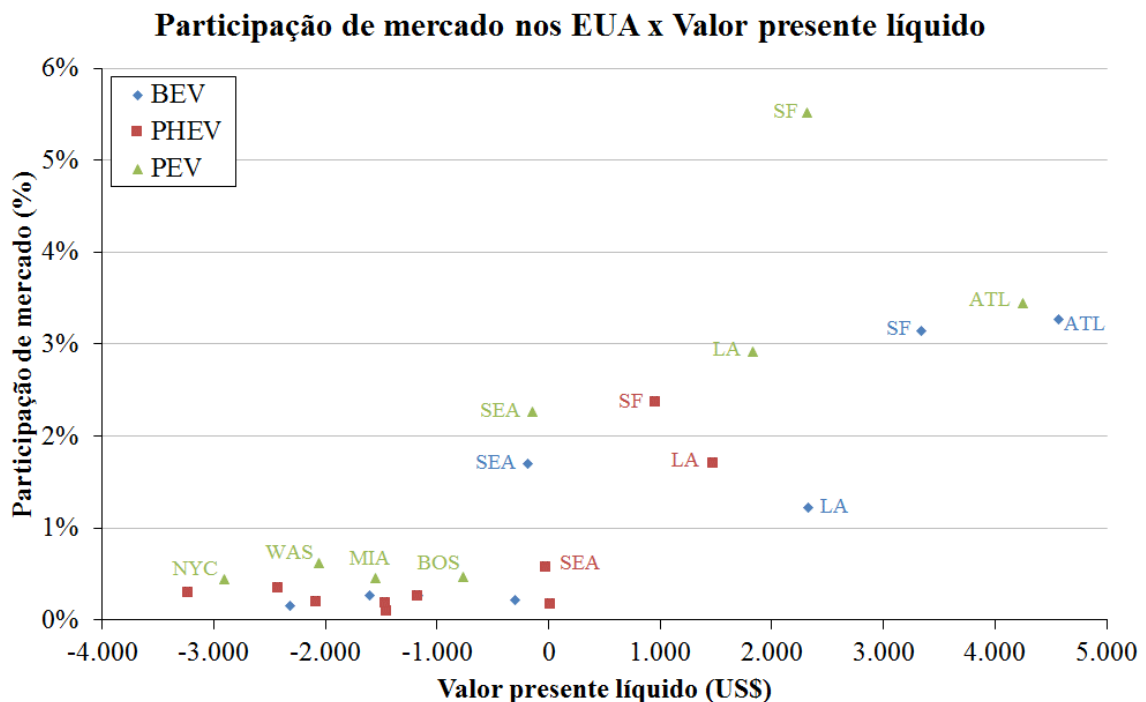
¹ Nota: VPL do Nissan LEAF na Tabela 10.

² Nota: Média ponderada do VPL do Chevrolet Volt e do Toyota Prius PHV na Tabela 10, utilizando os pesos da Tabela 2.

³ Nota: Média ponderada do VPL dos veículos BEV e PHEV na Tabela 12, utilizando os pesos da Tabela 11.

A Figura 5 apresenta a relação entre a participação dos veículos elétricos no mercado de veículos leves novos e o valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos em cidades norte-americanas no ano de 2014.

Figura 5 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades norte-americanas



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Tabelas 11 e 12.

Na Figura 5, observa-se claramente uma relação direta entre a participação dos veículos elétricos no mercado e o grau de viabilidade econômica na aquisição de tais veículos por parte dos consumidores norte-americanos no ano de 2014, representada pelo VPL.

2.3.2.2 Europa

Os modelos de veículos selecionados para a análise do mercado europeu são o Nissan LEAF, responsável por 25,59% do total de veículos BEV vendidos na Europa no ano de 2014, e o Mitsubishi Outlander PHEV, que respondeu por 45,53% das vendas de veículos PHEV (EAFO, 2018).

A Tabela 13 apresenta os preços finais de compra dos dois veículos elétricos considerados em cidades selecionadas da Europa no ano de 2014, já incluídos os incentivos financeiros governamentais, além dos preços de veículos convencionais similares aos veículos elétricos analisados. As cidades foram escolhidas por representarem importantes cidades da Europa e por apresentarem disponibilidade de todos os dados necessários para a análise econômica.

Tabela 13 - Preços finais de veículos elétricos e veículos convencionais similares no ano de 2014 em cidades europeias

Ano de 2014	Preço final de compra do VE (US\$) ¹		Preço final de compra do ICEV similar ao VE (US\$) ²	
	Nissan LEAF	Mitsubishi Outlander PHEV	Nissan Sentra	Mitsubishi Outlander
Oslo	30.500	38.216	37.000	41.614
Amsterdã	37.500	26.877	36.000	27.106
Londres	27.500	27.641	20.500	23.861
Berlim	35.000	30.618	20.250	25.006
Paris	28.000	30.542	20.250	23.136

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fontes: ICCT (2016a) para o Nissan LEAF; ICCT (2016b) para o Mitsubishi Outlander PHEV.

² Fontes: ICCT (2016a) para o Nissan Sentra; ICCT (2016b) para o Mitsubishi Outlander.

A partir dos preços da Tabela 13, os valores dos custos de investimento na aquisição dos dois veículos elétricos nas cinco cidades europeias no ano de 2014 são calculados, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Custo do investimento na aquisição de um veículo elétrico em cidades europeias no ano de 2014

Custo do investimento (US\$)	Nissan LEAF CI_{BEV}	Mitsubishi Outlander PHEV CI_{PHEV}
Oslo	-6.500	-3.398
Amsterdan	1.500	-229
Londres	7.000	3.780
Berlim	14.750	5.612
Paris	7.750	7.406

Fonte: Produção do próprio autor.

Não foram identificados, na literatura consultada, incentivos relacionados ao pagamento de impostos anuais de veículos elétricos na Europa no ano de 2014; desta forma, nenhum incentivo desta natureza é considerado neste trabalho.

Os valores de autonomia específica dos veículos elétricos Nissan LEAF e Mitsubishi Outlander PHEV, assim como de seus respectivos veículos convencionais similares, vendidos na Europa no ano de 2014, são exibidos na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares vendidos na Europa no ano de 2014

Valores de autonomia específica dos veículos avaliados com gasolina e/ou energia elétrica	Símbolo	Nissan LEAF	Mitsubishi Outlander PHEV
Auton. especif. do BEV (km/kWh) ¹	$AUT_{EE,esp,BEV}$	5,37	-
Auton. especif. do PHEV com gasolina no modo CD (km/l) ²	$AUT_{comb,esp,PHEV,CD}$	-	52,63
Auton. especif. do PHEV com gasolina no modo CS (km/l) ³	$AUT_{comb,esp,PHEV,CS}$	-	16,16
Auton. especif. do PHEV com energia elétrica no modo CD (km/kWh) ⁴	$AUT_{EE,esp,PHEV}$	-	3,42
Auton. especif. do ICEV similar ao VE com gasolina (km/l) ¹	$AUT_{comb,esp,ICEV}$	14,46	11,06

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017a).

² Fonte: NEGÓCIOS (2014).

³ Fonte: AUTOCAR (2017).

⁴ Fonte: ZEEV (2017) e AUTOCAR (2017).

Os preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina²¹ no ano de 2014 nas cidades europeias avaliadas são apresentados na Tabela 16.

²¹ As seguintes taxas de câmbio são empregadas para os preços da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014: US\$ 1,00 = € 0,76 = £ 0,61 = kr 5,68

Tabela 16 - Preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em cidades europeias

Ano de 2014	Preço da energia elétrica ¹ P _{EE} (US\$ ¢/kWh)	Preço da gasolina ² P _{comb} (US\$/l)
Oslo	21,70	2,38
Amsterdã	23,27	2,17
Londres	25,74	2,06
Berlim	39,00	1,97
Paris	20,99	1,93

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: EUROSTAT (2016).

² Fonte: BLOOMBERG (2016).

Na Tabela 17 são exibidas as premissas dos valores percentuais da distância total percorrida anual nos modos de operação *charge depleting* e *charge sustaining* para os dois veículos analisados. O detalhamento do método utilizado para obtenção dos valores apresentados na referida tabela é descrito no Apêndice A.

Tabela 17 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados na Europa

Percentual da distância total percorrida anual em cada modo de operação	Símbolo	Nissan LEAF (%)	Mitsubishi Outlander PHEV (%)
Operação no modo <i>charge depleting</i>	d _{CD}	100%	49%
Operação no modo <i>charge sustaining</i>	d _{CS}	0%	51%

Fonte: Produção do próprio autor.

Conforme constatado na Tabela 17 e mencionado na seção 2.1.2.2.1 deste trabalho, os veículos BEV, tais como o Nissan LEAF, operam somente no modo *charge depleting*.

Utilizando os dados das Tabelas 13 a 17 e as equações (7) e (15), calculam-se os valores do valor presente líquido na aquisição dos veículos Nissan LEAF e Mitsubishi Outlander PHEV no ano de 2014 nas cidades europeias selecionadas. Com o intuito de que os valores de VPL das cidades sejam posteriormente comparados entre si, os valores de VPL são corrigidos pela *paridade do poder de compra*²² (PPP) da moeda de cada cidade analisada. Os resultados do VPL, corrigidos pela paridade do poder de compra, são mostrados na Tabela 18.

²² Paridade do poder de compra do inglês *Purchasing power parity*

Tabela 18 - Valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades europeias

Ano de 2014	Valor presente líquido - VPL (US\$) ^{1,2}	
	Nissan LEAF	Mitsubishi Outlander PHEV
Oslo	13.998	9.016
Amsterdã	11.215	9.074
Londres	3.549	3.353
Berlim	-7.163	-625
Paris	3.471	394

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Paridade do poder de compra no ano de 2014 de acordo com OECD (2017) para correção dos valores do VPL: US\$ 1,00 = € 0,80 = £ 0,70 = kr 9,30.

² Para o cálculo do VPL, foi considerado um horizonte de seis anos na análise e as seguintes taxas anuais de juros para cidades europeias no ano de 2014: 1,5% para Oslo; 0,5% para Londres; 0,15% para Amsterdã, Berlim e Paris. Fonte: TRADING ECONOMICS (2017).

A Tabela 19 apresenta a participação dos veículos PEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014, estratificados por BEV e PHEV, nas cidades europeias selecionadas.

Tabela 19 - Participação dos veículos PEV, BEV e PHEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014 em cidades europeias

Cidade	Sigla	Participação no mercado de veículos leves (%)		
		BEV	PHEV	PEV
Oslo	OSL	18,3%	1,7%	20,0%
Amsterdã	AMS	1,0%	3,4%	4,4%
Londres	LON	0,5%	0,5%	0,9%
Berlim	BER	0,2%	0,1%	0,3%
Paris	PAR	0,9%	0,2%	1,1%

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ICCT (2016b).

Utilizando os dados de VPL da Tabela 18 e os valores de participação de mercado da Tabela 19, os valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos elétricos *plug-in* no ano de 2014 são calculados, conforme exibido na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV, PHEV e PEV no ano de 2014 em cidades europeias

Cidade	Sigla	Valor médio do VPL (US\$)		
		BEV ¹	PHEV ²	PEV ³
Oslo	OSL	13.998	9.016	13.564
Amsterdam	AMS	11.215	9.074	9.556
Londres	LON	3.549	3.353	3.451
Berlim	BER	-7.163	-625	-5.638
Paris	PAR	3.471	394	3.023

Fonte: Produção do próprio autor.

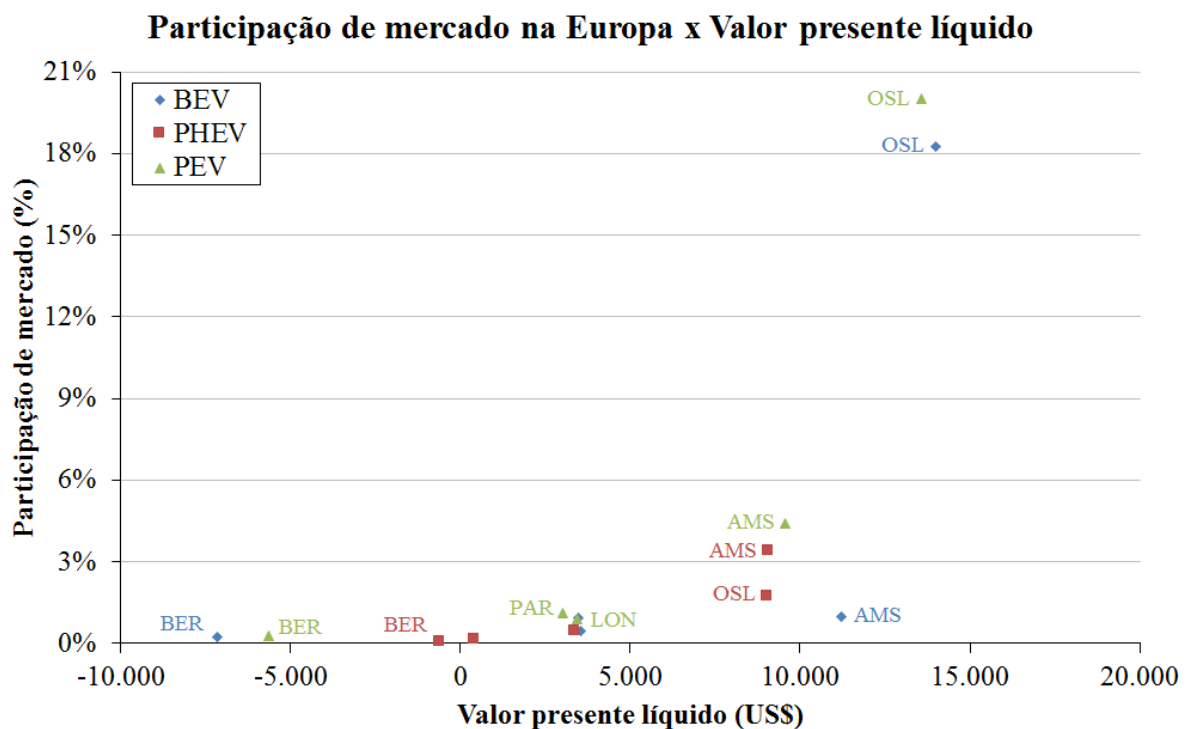
¹ Nota: VPL do Nissan LEAF na Tabela 18.

² Nota: VPL do Mitsubishi Outlander PHEV na Tabela 18.

³ Nota: Média ponderada do VPL dos veículos BEV e PHEV na Tabela 20, utilizando os pesos da Tabela 19.

A Figura 6 apresenta a relação entre a participação dos veículos elétricos no mercado de veículos leves novos e o valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos em cidades europeias no ano de 2014. Na figura, constata-se de maneira evidente uma relação direta entre a participação dos veículos elétricos no mercado e o grau de viabilidade econômica na aquisição de tais veículos por parte dos consumidores europeus no ano de 2014, representada pelo VPL corrigido pela paridade do poder de compra.

Figura 6 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades europeias



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Tabelas 19 e 20.

2.3.2.3 China

A Tabela 21 apresenta os preços oficiais de compra de três veículos elétricos selecionados na China no ano de 2014, além dos preços de veículos convencionais similares aos três veículos elétricos analisados²³.

Tabela 21 - Preços de veículos elétricos e veículos convencionais similares na China no ano de 2014

Ano de 2014	Chery QQ3 EV	Zotye Zhidou E20	BYD Qin
Preço oficial de compra do veículo elétrico (US\$) ¹	8.599	17.720	34.169
Preço oficial de compra do ICEV similar ao VE (US\$) ^{1,2}	6.498	5.212	16.270
Diferença de preços antes dos incentivos (US\$) ³	2.101	12.508	17.899

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: CHINA AUTO WEB (2016).

² Veículos ICEV similares considerados: Chery QQ, Zotye Z100 e BYD F5 Suri.

³ Nota: Valor da diferença de preços entre o veículo elétrico e o veículo convencional similar, sem quaisquer incentivos financeiros.

Os veículos escolhidos representaram 52,49% do total de veículos elétricos vendidos na China no ano de 2014, sendo que o Chery QQ3 EV em conjunto com o Zotye Zhidou E20 foram responsáveis por 36,92% das vendas de veículos BEV, enquanto que, dentre os veículos PHEV, o BYD Qin atingiu a marca de 92,92% do total de vendas no país (EV SALES, 2015). Os valores percentuais de participação de mercado dos modelos de veículos BEV e PHEV novos comercializados na China no ano de 2014 são exibidos na Tabela 22.

Tabela 22 - Participação de mercado dos modelos de veículos BEV e PHEV novos comercializados na China no ano de 2014

Veículo BEV	Participação de mercado dos veículos BEV (%)	Veículo PHEV	Participação de mercado dos veículos PHEV (%)
Kandi EV	24,33%	BYD Qin	92,92%
Chery QQ3 EV	19,10%	SAIC Roewe e550 PHEV	6,30%
Zotye Zhidou E20	17,82%	BMW i8	0,52%
BAIC E150 EV e EV200	12,71%	Porsche Panamera Plug-In	0,25%
BYD e6	8,64%	TOTAL	100,00%
Tesla Model S	6,07%		
Geely-Kandi Panda EV	3,12%		
JAC iev	2,31%		
Dongfeng Nissan Venucia E30	1,41%		
Chery eQ	1,32%		
Brilliance Zinoro 1E	0,75%		
Outros	2,44%		
TOTAL	100,00%		

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de EV SALES (2015).

²³ A seguinte taxa de câmbio é empregada para as cidades chinesas no ano de 2014: US\$ 1,00 = ¥ 6,14

A Tabela 23 apresenta os valores dos incentivos financeiros concedidos pelos governos federal e municipal na compra dos três veículos elétricos avaliados nas cidades de Pequim e Xangai no ano de 2014; somente estas duas cidades chinesas são avaliadas neste estudo, haja vista a dificuldade na obtenção de informações acerca do mercado chinês de veículos elétricos.

Tabela 23 - Incentivos financeiros concedidos pelos governos federal e municipal na compra de veículos elétricos na China no ano de 2014

Ano de 2014	Subsídio federal do veículo elétrico (US\$) ¹			Subsídios municipais do veículo elétrico (US\$) ²		
	Chery QQ3 EV	Zotye Zhidou E20	BYD Qin	Chery QQ3 EV	Zotye Zhidou E20	BYD Qin
Pequim	0	5.700	5.700	0	1.388	0
Xangai	0	5.700	5.700	0	0	16.287

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Hao et al. (2014).

² Fontes: Xinsheng (2014) e ICCT (2016a) para Pequim; Hao et al. (2014), EV Research (2013) e Inside EVS (2014) para Xangai.

A partir dos dados das Tabelas 21 e 23, os valores dos custos de investimento na aquisição dos três veículos elétricos em Pequim e Xangai no ano de 2014 são calculados, conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Custo do investimento na aquisição de um veículo elétrico em cidades chinesas no ano de 2014

Custo do investimento (US\$)	Chery QQ3 EV CI_{BEV}	Zotye Zhidou E20 CI_{EREV}	BYD Qin CI_{PHEV}
Pequim	2.101	5.420	12.199
Xangai	2.101	6.808	-4.088

Fonte: Produção do próprio autor.

Não foram identificados, na literatura consultada, incentivos relacionados ao pagamento de impostos anuais de veículos elétricos em Pequim e Xangai no ano de 2014; desta forma, nenhum incentivo desta natureza é considerado neste trabalho.

Os valores de autonomia específica dos veículos elétricos Chery QQ3 EV, Zotye Zhidou E20 e BYD Qin, assim como de seus respectivos veículos convencionais similares, vendidos na China no ano de 2014, são mostrados na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares vendidos na China no ano de 2014

Valores de autonomia específica dos veículos avaliados com gasolina e/ou energia elétrica	Símbolo	Chery	Zotye	BYD
		QQ3 EV	Zhidou E20	Qin
Auton. especif. do BEV (km/kWh) ¹	AUT _{EE,esp.BEV}	5,81	7,56	-
Auton. especif. do EREV com gasolina no modo CS (em km/l) ²	AUT _{comb,esp.EREV}	-	-	16,95
Auton. especif. do EREV com energia elétr. no modo CD (km/kWh) ²	AUT _{EE,esp.EREV}	-	-	5,00
Auton. especif. do ICEV similar ao VE com gasolina (km/l) ³	AUT _{comb,esp.ICEV}	19,61	19,23	16,95

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fontes: CHINA AUTO WEB (2016) para o Chery QQ3 EV; Marklines (2014) e CHINA AUTO WEB (2016) para o Zotye Zhidou E20.

² Fonte: CHINA AUTO WEB (2016).

³ Fonte: CHINA (2016).

Os preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em Pequim e Xangai utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Preços médios da energia elétrica residencial e da gasolina no ano de 2014 em Pequim e Xangai

Ano de 2014	Preço da energia elétrica ¹	Preço da gasolina ²
	P _{EE} (US\$ ¢/kWh)	P _{comb} (US\$/l)
Pequim	8,71	1,30
Xangai	9,94	1,30

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: THE WORLD BANK; DRC (2014).

² Fonte: BLOOMBERG (2016).

Na Tabela 27 são exibidas as premissas dos valores percentuais da distância total percorrida anual nos modos de operação *charge depleting* e *charge sustaining* para os três veículos analisados. O detalhamento do método utilizado para obtenção dos valores apresentados na referida tabela é descrito no Apêndice A.

Tabela 27 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados na China

Percentual da distância total percorrida anual em cada modo de operação	Símbolo	Chery QQ3 EV (%)	Zotye Zhidou E20 (%)	BYD Qin (%)
Operação no modo <i>charge depleting</i>	d _{CD}	100%	100%	69%
Operação no modo <i>charge sustaining</i>	d _{CS}	0%	0%	31%

Fonte: Produção do próprio autor.

Conforme observado na Tabela 9 e mencionado na seção 2.1.2.2.1 deste trabalho, os veículos BEV, tais como o Chery QQ3 EV e o Zotye Zhidou E20, operam somente no modo *charge depleting*.

A partir dos dados das Tabelas 21 a 27 e as equações (7) e (23), os valores de VPL na aquisição dos veículos Chery QQ3 EV, Zotye Zhidou E20 e BYD Qin no ano de 2014 nas cidades de Pequim e Xangai são calculados. Com o intuito de que os valores de VPL das cidades sejam comparados com os resultados observados em outros países, os valores de VPL são corrigidos pela *paridade do poder de compra*. Os resultados do VPL, corrigidos pela paridade do poder de compra, são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades chinesas

Ano de 2014	Valor presente líquido - VPL (US\$) ^{1,2}		
	Chery QQ3 EV	Zotye Zhidou E20	BYD Qin
Pequim	5.155	197	-14.197
Xangai	4.792	-2.496	14.132

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Nota: Considerando uma Paridade do poder de compra de US\$ 1,00 = ¥ 3,53 no ano de 2014. Fonte: OECD (2017).

² Nota: Para o cálculo do VPL, foi considerado um horizonte de seis anos na análise e uma taxa anual de juros de 5,93% no ano de 2014 em cidades chinesas. Fonte: TRADING ECONOMICS (2017).

A Tabela 29 apresenta a participação dos veículos PEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014, estratificados por BEV e PHEV, para as cidades chinesas selecionadas.

Tabela 29 - Participação dos veículos PEV, BEV e PHEV no mercado de veículos leves novos no ano de 2014 em cidades chinesas

Cidade	Sigla	Participação no mercado de veículos leves (%)		
		BEV	PHEV	PEV
Pequim	PEQ	1,6%	0,2%	1,8%
Xangai	XAN	0,8%	2,6%	3,4%

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ICCT (2016a).

Utilizando os dados de VPL da Tabela 28 e os valores de participação de mercado das Tabelas 22 e 29, são calculados os valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV e PHEV no ano de 2014, além do VPL médio ponderado para os veículos elétricos *plug-in*, conforme exibido na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores médios ponderados do valor presente líquido para os veículos BEV, PHEV e PEV no ano de 2014 em cidades chinesas

Cidade	Sigla	Valor médio do VPL (US\$)		
		BEV ¹	PHEV ²	PEV ³
Pequim	PEQ	2.762	-14.197	1.286
Xangai	XAN	1.274	14.132	11.239

Fonte: Produção do próprio autor.

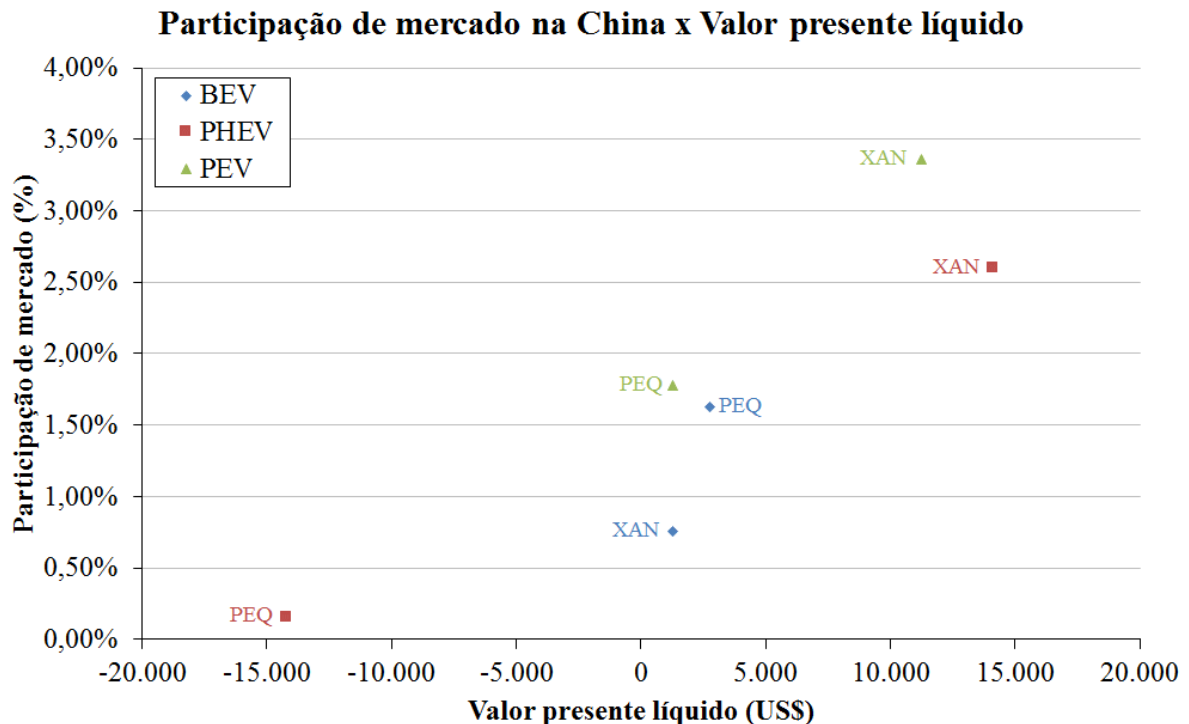
¹ Nota: Média ponderada do VPL do Chery QQ3 EV e do Zotye Zhidou E20 na Tabela 28, utilizando os pesos da Tabela 22.

² Nota: VPL do BYD Qin na Tabela 28.

³ Nota: Média ponderada do VPL dos veículos BEV e PHEV na Tabela 30, utilizando os pesos da Tabela 29.

A relação entre a participação dos veículos elétricos no mercado de veículos leves novos e o valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos nas cidades de Pequim e Xangai no ano de 2014 é exibida na Figura 7. Observa-se uma relação direta entre a participação dos veículos elétricos no mercado chinês e o grau de viabilidade econômica na aquisição de tais veículos pelos consumidores no ano de 2014, demonstrada por meio do VPL corrigido pela paridade do poder de compra.

Figura 7 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos no ano de 2014 em cidades chinesas



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Tabelas 29 e 30.

2.3.2.4 Brasil

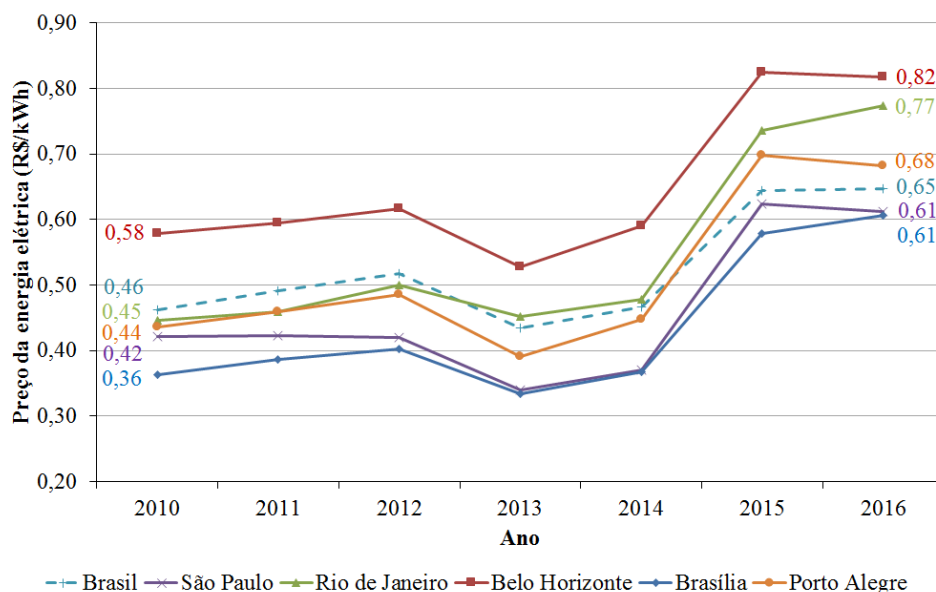
A análise econômica detalhada do quão distante cada cidade brasileira está da integração dos veículos elétricos em seu modal rodoviário, sob a ótica do consumidor, é apresentada nesta seção, uma vez que os consumidores somente sentir-se-ão atraídos a adquirir um veículo elétrico caso os mesmos apresentem uma viabilidade econômica aceitável.

Há grande variação de preços da energia elétrica e da gasolina, e também dos impostos anuais, entre as capitais de cada estado brasileiro, de forma que uma análise minuciosa dos aspectos econômicos em cada cidade torna-se indispensável para a implementação de políticas públicas assertivas.

No Brasil, as tarifas de energia elétrica são estipuladas pela ANEEL, que anualmente publica Resoluções Homologatórias que determinam as tarifas de energia para os consumidores residenciais, comerciais e industriais. Tais Resoluções são publicadas de forma individual, em meses distintos, de acordo com as datas de aniversário dos contratos de concessão das distribuidoras de energia.

A Figura 8 apresenta a evolução histórica dos preços da energia elétrica residencial no Brasil e em cinco importantes cidades selecionadas (ANEEL, 2017). Observa-se uma elevação no preço médio da energia elétrica residencial no Brasil, sendo registrado um aumento médio de 5,73% ao ano no período de 2010 a 2016.

Figura 8 - Evolução histórica dos preços da energia elétrica residencial no Brasil e em cinco cidades selecionadas

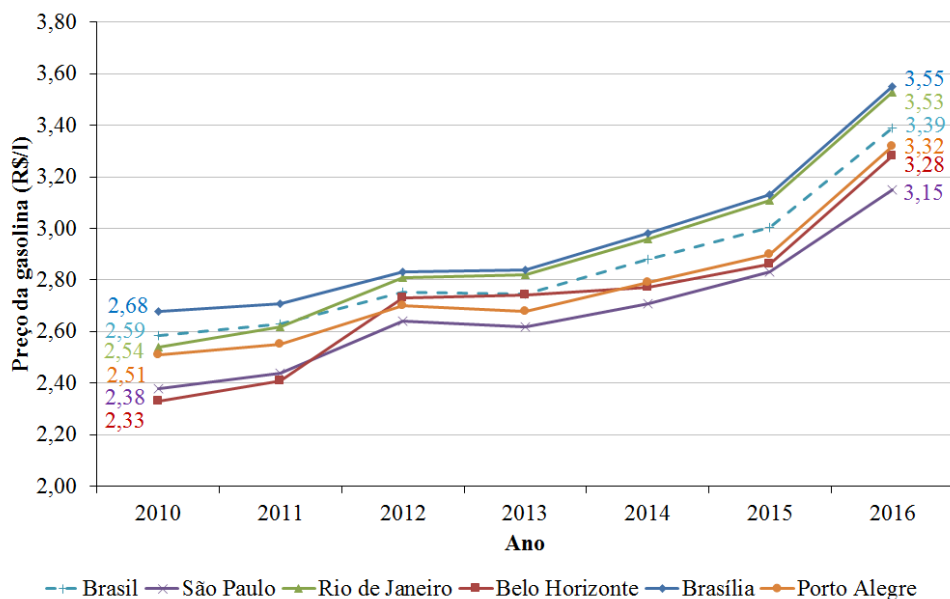


Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ANEEL (2017).

O mercado brasileiro de combustíveis e biocombustíveis é regulado pela ANP e regulamentado pela Lei 9.478/97, chamada de Lei do Petróleo. Esta lei estabelece em seu artigo primeiro a livre concorrência, de forma que cada agente econômico tem liberdade na definição dos preços praticados. Diferentemente do que ocorre no mercado de energia elétrica, em que as tarifas são estabelecidas pela ANEEL, a ANP não controla os preços de quaisquer combustíveis, sendo que esta atribuição de controle é exercida por meio da proteção do processo competitivo nos mercados.

A Figura 9 apresenta a evolução histórica dos preços da gasolina no Brasil e em cinco importantes cidades selecionadas (ANP, 2017). Verifica-se uma elevação nos preços da gasolina no Brasil, sendo registrado um aumento médio de 5,89% ao ano entre 2010 e 2016.

Figura 9 - Evolução histórica dos preços da gasolina no Brasil e em cinco cidades selecionadas



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ANP (2017).

A Tabela 31 exibe a estimativa dos preços de compra de dois veículos elétricos no ano de 2017, caso fossem vendidos no Brasil, além dos preços de veículos convencionais similares aos dois veículos elétricos analisados e dos valores dos custos de investimento na aquisição dos veículos elétricos.

Tabela 31 - Premissas de preços de veículos e de custos de investimento para aquisição de veículos elétricos no Brasil no ano de 2017

Ano de 2017	Nissan Leaf	Toyota Prius Plug-in
Preço de compra do veículo elétrico (R\$) ¹	129.584	124.558
Preço de compra do ICEV similar ao VE (R\$) ^{2,3}	84.580	87.030
Custo do investimento (R\$)	45.004	37.528

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Preço aproximado do Nissan Leaf de 24 kWh e do Toyota Prius Plug-in no Brasil (estimado pelo autor, com base nas diferenças de preços de veículos vendidos mutuamente no Brasil e nos Estados Unidos).

² Veículos ICEV similares considerados: Toyota Corolla e Toyota Corolla black pack, respectivamente.

³ Fonte: TOYOTA (2017).

As alíquotas do imposto anual (IPVA²⁴) e os valores percentuais do desconto concedido aos veículos elétricos no pagamento do imposto anual nas capitais brasileiras são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Alíquotas do imposto anual e valores percentuais do desconto concedido aos veículos elétricos no pagamento do imposto anual nas capitais brasileiras

Ano de 2017	Alíquota anual	Desconto no imposto ²		Cidade	Alíquota anual	Desconto no imposto ²	
Cidade	do imposto (%) ¹	BEVs (%)	PHEVs (%)		do imposto (%) ¹	BEVs (%)	PHEVs (%)
Brasília	3,50%	0,00%	0,00%	Macapá	3,00%	0,00%	0,00%
Goiânia	3,75%	0,00%	0,00%	Manaus	3,00%	0,00%	0,00%
Cuiabá	2,00%	0,00%	0,00%	Belém	2,50%	0,00%	0,00%
Campo Grande	3,50%	50,00%	50,00%	Porto Velho	3,00%	0,00%	0,00%
Maceió	4,00%	0,00%	0,00%	Boa Vista	3,00%	0,00%	0,00%
Salvador	2,50%	0,00%	0,00%	Palmas	2,00%	0,00%	0,00%
Fortaleza	2,50%	100,00%	100,00%	Vitória	2,00%	0,00%	0,00%
São Luís	2,50%	100,00%	100,00%	Belo Horizonte	4,00%	0,00%	0,00%
João Pessoa	2,00%	0,00%	0,00%	Rio de Janeiro	4,00%	87,50%	62,50%
Recife	3,50%	100,00%	100,00%	São Paulo	4,00%	62,50%	62,50%
Teresina	2,50%	100,00%	100,00%	Curitiba	3,50%	0,00%	0,00%
Natal	3,00%	100,00%	100,00%	Porto Alegre	3,00%	100,00%	100,00%
Aracaju	2,00%	100,00%	100,00%	Florianópolis	2,00%	0,00%	0,00%
Rio Branco	2,00%	0,00%	0,00%				

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: CARROS (2017).

² Fontes: ABVE (2016), com exceção das cidades de Rio de Janeiro, RIO DE JANEIRO (1997) e São Paulo, SÃO PAULO (2008); SÃO PAULO (2014).

Os valores de autonomia específica dos veículos elétricos Nissan Leaf e Toyota Prius Plug-in no ano de 2017, assim como de seus respectivos veículos convencionais similares, são mostrados na Tabela 33.

²⁴ IPVA - Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

Tabela 33 - Valores de autonomia específica de veículos elétricos e veículos convencionais similares no ano de 2017

Valores de autonomia específica dos veículos avaliados com gasolina e/ou energia elétrica	Símbolo	Nissan Leaf	Toyota Prius Plug-in
Aut. especif. do BEV com energia elétrica (km/kWh)	$AUT_{EE,esp,BEV}$	5,37	-
Aut. especif. do EREV com gasolina no modo CS (km/l)	$AUT_{comb,esp,EREV}$	-	22,97
Aut. especif. do EREV com energia elétrica no modo CD (km/kWh)	$AUT_{EE,esp,EREV}$	-	6,44
Aut. especif. do ICEV similar ao VE com gasolina (km/l)	$AUT_{comb,esp,ICEV}$	13,61	13,61

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ESTADOS UNIDOS (2017a).

A desvalorização percentual dos veículos elétricos e dos veículos convencionais similares de acordo com a idade dos veículos considerada neste trabalho é mostrada na Tabela 34.

Tabela 34 - Desvalorização percentual dos veículos elétricos e dos veículos convencionais similares de acordo com a idade dos veículos

Desvalorização dos veículos	Veículos BEV (%)	Veículos PHEV (%)	Veículos ICEV (%)
1 ano de uso	-22%	-18%	-13%
2 anos de uso	-28%	-23%	-19%
3 anos de uso	-36%	-34%	-32%
4 anos de uso	-44%	-41%	-37%
5 anos de uso	-57%	-49%	-41%
6 anos de uso	-65%	-56%	-47%

Fonte: Utilizando dados de FIPE (2017), os valores foram estimados pelo próprio autor, com base na desvalorização média de veículos com preços similares aos veículos avaliados neste trabalho.

Na Tabela 35 são apresentadas as premissas dos valores percentuais da distância total percorrida anual nos modos de operação *charge depleting* e *charge sustaining* para os dois veículos analisados. O detalhamento do método utilizado para obtenção dos valores apresentados na referida tabela é descrito no Apêndice A.

Tabela 35 - Valores percentuais da distância total percorrida anual em cada modo de operação para os veículos elétricos analisados no Brasil

Percentual da distância total percorrida anual em cada modo de operação	Símbolo	Nissan Leaf (%)	Toyota Prius Plug-in (%)
Operação no modo <i>charge depleting</i>	d_{CD}	100%	48%
Operação no modo <i>charge sustaining</i>	d_{CS}	0%	52%

Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com o observado na Tabela 35 e mencionado na seção 2.1.2.2.1 deste trabalho, os veículos BEV, tais como o Nissan LEAF, operam somente no modo *charge depleting*.

Os preços da energia elétrica residencial e da gasolina, bem como as diferenças nos valores dos impostos anuais entre o Nissan Leaf e Toyota Prius Plug-in e seus respectivos veículos convencionais similares nas capitais brasileiras no ano de 2017, são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Preços dos energéticos e diferenças nos valores dos impostos anuais nas capitais brasileiras no ano de 2017

Ano de 2017	Preços		Diferença de impostos entre o VE e o ICEV similar (R\$/ano) ³	
	Energia elétrica ¹	Gasolina ²	Nissan Leaf	Toyota Prius Plug-in
	P _{EE} (R\$/kWh)	P _{comb} (R\$/l)	I _{ICEV} -I _{BEV}	I _{ICEV} -I _{EREV}
Brasília	0,63	3,72	-602	-670
Goiânia	0,63	3,90	-645	-718
Cuiabá	0,73	3,74	-344	-383
Campo Grande	0,67	3,57	713	708
Maceió	0,64	3,64	-688	-766
Salvador	0,64	3,61	-430	-479
Fortaleza	0,68	3,98	1.448	1.490
São Luís	0,61	3,47	1.448	1.490
João Pessoa	0,66	3,55	-344	-383
Recife	0,64	3,38	2.028	2.086
Teresina	0,64	3,61	1.448	1.490
Natal	0,59	3,91	1.738	1.788
Aracaju	0,65	3,75	1.159	1.192
Rio Branco	0,65	4,20	-344	-383
Macapá	0,52	3,76	-516	-575
Manaus	0,78	3,78	-516	-575
Belém	0,82	3,90	-430	-479
Porto Velho	0,60	3,88	-516	-575
Boa Vista	0,44	3,86	-516	-575
Palmas	0,75	3,88	-344	-383
Vitória	0,66	3,70	-344	-383
Belo Horizonte	0,82	3,73	-688	-766
Rio de Janeiro	0,69	4,03	1.942	1.203
São Paulo	0,58	3,59	1.190	1.203
Curitiba	0,67	3,55	-602	-670
Porto Alegre	0,57	3,81	1.738	1.788
Florianópolis	0,63	3,92	-344	-383

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Preço em jan. 2017 (ANEEL, 2017).

² Fonte: Preço em jan. 2017 (ANP, 2017).

³ Nota: Calculado utilizando os preços dos veículos da Tabela 31, as alíquotas e descontos no imposto anual da Tabela 32 e a desvalorização percentual dos veículos da Tabela 34.

Utilizando os dados das Tabelas 31 a 36 e as equações (7) e (23), os valores de VPL na aquisição dos veículos Nissan Leaf e Toyota Prius Plug-in no ano de 2017 nas capitais brasileiras são calculados. Com o intuito de que os valores de VPL das cidades sejam comparados com os resultados observados em outros países, os valores de VPL são corrigidos pela *paridade do poder de compra*. Os resultados do VPL, corrigidos pela paridade do poder de compra, são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - Valor presente líquido na aquisição de veículos elétricos no ano de 2017 em cidades brasileiras

Valor presente líquido - VPL (US\$) ^{1,2}	Nissan Leaf		Prius Plug-in		
	BEV	PHEV	BEV	PHEV	
Brasília	-16.713	-13.783	Macapá	-15.442	-13.095
Goiânia	-16.283	-13.504	Manaus	-17.670	-13.966
Cuiabá	-16.958	-13.440	Belém	-17.365	-13.586
Campo Grande	-14.625	-11.145	Porto Velho	-15.746	-13.099
Maceió	-17.307	-14.239	Boa Vista	-14.444	-12.598
Salvador	-16.802	-13.646	Palmas	-16.652	-13.180
Fortaleza	-11.628	-8.428	Vitória	-16.491	-13.293
São Luís	-12.741	-9.373	Belo Horizonte	-18.560	-14.652
João Pessoa	-16.950	-13.623	Rio de Janeiro	-10.430	-9.008
Recife	-11.954	-8.313	São Paulo	-12.653	-9.641
Teresina	-12.513	-9.145	Curitiba	-17.642	-14.321
Natal	-10.395	-7.586	Porto Alegre	-10.606	-7.769
Aracaju	-12.754	-9.520	Florianópolis	-15.444	-12.658
Rio Branco	-14.741	-12.102			
Média aritmética Brasil	-14.871	-11.804			
Valor mínimo	-18.560	-14.652			
Valor máximo	-10.395	-7.586			

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Nota: Considerando uma Paridade do poder de compra de US\$ 1,00 = R\$ 2,00 no ano de 2017.

² Nota: Para o cálculo do VPL, foi considerado um horizonte de seis anos na análise e uma taxa anual de juros de 8,35%, que correspondeu ao rendimento médio da poupança no ano de 2016. Fonte: PORTAL BRASIL (2017).

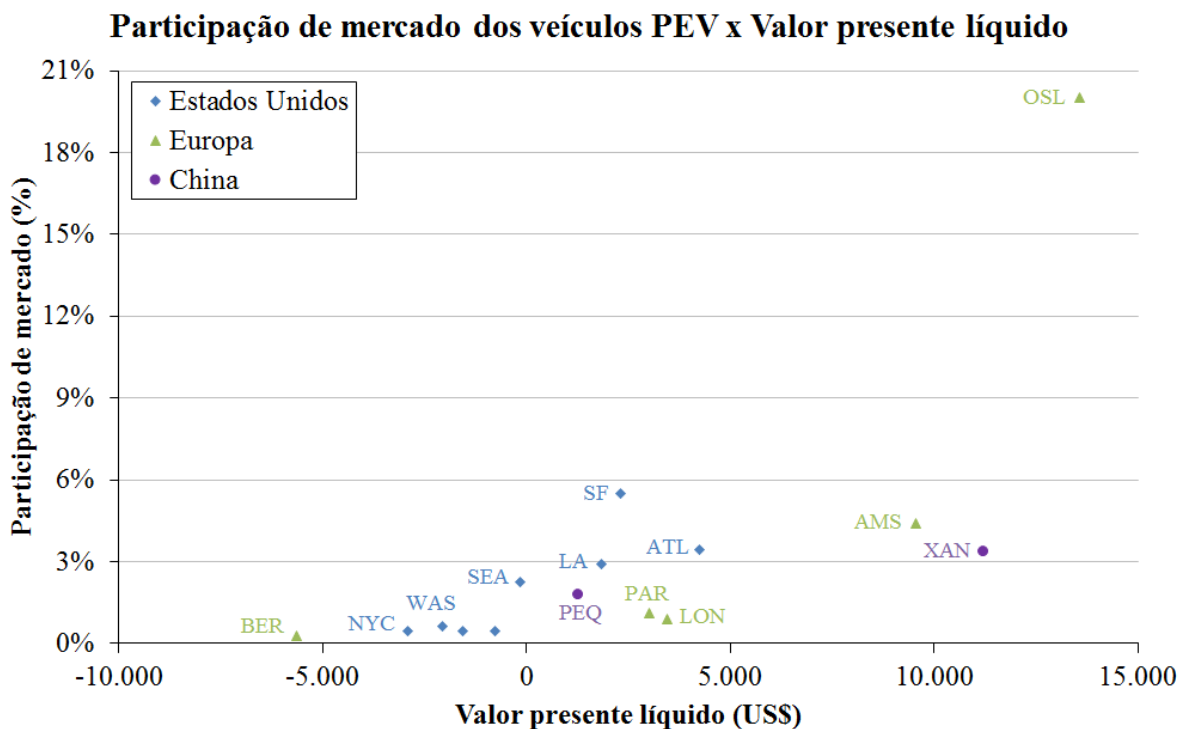
Na Tabela 37, os valores apresentados são distantes daqueles observados nas cidades norte-americanas (Tabela 12), europeias (Tabela 20) e chinesas (Tabela 30), corroborando a necessidade de melhoria das condições financeiras oferecidas para potenciais compradores de veículos elétricos no Brasil. Tal resultado explica o fato de que, no Brasil, o mercado de veículos elétricos é praticamente inexistente.

2.3.3 Principais resultados do capítulo

A partir dos resultados da análise econômica de aquisição de veículos elétricos nos mercados norte-americano, europeu e chinês, propõe-se nesta seção uma comparação dos resultados, a fim de determinar possíveis similaridades existentes entre os diferentes mercados sob a perspectiva dos consumidores.

Na Figura 10, os resultados previamente obtidos da participação de mercado dos veículos elétricos *plug-in* (PEV) em função do valor presente líquido para diferentes cidades dos Estados Unidos, Europa e China no ano de 2014 são exibidos na mesma figura. Constatase de forma evidente a tendência de aumento da participação dos veículos elétricos *plug-in* nos mercados avaliados na medida em que os benefícios financeiros são incrementados para os compradores de tais veículos; ou seja, o fator econômico ainda pesa, e muito, na integração dos veículos elétricos em uma determinada localidade.

Figura 10 - Participação dos veículos elétricos no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos em cidades norte-americanas, europeias e chinesas no ano de 2014



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Figuras 5, 6 e 7

Na análise da Figura 10, observa-se que os valores de VPL na aquisição de veículos elétricos variaram consideravelmente entre as cidades avaliadas; nos Estados Unidos, a faixa

de variação foi de –US\$ 2.903 a US\$ 4.251, sendo que cidades com valores de VPL mais favoráveis apresentaram um nível de inserção de veículos elétricos mais elevado.

Ainda no mercado norte-americano, foi observado que a participação de mercado nas cidades com valores de VPL inferiores a –US\$ 1.000 foi praticamente constante, em torno de 0,5% do total de veículos novos vendidos, enquanto que, nas cidades com VPL acima deste valor, observou-se um acréscimo de 1,0% na venda de veículos elétricos a cada incremento de aproximadamente US\$ 1.100 no valor do VPL.

Na Europa, o comportamento da participação de mercado em função do VPL foi similar ao do mercado norte-americano, confirmando que o aspecto econômico pesa muito na escolha do tipo de veículo. Os valores de VPL variaram de –US\$ 5.638 a US\$ 13.564, com destaque para a cidade de Oslo, cujo valor do VPL para veículos BEV foi de pouco menos de US\$ 14.000, permitindo à cidade alcançar a marca de 20% de participação dos veículos elétricos *plug-in* no mercado.

Dentre todas as cidades avaliadas nos Estados Unidos, Europa e China, o destaque negativo foi a cidade de Berlim, cujo valor médio do VPL na aquisição de veículos elétricos foi de –US\$ 5.638, o menor valor dentre as cidades estudadas. O baixo valor de VPL explica o fato de que, em Berlim, os veículos elétricos representaram apenas 0,3% de participação no mercado de veículos novos, também o menor valor dentre as cidades avaliadas.

Os resultados da análise econômica apresentados neste capítulo podem contribuir significativamente para o planejamento de políticas públicas de introdução de veículos elétricos nos países, especialmente na previsão da participação de mercado dos veículos elétricos em decorrência do estabelecimento de incentivos de ordem econômica aos potenciais compradores. Além disso, o método utilizado propicia novas oportunidades de pesquisa relacionadas à integração dos veículos elétricos na frota de determinada cidade.

3 IMPACTO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

Além dos aspectos econômicos que envolvem a inserção dos veículos elétricos em um país, outros pontos importantes devem ser avaliados anteriormente à definição da melhor estratégia de integração de tais veículos no modal rodoviário. Assim, propõe-se nesta seção a análise dos impactos ambientais, epidemiológicos, energéticos e infraestruturais em decorrência do uso de veículos elétricos em detrimento dos veículos convencionais.

A Figura 11 apresenta de forma concisa os principais tópicos avaliados em cada uma das análises conduzidas neste capítulo.

Figura 11 - Principais tópicos avaliados na análise dos impactos ambientais, epidemiológicos, energéticos e infraestruturais em decorrência do uso de veículos elétricos

Análise ambiental	Análise epidemiológica	Análise energética	Análise da infraestrutura
<ul style="list-style-type: none"> • Gases de efeito estufa • Poluentes atmosféricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Material particulado • Ozônio • Dióxido de enxofre • Monóxido de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de gasolina • Consumo de energia elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Instalação de estações de recarga

Fonte: Produção do próprio autor.

As análises citadas na Figura 11 são conduzidas considerando diferentes níveis de inserção dos veículos elétricos em uma determinada cidade.

3.1 NÍVEL DE INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Neste trabalho, quatro alternativas de inserção dos veículos elétricos são consideradas, conforme exibido na Tabela 38. Os valores apresentados na Tabela 38 foram definidos com base na participação dos veículos PEV nos mercados norte-americano, europeu e chinês no ano de 2014, tendo sido constatada uma participação média de 3,2% nas 15 cidades avaliadas.

Conforme observa-se na Figura 10, dentre as 15 cidades analisadas, 13 apresentaram participação dos veículos PEV no mercado inferior a 5%, de modo que, nesta tese, três alternativas de inserção são consideradas nesta faixa, com valores de 1%, 3% e 5%. Adicionalmente, foi adotada a participação de mercado de 10%, que representa a inserção

massiva de veículos elétricos na frota, a fim de representar o dobro da participação de mercado em relação à inserção elevada.

Tabela 38 - Alternativas de inserção dos veículos elétricos

Alternativa de inserção dos veículos elétricos	Participação anual no mercado de veículos novos (%)
Não inserir veículos elétricos	-
Inserção leve	1,00%
Inserção moderada	3,00%
Inserção elevada	5,00%
Inserção massiva	10,00%

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 39 apresenta a frota total de automóveis e a média anual da quantidade de veículos novos vendidos nas capitais brasileiras, bem como a população total e as taxas de motorização em cada uma das cidades.

A partir da média anual da quantidade de veículos novos vendidos nas capitais brasileiras exibida na Tabela 39 e dos percentuais de participação dos veículos elétricos no mercado de veículos novos definidos na Tabela 38, calcula-se a quantidade anual de veículos elétricos novos vendidos em cada cidade para diferentes níveis de inserção dos veículos elétricos. Tal resultado é observado na Tabela 40.

Tabela 39 - Frota total de automóveis, média anual da quantidade de veículos novos vendidos, população total e taxas de motorização nas capitais brasileiras

Cidade	Frota de automóveis ¹	Média anual da quantidade de veículos novos vendidos ²	População ³ (pessoas)	Taxas de motorização ⁴	
				Habit./automóvel	Automóveis/habit.
Brasília	1.201.311	60.471	2.977.216	2,5	0,40
Goiânia	587.217	29.559	1.448.639	2,5	0,41
Cuiabá	194.959	9.814	585.367	3,0	0,33
Campo Grande	277.455	13.966	863.982	3,1	0,32
Maceió	176.381	8.879	1.021.709	5,8	0,17
Salvador	569.412	28.663	2.938.092	5,2	0,19
Fortaleza	561.602	28.270	2.609.716	4,6	0,22
São Luís	191.540	9.642	1.082.935	5,7	0,18
João Pessoa	192.700	9.700	801.718	4,2	0,24
Recife	385.342	19.397	1.625.583	4,2	0,24
Teresina	189.642	9.546	847.430	4,5	0,22
Natal	216.369	10.891	877.662	4,1	0,25
Aracaju	167.247	8.419	641.523	3,8	0,26
Rio Branco	61.244	3.083	377.057	6,2	0,16
Macapá	59.932	3.017	465.495	7,8	0,13
Manaus	345.528	17.393	2.094.391	6,1	0,16
Belém	221.588	11.154	1.446.042	6,5	0,15
Porto Velho	102.880	5.179	511.219	5,0	0,20
Boa Vista	59.621	3.001	326.419	5,5	0,18
Palmas	69.658	3.506	279.856	4,0	0,25
Vitória	124.047	6.244	359.555	2,9	0,35
Belo Horizonte	1.183.112	59.555	2.513.451	2,1	0,47
Rio de Janeiro	1.966.242	98.976	6.498.837	3,3	0,30
São Paulo	5.400.925	271.869	12.038.175	2,2	0,45
Curitiba	1.052.720	52.991	1.893.997	1,8	0,56
Porto Alegre	598.619	30.133	1.481.019	2,5	0,40
Florianópolis	217.199	10.933	477.798	2,2	0,45
Total - somente capitais	16.374.492	824.251	49.084.883	3,0	0,33
Total - Brasil	50.659.605	2.550.074	205.873.492	4,1	0,25

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: DENATRAN (2016).

² Fonte: Média aritmética da venda anual de veículos novos entre os anos de 2012 e 2016, considerando dados do DENATRAN (2016) e da ANFAVEA (2017b).

³ Fonte: IBGE (2016).

⁴ Nota: Calculado utilizando os dados da própria Tabela 39.

Tabela 40 - Quantidade anual de veículos elétricos novos vendidos em cada cidade para diferentes níveis de inserção dos veículos elétricos

Cidade	Quantidade anual de veículos elétricos novos vendidos em função do nível de inserção (veículos/ano)				
	Não inserir veículos elétricos	Inserção leve (1%)	Inserção moderada (3%)	Inserção elevada (5%)	Inserção massiva (10%)
Brasília	-	605	1.814	3.024	6.047
Goiânia	-	296	887	1.478	2.956
Cuiabá	-	98	294	491	981
Campo Grande	-	140	419	698	1.397
Maceió	-	89	266	444	888
Salvador	-	287	860	1.433	2.866
Fortaleza	-	283	848	1.414	2.827
São Luís	-	96	289	482	964
João Pessoa	-	97	291	485	970
Recife	-	194	582	970	1.940
Teresina	-	95	286	477	955
Natal	-	109	327	545	1.089
Aracaju	-	84	253	421	842
Rio Branco	-	31	92	154	308
Macapá	-	30	91	151	302
Manaus	-	174	522	870	1.739
Belém	-	112	335	558	1.115
Porto Velho	-	52	155	259	518
Boa Vista	-	30	90	150	300
Palmas	-	35	105	175	351
Vitória	-	62	187	312	624
Belo Horizonte	-	596	1.787	2.978	5.956
Rio de Janeiro	-	990	2.969	4.949	9.898
São Paulo	-	2.719	8.156	13.593	27.187
Curitiba	-	530	1.590	2.650	5.299
Porto Alegre	-	301	904	1.507	3.013
Florianópolis	-	109	328	547	1.093

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 ANÁLISE AMBIENTAL

Nesta seção são apresentadas as fontes e intensidades das emissões de gases de efeito estufa e poluentes de veículos convencionais e de veículos elétricos.

3.2.1 Efeito estufa

Os principais gases de efeito estufa decorrentes da utilização de veículos automotores leves são apresentados na Tabela 41, porém nem todos apresentam o mesmo potencial de reter o calor dentro do planeta. A capacidade desses gases em contribuir para o aquecimento global é medida por um indicador chamado de *Potencial de Aquecimento Global (GWP²⁵)*, que

²⁵ GWP do inglês *Global Warming Potential*

indica a contribuição relativa de cada gás, por unidade de massa, comparada à do dióxido de carbono (CO₂).

Tabela 41 - Principais gases de efeito estufa na utilização de veículos automotores leves

GEE	Fórmula	Potencial de aquecimento global GWP	Tempo de vida na atmosfera (anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	1	variável
Metano	CH ₄	28	12
Metano fóssil	CH ₄	30	12
Óxido nitroso	N ₂ O	265	121
Monóxido de carbono	CO	2	0,166 a 0,25
Óxidos de nitrogênio	NO _x	-11	variável

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de IPCC (2014b).

Como se observa na Tabela 41, o GWP depende do tempo de vida do gás na atmosfera. Algumas substâncias têm um tempo de vida na atmosfera muito extenso, aumentando seu GWP.

3.2.2 Emissão de gases de efeito estufa de veículos convencionais

A fim de calcular as emissões de gases de efeito estufa de veículos convencionais e elétricos, são adotadas neste trabalho as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC²⁶) para elaboração de inventários de GEE. Os valores dos *Fatores de Emissão* (FE), que expressam o quão intensiva é uma dada atividade em termos de emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2006), são apresentados nesta seção.

As emissões veiculares são divididas em *emissões de escapamento*, *emissões evaporativas* e *emissões de abastecimento*, sendo que os GEE estão presentes apenas nas emissões de escapamento.

3.2.2.1 Emissão de escapamento

Na Tabela 42 são apresentados os valores dos Fatores de Emissão de gases de efeito estufa de veículos automotores leves durante a combustão da gasolina.

²⁶ IPCC do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*

Tabela 42 - Valores dos Fatores de Emissão de GEE das emissões de escapamento de veículos automotores

GEE emitido na combustão da gasolina	Unidade	Fator de emissão
Dióxido de carbono - CO ₂	kg/l	2,212
Metano - CH ₄	g/km	0,005
Óxido nitroso - N ₂ O	g/km	0,02
Monóxido de carbono - CO	g/km	0,171
Óxidos de nitrogênio - NO _x	g/km	0,022

Fontes: BRASIL (2014b) para o CO₂ e CETESB (2016a) para os demais GEE.

3.2.3 Emissão de poluentes atmosféricos de veículos convencionais

Os poluentes atmosféricos estão presentes nas emissões de escapamento, nas emissões evaporativas e nas emissões de abastecimento, sendo apresentadas a seguir.

3.2.3.1 Emissão de escapamento

Dentre os poluentes atmosféricos encontrados nas emissões diretas de automóveis convencionais, destacam-se o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos não-metano (NMHC²⁷), os aldeídos (RCHO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o material particulado (MP), o metano (CH₄), o dióxido de carbono (CO₂) e o dióxido de enxofre (SO₂) (BRASIL, 2011), sendo que, conforme explanado na seção 3.2.2.1 deste trabalho, alguns deles também são gases de efeito estufa.

Além das emissões veiculares diretas, há ainda as indiretas, em que o poluente não é emitido diretamente para a atmosfera, mas sim produzido pela reação química dos poluentes de emissões diretas com a radiação solar ou outros gases presentes naturalmente na atmosfera (CETESB, 2014).

Os valores dos Fatores de Emissão de poluentes atmosféricos de veículos automotores leves durante a combustão da gasolina são apresentados na Tabela 43, com exceção daqueles previamente apresentados na Tabela 42.

²⁷ NMHC do inglês *Non-Methane Hydrocarbon*

Tabela 43 - Valores dos Fatores de Emissão de poluentes atmosféricos das emissões de escapamento de veículos automotores

Poluente atmosférico emitido na combustão da gasolina	Unidade	Fator de emissão
Hidrocarbonetos não-metano - NMHC	g/km	0,012
Aldeídos - RCHO	g/km	0,0015
Material particulado - MP	g/km	0,001
Dióxido de enxofre - SO ₂	g/l	0,0371

Fontes: CETESB (2016a); para o dióxido de enxofre foi adotada a massa específica da gasolina estipulada em EPE (2016).

3.2.3.2 Emissão evaporativa e emissão de abastecimento

A emissão evaporativa do combustível de um veículo é classificada da seguinte forma (CETESB, 2016a):

- Emissão diurna: vapor de combustível emitido em consequência da exposição do veículo ao sol com o carro frio;
- Emissão *hotsoak*: emissão de vapor de combustível devido ao aquecimento do motor após o uso do veículo; e
- Emissão *running losses*: representa a emissão evaporativa do veículo em funcionamento.

A emissão de abastecimento decorre da expulsão do vapor do combustível armazenado no tanque do veículo durante o processo de abastecimento. Os vapores escapam pelo próprio tubo de enchimento do tanque, em volume equivalente ao de abastecimento (CETESB, 2016a).

Os valores dos Fatores de Emissão de NMHC de veículos automotores leves a gasolina decorrentes das emissões evaporativa e de abastecimento são mostrados na Tabela 44.

Tabela 44 - Valores dos Fatores de Emissão de NMHC de veículos automotores leves a gasolina decorrentes das emissões evaporativa e de abastecimento

Emissão de NMHC para veículos a gasolina	Unidade	Fator de emissão
Emissão evaporativa		
Emissão diurna	g/dia	0,06
Emissão hotsoak	g/viagem	0,09
Emissão running losses	g/viagem	0,03
Emissão de abastecimento		
Taxa de evaporação	g/l	1,14

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de CETESB (2016a).

3.2.4 Emissão de gases de efeito estufa de veículos elétricos *plug-in*

A introdução de veículos elétricos na frota conduz a uma mudança das fontes de emissão de gases de efeito estufa e poluentes. Tipicamente, veículos convencionais emitem GEE decorrentes do uso de combustíveis fósseis nos motores de combustão interna, ao passo que, nos veículos elétricos, uma parcela das emissões, ou sua totalidade no caso de veículos BEV, é evitada, tendo em vista que os veículos utilizam a energia elétrica das baterias como fonte de energia para o motor elétrico.

Neste contexto, cabe avaliar o nível médio de emissão de GEE da energia elétrica gerada pelo conjunto de todas as usinas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, uma vez que a mesma é utilizada para recarregar as baterias dos veículos elétricos. A Tabela 45 apresenta o histórico dos valores do fator de emissão pelo uso de energia elétrica proveniente do Sistema Interligado Nacional.

Tabela 45 - Histórico dos valores do fator de emissão pelo uso de energia elétrica proveniente do Sistema Interligado Nacional

Valores anuais	2012	2013	2014	2015	2016	Média aritmética
Fator de emissão médio (t CO ₂ eq/MWh)	0,0653	0,096	0,1355	0,1244	0,0817	0,1006

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de BRASIL (2017).

3.3 ANÁLISE EPIDEMIOLÓGICA

As questões relacionadas às doenças e ao ruído urbano proveniente da poluição atmosférica assolam as cidades, principalmente aquelas de maior porte. Nesta seção, avalia-se até que ponto a introdução de veículos elétricos pode contribuir com a redução da quantidade de mortes e internações por doenças respiratórias e cardiovasculares nas cidades brasileiras, considerando diferentes níveis de inserção dos veículos elétricos na frota.

A análise é realizada para os seguintes poluentes automotivos: material particulado, ozônio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono, que são aqueles mais citados em pesquisas epidemiológicas de poluentes com efeito deletério sobre os seres humanos (CLARK; CLARK, 2010; PEREIRA; LIMONGI, 2015).

3.3.1 Risco à saúde atribuído à poluição do ar

Os casos de mortes e internações hospitalares estão relacionados tanto com a poluição do dia quanto de dias anteriores. Desta forma, é necessário avaliar o risco relativo entre as doenças respiratórias e cardiovasculares de um dia com a poluição atmosférica de dias anteriores (BAKONYI et al., 2004).

O Risco Relativo (RR), ou *Odds Ratio*, também conhecido como razão de chances, indica a razão entre a probabilidade do risco de adoecer entre grupo de expostos e não expostos a um fator de risco em estudo, o que nos dá a associação entre a exposição ao fator de risco x (neste caso seriam a concentração de poluentes atmosféricos ou variáveis meteorológicas tais como temperatura, umidade relativa ou pressão atmosférica), e o risco do resultado Y (por exemplo, o número de pessoas internadas com problemas respiratórios em uma determinada região). O risco relativo pode ser definido como (PAULA, 2013):

$$RR(x) = \frac{E(Y/X)}{E(Y/X=0)} \quad (24)$$

sendo,

$RR(x)$: o risco relativo devido ao fator de risco x

$E(Y/X)$: o valor esperado ou esperança da variável explicativa, para determinada concentração X de um poluente

Quanto maior o valor do RR , maior a força da associação entre a exposição ao fator de risco e o efeito da exposição. Pode-se interpretar este risco relativo da seguinte maneira (ARDILES, 2016):

- Se $RR < 1$ indica que o fator de associação teria uma ação protetora, e não constitui um risco à saúde;
- Se $RR = 1$ indica que não há associação entre o fator de estudo e o risco do resultado;
- e
- Se $RR > 1$ a associação indica que o fator estudado é um fator de risco.

A título de exemplo, um risco relativo igual a 1,5 para uma pessoa exposta a concentração de CO indica que esta pessoa tem 50% a mais de chance de adquirir uma determinada doença do que uma pessoa que não foi exposta a essa concentração.

A estimativa do número de casos atribuíveis ao fator de risco, que no caso deste trabalho é a exposição ao poluente atmosférico, pode ser calculada a partir de (PAIVA, 2012):

$$NA = \frac{RR-1}{RR} \cdot N \quad (25)$$

sendo,

NA: o número de casos atribuídos à concentração do poluente analisado

N: o número total de casos, como, por exemplo, o total de internações por doenças respiratórias no período

3.3.2 Material particulado

O material particulado é apresentado na forma de partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça ou fuligem. O termo *partículas inaláveis finas* (MP_{2,5}) é geralmente empregado para o material particulado com diâmetro de até 2,5 µm, enquanto que o termo *partículas inaláveis* (MP₁₀) é utilizado para o material particulado de até 10 µm de diâmetro (CETESB, 2014).

O material particulado está associado ao aumento do risco de enfermidades cardiovasculares, respiratórias e de câncer de pulmão, com maior incidência em crianças e idosos (DANNI-OLIVEIRA, 2008; CETESB, 2016b).

Pesquisas realizadas por Nardocci et al. (2013) indicam uma relação direta entre a concentração de material particulado na atmosfera e a quantidade de internações por doenças respiratórias e cardiovasculares em residentes do município de Cubatão, localizado no Estado de São Paulo.

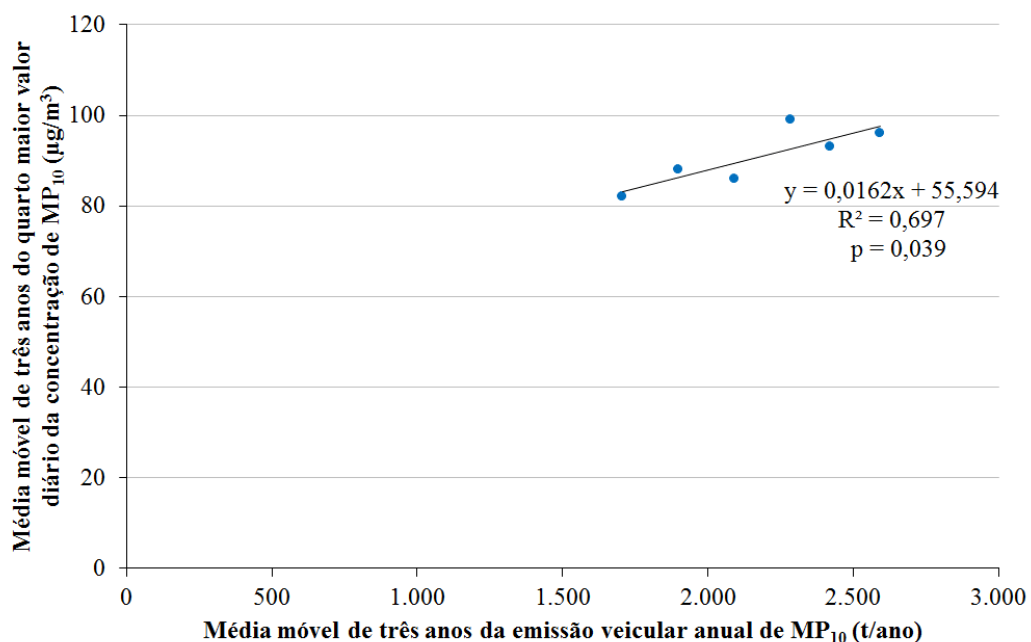
Os autores do estudo analisaram as concentrações diárias de MP₁₀ utilizando como variáveis de controle a temperatura, umidade, dias da semana e feriados. Para cada incremento de 10 µg/m³ de MP₁₀, encontrou-se um excesso de internações de 4,25%, 5,74% e 2,29% para doenças respiratórias totais, doenças respiratórias em menores de cinco anos e doenças cardiovasculares em maiores de 39 anos, respectivamente.

Gouveia et al. (2006) estudaram a associação entre exposição à poluição atmosférica e internações hospitalares no município de São Paulo. Foi realizado um estudo de séries temporais, analisando as hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares em crianças e idosos em relação aos níveis diários observados de poluentes, por meio de modelos aditivos generalizados em regressão de Poisson (HAN et al., 2017; SILVA; TENREYRO, 2010).

Os autores da pesquisa concluíram que o poluente MP_{10} apresentou associação significativa com internações respiratórias e cardiovasculares, sendo que para um aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no nível de material particulado inalável PM_{10} constatou-se um incremento de 4,6% nas internações por asma em crianças, de 4,3% por doença pulmonar obstrutiva crônica em idosos e de 1,5% por doença isquêmica do coração também em idosos. Adicionalmente, os resultados do estudo apontaram que um aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ nos níveis de PM_{10} esteve associado a um incremento nas hospitalizações por doenças respiratórias de 2,2% em idosos e de 2,4% em crianças menores de cinco anos.

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a relação entre a média móvel (SHAMPINE; THOMPSON, 2007) de três anos do quarto maior valor diário da concentração de MP_{10} e a média móvel de três anos da emissão veicular anual de MP_{10} entre os anos de 2008/2010 e 2013/2015 é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Relação entre a média móvel de três anos do quarto maior valor diário da concentração de MP_{10} e a média móvel de três anos da emissão veicular anual de MP_{10} entre os anos de 2008/2010 e 2013/2015 na RMSP



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de CETESB (2016a) e CETESB (2016b).

Na Figura 12, o nível de significância (MARINO, 2018), *p-value*, é menor que 5% ($p < 0,05$), indicando uma relação estatisticamente significativa entre as duas variáveis analisadas. O valor do coeficiente de determinação (ESPÍRITO-SANTO; DANIEL, 2017), R^2 , aponta uma correlação muito forte entre as variáveis consideradas (EVANS²⁸, 1996 apud MOMBER et al., 2017).

Os valores de nível de significância apresentados neste trabalho foram determinados por meio do *software* LAB Fit.

O impacto esperado na redução da concentração de material particulado MP₁₀ na atmosfera a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da Região Metropolitana de São Paulo é detalhado na Tabela 46.

Tabela 46 - Impacto esperado na redução da concentração de MP₁₀ na atmosfera a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP

	Unidade	Percentual de veículos elétricos na frota			
		1%	3%	5%	10%
Quantidade de veículos BEV na frota ¹	veículos	84.863	254.589	424.315	848.630
Distância total percorrida anual ²	km/ano	20.000	20.000	20.000	20.000
Fator de emissão de MP ₁₀ de veículos ICEV ³	g/km	0,001	0,001	0,001	0,001
Emissões evitadas de MP ₁₀ ⁴	t/ano	1,70	5,09	8,49	16,97
Emissão veicular de MP ₁₀					
Antes da introdução de veículos BEV ⁵	t/ano	1.707	1.707	1.707	1.707
Após a introdução de veículos BEV ⁶	t/ano	1.705	1.702	1.699	1.690
4º maior valor diário da concentração de MP ₁₀					
Antes da introdução de veículos BEV ⁷	µg/m ³	83,25	83,25	83,25	83,25
Após a introdução de veículos BEV ⁷	µg/m ³	83,22	83,16	83,11	82,97
Redução após a introdução de veículos BEV	µg/m ³	0,03	0,08	0,14	0,27
Redução após a introdução de veículos BEV	%	0,03%	0,10%	0,17%	0,33%

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Calculado a partir de dados de DENATRAN (2016) e CETESB (2016a).

² Nota: Distância total percorrida anual adotada em todo o estudo.

³ Nota: Valor da Tabela 43.

⁴ Nota: Calculado utilizando os dados das três primeiras linhas desta tabela.

⁵ Fonte: Emissão anual média nos anos de 2013 a 2015 na RMSP, de acordo com CETESB (2016a).

⁶ Nota: Diferença entre o valor da emissão veicular de MP₁₀ antes da introdução de veículos BEV e o valor das emissões evitadas de MP₁₀, ambas mostradas nesta tabela.

⁷ Nota: Valores calculados a partir da equação obtida na Figura 12.

²⁸ EVANS, J. D. **Straightforward Statistic For the Behavioral Sciences**. Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing, 1996.

Frente ao exposto na Tabela 46, constata-se que, mesmo considerando que 10% da frota da RMSP fosse composta de veículos BEV, a redução esperada na concentração diária de MP_{10} na atmosfera seria insignificante. Assim, a integração de veículos elétricos na frota não pode ser considerada um fator impulsionador da redução da concentração de material particulado na atmosfera.

3.3.3 Ozônio

O ozônio (O_3) é um gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica. Não é emitido diretamente para a atmosfera, mas sim produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (VOC²⁹), sendo que os poluentes NMHC e RCHO são VOCs emitidos pelos veículos (CETESB, 2014).

É importante ressaltar a diferença entre o ozônio troposférico (até 25 km de altitude) e o estratosférico (acima de 25 km). O ozônio troposférico é um gás de efeito estufa, além de ser um poluente tóxico, que causa danos à vegetação e ao sistema respiratório. O ozônio estratosférico é de vital importância para a vida no planeta, pois filtra os raios ultravioleta do sol, que são extremamente nocivos à saúde humana (SILVA, 2012).

Quando encontrado em concentração superior à recomendada na atmosfera, pode causar problemas respiratórios, ardor nos olhos, nariz e garganta, desencadear a asma e causar enfermidades pulmonares (DANNI-OLIVEIRA, 2008; CETESB, 2016b).

Pesquisas comprovam que o incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração diária de O_3 está associado a um excesso de internações por doenças cardiovasculares em maiores de 39 anos de 2,85% e por doenças respiratórias em menores de 5 anos de 3,91% (NARDOCCI et al., 2013).

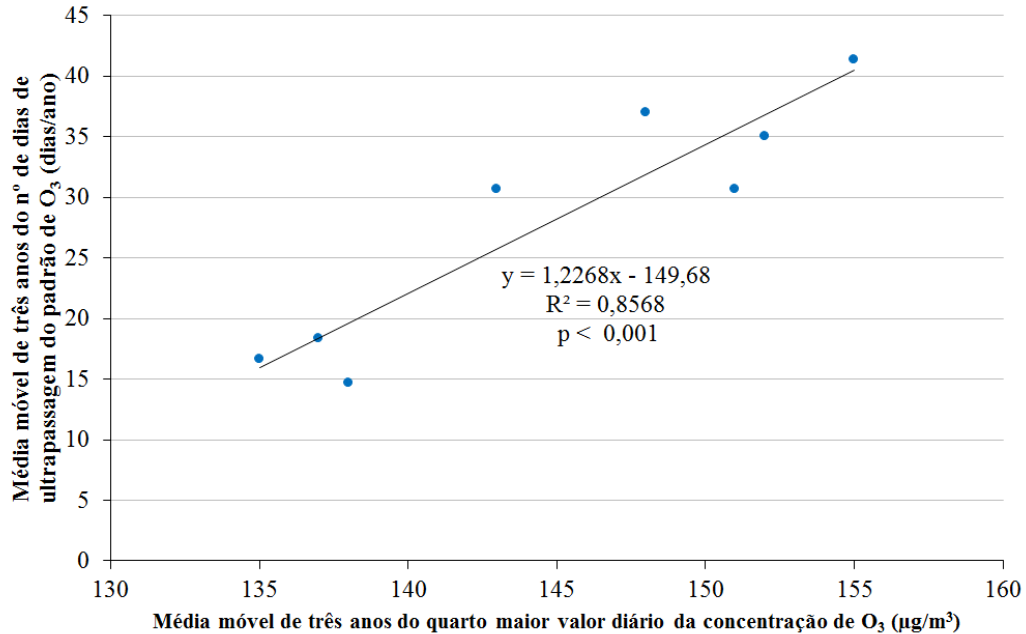
Na Figura 13 é apresentada a relação entre a média móvel de três anos do número de dias de ultrapassagem do padrão estadual de O_3 e a média móvel de três anos do quarto maior valor diário da concentração de O_3 entre os anos de 2006/2008 e 2013/2015 na Região Metropolitana de São Paulo.

A redução das emissões de CO, COV e NO_x a partir da inserção de veículos elétricos a bateria na frota da Região Metropolitana de São Paulo é mostrada na Tabela 47, podendo-se constatar que, considerando que 10% da frota da RMSP fosse composta de veículos BEV, a

²⁹ VOC do inglês *Volatile Organic Compound*

redução esperada nos níveis de emissão de CO, COV e NO_x seria respectivamente de 2,0%, 4,1% e 0,4%.

Figura 13 - Relação entre a média móvel de três anos do número de dias de ultrapassagem do padrão estadual de O₃ e a média móvel de três anos do quarto maior valor diário da concentração de O₃ entre os anos de 2006/2008 e 2013/2015 na RMSP



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de CETESB (2016b).

Pesquisas apontam que a diminuição das emissões totais de COV e CO está associada à redução da concentração de O₃ na atmosfera, enquanto que para os NO_x ocorre exatamente o inverso, uma vez que ao diminuir as emissões deste poluente, observa-se um acréscimo na concentração de O₃ na atmosfera (ORLANDO, 2008; ALVIM, 2013).

Alvim (2013) comprovou em seus estudos que a variação da concentração de O₃ em função da diminuição das emissões de CO é pouco significativa, sendo que para uma redução de 30% nas emissões de CO, foi observado o decréscimo de apenas 0,6% na concentração de ozônio na atmosfera. Assim, na Tabela 47, a redução de 2,0% nas emissões de CO em decorrência da inserção de 10% de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP não acarretaria benefícios efetivos em termos da redução da concentração de ozônio na atmosfera.

A Figura 14 apresenta os valores percentuais da redução da concentração de ozônio para diferentes níveis de diminuição percentual das emissões de COV na cidade de São Paulo, conforme resultados obtidos nas pesquisas realizadas por Alvim (2013).

Tabela 47 - Redução das emissões de CO, COV e NO_x a partir da inserção de veículos elétricos a bateria na frota da RMSF

	Unidade	Percentual de veículos elétricos na frota			
		1%	3%	5%	10%
Quantidade de veículos BEV na frota ¹	veículos	84.863	254.589	424.315	848.630
Distância total percorrida anual ²	km/ano	20.000	20.000	20.000	20.000
Fator de emissão de veículos ICEV na combustão ³					
CO	g/km	0,171	0,171	0,171	0,171
NMHC	g/km	0,012	0,012	0,012	0,012
RCHO	g/km	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
NO _x	g/km	0,022	0,022	0,022	0,022
Fator de emissão de veículos ICEV na emissão evaporativa ⁴					
NMHC - Emissão evaporativa diurnal	g/dia	0,06	0,06	0,06	0,06
NMHC - Emissão evaporativa hotsoak	g/viagem	0,09	0,09	0,09	0,09
NMHC - Emissão evaporativa running losses	g/viagem	0,03	0,03	0,03	0,03
Fator de emissão de veículos ICEV na emissão de abastecimento ⁴					
NMHC - Taxa de evaporação	g/l	1,14	1,14	1,14	1,14
Emissões evitadas na combustão ⁵					
CO	t/ano	290	871	1.451	2.902
NMHC	t/ano	20	61	102	204
RCHO	t/ano	2,5	7,6	12,7	25,5
NO _x	t/ano	37	112	187	373
Emissões evitadas na emissão evaporativa					
NMHC - Emissão evaporativa diurnal ⁶	t/ano	1,9	5,6	9,3	18,6
NMHC - Emissão evaporativa hotsoak ⁷	t/ano	2,2	6,7	11,1	22,2
NMHC - Emissão evaporativa running losses ⁷	t/ano	0,7	2,2	3,7	7,4
Emissões evitadas na emissão de abastecimento					
NMHC - Taxa de evaporação ⁸	t/ano	142	426	711	1.421
Total de emissões evitadas ⁹					
CO	t/ano	290	871	1.451	2.902
COV ¹⁰	t/ano	170	510	849	1.699
NO _x	t/ano	37	112	187	373
Redução percentual das emissões ¹¹					
CO	%	0,2%	0,6%	1,0%	2,0%
COV	%	0,4%	1,2%	2,1%	4,1%
NO _x	%	0,04%	0,1%	0,2%	0,4%

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Calculado a partir de dados de DENATRAN (2016) e CETESB (2016a).

² Nota: Distância total percorrida anual adotada em todo o estudo.

³ Nota: Valores das Tabelas 42 e 43.

⁴ Nota: Valores da Tabela 44.

⁵ Nota: Calculado utilizando os dados das duas primeiras linhas desta tabela e os fatores de emissão na combustão.

⁶ Nota: Calculado utilizando os dados da primeira linha desta tabela e os fatores de emissão evaporativa.

⁷ Nota: Calculado utilizando os dados da primeira linha e os fatores de emissão evaporativa desta tabela, além de 291,36 dias de uso do veículo por ano, conforme apresentado no Apêndice A.

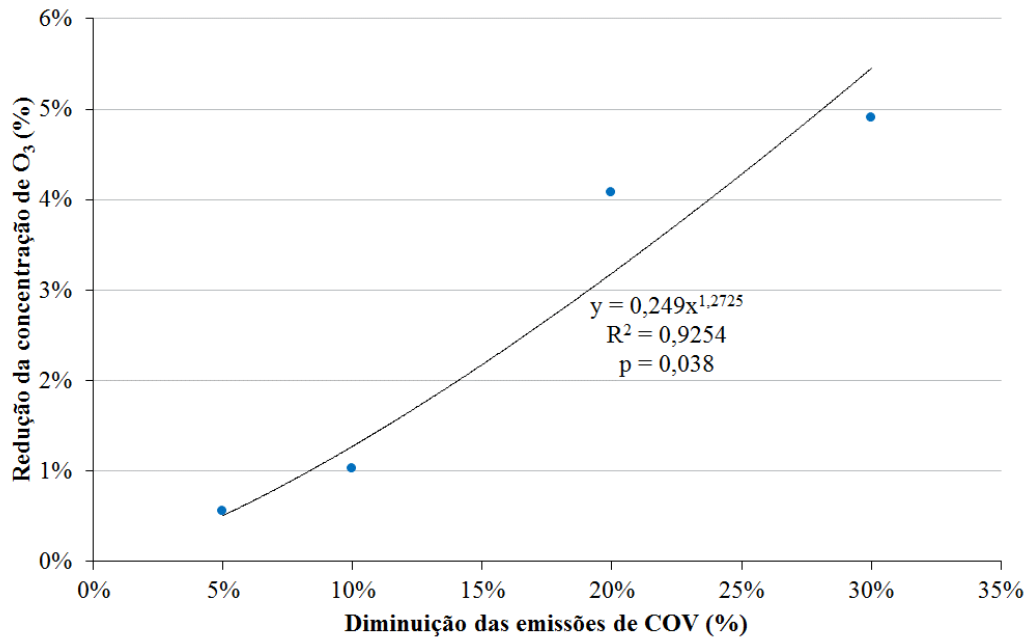
⁸ Nota: Calculado utilizando os dados das duas primeiras linhas e o fator de emissão de abastecimento desta tabela, além de uma autonomia específica do ICEV com gasolina de 13,61 km/l, conforme mostrado na Tabela 33.

⁹ Nota: Somatório das emissões evitadas na combustão, no abastecimento e evaporativa.

¹⁰ Nota: Corresponde às emissões dos poluentes NMHC e RCHO.

¹¹ Nota: Redução percentual calculada com base no valor médio das emissões entre os anos de 2013 e 2015 para cada um dos poluentes (CETESB, 2016a, 2016b).

Figura 14 - Relação entre a redução da concentração de O₃ e a diminuição das emissões de COV na cidade de São Paulo



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de Alvim (2013).

A partir da equação que consta na Figura 14, calcula-se que, para uma redução de 4,1% nas emissões de COV em decorrência da inserção de 10% de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP, espera-se uma redução de 0,41% na concentração de ozônio na atmosfera, que corresponde a $0,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se tomado como base a média móvel do quarto maior valor diário da concentração de ozônio entre os anos de 2013 e 2015 (CETESB, 2016b).

O nível de redução de ozônio estimado é insignificante, ainda mais considerando que o decréscimo de 0,4% nas emissões de NO_x, apresentado na Tabela 47, tenderia a piorar a redução da concentração de ozônio. Desta forma, a integração de veículos elétricos na frota não pode ser considerada um fator relevante na redução da concentração de O₃ na atmosfera.

3.3.4 Dióxido de enxofre

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás incolor e com forte odor, emitido principalmente em processos que utilizam a queima de óleo combustível, em refinarias de petróleo, veículos a diesel, na produção de papel e fertilizantes, podendo levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação (CETESB, 2014).

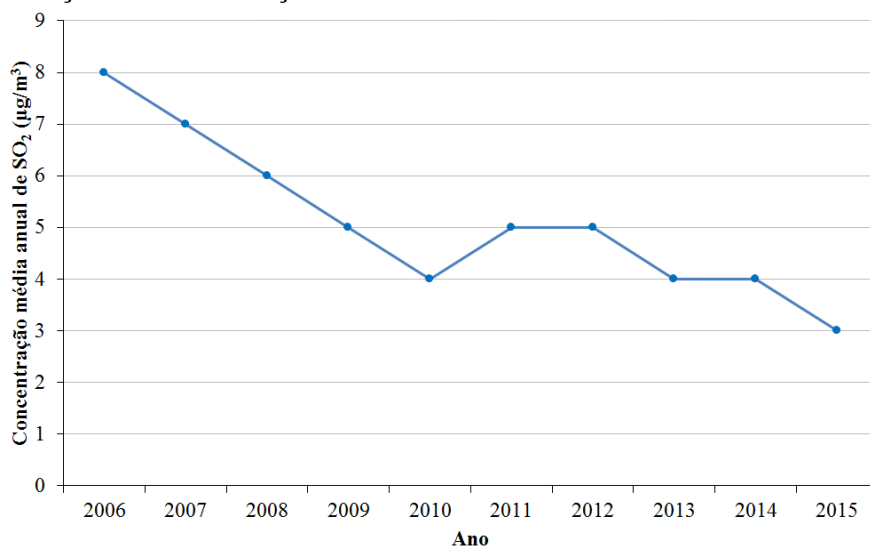
Quando encontrado em concentração superior à recomendada na atmosfera, pode causar problemas no sistema respiratório e na função pulmonar, irritação ocular e aumento da morbidade e da mortalidade por enfermidades cardíacas durante episódios críticos, sendo que

tais sintomas são agravados em pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças (DANNI-OLIVEIRA, 2008; CETESB, 2016b).

Em pesquisas de Gouveia et al. (2006), foi constatado que um incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração de SO_2 na atmosfera leva ao aumento de 6,7% e 11,3% no risco de internações por doenças respiratórias, respectivamente, em crianças e em idosos. Para as internações por doenças circulatórias em idosos, o aumento observado foi de 3,3%.

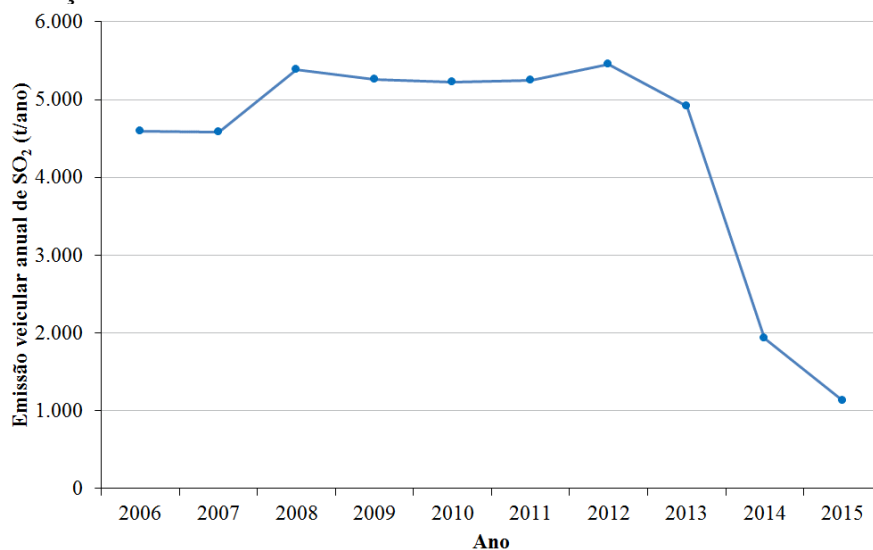
A Figura 15 apresenta a evolução histórica da concentração média anual de SO_2 na Região Metropolitana de São Paulo. A Figura 16 exhibe a evolução da emissão veicular anual de SO_2 na mesma região.

Figura 15 - Evolução da concentração média anual de SO_2 na RMSP



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de CETESB (2016b).

Figura 16 - Evolução da emissão veicular anual de SO_2 na RMSP



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de CETESB (2016a).

Conforme se observa na Figura 16, a emissão de SO₂ na RMSP sofreu redução drástica a partir de 2014 em função da alteração do teor de enxofre do diesel ocorrida em 2013 (de 50 mg/kg para 10 mg/kg), e em especial da gasolina, ocorrida em 2014 (de 800 mg/kg para 50 mg/kg). No ano de 2015, esse poluente não apresentou nenhum episódio de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar na RMSP (CETESB, 2016a, 2016b).

Considerando que os automóveis são responsáveis por apenas 10% das emissões de SO₂ na RMSP (CETESB, 2016a) e que nos últimos anos houve uma redução expressiva da concentração de SO₂ na atmosfera da região, atingindo 3 µg/m³ no ano de 2015, a inserção de veículos elétricos na frota de veículos da RMSP, em substituição aos veículos convencionais, reduzirá de forma insignificativa a concentração deste poluente na atmosfera.

3.3.5 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido, emitido principalmente na combustão incompleta de combustíveis, como por exemplo, em veículos automotores. Além de ser um gás asfixiante, quando em concentração superior à recomendada na atmosfera, pode levar a problemas respiratórios e cardiovasculares, como o infarto do miocárdio (CETESB, 2016b).

Diversas pesquisas avaliaram o impacto da variação da concentração do monóxido de carbono na saúde humana. A Tabela 48 apresenta os valores do risco relativo de internação por doenças respiratórias e infarto do miocárdio decorrente do incremento da concentração de CO na atmosfera encontrados na literatura.

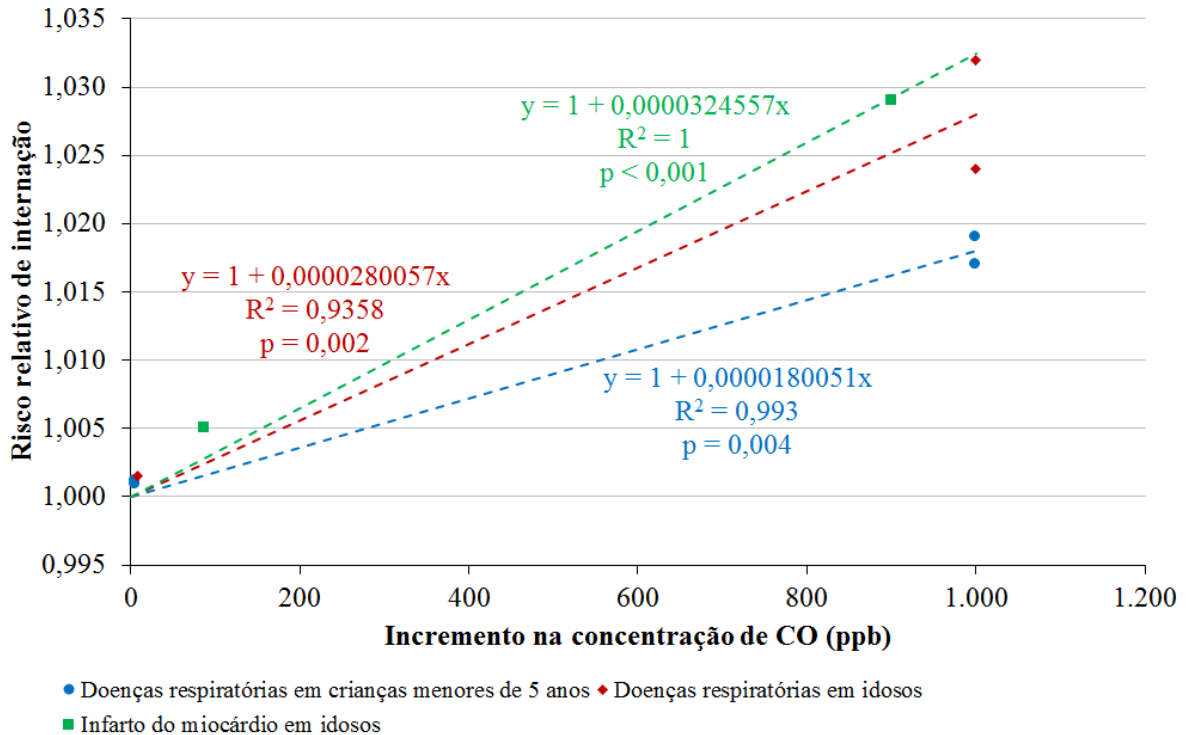
Tabela 48 - Valores de risco relativo de internação por doenças respiratórias e infarto do miocárdio decorrente do incremento da concentração de CO na atmosfera

Tipo de enfermidade	População	Incremento na concentração de CO (ppb)	Risco relativo (RR)	Fonte
Doenças respiratórias	Crianças menores de 1 ano	5,56	1,00115	(SOUSA et al., 2012)
Doenças respiratórias	Crianças de 1 a 5 anos	5,56	1,0009	(SOUSA et al., 2012)
Doenças respiratórias	Crianças menores de 5 anos	1.000	1,019	(GOUVEIA et al., 2006)
Doenças respiratórias	Crianças menores de 5 anos	1.000	1,017	(GOUVEIA et al., 2003)
Doenças respiratórias	Idosos com 65 anos ou mais	8,73	1,00154	(SOUSA et al., 2012)
Doenças respiratórias	Idosos com 65 anos ou mais	1.000	1,024	(GOUVEIA et al., 2006)
Doenças respiratórias	Idosos com 65 anos ou mais	1.000	1,032	(GOUVEIA et al., 2003)
Infarto do miocárdio	Idosos com 75 anos ou mais	87,29	1,005	(NUVOLONE, 2011)
Infarto do miocárdio	Idosos com 65 anos ou mais	900	1,029	(BARNETT et al., 2006)

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 48, observa-se uma tendência de aumento no risco relativo de internação com o incremento na concentração de CO na atmosfera, sendo tal relação mostrada na Figura 17.

Figura 17 - Risco relativo de internação em função do incremento na concentração de CO na atmosfera

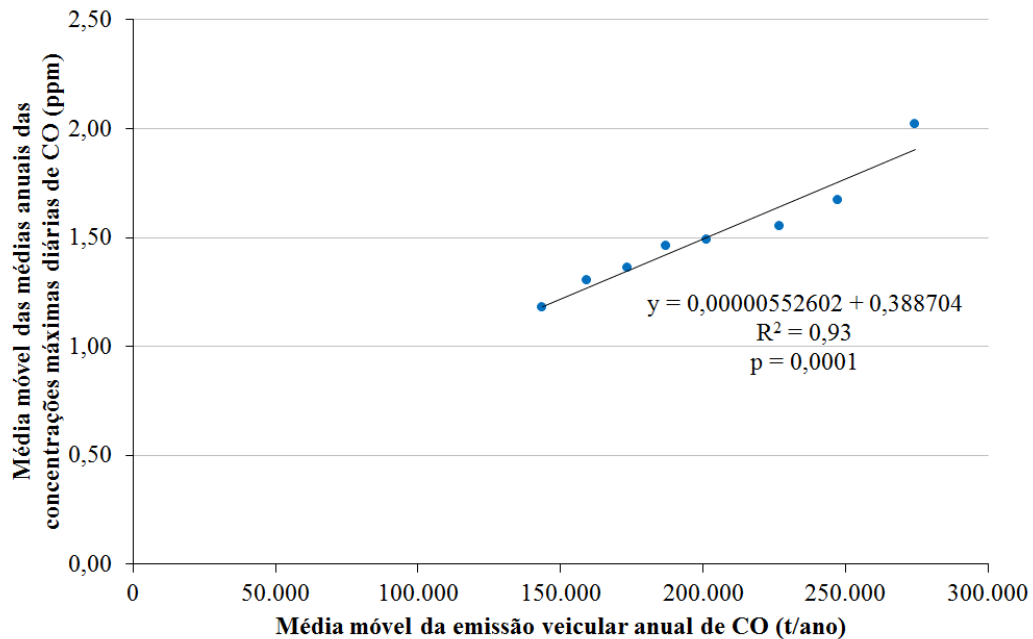


Fonte: Produção do próprio autor, utilizando valores da Tabela 48.

Na Região Metropolitana de São Paulo, a relação entre a média móvel de três anos das médias anuais das concentrações máximas diárias de CO e a média móvel de três anos da emissão veicular anual de CO entre os anos de 2006/2008 e 2013/2015 é exibida na Figura 18.

O impacto esperado na redução da concentração de monóxido de carbono na atmosfera a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da Região Metropolitana de São Paulo, é detalhado na Tabela 49.

Figura 18 - Relação entre a média móvel de três anos das médias anuais das concentrações máximas diárias de CO e a média móvel de três anos da emissão veicular anual de CO entre os anos de 2006/2008 e 2013/2015 na RMSP



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de CETESB (2016a) e CETESB (2016b).

Tabela 49 - Impacto esperado na redução da concentração de CO na atmosfera a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP

	Unidade	Percentual de veículos elétricos na frota			
		1%	3%	5%	10%
Quantidade de veículos BEV na frota ¹	veículos	84.863	254.589	424.315	848.630
Distância total percorrida anual ²	km/ano	20.000	20.000	20.000	20.000
Fator de emissão de CO de veículos ICEV ³	g/km	0,171	0,171	0,171	0,171
Emissões evitadas de CO ⁴	t/ano	290	871	1.451	2.902
Emissão veicular de CO					
Antes da introdução de veículos BEV ⁵	t/ano	143.889	143.889	143.889	143.889
Após a introdução de veículos BEV ⁶	t/ano	143.598	143.018	142.438	140.986
Concentrações máximas diárias de CO					
Antes da introdução de veículos BEV ⁷	ppb	1.183,84	1.183,84	1.183,84	1.183,84
Após a introdução de veículos BEV ⁷	ppb	1.182,23	1.179,02	1.175,82	1.167,80
Redução após a introdução de veículos BEV	ppb	1,60	4,81	8,02	16,04
Redução após a introdução de veículos BEV	%	0,14%	0,41%	0,68%	1,35%

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Calculado a partir de dados de DENATRAN (2016) e CETESB (2016a).

² Nota: Distância total percorrida anual adotada em todo o estado.

³ Nota: Valores da Tabela 42.

⁴ Nota: Calculado utilizando os dados das três primeiras linhas desta tabela.

⁵ Fonte: Emissão anual média nos anos de 2013 a 2015 na RMSP, de acordo com CETESB (2016a).

⁶ Nota: Diferença entre o valor da emissão veicular de CO antes da introdução de veículos BEV e o valor das emissões evitadas de CO, ambas mostradas nesta tabela.

⁷ Nota: Valores calculados a partir da equação obtida na Figura 18.

A partir dos valores da redução da concentração de CO obtidos na Tabela 49, estimam-se os riscos relativos e as quantidades anuais de internações por doenças respiratórias e infarto do miocárdio que poderiam ser evitadas anualmente na RMSP, sendo tais resultados mostrados na Tabela 50. Também são apresentados os valores do custo anual evitado com as internações supramencionadas.

Tabela 50 - Riscos relativos, quantidades e custos anuais com internações por doenças respiratórias e infarto do miocárdio que poderiam ser evitadas na RMSP com a redução da concentração do CO na atmosfera

	Símbolo	Percentual de veículos elétricos na frota			
		1%	3%	5%	10%
Risco relativo de internações ¹					
Doenças respiratórias em crianças menores de 5 anos	RR	1,000029	1,000087	1,000144	1,000289
Doenças respiratórias em idosos	RR	1,000045	1,000135	1,000225	1,000449
Infarto do miocárdio em idosos	RR	1,000052	1,000156	1,000260	1,000521
Quantidade total anual de internações na RMSP ²					
Doenças respiratórias em crianças menores de 5 anos	N	37.284	37.284	37.284	37.284
Doenças respiratórias em idosos	N	24.000	24.000	24.000	24.000
Infarto do miocárdio em idosos	N	7.975	7.975	7.975	7.975
Quantidade anual de internações evitadas na RMSP ³					
Doenças respiratórias em crianças menores de 5 anos	NA	1	3	5	11
Doenças respiratórias em idosos	NA	1	3	5	11
Infarto do miocárdio em idosos	NA	0	1	2	4
Custo médio de internação na RMSP ²					
Doenças respiratórias (R\$/internação)	-	1.048	1.048	1.048	1.048
Infarto do miocárdio (R\$/internação)	-	3.111	3.111	3.111	3.111
Custo evitado anual de internações na RMSP ⁴					
Doenças respiratórias (R\$)	-	2.096	6.289	10.481	23.059
Infarto do miocárdio (R\$)	-	0	3.111	6.221	12.443
Total (R\$)	-	2.096	9.399	16.703	35.501

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Nota: Valores calculados utilizando as equações obtidas na Figura 17 e os níveis de redução da concentração de CO da Tabela 49, que variaram de 1,60 a 16,04 ppb.

² Fonte: DATASUS (2017).

³ Nota: Cálculo realizado a partir da equação 25.

⁴ Nota: Cálculo utilizando os valores da quantidade anual de internações evitadas na RMSP e do custo médio de internação na RMSP apresentados nesta tabela.

Os cálculos desenvolvidos nesta seção consideraram somente a introdução de veículos BEV na frota, sem quaisquer veículos PHEV. Neste caso, o valor do custo evitado anual com internações na RMSP, apresentado na Tabela 50, é maximizado, haja vista que os veículos BEV têm a capacidade de percorrer 100% da distância total percorrida anual (*DTA*) no modo

charge depleting, diferentemente dos veículos PHEV, que tendem a utilizar o motor de combustão interna quando a distância de uma determinada viagem é superior à autonomia da bateria do veículo.

A partir dos resultados exibidos na Tabela 50, constata-se que, considerando um nível de introdução de 10% de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP, a redução prevista no custo anual com internações decorrentes de doenças respiratórias e infartos do miocárdio seria de R\$ 35.501,00. Tal valor sugere que apenas níveis de inserção superiores a 10% de veículos PEV na frota poderiam contribuir significativamente para a redução dos custos públicos com internações devidas às emissões de CO para a atmosfera, sendo que valores abaixo de 10% contribuem de forma limitada.

3.4 ANÁLISE ENERGÉTICA

Somente no ano de 2015, foram consumidos $260.684 \cdot 10^3$ tep de energia no Brasil, que corresponde a 3.032 TWh, sendo o setor de transportes rodoviários responsável por 30% deste total (EPE, 2016). O impacto da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da Região Metropolitana de São Paulo no consumo de energia elétrica e gasolina é apresentado na Tabela 51.

Tabela 51 - Impacto no consumo de energia elétrica e gasolina a partir da introdução de veículos elétricos a bateria na frota da RMSP

	Unidade	Percentual de veículos elétricos na frota			
		1%	3%	5%	10%
Quantidade de veículos BEV na frota ¹	veículos	84.863	254.589	424.315	848.630
Distância total percorrida anual ²	km/ano	20.000	20.000	20.000	20.000
Autonomia específica do BEV com energia elétrica ³	km/kWh	5,37	5,37	5,37	5,37
Autonomia específica do ICEV similar ao VE com gasolina ³	km/l	13,61	13,61	13,61	13,61
Aumento do consumo de energia elétrica	GWh/ano	316	949	1.581	3.163
	tep/ano	27.192	81.576	135.960	271.920
Redução do consumo de gasolina	Ml/ano	125	374	623	1.247
	tep/ano	96.217	288.652	481.086	962.172

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Calculado a partir de dados de DENATRAN (2016) e CETESB (2016a).

² Nota: Distância total percorrida anual adotada em todo o estado.

³ Nota: Valor da Tabela 33.

Na Tabela 51, constata-se que se 10% da frota de veículos da Região Metropolitana de São Paulo fosse composta por veículos elétricos a bateria, a redução do consumo de gasolina

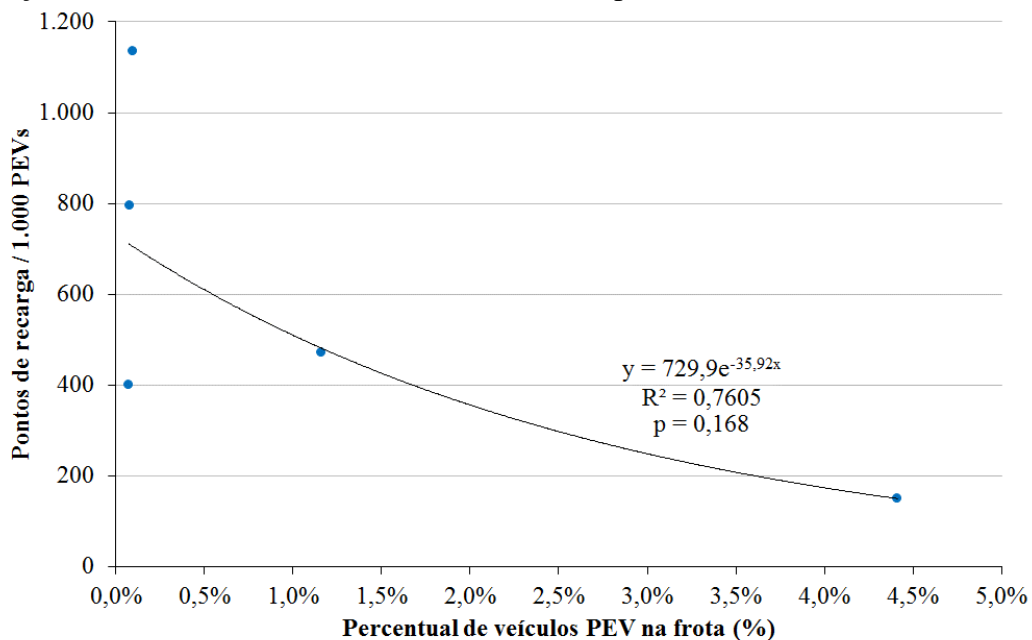
seria de 962.172 tep/ano, enquanto que o aumento do consumo de energia elétrica seria de 271.920 tep/ano. Assim, a redução total no consumo de energéticos seria de 690.252 tep/ano, que corresponde a 0,2648% do total da energia consumida no Brasil no ano de 2015.

3.5 ANÁLISE DA INFRAESTRUTURA DE RECARGA

Nos Estados Unidos, estima-se que 85% das recargas de veículos PEV são realizadas na própria residência dos proprietários dos veículos, prioritariamente no período da madrugada, sendo que tais recargas residenciais respondem por aproximadamente 83% da energia elétrica consumida pelos veículos PEV (INL, 2014). Ainda assim, em face da necessidade de recarga, a introdução de veículos elétricos *plug-in* em uma cidade demanda a disponibilização de estações públicas de recarga para atender aos proprietários de tais veículos.

A Figura 19 apresenta a relação entre a quantidade específica de estações públicas de recarga e a participação dos veículos PEV na frota de cinco cidades europeias no ano de 2014.

Figura 19 - Relação entre a quantidade específica de estações públicas de recarga e a participação dos veículos PEV na frota de cidades europeias no ano de 2014



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de ICCT (2016b).

Na Figura 19, constata-se um nível de significância, *p-value*, de 0,168. Conforme apontado por Espírito-Santo e Daniel (2015), o nível de significância é afetado por diversos fatores, sendo o tamanho da amostra o mais determinante, de forma que é mais provável obter

um valor de *p-value* significativo com tamanhos grandes das amostras e, inversamente, em amostras pequenas, o valor de *p-value* pode não ser significativo.

No caso da análise em questão, a amostra apresenta apenas 5 elementos, o que torna o cálculo do valor do nível de significância bastante sensível, sendo que qualquer avaliação isolada de seu valor deve ser efetuada com cautela, dada a limitação do teste estatístico.

Na Figura 19, observa-se que as cidades com valores de participação dos veículos PEV na frota inferiores a 0,1% apresentam variação acentuada na quantidade específica de pontos de recarga, demonstrando as diferentes estratégias adotadas pelos governos locais na adoção das estações de recarga, mas ainda assim, a equação exibida na Figura 19 permite estimar, com base na evidência das cidades avaliadas, a quantidade de pontos de recarga necessários para diferentes níveis de participação dos veículos PEV na frota, haja vista que o valor do coeficiente de determinação, R^2 , é de 0,7605, apontando uma correlação muito forte entre as variáveis consideradas.

A Tabela 52 apresenta a estimativa do custo de instalação de estações públicas de recarga para veículos PEV na Região Metropolitana de São Paulo para atender a diferentes níveis de participação dos veículos PEV nas vendas anuais no primeiro e no sexto ano de integração dos veículos PEV na frota. Na Tabela 52 também são apresentadas as estimativas dos custos de operação e manutenção (O&M) e da receita obtida com a venda da energia elétrica nas estações de recarga.

Tabela 52 - Análise da implantação de estações públicas de recarga na RMSP

Análise da implantação de estações de recarga no primeiro e sexto anos após a integração dos veículos PEV na frota	Unidade	Participação dos veículos PEV nas vendas no primeiro ano				Participação dos veículos PEV nas vendas anuais no sexto ano			
		1%	3%	5%	10%	1%	3%	5%	10%
Cálculo da quantidade de estações de recarga									
Venda anual total de veículos leves novos ¹	veículos/ano	427.179	427.179	427.179	427.179	427.179	427.179	427.179	427.179
Quant. anual de novos veículos PEV na frota (A) ²	PEV/ano	4.272	12.815	21.359	42.718	4.272	12.815	21.359	42.718
Quant. total acumulada de veículos PEV na frota (B) ³	PEV	4.272	12.815	21.359	42.718	25.632	76.890	128.154	256.308
Frota total de veículos no ano em questão (C) ⁴	veículos	8.737.334	8.737.334	8.737.334	8.737.334	10.108.401	10.108.401	10.108.401	10.108.401
Percentual total de veículos PEV na frota no ano em questão (D=B/C)	%	0,05%	0,15%	0,24%	0,49%	0,25%	0,76%	1,27%	2,54%
Quant. específica de pontos de recarga em função do percentual de veículos PEV na frota (E) ⁵	pt/1.000 PEV	717	692	669	612	666	555	463	294
Quant. total acumulada de pontos de recarga (F=C·D·E/1000)	pt	3.064	8.874	14.279	26.158	17.080	42.704	59.323	75.245
Quant. total de novos pontos de recarga no ano em questão (G) ⁶	pt/ano	3.064	8.874	14.279	26.158	2.661	5.709	6.584	3.882
Quant. total de veículos PEV por ponto de recarga (H=D·E/G)	PEV/pt	1,4	1,4	1,5	1,6	1,5	1,8	2,2	3,4
Quant. total de pontos de recarga por veículo PEV (I=1000/H)	pt/1.000 PEV	717	692	669	612	666	555	463	294
Quant. de pontos de recarga por veículo PEV no ano em questão (J=1000·G/A)	pt/1.000 PEV	717	692	669	612	623	446	308	91
Custo de instalação das estações de recarga									
Custo específico de instalação dos novos pontos de recarga (K) ⁷	R\$/ponto	9.946	9.946	9.946	9.946	9.946	9.946	9.946	9.946
Custo de instalação dos novos pontos de recarga no ano em questão (L=G·K/1000000)	mi R\$/ano	30,47	88,25	142,02	260,16	26,47	56,78	65,49	38,61
Custo total acumulado de instalação dos pontos de recarga (M) ³	mi R\$	30,47	88,25	142,02	260,16	169,87	424,72	590,00	748,35
Custo médio de instalação dos pontos por veículo PEV no ano em questão (N=1000000·L/A)	R\$/PEV	7.133	6.887	6.649	6.090	6.196	4.431	3.066	904
Custo médio total de instalação dos pontos por veículo PEV (O=M/B)	R\$/PEV	7.133	6.887	6.649	6.090	6.627	5.524	4.604	2.920
Custo de operação e manutenção (O&M)									
Custo de operação e manutenção no ano em questão ⁸	mi R\$/ano	3,05	8,83	14,20	26,02	16,99	42,47	59,00	74,84
Custo total acumulado de operação e manutenção ³	mi R\$	3,05	8,83	14,20	26,02	60,85	159,61	233,03	337,68
Receita com a venda de energia elétrica									
Energia fornecida pelos pontos de recarga no ano em questão (P) ⁹	MWh/ano	1.449	4.346	7.243	14.487	8.693	26.076	43.461	86.922
Energia total acumulada fornecida pelos pontos de recarga ³	MWh	1.449	4.346	7.243	14.487	30.424	91.265	152.113	304.226
Preço de venda da energia elétrica nos pontos de recarga (Q) ¹⁰	R\$/kWh	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Receita com a venda de energia elétrica nas estações no ano em questão (R=P·Q/1000)	mi R\$/ano	0,84	2,52	4,20	8,39	5,04	15,11	25,18	50,36
Receita total acumulada com a venda de energia elétrica nas estações ³	mi R\$	0,84	2,52	4,20	8,39	17,63	52,87	88,12	176,25

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Fonte: Calculado a partir de dados de DENATRAN (2016) e CETESB (2016a).

² Nota: Calculado utilizando o valor da primeira linha da tabela e o percentual de participação dos veículos PEV nas vendas anuais.

³ Nota: Valor acumulado desde o primeiro ano de integração dos veículos PEV na frota.

⁴ Fonte: Calculado a partir de dados de DENATRAN (2016) e CETESB (2016a), e considerando um aumento médio da frota de 2,96% ao ano entre os anos de 2012 e 2016, conforme DENATRAN (2012, 2016).

⁵ Nota: Cálculo realizado a partir da equação que consta na Figura 19.

⁶ Nota: Diferença entre a quantidade total necessária e a quantidade existente de pontos de recarga.

⁷ Fonte: INL (2015), considerando uma taxa de câmbio de US\$ 1,00 = R\$ 3,20.

⁸ Fonte: Baseado em estudos de Schroeder e Traber (2012).

⁹ Nota: Considerando que 13% da energia elétrica consumida pelos veículos PEV advém de estações públicas de recarga: INL (2014) e que a frota de veículos PEV é dividida igualmente entre os veículos Nissan Leaf e Toyota Prius Plug-in.

¹⁰ Fonte: Preço em jan. 2017, conforme ANEEL (2017).

A análise econômica consolidada da instalação de estações públicas de recarga na Região Metropolitana de São Paulo é apresentada na Tabela 53.

Tabela 53 - Análise econômica da instalação de estações públicas de recarga na RMSP

Instalação das estações de recarga	Análise econômica anual						VPL
	Ano 01	Ano 02	Ano 03	Ano 04	Ano 05	Ano 06	
Custo de instalação dos pontos de recarga (mi R\$) ¹							
1% de veículos PEV nas vendas anuais	30,47	29,47	28,58	27,79	27,09	26,47	-
3% de veículos PEV nas vendas anuais	88,25	79,70	72,47	66,35	61,16	56,78	-
5% de veículos PEV nas vendas anuais	142,02	119,46	101,33	86,74	74,97	65,49	-
10% de veículos PEV nas vendas anuais	260,16	180,78	125,01	85,73	58,06	38,61	-
Custo de O&M dos pontos de recarga (mi R\$/ano) ¹							
1% de veículos PEV nas vendas anuais	3,05	5,99	8,85	11,63	14,34	16,99	-
3% de veículos PEV nas vendas anuais	8,83	16,80	24,04	30,68	36,79	42,47	-
5% de veículos PEV nas vendas anuais	14,20	26,15	36,28	44,95	52,45	59,00	-
10% de veículos PEV nas vendas anuais	26,02	44,09	56,59	65,17	70,97	74,84	-
Receita com a venda de energia elétrica (mi R\$/ano) ¹							
1% de veículos PEV nas vendas anuais	0,84	1,68	2,52	3,36	4,20	5,04	-
3% de veículos PEV nas vendas anuais	2,52	5,04	7,55	10,07	12,59	15,11	-
5% de veículos PEV nas vendas anuais	4,20	8,39	12,59	16,79	20,98	25,18	-
10% de veículos PEV nas vendas anuais	8,39	16,79	25,18	33,57	41,96	50,36	-
Valor presente líquido (mi R\$) ²							
1% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-163,58
3% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-414,19
5% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-582,45
10% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-759,09
Valor presente líquido por veículo PEV (R\$/PEV) ³							
1% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-6.382
3% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-5.387
5% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-4.545
10% de veículos PEV nas vendas anuais	-	-	-	-	-	-	-2.962

Fonte: Produção do próprio autor.

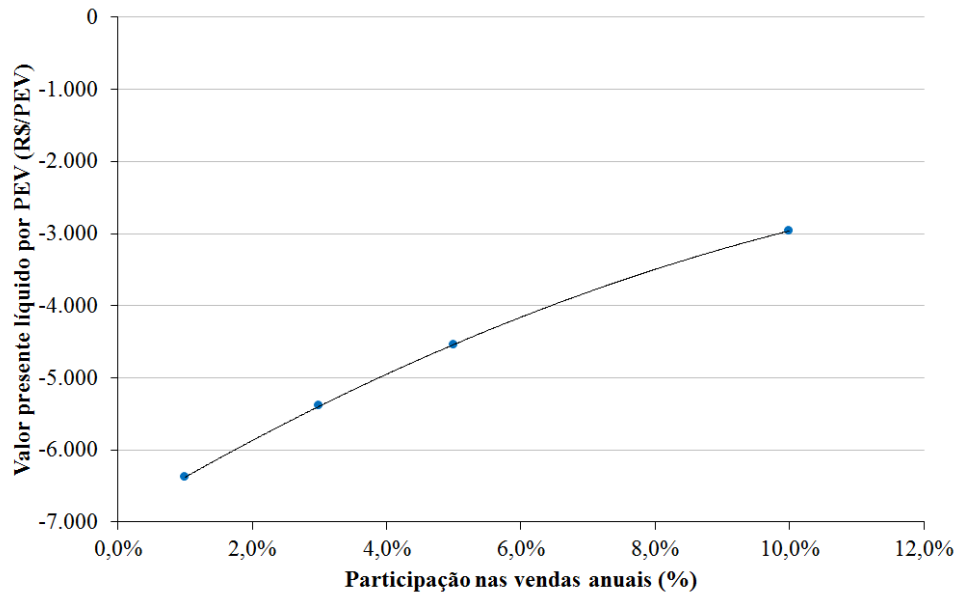
¹ Nota: Valores obtidos de maneira análoga ao procedimento demonstrado na Tabela 52.

² Fonte: Para o cálculo do VPL, foi considerado um horizonte de seis anos na análise e uma taxa anual de juros de 8,35%, que correspondeu ao rendimento médio da poupança no ano de 2016. Fonte: PORTAL BRASIL (2017).

³ Nota: Razão do VPL pela quantidade total de veículos PEV na frota decorridos seis anos da inserção dos mesmos.

Na Figura 20 observa-se a relação entre o valor presente líquido da implantação das estações públicas de recarga por veículo PEV e a participação dos veículos PEV nas vendas anuais na RMSP.

Figura 20 - Relação entre o VPL das estações públicas de recarga por veículo PEV e a participação dos veículos PEV nas vendas anuais na RMSP



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando valores da Tabela 53.

Na Figura 20, evidencia-se que o custo específico com a implantação de estações públicas de recarga é reduzido substancialmente à medida que a participação dos veículos elétricos *plug-in* nas vendas anuais é incrementada.

4 MÉTODOS DE AUXÍLIO À DECISÃO

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos métodos de Tomada de Decisão por Múltiplos Objetivos (MODM) e aos métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA), destacando os elementos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

A otimização multiobjetivo é uma área da ciência que estuda problemas matemáticos que envolvem a otimização simultânea de mais de uma função objetivo (STEVANOVIC et al., 2015).

Diferentemente dos problemas de otimização com objetivo único, os problemas com múltiplos objetivos geralmente não têm uma *solução ótima* que satisfaça a todos objetivos, haja vista que as funções objetivo, que devem ser maximizadas ou minimizadas, podem ser conflitantes entre si. Uma solução boa para uma função objetivo pode ser ruim para outras funções, tornando difícil a busca por soluções que satisfaçam todos os objetivos concomitantemente (CUI et al., 2017).

Para contornar essa dificuldade é necessário dar um novo sentido ao que vem a ser solução para um problema de otimização multiobjetivo (MOP³⁰), e isso requer alguns conceitos, que são apresentados a seguir.

4.1.1 Pareto-otimalidade

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser formalmente definido como (CHIANDUSSI et al., 2012):

$$\text{minimizar } F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}) \dots, f_k(\mathbf{x})] \quad (26)$$

sujeito a:

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (27)$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, p \quad (28)$$

$$\mathbf{x} \in \Omega \quad (29)$$

³⁰ MOP do inglês *Multiobjective Optimization Problem*

sendo,

$F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}) \dots, f_k(\mathbf{x})]$ as k funções objetivo

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ o vetor com n variáveis de decisão

g_i : as m restrições de desigualdade

h_j : as p restrições de igualdade

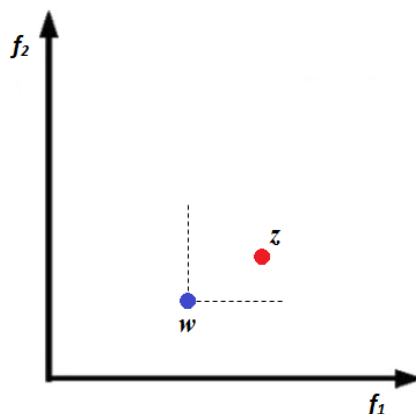
Ω : o espaço de decisão

A noção de otimalidade empregada em problemas de otimização multiobjetivo está relacionada com o conceito de dominância.

Dominância de Pareto Um vetor $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_k)$ domina um outro vetor $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_k)$ se e somente se $u_i \leq v_i \forall i \in 1, \dots, k$ e existe pelo menos um j ($1 \leq j \leq k$) tal que $u_j < v_j$. Isto é usualmente denotado por $\mathbf{u} < \mathbf{v}$.

A Figura 21 ilustra um exemplo em que uma solução w domina a solução z , denotado como $w < z$, para um MOP com duas funções objetivo, cujo objetivo é minimizar f_1 e f_2 .

Figura 21 - Exemplo de dominância de Pareto

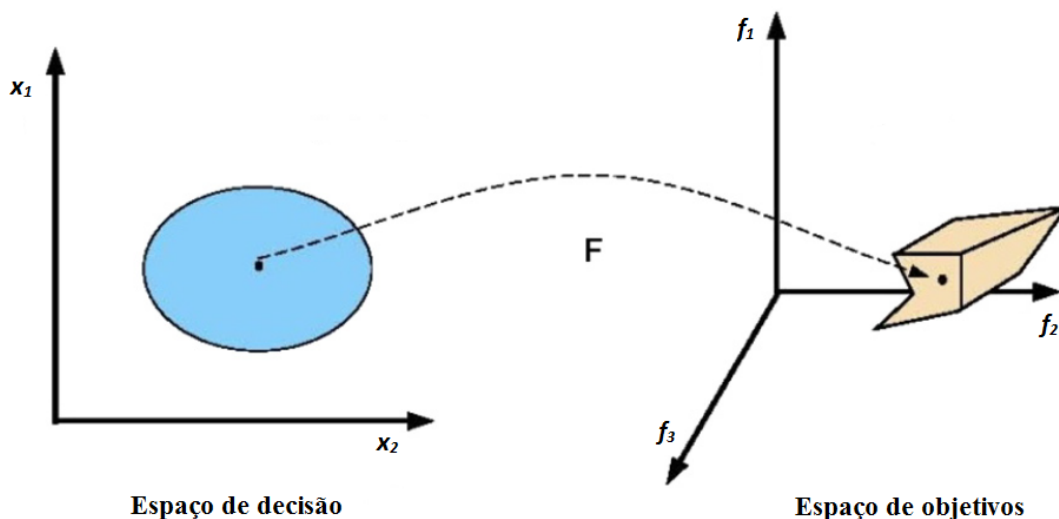


Fonte: Produção do próprio autor.

Espaço de decisão / Espaço de objetivos As funções objetivo $F(\mathbf{x})$ de problemas de otimização multiobjetivo formam um espaço multidimensional. Supondo a existência de k funções objetivo nomeadas f_1, f_2, \dots, f_k , se estas funções dependem de n variáveis, então o vetor de soluções pode ser representado no espaço de decisão como $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^n$, sendo que para cada vetor de soluções \mathbf{x} há um ponto $F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}) \dots, f_k(\mathbf{x})]$ no espaço de objetivos (AGARWAL; KUMAR; VIG, 2014). O mapeamento das variáveis de decisão do

espaço de decisão no respectivo espaço de objetivos é exemplificado na Figura 22 (CHIANDUSSI et al., 2012).

Figura 22 - Exemplo de mapeamento das variáveis de decisão em problemas de otimização multiobjetivo



Fonte: Adaptado de Chianducci et al. (2012).

Pareto Ótimo Uma solução $\mathbf{x} \in \Omega$ é um Pareto ótimo em relação ao conjunto Ω se e somente se não existe $\mathbf{x}' \in \Omega$ tal que $F(\mathbf{x}') < F(\mathbf{x})$.

Considerando as soluções Pareto-ótimas de um MOP qualquer, o termo *soluções não dominadas* é utilizado para representar os vetores dos valores das funções objetivo $F(\mathbf{x})$ no espaço de objetivos, enquanto que o termo *soluções eficientes* é reservado para os vetores dos valores das variáveis de decisão \mathbf{x} no espaço de decisão (KÖHN, 2011). Desta forma, na Figura 22, a área de cor azul no espaço de decisão representa as soluções eficientes do problema, enquanto que a superfície de cor laranja, no espaço de objetivos, representa as soluções não dominadas.

Conjunto Pareto Ótimo Seja o MOP $F(\mathbf{x})$, o conjunto Pareto Ótimo, P^* , é definido como:

$$P^* := \{\mathbf{x} \in \Omega \mid \nexists \mathbf{x}' \in \Omega, F(\mathbf{x}') < F(\mathbf{x})\} \quad (30)$$

Assim, todas as soluções Pareto-ótimas do MOP constituem o conjunto Pareto ótimo P^* . Consequentemente, qualquer solução $x' \in \Omega$, não inclusa no conjunto Pareto ótimo, é dominada por pelo menos uma solução x do conjunto Pareto ótimo.

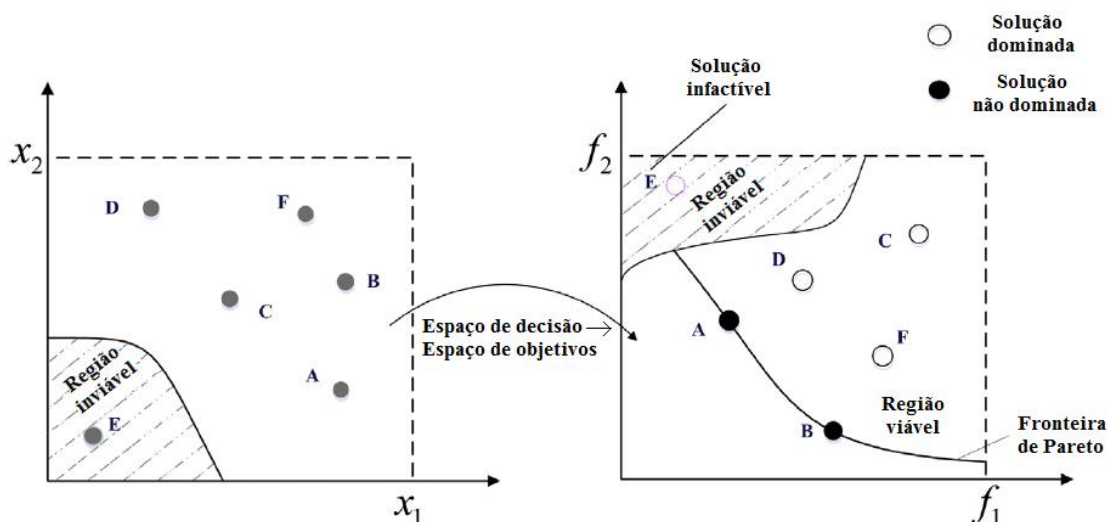
Teoricamente, a quantidade de soluções do conjunto Pareto ótimo pode ser infinita, mas na prática, somente um número limitado de soluções é calculado (AGARWAL; KUMAR; VIG, 2014).

Fronteira de Pareto A representação do conjunto Pareto ótimo, P^* , no espaço de objetivos, é conhecida como Fronteira de Pareto, que é formalmente definida como:

$$PF^* := \{F(x) \mid x \in P^*\} \quad (31)$$

A Figura 23 apresenta um exemplo de fronteira de Pareto para um MOP com duas variáveis de decisão e duas funções objetivo, cujo objetivo é minimizar f_1 e f_2 (CUI et al., 2017). Em tal figura, os pontos A e B do espaço de objetivos são as soluções não dominadas do MOP, que quando representadas no espaço de decisão, são denominadas soluções eficientes do problema.

Figura 23 - Exemplo de fronteira de Pareto para um MOP com duas variáveis de decisão e duas funções objetivo



Fonte: Cui et al. (2017).

De acordo com Chiandussi et al. (2012), não é tarefa fácil encontrar uma expressão analítica para a linha ou superfície que contém os pontos da fronteira de Pareto e, em muitos casos, é impossível.

Para Köhn (2011), gerar o conjunto Pareto ótimo e a fronteira de Pareto representa o aspecto mais desafiador da otimização multiobjetivo; mesmo problemas com apenas duas funções objetivo podem facilmente possuir soluções Pareto-ótimas inviáveis em termos computacionais. As técnicas de otimização empregadas na geração da fronteira de Pareto podem ser classificadas em *métodos exatos* ou *métodos heurísticos*, dependendo do grau de exatidão das soluções obtidas.

Os métodos exatos, como o próprio nome sugere, garantem que sejam encontradas as soluções da fronteira de Pareto, desde que existam soluções viáveis para o problema. (BOECK; BELIËN; EGYED, 2014).

Os métodos heurísticos, também chamados de métodos numéricos inteligentes, são inspirados em simulações ou observações de fenômenos naturais e são divididos em quatro categorias: algoritmos baseados na biologia, algoritmos baseados na física, algoritmos baseados na geografia e algoritmos baseados na cultura (CUI et al., 2017). Usualmente são utilizados em problemas complexos, que demandam alto custo computacional, em que o uso de métodos exatos tornaria a resolução inviável ou com tempo computacional inaceitável. Tais métodos, diferentemente dos métodos exatos, encontram apenas soluções próximas da fronteira de Pareto (SAFARI, 2012).

Para Hu, Wang e Paolo (2013), a geração da fronteira de Pareto por meio de um método exato é uma vantagem óbvia, uma vez que, neste caso, são fornecidas aos tomadores de decisão as informações mais exatas com relação à otimalidade das soluções, além de melhorar a robustez da decisão.

4.1.2 Métodos para solução de problemas de otimização multiobjetivo

De acordo com Veldhuizen e Lamont (2000), os métodos para resolução de problemas de otimização multiobjetivo podem ser classificados, quanto ao processo de decisão, em *métodos à priori*, *métodos à posteriori* e *métodos iterativos*, dependendo do momento em que o tomador de decisão aponta suas preferências.

- Métodos à priori:

Nos métodos *à priori*, o tomador de decisão aponta suas preferências antes do processo de resolução, utilizando, por exemplo, pesos para os diferentes objetivos, e o problema multiobjetivo é convertido em um problema com objetivo único. Então, um algoritmo de otimização clássico para problemas de objetivo único é empregado para encontrar a solução (SAZVAR et al., 2014).

As principais vantagens dos métodos *à priori* são a facilidade de implementação e o baixo custo computacional quando comparados aos outros tipos de métodos, entretanto, de acordo com Gong et al. (2014), tais métodos apresentam como desvantagem o fato de que, caso o tomador de decisão não conheça o problema detalhadamente, a tarefa de fornecer suas preferências para cada um dos objetivos torna-se difícil, resultando em uma solução subótima para o problema.

Adicionalmente, nos métodos *à priori*, o tomador de decisão aponta suas preferências sem conhecer suas alternativas, ou seja, sem conhecer outras soluções não dominadas da fronteira de Pareto.

Outra desvantagem apontada por Boeck, Beliën e Egyed (2014) é que, como o tomador de decisão fixa os pesos de cada objetivo antes do processo de otimização, os métodos *à priori* podem ser considerados demasiadamente subjetivos, uma vez que a solução depende significativamente dos pesos dados aos diferentes objetivos.

- Métodos à posteriori:

Nos métodos *à posteriori*, o objetivo é produzir todas as soluções Pareto-ótimas, ou pelo menos um subconjunto representativo de tais soluções, bem como gerar a fronteira de Pareto (KANAFI; KHORRAM, 2015). Todos os pontos ao longo da fronteira de Pareto são igualmente importantes, e resultam em diferentes valores para cada objetivo.

Embora as soluções obtidas não apresentem prioridade entre elas, do ponto de vista prático, os tomadores de decisão usualmente necessitam de apenas uma solução final. Desta forma, ao final do processo, o tomador de decisão é envolvido para apontar, dentre as soluções do conjunto Pareto ótimo, aquela que melhor atenda às suas preferências (CUI et al., 2017).

A maior vantagem dos métodos *à posteriori* é que, com várias alternativas em mãos, o leque de opções oferecidas ao tomador de decisão é aumentado, proporcionando maior confiança na solução escolhida (VIEIRA; VARELA; PÓVOA, 2017).

Segundo Neto (2011), outra vantagem de tais métodos é que, ao contrário dos métodos *à priori*, uma mudança de ideia do tomador de decisão com relação às suas preferências não implica obrigatoriamente em uma nova execução do método *à posteriori*.

Para Steponavičė et al. (2014), como desvantagens podem ser citadas o maior custo computacional na busca das soluções utilizadas para gerar a fronteira de Pareto e a falta de suporte ao tomador de decisão na comparação e classificação das alternativas de solução disponíveis. Contudo, conforme apontado por Jeyadevi et al. (2011), tal dificuldade pode ser superada a partir da implementação de técnicas de Tomada de Decisão por Múltiplos Atributos para a seleção da melhor solução, sob a percepção do tomador de decisão, dentre todas as alternativas de soluções eficientes disponíveis.

- Métodos interativos:

Nos métodos interativos, a fase na qual o tomador de decisão é envolvido na busca da solução, expressando suas preferências, é intercalada com a fase de cálculo, sendo que, após algumas interações, o método converge para uma solução que satisfaça as preferências do tomador de decisão (SAZVAR et al., 2014).

As principais vantagens dos métodos interativos são o fato de que as informações de preferência solicitadas ao tomador de decisão geralmente são mais simples que nos métodos *à priori*, apresentam custo computacional moderado quando comparados com os métodos *à posteriori* e o tomador de decisão é mais envolvido no processo de busca da solução (GONG et al., 2014). Analogamente aos métodos *à priori*, os métodos interativos apresentam a desvantagem de que o tomador de decisão aponta suas preferências durante o processo de busca sem conhecer todas as alternativas finais disponíveis da fronteira de Pareto.

Dentre as classificações apresentadas, o problema da otimização da introdução dos veículos elétricos na matriz do modal rodoviário brasileiro será tratado a partir de uma abordagem *à posteriori*, uma vez que tal abordagem permite que seja apresentado um conjunto de soluções não dominadas ao tomador de decisão, ao invés de uma solução final única, proporcionando maior nível de confiança ao tomador de decisão e uma visão macro de soluções alternativas.

Como se trata de um problema com várias variáveis e novo para o tomador de decisão, o uso de abordagens *à priori* ou interativas poderia contaminar o resultado final da otimização com certo grau de subjetivismo, uma vez que os tomadores de decisão não conhecem o problema a fundo e não teriam acesso a soluções alternativas. Com relação à geração da fronteira de Pareto, adotar-se-á uma técnica de otimização *exata*, haja vista que, conforme será apresentado no Capítulo 5 deste trabalho, o modelo proposto comporta, do ponto de vista computacional, o uso de técnicas exatas.

Isto posto, a próxima seção aborda alguns métodos *à posteriori* utilizados na resolução de problemas de otimização multiobjetivo.

4.1.2.1 Métodos *à posteriori*

A literatura disponibiliza diversos métodos para a geração da fronteira de Pareto de um MOP. Os mais comumente utilizados são o Método da soma ponderada³¹ e o Método das ε -restrições³² (KÖHN, 2011), embora existam outros métodos que podem ser citados, tais como o Método das ε -restrições aumentado³³, o Método da Programação por compromisso³⁴ (LI et al., 2012; LI; LEUNG, 2011), o Método min-max (LI; LEUNG, 2011), o Método híbrido³⁵ (DEMIR; BEKTAŞ; LAPORTE, 2014), o Método Tchebycheff ponderado lexicográfico³⁶ (SAMANLIOGLU, 2013), o Método Tchebycheff ponderado aumentado³⁷ (DÄCHERT; GORSKI; KLAMROTH, 2012; SANTOS; FERREIRA; FLINTSCH, 2017), o Método Tchebycheff ponderado modificado³⁸ (DÄCHERT, 2014), o Método da soma ponderada adaptável (KIM; WECK, 2006)³⁹ e o Método da soma ponderada com normalização (DEMIR; BEKTAŞ; LAPORTE, 2014)⁴⁰.

4.1.2.1.1 Método da soma ponderada

Historicamente, o primeiro método desenvolvido para a resolução de MOPs foi o Método da soma ponderada. O método associa um peso, w , a cada uma das funções objetivo,

³¹ Método da soma ponderada do inglês *Weighted sum method*

³² Método das ε -restrições do inglês *ε -constraint method*

³³ Método das ε -restrições aumentado do inglês *Augmented ε -constraint method*

³⁴ Programação por compromisso do inglês *Compromise programming*

³⁵ Método híbrido do inglês *Hybrid method*

³⁶ Método Tchebycheff ponderado lexicográfico do inglês *Lexicographic weighted Tchebycheff method*

³⁷ Método Tchebycheff ponderado aumentado do inglês *Augmented weighted Tchebycheff method*

³⁸ Método Tchebycheff ponderado modificado do inglês *Modified weighted Tchebycheff method*

³⁹ Método da soma ponderada adaptável do inglês *Adaptive weighted sum method*

⁴⁰ Método da soma ponderada com normalização do inglês *Weighted sum method with normalization*

e posteriormente minimiza a soma ponderada dos objetivos. Desta forma, as múltiplas funções objetivo são convertidas em um objetivo único (RODRIGUEZ, 2011). Matematicamente, o método é formulado da seguinte maneira (KÖHN, 2011):

$$\min \quad \sum_{i=1}^k w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (32)$$

sujeito a:

$$\mathbf{x} \in \Omega \quad (33)$$

sendo,

$f_i(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}) \dots, f_k(\mathbf{x})]$ as k funções objetivo

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ o vetor com n variáveis de decisão

w_i : o peso da função objetivo f_i

Ω : o espaço de decisão

Quanto aos pesos utilizados neste método, $w_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, k$. Adicionalmente, os pesos geralmente são normalizados, de forma que $\sum_{i=1}^k w_i = 1$. Estas duas relações tornam a função objetivo (32) uma combinação convexa das funções objetivo do MOP.

A utilização do método da soma ponderada não impõe que os objetivos apresentem a mesma unidade de medida, haja vista que os pesos servem meramente para encontrar soluções distintas na fronteira de Pareto. Variando os pesos sistematicamente, diferentes pontos da fronteira de Pareto são obtidos (PLAS; 2012).

Segundo Chiandussi et al. (2012), as principais vantagens deste método são a sua simplicidade, tanto na implementação, quanto no uso, e sua eficiência computacional. A principal desvantagem deste método é que ele não consegue gerar todas as soluções da fronteira de Pareto quando sua forma não é convexa, independentemente da combinação de pesos utilizada. Conforme apontado por Plas (2012), outro inconveniente do método da soma ponderada é que a variação aleatória dos pesos pode não resultar em uma fronteira de Pareto com pontos uniformemente distribuídos, acarretando dificuldades na representação do mesmo.

Com o intuito de lidar com as limitações supramencionadas, a literatura apresenta variações do método da soma ponderada, como por exemplo, o Método da soma ponderada

adaptável (KIM; WECK, 2006), que encontra soluções bem distribuídas e em regiões não-convexas da fronteira de Pareto.

4.1.2.1.2 Método das ε -restrições

No método das ε -restrições, proposto inicialmente por Haimes, Lasdon e Wismer⁴¹ (1971 apud DÄCHERT, 2014), uma das funções objetivo é selecionada para ser otimizada, enquanto todas as outras funções restantes são convertidas em restrições a partir da imposição de limites superiores a cada uma delas.

Seja um MOP com p funções objetivo e n variáveis de decisão, a aplicação do método das ε -restrições implica no seguinte modelo matemático (CHIANDUSSI et al., 2012):

$$\min \quad f_j(\mathbf{x}) \quad (34)$$

sujeito a:

$$f_k(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_k \quad k = 1, \dots, p; k \neq j \quad (35)$$

$$\mathbf{x} \in \Omega \quad (36)$$

sendo,

f_j : a função objetivo a ser minimizada

f_k : as $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições

ε_k : os $(p - 1)$ limites superiores das $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ o vetor com n variáveis de decisão

Ω : o espaço de decisão

As soluções Pareto-ótimas e a fronteira de Pareto podem ser obtidas a partir da variação conveniente dos valores de ε_k das funções objetivo convertidas em restrições. A faixa de valores de ε_k para cada restrição pode ser determinada utilizando uma *Tabela Payoff*, conforme procedimento descrito em Bootaki, Mahdavi e Paydar (2016), embora, segundo Mavrotas (2009), tal procedimento nem sempre garanta que sejam obtidos pontos igualmente distribuídos na fronteira de Pareto.

⁴¹ HAIMES, Y. Y.; LASDON, L. S.; WISMER, D. On a bicriteria formulation of the problems of integrated systems identification and system optimization. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 1, p. 296-297, 1971.

As principais vantagens do Método das ε -restrições frente ao Método da soma ponderada são a capacidade de encontrar soluções em regiões não-convexas e a possibilidade de controlar a quantidade de soluções eficientes a serem obtidas, uma vez que tal tarefa não é trivial no método da soma ponderada (PLAS, 2012). Adicionalmente, Demir, Bektaş e Laporte (2014) apontam que o método das ε -restrições apresenta um menor custo computacional quando comparado com o método da soma ponderada.

Segundo Chiandussi et al. (2012), a maior desvantagem do método das ε -restrições é que não se pode garantir que as soluções encontradas são de fato não dominadas, a não ser que tais soluções sejam únicas; entretanto, verificar se uma solução é única nem sempre é tarefa fácil. Por exemplo, em um MOP com duas funções objetivo, pode acontecer que resolvendo o problema da função objetivo (34), uma solução aparentemente Pareto-ótima x^* seja obtida, enquanto que uma outra solução ótima, \bar{x} , desconhecida por parte do analista, exista, tal que:

$$f_1(x^*) = f_1(\bar{x}) \quad e \quad (37)$$

$$f_2(\bar{x}) < f_2(x^*) \leq \varepsilon_2 \quad (38)$$

Neste caso, diz-se que a solução x^* encontrada pelo método das ε -restrições é uma *solução eficiente fraca*, uma vez que se trata de uma solução dominada, e não de uma solução verdadeiramente Pareto-ótima.

Assim, conforme apontado por Dächert (2014), a aplicação do método das ε -restrições apenas garante que sejam encontradas soluções eficientes fracas, sem qualquer garantia de otimalidade das mesmas.

4.1.2.1.3 *Método das ε -restrições aumentado*

A fim de contornar as limitações do método das ε -restrições, Mavrotas (2009) propôs o Método das ε -restrições aumentado (AUGMECON). O Quadro 2 apresenta uma comparação das principais características e vantagens do método AUGMECON frente aos métodos da soma ponderada e das ε -restrições.

Quadro 2 - Principais características e vantagens do método AUGMECON frente aos métodos da soma ponderada e das ε -restrições

	Soma ponderada	ε -restrições	AUGMECON
Capacidade de gerar todas as soluções da fronteira de Pareto quando sua forma não é convexa.	Não	Sim	Sim
Capacidade de gerar uma fronteira de Pareto que contemple apenas soluções eficientes, evitando soluções eficientes fracas.	Sim	Não	Sim
A aplicação do método não requer a estimação de pesos ou metas.	Não	Sim	Sim
Garantia de obtenção de uma fronteira de Pareto com pontos uniformemente distribuídos.	Não	Não	Sim

Fonte: Produção do próprio autor, baseado em Mavrotas (2009) e Plas (2012).

Analogamente ao método das ε -restrições, no método AUGMECON uma das funções objetivo é selecionada para ser otimizada, enquanto todas as outras funções restantes são convertidas em restrições a partir da imposição de limites superiores a cada uma delas.

O método AUGMECON impõe três modificações no método das ε -restrições:

- **Primeira modificação** - As restrições de desigualdade (35) são transformadas em restrições de igualdade a partir da introdução de variáveis de folga (problemas de minimização) ou variáveis de excesso (problemas de maximização) (BOOTAKI; MAHDAVI; PAYDAR, 2016).

- **Segunda modificação** - A função objetivo (34) é aumentada mediante a subtração das variáveis de folga (problemas de minimização) ou da adição das variáveis de excesso (problemas de maximização) (BOOTAKI; MAHDAVI; PAYDAR, 2016).

- **Terceira modificação** - A faixa de valores de ε_k para cada restrição é determinada a partir da otimização lexicográfica da Tabela *Payoff*. A otimização lexicográfica de uma série de funções objetivo visa otimizar inicialmente o objetivo mais importante e, posteriormente, considerando o resultado obtido na primeira otimização, otimizar o segundo objetivo, e assim sucessivamente para todos os demais objetivos. Tal procedimento é explicado detalhadamente em Cambero e Sowlati (2016) e em Mavrotas (2009).

As modificações supramencionadas garantem que o modelo gere apenas soluções Pareto-ótimas, fugindo de soluções eficientes fracas, conforme comprovado matematicamente por Mavrotas (2009). O modelo matemático do método AUGMECON para um MOP que visa minimizar p funções objetivo, com n variáveis de decisão, apresenta a seguinte formulação (DABIRI; TAROKH; ALINAGHIAN, 2017):

$$\min \quad f_j(\mathbf{x}) - \theta \left(\sum_{i=1}^{p(i \neq j)} \frac{s_i}{r_i} \right) \quad (39)$$

sujeito a:

$$f_i(\mathbf{x}) + s_i = \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, p; i \neq j \quad (40)$$

$$s_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, p; i \neq j \quad (41)$$

$$\mathbf{x} \in \Omega \quad (42)$$

sendo,

f_j : a função objetivo a ser minimizada

f_i : as $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições

ε_i : os $(p - 1)$ limites superiores das $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições

s_i : as $(p - 1)$ variáveis de folga das $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições

r_i : as $(p - 1)$ faixas de variação das $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições

θ : um número pequeno, usualmente entre 10^{-3} e 10^{-6}

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ o vetor com n variáveis de decisão

Ω : o espaço de decisão

A fim de evitar problemas relacionados à diferentes ordens de grandeza dos termos da função objetivo (39), as variáveis de folga (ou excesso), s_i , são divididas por suas respectivas faixas de variação, r_i , na função objetivo.

Na prática, o método AUGMECON é implementado de acordo com os seguintes passos (BOOTAKI; MAHDAVI; PAYDAR, 2016; RODRIGUEZ, 2011):

Passo 1. Utilizando a Tabela *Payoff* com otimização lexicográfica, as faixas de variação r_i das $(p - 1)$ funções objetivo convertidas em restrições são determinadas.

Passo 2. As faixas de variação r_i são divididas em q_i intervalos iguais. Desta forma, tem-se $(q_i + 1)$ pontos de grade, cujos valores são utilizados como limites superiores, ε_i , no lado direito das restrições (40).

Passo 3. As soluções Pareto-ótimas e a fronteira de Pareto são obtidas a partir da variação combinatorial dos valores de ε_i no lado direito das restrições (40), conforme valores obtidos no Passo 2.

Rodriguez (2011) aponta que uma característica interessante do método AUGMECON é a possibilidade de calibrar a densidade de pontos da fronteira de Pareto a partir da variação dos valores de q_i . Quanto maior o valor de q_i , mais densa é a fronteira de Pareto, bem como maior é o custo computacional.

4.1.3 Principais aspectos dos métodos MODM abordados

Neste tópico, inicialmente foram apresentados conceitos da otimização multiobjetivo, com foco nos métodos *à posteriori*. Os modelos matemáticos do método da soma ponderada, do método das ε -restrições e do método AUGMECON foram investigados, mostrando as principais características, vantagens e desvantagens de cada um deles.

O Capítulo 5 abordará a aplicação do modelo AUGMECON no problema da otimização da introdução dos veículos elétricos na matriz do modal rodoviário brasileiro. Tal escolha deve-se ao fato de que o método AUGMECON é capaz de gerar uma fronteira de Pareto que contemple apenas soluções eficientes, evitando soluções eficientes fracas, considerando os diferentes objetivos do problema, sejam eles de ordem econômica, técnica, energética, ambiental ou social. Também se optou pelo método AUGMECON pelo fato do mesmo não requerer a estimação de pesos, metas ou quaisquer outros parâmetros por parte do tomador de decisão, evitando variações e subjetivismos no resultado final do problema.

Após a aplicação do método AUGMECON, dentre todas as alternativas de soluções eficientes disponíveis na fronteira de Pareto, o tomador de decisão deve selecionar aquela que melhor atenda aos seus interesses. Os métodos empregados na comparação, classificação e seleção da melhor solução, sob a percepção do tomador de decisão, são apresentados na seção seguinte.

4.2 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Grande parte das decisões que tomamos diariamente requerem a avaliação e comparação de diferentes opções. Os métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA) permitem a avaliação de problemas reais complexos que apresentam diversos critérios quantitativos e/ou qualitativos que devem ser julgados conjuntamente, cujo intuito final é indicar a preferência dentre várias alternativas disponíveis (ZYOULD; HANUSCH, 2016).

Roy⁴² (1981 apud ISHIZAKA; NEMERY, 2013) aponta que, no estudo de técnicas MCDA, os problemas são classificados de acordo com o tipo de decisão pretendido, conforme explicado brevemente a seguir:

- **Problemas de escolha** - O objetivo é a seleção de uma única solução (a melhor) ou a redução do conjunto de alternativas para um subconjunto que contemple *boas* opções sob a percepção do tomador de decisão. Por exemplo, um gerente selecionando o funcionário ideal para um projeto específico.

- **Problemas de classificação** - As alternativas são classificadas da melhor para a pior, utilizando dados quantitativos e/ou comparação por pares dos critérios e alternativas do problema. Um exemplo é a classificação de universidades de acordo com diversos critérios, tais como a qualidade de ensino, especialização em pesquisas e oportunidades de carreira.

- **Problemas de ordenação** - As alternativas são ordenadas em grupos pré-definidos, chamados categorias, de acordo com comportamentos ou características similares. Por exemplo, funcionários de uma empresa podem ser avaliados e ordenados em diferentes categorias, tais como *Empregados com performance acima da média*, *Empregados com performance dentro da média* e *Empregados com performance abaixo da média*; assim, baseado neste resultado, medidas necessárias adicionais podem ser tomadas.

- **Problemas de descrição** - O objetivo é descrever as alternativas e suas consequências, sem necessidade de apontar a melhor delas.

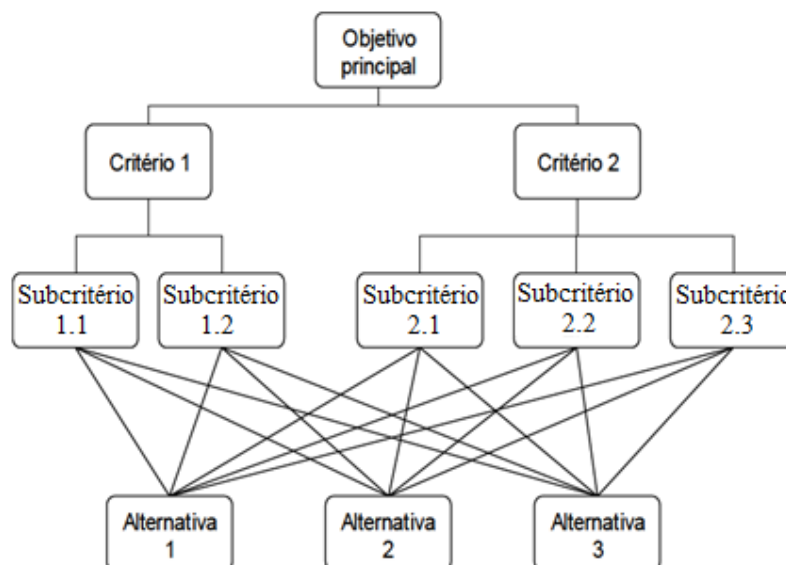
⁴² ROY, B. The Optimisation Problem Formulation: Criticism and Overstepping. **Journal of the Operational Research Society**, v. 32, n. 6, p. 427-436, jun. 1981.

Considerando um problema de escolha ou classificação em que são disponibilizadas m alternativas para o tomador de decisão, sendo cada uma delas avaliadas sob n critérios, os métodos MCDA apresentam as seguintes características principais (adaptado de MALAK et al., 2017):

- O objetivo do tomador de decisão é escolher a melhor solução dentre as m alternativas disponíveis, ou ainda, classificá-las da melhor para a pior;
- Cada uma das m alternativas apresentam n critérios, que podem ser de ordem econômica, técnica, ambiental, social, dentre outras; os critérios podem ser quantitativos e/ou qualitativos;
- O desempenho das m alternativas em cada um dos n critérios considerados deve ser medido, podendo ser adotada, por exemplo, uma pontuação para refletir o desempenho das alternativas em cada critério; e
- Devem ser determinados pesos para cada um dos n critérios, sendo que tais pesos indicam a importância relativa de cada critério quando comparados com os outros $(n - 1)$ critérios.

A Figura 24 apresenta o modelo hierárquico de um processo MCDA de tomada de decisão para um problema com três alternativas e dois critérios, sendo que cada critério apresenta subcritérios; o objetivo é selecionar a melhor alternativa (BITTENCOURT, 2016).

Figura 24 - Modelo hierárquico de um processo MCDA de tomada de decisão



Há uma diversidade de técnicas MCDA disponíveis na literatura. A classificação dos métodos empregados nos problemas dá-se em três categorias principais, de acordo com a abordagem adotada pelo método.

- **Abordagem da agregação a um critério único de síntese** - Valores numéricos são calculados a fim de representar o grau no qual uma opção de decisão é preferível em relação a outra opção. Tais valores são calculados inicialmente para cada critério, e são então sintetizados em um valor global final (MALAK et al., 2017). Esta abordagem permite a compensação de valores entre diferentes critérios, isto é, uma pontuação ruim em um critério pode ser contrabalanceada por uma boa pontuação em outro critério. Exemplos de métodos MCDA que utilizam a abordagem da agregação incluem o AHP, ANP, MAUT, MACBETH, COMET, EVAMIX, SAW, SMART, UTA e BWM (REZAEI, 2015; WAŹTRÓBSKI, 2016).

- **Abordagem da subordinação de síntese** - Esta abordagem, também conhecida como *outranking*, não visa a obtenção de uma solução ideal. Seus conceitos privilegiam a superação de relacionamentos para auxiliar os tomadores de decisão a comparar alternativas em forma de pares e para classificar suas preferências para as alternativas de várias maneiras. Adicionalmente, esta abordagem defende que tomadores de decisão não têm preconceitos com relação à importância relativa dos critérios. Por fim, em tal abordagem, as preferências dos decisores não são bem definidas, uma vez que podem existir incertezas, crenças parciais, preconceitos, conflitos e contradições (BITTENCOURT, 2016). Os métodos PROMETHEE I, PROMETHEE II, ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE-Tri, MELCHIOR, NAIADE I, NAIADE II, ORESTE, PAMSSEM I, PAMSSEM II, REGIME e TACTIC são exemplos de métodos de subordinação de síntese (WAŹTRÓBSKI, 2016).

- **Abordagem do julgamento interativo** - Esta abordagem define níveis desejáveis (metas) ou satisfatórios para cada critério e, posteriormente, identifica as opções mais próximas da meta ideal ou do nível de referência previamente estabelecidos (MALAK et al., 2017). Exemplos de métodos que utilizam a abordagem do julgamento interativo incluem o TOPSIS, o método Stem e a Programação por metas (WAŹTRÓBSKI, 2016).

Dentre as abordagens supramencionadas, a seleção da melhor solução, dentre as alternativas disponibilizadas na resolução do método AUGMECON para o problema da

otimização da introdução dos veículos elétricos no modal rodoviário brasileiro, deve ser implementada a partir de uma abordagem com agregação a um critério único de síntese, uma vez que tal abordagem não requer metas específicas para os diferentes critérios e permite que o tomador de decisão indique os critérios que devem ser priorizados na tomada de decisão, como por exemplo, os de ordem econômica ou ambiental.

Estudos conduzidos por Marttunen, Lienert e Belton (2017) avaliaram os métodos mais frequentemente utilizados em 333 artigos publicados entre os anos de 2000 e 2015. Os resultados revelaram que os métodos de agregação a um critério único de síntese representaram 53,9% das publicações, com destaque para o método AHP, que respondeu por 42,7% de todas as publicações no período.

Huang, Keisler e Linkov (2011) estudaram o uso de técnicas MCDA em 312 artigos publicados entre os anos de 2000 e 2009 na área de gestão ambiental, incluindo tópicos como problemas ambientais, intervenções e análise do impacto ambiental. Eles concluíram que os métodos com uso mais recorrente foram o AHP (SAATY, 1977) e o ANP (SAATY, 1996), com 62% do total de publicações.

Pesquisas realizadas por Strantzali e Aravossis (2016) apresentaram uma revisão dos métodos MCDA aplicados na área de planejamento energético. Conforme apontado pelos autores do estudo, a tomada de decisão na área de energia requer a avaliação de uma série de critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais, de forma que as técnicas MCDA são indicadas nestes casos. Os resultados apontaram que, dentre os 183 artigos publicados entre os anos de 1983 e 2014, os métodos AHP e ANP foram os mais utilizados.

Assim, constata-se que o método AHP, bem como o ANP, que é uma generalização do AHP para casos de dependência e realimentação entre os elementos do problema, são os métodos MCDA que mais têm sido aplicados nos últimos anos. Estes métodos utilizam comparação por pares para avaliar o desempenho das alternativas em cada critério, bem como para determinar a importância relativa de um critério frente a outro, sendo que tais comparações são baseadas no julgamento de *tomadores de decisão* ou *especialistas*.

Uma das características dos métodos que utilizam a abordagem de comparação por pares é que vários fatores podem influenciar a consistência das comparações, como por exemplo, questionários complicados, falta de conhecimento e fadiga do respondente (AHMAD, 2016), que pode ocasionar a inconsistência das comparações. Rezaei (2015) argumenta que estes são problemas metodológicos que podem ser remediados a partir de uma abordagem por comparações mais estruturada, e assim propôs um novo método MCDA para a classificação e seleção de alternativas, intitulado BWM.

4.2.1 Método BWM

No método BWM, os pesos dos critérios utilizados na decisão são obtidos a partir de comparações de referência, que são as comparações por pares dos critérios mais importante e menos importante em relação aos demais critérios envolvidos no problema. A partir da eliminação de comparações secundárias, o BWM torna-se muito mais eficiente quando comparado a outros métodos (SHOJAEI; HAERI; MOHAMMADI, 2017).

De acordo com Rezaei (2015), o BWM é um método MCDA robusto que apresenta as seguintes vantagens em relação a outros métodos:

- Quantidade reduzida de comparações por pares;
- Questionários simplificados;
- Garantia de julgamentos sempre consistentes;
- Comparações realizadas por meio de uma escala linear de números inteiros, sem a utilização de números fracionários; e
- Desempenho superior ao método AHP.

Primeiramente, o BWM é um método baseado em vetores de prioridade, que necessita de menos comparações por pares em relação a métodos MCDA baseados em matrizes de prioridade, tal como o AHP. Assim, enquanto no BWM são necessárias $(2n - 3)$ comparações para um problema com n critérios, no AHP são necessárias $n(n - 1)/2$ comparações.

Para Ahmad (2016), esta é uma vantagem importante, uma vez que reduz a complexidade e o tempo dispendido pelos tomadores de decisão e especialistas na avaliação da preferência de cada critério. A título de exemplo, em um problema com dez critérios, o número total de comparações por pares para determinação dos pesos dos critérios no BWM e AHP seria de 17 e 45 comparações, respectivamente.

Adicionalmente, os valores dos pesos obtidos no método BWM são altamente confiáveis, uma vez que as comparações por pares são mais consistentes que aquelas utilizadas no AHP, conforme comprovado matematicamente por Rezaei (2015). Enquanto que na maioria dos métodos MCDA, incluindo o AHP, a Razão de Consistência é um indicador utilizado para avaliar se as comparações estão coerentes entre si, no BWM a Razão de Consistência indica o nível de confiabilidade das comparações, uma vez que em tal método os resultados são sempre consistentes.

Além disso, o BWM se destaca por sua simplicidade de implementação, uma vez que as comparações são realizadas utilizando uma escala linear de números inteiros de 1 a 9. Isto representa uma clara vantagem em relação a métodos MCDA que requerem matrizes de comparação com números inteiros e fracionários (ALONSO, 2017).

Finalmente, dentre os diversos indicadores que podem ser utilizados na avaliação do desempenho de um método MCDA, Rezaei (2015) comparou estatisticamente o BWM em relação ao AHP; os resultados apontaram que o BWM apresentou melhor desempenho que o AHP nos quatro critérios analisados, que dizem respeito à Razão de Consistência, Violação mínima, Desvio total e Conformidade.

A seguir são descritos os passos necessários na aplicação do BWM em um problema de classificação ou seleção (AHMAD, 2016; REZAEI, 2015, 2016).

Passo 1. Inicialmente, o tomador de decisão deve definir o objetivo principal do problema, além de identificar quais são as m alternativas disponíveis.

Passo 2. Determinar o conjunto de critérios e subcritérios do problema. Neste passo, o tomador de decisão identifica os n critérios principais $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, e eventuais subcritérios, que são relevantes para a tomada de decisão, de forma a obter uma estrutura similar à apresentada na Figura 24.

Passo 3. Apurar o peso de cada um dos n critérios principais do problema. Para tanto, primeiramente o tomador de decisão deve determinar o melhor (mais importante, mais desejável) e o pior (menos importante, menos desejável) critérios; se mais de um critério é considerado o melhor ou o pior, um critério pode ser escolhido arbitrariamente. Nenhuma comparação é realizada neste estágio.

Passo 4. Determinar a preferência do melhor critério em relação a cada um dos n critérios usando uma escala linear de números inteiros de 1 a 9, sendo que o valor 1 representa igual importância entre os critérios e o valor 9 representa a importância extrema do melhor critério frente a outro critério. Desta forma, o vetor de prioridade A_B resultante, intitulado *Vetor best-to-others (BO)*, terá a seguinte forma:

$$A_B = [a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}] \quad (43)$$

sendo,

A_B : o vetor de prioridade *best-to-others* (BO)

a_{Bj} : a preferência do melhor critério (B) em relação ao critério j

$$a_{BB} = 1$$

Passo 5. Determinar a preferência de cada um dos n critérios em relação ao pior critério usando uma escala linear de números inteiros de 1 a 9. Desta forma, o vetor de prioridade A_W resultante, intitulado *Vetor others-to-worst* (OW), terá a seguinte forma:

$$A_W = [a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}]^T \quad (44)$$

sendo,

A_W : o vetor de prioridade *others-to-worst* (OW)

a_{jW} : a preferência do critério j em relação ao pior critério (W)

$$a_{WW} = 1$$

Passo 6. Determinar os valores dos pesos principais ótimos $\{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$ de cada um dos n critérios principais de forma que o valor máximo entre os valores absolutos $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ e $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$, para todos os critérios j , sejam minimizados. Em forma matemática, tem-se o seguinte modelo minmax:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (45)$$

sujeito a:

$$\sum_j w_j = 1 \quad (46)$$

$$w_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (47)$$

sendo,

w_B : o peso do melhor critério (B)

w_W : o peso do pior critério (W)

w_j : o peso do critério j

a_{Bj} : a preferência do melhor critério (B) em relação ao critério j

a_{jW} : a preferência do critério j em relação ao pior critério (W)

O modelo (45)-(47) é equivalente ao seguinte modelo:

$$\min \quad \xi \quad (48)$$

sujeito a:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \quad j = 1, \dots, n \quad (49)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi \quad j = 1, \dots, n \quad (50)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (51)$$

$$w_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (52)$$

Resolvendo o modelo (48)-(52), os valores de ξ^* e dos pesos principais ótimos $[w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*]^T$ são obtidos. O vetor $\mathbf{w} = [w_j^*]^T$ é definido como *vetor de prioridade dos critérios*.

Passo 7. Dando continuidade à fase de julgamentos, caso algum dos n critérios principais do problema apresente subcritérios, os Passos 3 a 6 devem ser repetidos a fim de determinar os valores dos q pesos locais ótimos $\{w_{j.1}^*, w_{j.2}^*, \dots, w_{j.q}^*\}$ dos q subcritérios pertencentes a um mesmo critério principal j . Tomando como exemplo a estrutura do problema mostrado na Figura 24, para o *Critério 2* deveriam ser determinados os pesos locais ótimos $\{w_{2.1}^*, w_{2.2}^*$ e $w_{2.3}^*\}$, sendo que $w_{2.1}^* + w_{2.2}^* + w_{2.3}^* = 1$.

Passo 8. Para todos os critérios quantitativos, determinar o valor normalizado do desempenho da alternativa i em relação ao critério j , p_{ij} , para todas as m alternativas.

Passo 9. Para todos os critérios qualitativos, repetir os Passos 4 a 6 a fim de determinar os valores normalizados do desempenho da alternativa i em relação ao critério j , p_{ij} , para todas as m alternativas. A matriz formada pelos valores de desempenho p_{ij} , considerando todos os n critérios e m alternativas, é definida como *matriz de decisão das alternativas* $\mathbf{P} = [p_{ij}]$.

Passo 10. Determinar o valor do desempenho final v_i de cada uma das m alternativas a partir do cálculo do *vetor de decisão*, definido como $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$, de acordo com a equação (53).

$$\mathbf{V} = \mathbf{P} \times \mathbf{w} \quad (53)$$

sendo,

$V = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$ o vetor de decisão

$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}$ a matriz de decisão das alternativas

$w = [w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*]^T$ o vetor de prioridade dos critérios

Passo 11. Ordenar os valores do vetor de decisão V a fim de obter o *ranking* de decisão. A melhor alternativa é aquela que apresenta o maior valor de desempenho final v_i no *ranking* de decisão.

Passo 12. Determinar a Razão de Consistência das comparações realizadas nos Passos 4 e 5, tanto as relacionadas aos critérios, quanto às alternativas qualitativas, de forma a avaliar o nível de coerência dos julgamentos. Uma comparação é totalmente consistente quando $a_{Bj} \times a_{jW} = a_{BW}$, para todos critérios j . A Razão de Consistência é calculada de acordo com a equação (54).

$$CR = \frac{\xi^*}{CI} \quad (54)$$

sendo,

CR : a Razão de Consistência⁴³

ξ^* : o valor ótimo de ξ na resolução do modelo matemático (48)-(52)

CI : o Índice de Consistência⁴⁴

O Índice de Consistência está relacionado ao máximo valor possível de ξ (max ξ) para diferentes valores de $a_{BW} \in \{1, 2, \dots, 9\}$, conforme mostrado na Tabela 54.

Tabela 54 - Valores do Índice de Consistência

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CI(max ξ)	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de REZAEI (2015).

⁴³ Razão de Consistência do inglês *Consistency Ratio*

⁴⁴ Índice de Consistência do inglês *Consistency Index*

O valor da Razão de Consistência varia entre zero e um, ou seja, $CR \in [0, 1]$, sendo que valores próximos de 0 indicam um maior nível de coerência dos julgamentos, enquanto que valores próximos de 1 indicam menos coerência. Se o valor de CR for zero, tem-se que os julgamentos são 100% coerentes entre si (REZAEI, 2016).

Rezaei (2016) aponta que a resolução do modelo matemático (48)-(52), usada para determinar os valores dos pesos, pode apresentar múltiplas soluções ótimas em problemas com mais de três critérios cujas comparações não são totalmente consistentes; assim, diferentes faixas de pesos são disponibilizadas para o tomador de decisão.

Esta característica do método BWM pode ser desejável em alguns casos. Por exemplo, quando o debate tem um papel importante no processo de tomada de decisão, a multi-otimalidade pode fornecer aos tomadores de decisão informações suplementares acerca dos pesos dos critérios e alternativas. Em outros casos, entretanto, o tomador de decisão pode preferir uma solução única, que seja mais clara e de fácil entendimento. Em ambos os casos, variações do método BWM foram propostas por Rezaei (2016) e são descritas nas seções seguintes.

4.2.1.1 BWM com intervalos de pesos

Com o intuito de determinar os limites inferior e superior das faixas de valores dos pesos em problemas com mais de três critérios ou alternativas cujas comparações não são totalmente consistentes, os dois modelos matemáticos apresentados a seguir devem ser acrescentados no Passo 6 do método BWM, imediatamente após a resolução do modelo (48)-(52) (REZAEI, 2016):

Modelo 1 - Determinação do limite inferior no método BWM com intervalos de pesos

$$\min \quad w_j \quad (55)$$

sujeito a:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi^* \quad j = 1, \dots, n \quad (56)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi^* \quad j = 1, \dots, n \quad (57)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (58)$$

$$w_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (59)$$

Modelo 2 - Determinação do limite superior no método BWM com intervalos de pesos

$$\max w_j \quad (60)$$

sujeito a:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi^* \quad j = 1, \dots, n \quad (61)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi^* \quad j = 1, \dots, n \quad (62)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (63)$$

$$w_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (64)$$

sendo,

w_B : o peso do melhor critério (B)

w_W : o peso do pior critério (W)

w_j : o peso do critério j

a_{Bj} : a preferência do melhor critério (B) em relação ao critério j

a_{jW} : a preferência do critério j em relação ao pior critério (W)

ξ^* : o valor ótimo de ξ na resolução do modelo matemático (48)-(52)

A partir da resolução destes dois modelos para todos os n critérios do problema, é possível representar os pesos ótimos $\{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$ como intervalos.

O valor final do peso w_j de um determinado critério j pode ser calculado utilizando a equação (65), conforme Ahmad et al. (2017):

$$w_j^* = \frac{w_{j.min} + w_{j.max}}{2} \quad (65)$$

sendo,

w_j^* : o valor final do peso do critério j

$w_{j.min}$: o valor do limite inferior do critério j obtido na resolução do modelo (55)-(59)

$w_{j.max}$: o valor do limite superior do critério j obtido na resolução do modelo (60)-(64)

4.2.1.2 BWM linear

De modo a obter uma única solução ótima para os pesos em problemas com mais de três critérios ou alternativas cujas comparações não são totalmente consistentes, Rezaei (2016)

propôs o método BWM linear. Este método impõe duas modificações no método BWM inicialmente proposto (SALIMI; REZAEI, 2018; REZAEI, 2016).

- **Primeira modificação** - No Passo 6, que visa determinar os valores dos pesos principais ótimos $\{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$ de cada um dos n critérios principais, ao invés de minimizar o valor máximo do conjunto $\left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\}$, para todos os critérios j , minimiza-se o valor máximo do conjunto $\{|w_B - a_{Bj}w_j|, |w_j - a_{jW}w_W|\}$, que conduz ao seguinte problema:

$$\min \max_j \{|w_B - a_{Bj}w_j|, |w_j - a_{jW}w_W|\} \quad (66)$$

sujeito a:

$$\sum_j w_j = 1 \quad (67)$$

$$w_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (68)$$

sendo,

w_B : o peso do melhor critério (B)

w_W : o peso do pior critério (W)

w_j : o peso do critério j

a_{Bj} : a preferência do melhor critério (B) em relação ao critério j

a_{jW} : a preferência do critério j em relação ao pior critério (W)

O problema (66)-(68) é então reescrito como um problema de Programação Linear, conforme exibido a seguir:

$$\min \quad \xi^L \quad (69)$$

sujeito a:

$$|w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi^L \quad j = 1, \dots, n \quad (70)$$

$$|w_j - a_{jW}w_W| \leq \xi^L \quad j = 1, \dots, n \quad (71)$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad (72)$$

$$w_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (73)$$

O problema (69)-(73) é um problema de Programação Linear que apresenta uma única solução. Resolvendo-o, encontram-se os valores de ζ^{L*} e dos pesos principais ótimos $\{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$. Assim, o vetor de prioridade dos critérios, $w = [w_j^*]^T$, é obtido.

- Segunda modificação - No Passo 12 do método BWM inicialmente proposto, a coerência dos julgamentos é avaliada por meio do cálculo da Razão de Consistência (*CR*). Todavia, no método BWM linear, o valor de ζ^{L*} é utilizado como um indicador da consistência das comparações. Quanto mais próximo de zero for o valor de ζ^{L*} , maior a coerência das comparações.

4.3 PRINCIPAIS RESULTADOS DO CAPÍTULO

A seção 4.2 deste trabalho discorreu sobre os métodos MCDA, apresentando uma breve revisão de conceitos e os métodos que mais têm sido utilizados. O BWM destaca-se como um novo método, desenvolvido com o intuito de melhorar a confiabilidade dos resultados obtidos em processos de tomada de decisão e de simplificar a fase de julgamentos dos critérios e alternativas em um problema real.

No Capítulo 5, após a aplicação do método AUGMECON para geração da fronteira de Pareto no problema da otimização da introdução dos veículos elétricos no modal rodoviário brasileiro, o método BWM será utilizado na comparação, classificação e seleção da melhor solução, sob a percepção do tomador de decisão. Tal escolha deve-se ao fato de que, como o problema apresenta diversos critérios e alternativas, a utilização do método BWM possibilita a redução da quantidade de comparações por pares, o que torna mais clara e simples a fase de julgamentos realizada pelo tomador de decisão, além de proporcionar resultados mais consistentes que os obtidos em outros métodos MCDA similares, tal como o AHP.

De forma a tornar mais claro o entendimento dos resultados obtidos no método BWM para o tomador de decisão, opta-se pela forma linear do método BWM, uma vez que o mesmo fornece uma solução única para os pesos dos critérios e alternativas.

5 MODELO PROPOSTO PARA OS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Este capítulo visa descrever o problema da introdução dos veículos elétricos na matriz do modal rodoviário brasileiro a partir de conceitos da otimização multiobjetivo e da tomada de decisão, bem como apresentar uma proposta de método que seja capaz de indicar a melhor solução para a inserção dos veículos elétricos na frota de determinada cidade. O método desenvolvido baseia-se na modelagem AUGMECON-BWM do problema estudado.

5.1 ABORDAGEM PROPOSTA E IDENTIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

O problema da inserção de veículos elétricos no mercado brasileiro pode ser representado por um modelo matemático que visa otimizar objetivos conflitantes e que apresenta uma série de restrições que precisam ser satisfeitas, tais como:

- Restrições econômicas dos consumidores - sem que haja uma viabilidade econômica aceitável, os consumidores não se sentirão atraídos a adquirir veículos elétricos; esta restrição pode ser representada pelo valor presente líquido na aquisição de um veículo elétrico;
- Restrições econômicas do governo - representadas pela arrecadação total de impostos, seja na aquisição do veículo ou no pagamento dos impostos anuais;
- Restrições econômicas das montadoras de veículos - como a empresa visa lucro, nenhum tipo de benefício ao consumidor pode ser esperado (*à priori*), como, por exemplo, uma redução da margem de lucro na venda de veículos elétricos;
- Restrições econômicas da distribuidora de energia elétrica - representadas pelo impacto econômico da implantação e operação de estações públicas de recarga nas cidades avaliadas, descontado o lucro obtido com a venda de energia em tais estações e nas residências; e
- Restrições técnicas, energéticas, ambientais e sociais - além das restrições econômicas, devem ser determinados possíveis gargalos técnicos, energéticos, ambientais e sociais que possam restringir a inserção dos veículos elétricos no mercado.

Como equacionar todos estes interesses e encontrar a melhor solução? Considerando os interesses econômicos do legislador (poder público) na manutenção ou incremento do nível de arrecadação de impostos e os resultados obtidos nos itens 2.3.2 e 3 desta pesquisa, que dispõem sobre os aspectos econômicos, ambientais, epidemiológicos e energéticos da introdução de veículos PEV na frota, o método multiobjetivo proposto nesta tese visa atingir os seguintes objetivos:

- Minimização da perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora: conforme demonstrado na seção 2.3.2 deste trabalho, a integração de veículos elétricos na frota de uma cidade está vinculada à concessão de incentivos financeiros aos consumidores, que podem se dar na forma de descontos e isenções (perda na arrecadação de impostos), a fim de possibilitar que o valor do VPL na aquisição de um veículo elétrico seja condizente com o nível de inserção de veículos PEV estabelecido pelo legislador; ademais, além das perdas de receita decorrentes da redução na arrecadação de impostos, espera-se um impacto financeiro nas receitas das distribuidoras de energia, que deverão instalar, operar e manter as estações de recarga para veículos PEV. Tomando a perspectiva do legislador como norteador da integração de veículos elétricos nas cidades brasileiras, o objetivo da minimização das perdas econômicas é essencial.
- Minimização das emissões totais de gases de efeito estufa: a redução das emissões de GEE apresenta-se como um objetivo antagônico à minimização das perdas na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora. Assim, a melhoria de um objetivo está atrelada à piora do outro objetivo, e vice-versa.

De acordo com o apresentado na Tabela 38, quatro alternativas de inserção dos veículos elétricos são consideradas nesta pesquisa: inserção leve (1%), inserção moderada (3%), inserção elevada (5%), inserção massiva (10%), ou ainda a não-inserção de veículos elétricos na frota.

Cada uma das alternativas incorre na modificação dos valores de alguns parâmetros e restrições do modelo AUGMECON proposto, resultando, assim, em quatro problemas matemáticos para cada cidade avaliada, um para cada nível de inserção dos veículos elétricos. A resolução dos modelos para obtenção das fronteiras de Pareto é realizada a partir de

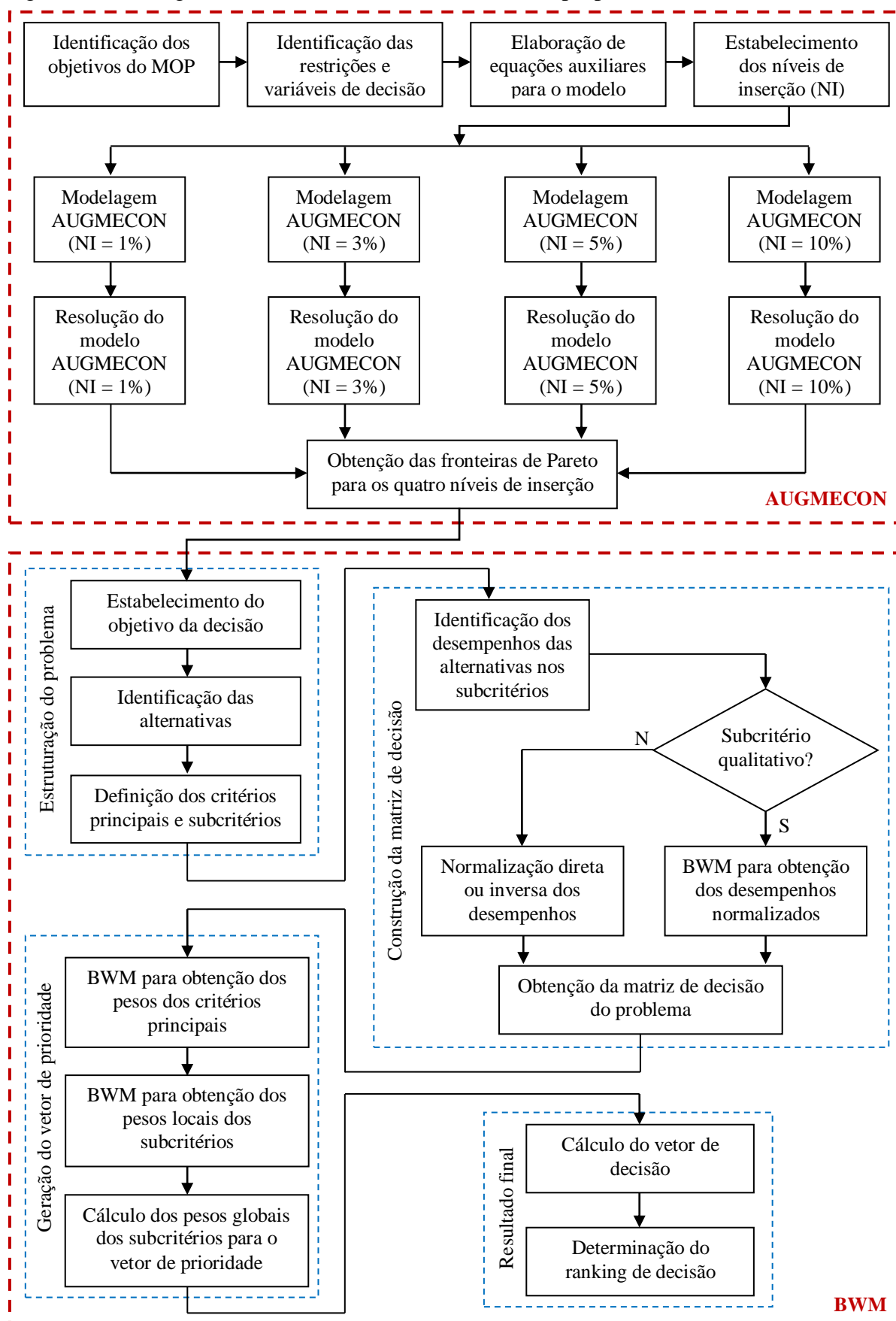
simulações utilizando o *software* LINGO, que determina as soluções eficientes dos quatro problemas de Programação Não-Linear.

Neste ponto, quatro fronteiras de Pareto estão disponíveis, sendo uma para cada nível de inserção. Cada solução eficiente apresenta valores distintos para cada uma das variáveis de decisão e, conseqüentemente, os impactos econômicos, técnicos, energéticos, sociais e ambientais, tais como a arrecadação de impostos, as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, o consumo de energia elétrica da rede de distribuição, o consumo de combustíveis, etc, também são diferentes. Assim, uma vez conhecidas as soluções eficientes e a fronteira de Pareto para cada alternativa de inserção, como selecionar a melhor solução sob a perspectiva do legislador?

De forma a selecionar a melhor alternativa de inserção sob o ponto de vista do tomador de decisão, aplica-se o método BWM linear. Ao todo, quatro critérios são considerados na implementação do BWM, sendo que cada critério apresenta subcritérios. A partir dos valores de desempenho das alternativas e das prioridades estabelecidas pelo legislador para cada um dos critérios e subcritérios, o método BWM linear indica qual a melhor alternativa de inserção dos veículos elétricos na cidade sob análise (inserção leve, moderada, elevada, massiva ou a não-inserção).

A Figura 25 apresenta o fluxograma do método AUGMECON-BWM proposto neste trabalho.

Figura 25 - Fluxograma do método AUGMECON-BWM proposto neste trabalho



Fonte: Produção do próprio autor.

As próximas seções deste capítulo visam elucidar as etapas necessárias para aplicação do método proposto.

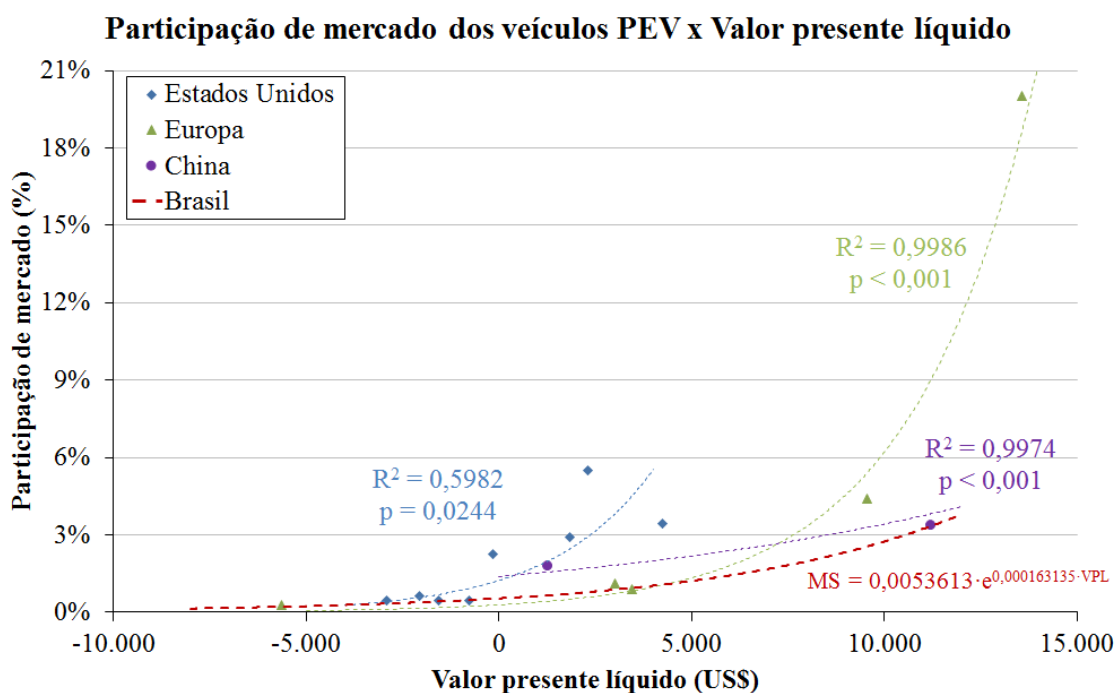
5.2 EQUAÇÕES AUXILIARES PARA O MODELO

Esta seção trata do desenvolvimento de equações auxiliares que são utilizadas no modelo matemático proposto. Tais equações visam relacionar diferentes parâmetros do modelo, de forma que, com base em informações reais dos mercados norte-americano, europeu e chinês, e também em informações da realidade brasileira, possam ser calculados alguns parâmetros do modelo.

5.2.1 Equação da participação dos veículos PEV no mercado

Na Figura 26 são apresentadas curvas que possibilitam estimar a participação de mercado dos veículos elétricos *plug-in* como uma função do VPL nos mercados norte-americano, europeu e chinês, uma vez que, conforme apontado na seção 2.3.3 deste trabalho, há uma tendência de aumento da participação dos veículos PEV nos mercados avaliados na medida em que os benefícios financeiros são incrementados para os compradores.

Figura 26 - Curvas da participação dos veículos PEV no mercado em função do VPL na aquisição de veículos elétricos em cidades norte-americanas, europeias, chinesas e brasileiras



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Figuras 5, 6 e 7.

Na Figura 26, os valores do nível de significância, *p-value*, são inferiores a 5%, apontando a existência de relações estatisticamente significativas entre as variáveis. Os valores do coeficiente de determinação, R^2 , apontam uma correlação forte para as cidades norte-americanas e uma correlação muito forte para as cidades europeias e chinesas.

As curvas exibidas na Figura 26 permitem aos tomadores de decisão o correto planejamento das políticas e incentivos que devem ser desenvolvidos a fim de atingir um nível pré-estabelecido de participação dos veículos PEV no mercado em uma determinada cidade.

Considerando as curvas da Figura 26, a participação dos veículos PEV nas cidades brasileiras é estimada com base no comportamento das curvas dos mercados europeu e chinês. Assim, adota-se como premissa a equação (74) para representar a participação de mercado dos veículos PEV nas cidades brasileiras.

$$MS_{PEV} = 0,0053613 \cdot e^{0,000163135 \cdot VPL_{PEV}} \quad (74)$$

sendo,

MS_{PEV} : a participação de mercado dos veículos PEV nas cidades brasileiras

VPL_{PEV} : o valor presente líquido corrigido pela paridade do poder de compra na aquisição de veículos PEV [US\$]

5.2.2 Equação do valor presente líquido dos veículos PEV

Na equação (74), o valor presente líquido para os veículos PEV, VPL_{PEV} , é calculado a partir da equação (75).

$$VPL_{PEV} = 0,9644 \cdot \max\{VPL_{BEV}, VPL_{PHEV}\} - 429,72 \quad (75)$$

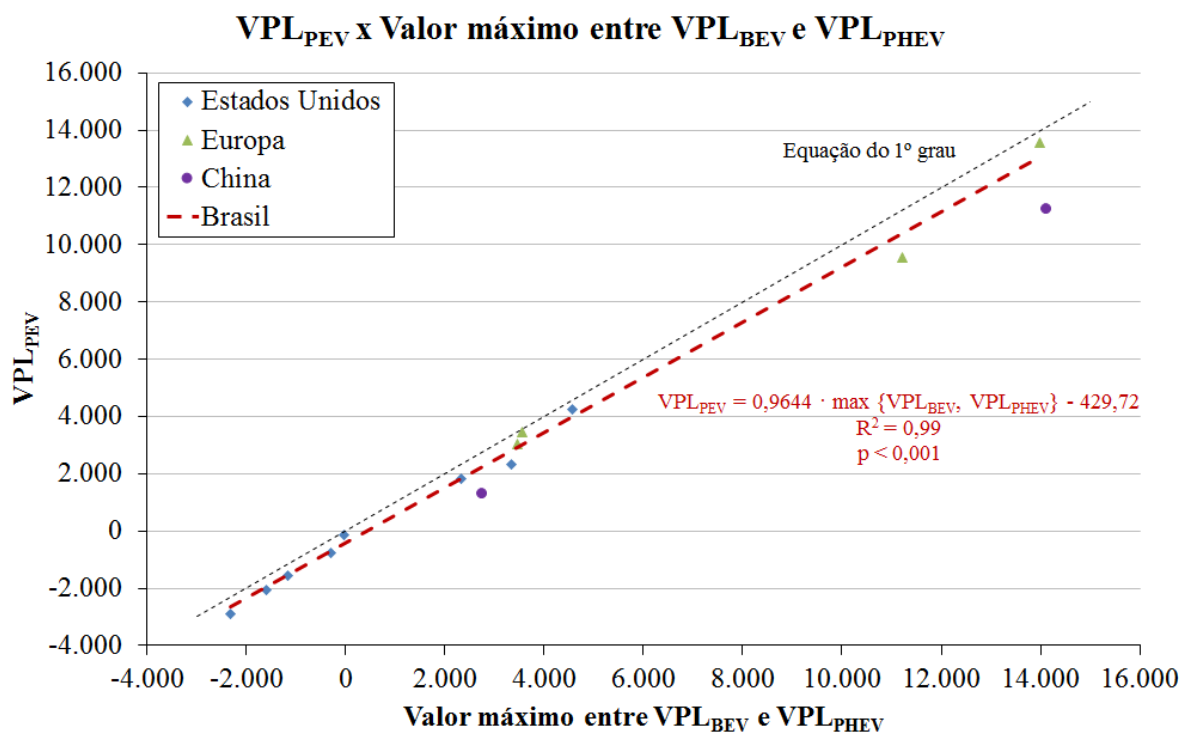
sendo,

VPL_{BEV} : o valor presente líquido corrigido pela paridade do poder de compra na aquisição de veículos BEV [US\$]

VPL_{PHEV} : o valor presente líquido corrigido pela paridade do poder de compra na aquisição de veículos PHEV [US\$]

A equação (75) advém da constatação prática do comportamento do valor do VPL_{PEV} como uma função linear do valor máximo entre VPL_{BEV} e VPL_{PHEV} em cidades norte-americanas, europeias e chinesas no ano de 2014, conforme observado na Figura 27.

Figura 27 - Comportamento do VPL_{PEV} como uma função linear do valor máximo entre VPL_{BEV} e VPL_{PHEV} em cidades norte-americanas, europeias e chinesas no ano de 2014



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Tabelas 12, 20 e 30.

A partir da análise da Figura 27⁴⁵, conclui-se que, nas cidades avaliadas, os consumidores tendem a adquirir o tipo de veículo (BEV ou PHEV) que apresenta o maior valor de VPL, sendo observada uma relação quase que direta entre o valor do VPL_{PEV} e o valor máximo entre VPL_{BEV} e VPL_{PHEV} , que pode ser apreciada na Figura 27 por meio da comparação entre a curva da equação (75) proposta neste estudo e a equação do primeiro grau com coeficiente linear nulo ($f(x)=x$).

5.2.3 Equações da participação dos veículos BEV e PHEV no mercado

Após o cálculo dos valores do VPL na aquisição de veículos BEV e PHEV, como determinar a preferência dos consumidores na compra de um tipo de veículo (BEV/PHEV)

⁴⁵ A cidade de Berlim não foi considerada na Figura 27, uma vez que, por apresentar um valor de participação dos veículos PEV no mercado muito baixo, de apenas 0,3%, a amostra é pouco representativa e apresenta comportamento bastante diverso das demais cidades europeias, norte-americanas e chinesas

em detrimento do outro? Neste trabalho, propõe-se o uso da *função logística* (VILLANUEVA; FEIJÓO, 2018; WONG; GOH, 2010) para modelar o comportamento dos consumidores na escolha do veículo a ser adquirido.

Conforme apontado por Dost e Geiger (2017), o valor final da variável dependente da função logística varia de 0 a 1, sendo que 0 (zero) representa que o consumidor certamente não irá adquirir um dado produto, e 1 (um) representa que o consumidor certamente irá adquirir um dado produto.

Utilizando a função logística, a participação dos veículos BEV no mercado é estimada a partir da equação (76). Complementarmente, a equação (77) possibilita o cálculo da participação dos veículos PHEV no mercado:

$$\frac{MS_{BEV}}{MS_{PEV}} = \frac{0,9626}{1 + 0,8781 \cdot e^{-0,4213 \cdot ((VPL_{BEV} - VPL_{PHEV}) / 1000)}} \quad (76)$$

$$MS_{PHEV} = MS_{PEV} - MS_{BEV} \quad (77)$$

sendo,

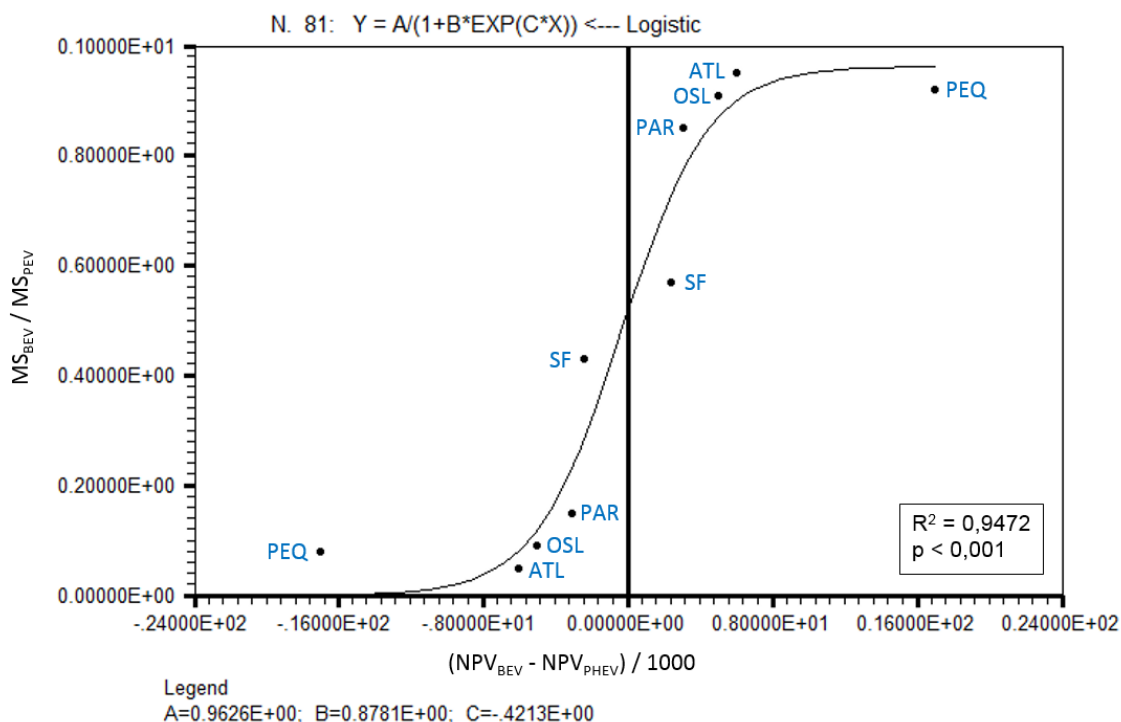
MS_{BEV} : a participação dos veículos BEV no mercado

MS_{PHEV} : a participação dos veículos PHEV no mercado

O uso da função logística na equação (76) decorre da observação prática do comportamento do valor da razão (MS_{BEV} / MS_{PEV}) em cidades norte-americanas, europeias e chinesas no ano de 2014, e representa o percentual de veículos BEV adquiridos frente ao total de veículos PEV adquiridos em um ano, podendo variar de 0 a 1. Na equação (76), a variável independente da equação da curva logística é o termo $((VPL_{BEV} - VPL_{PHEV}) / 1000)$.

A partir de dados reais das cidades norte-americanas, europeias e chinesas avaliadas neste trabalho, foi elaborada a Figura 28, que apresenta os pontos correspondentes às cinco cidades com os maiores valores do termo $((VPL_{BEV} - VPL_{PHEV}) / 1000)$. A partir dos pontos plotados na Figura 28, a curva da função logística da equação (76) foi determinada por meio do *software* LAB Fit.

Figura 28 - Curva da função logística para determinação da participação dos veículos BEV no mercado



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados das Tabelas 11, 12, 19, 20, 29 e 30.

5.2.4 Equação da quantidade específica de pontos de recarga por veículo PEV

A partir da Figura 19, estima-se a quantidade necessária de pontos públicos de recarga de veículos PEV em função da participação prevista dos veículos PEV na frota das cidades brasileiras, conforme apresentado na equação (78).

$$Q_{\text{Ponto.esp}} = 729,9e^{-35,92 \cdot F_{\text{PEVvacum\%}}} \quad (78)$$

sendo,

$Q_{\text{Ponto.esp}}$: a quantidade específica de pontos públicos de recarga necessários em uma cidade [pontos / 1000 veículos PEV]

$F_{\text{PEVvacum\%}}$: o percentual total de veículos PEV na frota

5.3 FORMULAÇÃO DO MODELO AUGMECON-BWM

Esta seção apresenta o detalhamento do modelo AUGMECON-BWM aplicado no planejamento da inserção de veículos elétricos no modal rodoviário brasileiro.

5.3.1 Modelagem AUGMECON

A seguir são descritos os índices, conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, variáveis auxiliares, restrições e função objetivo do modelo AUGMECON empregado nesta tese.

Índices

n	Ano da análise, $n \in N$;
v	Tipo de veículo, $v \in V$;
g	Gás de efeito estufa, $g \in G$.

Conjuntos

N	Conjunto dos anos de análise $\{1, 2, \dots, 6\}$;
V	Conjunto dos tipos de veículos $\{BEV, PHEV, ICEV\}$;
G	Conjunto dos gases de efeito estufa $\{CH_4, N_2O, CO, NO_x\}$.

Parâmetros

Parâmetros da cidade analisada:

P_{comb}	Preço da gasolina [R\$/l];
P_{EE}	Preço da energia elétrica residencial [R\$/kWh];
$A_{PIS.Cofins.EE}$	Alíquota do PIS/Cofins na energia elétrica residencial [%];
$A_{ICMS.EE}$	Alíquota do ICMS na energia elétrica residencial [%];
A_{IPVA}	Alíquota do imposto anual [%];
$D_{IPVA.BEV}$	Desconto no imposto anual do BEV [%];
$D_{IPVA.EREV}$	Desconto no imposto anual do EREV [%];
V_{leves}	Venda total anual de veículos leves da cidade [veículos/ano];
F_{aut}	Frota de automóveis inicial da cidade [milhares de veículos].

Parâmetros dos veículos:

$P_{BEV.base}$	Preço do BEV sem impostos [R\$];
$AUT_{EE.esp.BEV}$	Autonomia específica do BEV [km/kWh];
$A_{IPI.BEV}$	Alíquota do IPI na aquisição do BEV [%];
$P_{EREV.base}$	Preço do EREV sem impostos [R\$];

d_{CS}	Percentual da distância total percorrida anual que o EREV opera no modo <i>charge sustaining</i> [%];
$AUT_{comb.esp.EREV}$	Autonomia específica do EREV com gasolina no modo <i>charge sustaining</i> [km/l];
d_{CD}	Percentual da distância total percorrida anual que o EREV opera no modo <i>charge depleting</i> [%];
$AUT_{EE.esp.EREV}$	Autonomia específica do EREV com energia elétrica no modo <i>charge depleting</i> [km/kWh];
$A_{IPI.EREV}$	Alíquota do IPI na aquisição do EREV [%];
$P_{ICEV.BEV}$	Preço do ICEV similar ao BEV [R\$];
$P_{ICEV.EREV}$	Preço do ICEV similar ao EREV [R\$];
$AUT_{comb.esp.ICEV}$	Autonomia específica do ICEV com gasolina [km/l];
$DESV_{v,n}$	Desvalorização total do veículo do tipo v após n anos [%].

Parâmetros da recarga dos veículos:

$EE_{Resid.perfil}$	Percentual da energia elétrica recarregada nas residências [%];
$EE_{Público.perfil}$	Percentual da energia elétrica recarregada em pontos públicos de recarga [%];
$EE_{Outros.perfil}$	Percentual da energia elétrica recarregada em outros tipos de pontos de recarga [%];
$C_{Ponto.esp}$	Custo específico de instalação de um novo ponto público de recarga para veículos PEV [US\$/ponto].

Parâmetros ambientais:

FE_{CO_2}	Fator de emissão de CO ₂ de veículos convencionais [kg/l];
FE_g	Fator de emissão do gás de efeito estufa g para veículos convencionais [g/km];
FE_{SIN}	Fator de emissão de GEE pelo uso de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro [t CO ₂ eq/MWh];
GWP_{CO_2}	Potencial de aquecimento global do CO ₂ ;
GWP_g	Potencial de aquecimento global do gás de efeito estufa g ;
$FE_{NMHC.esc}$	Fator de emissão de Hidrocarbonetos não-metano no escapamento para veículos ICEV [g/km];
FE_{RCHO}	Fator de emissão de Aldeídos no escapamento para veículos ICEV [g/km];

FE_{MP}	Fator de emissão de Material particulado no escapamento para veículos ICEV [g/km];
FE_{SO2}	Fator de emissão de Dióxido de enxofre no escapamento para veículos ICEV [g/l];
$FE_{NMHC.diu}$	Fator de emissão evaporativa diurna de NMHC [g/dia];
$FE_{NMHC.hot}$	Fator de emissão evaporativa <i>hotsoak</i> de NMHC [g/viagem];
$FE_{NMHC.run}$	Fator de emissão evaporativa <i>running losses</i> de NMHC [g/viagem];
$FE_{NMHC.aba}$	Taxa de evaporação de NMHC no abastecimento [g/l].

Parâmetros energéticos:

FC_1	Fator de conversão de <i>mi l</i> para <i>mil tep</i> para a gasolina;
FC_2	Fator de conversão de <i>GWh</i> para <i>mil tep</i> para a energia elétrica.

Parâmetros diversos:

DTA	Distância total percorrida anual [km/ano];
k	Taxa anual de juros [%];
TC	Taxa de câmbio [R\$/US\$];
PPP	Paridade do poder de compra [R\$/US\$];
F_{aument}	Aumento médio anual da frota de automóveis na cidade [%];
A_{PIS}	Alíquota do PIS na aquisição de veículos [%];
A_{Cofins}	Alíquota da Cofins na aquisição de veículos [%];
A_{ICMS}	Alíquota do ICMS na aquisição de veículos [%];
L_{Dee}	Limite de desconto no preço da energia elétrica residencial [%];
$LARR_{Perda.Fed}$	Limite de perda na arrecadação total de impostos federais dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [%];
$LARR_{Perda.Est}$	Limite de perda na arrecadação total de impostos estaduais dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [%];
U_{Anual}	Uso médio anual do veículo [dias/ano];
NI	Nível de inserção de veículos PEV na cidade;
N_{dias}	Quantidade total de dias em um ano [dias/ano];
α_1	Coefficiente 1 da equação da participação dos veículos PEV no mercado;
α_2	Coefficiente 2 da equação da participação dos veículos PEV no mercado;
β_1	Coefficiente 1 da equação do VPL dos veículos PEV;
β_2	Coefficiente 2 da equação do VPL dos veículos PEV;

φ_1	Coeficiente 1 da equação da participação dos veículos BEV no mercado;
φ_2	Coeficiente 2 da equação da participação dos veículos BEV no mercado;
φ_3	Coeficiente 3 da equação da participação dos veículos BEV no mercado;
ω_1	Coeficiente 1 da equação da quantidade específica de pontos de recarga;
ω_2	Coeficiente 2 da equação da quantidade específica de pontos de recarga;
ζ	Coeficiente para cálculo do custo de O&M dos pontos de recarga.

Parâmetros do método AUGMECON:

ε	Limite superior da função objetivo convertida em restrição;
r	Faixa de variação da função objetivo convertida em restrição;
θ	Número pequeno, usualmente entre 10^{-3} e 10^{-6} .

Variáveis de decisão

D_{PIS}	Desconto na alíquota do PIS na aquisição de veículo PEV [%];
D_{Cofins}	Desconto na alíquota da Cofins na aquisição de veículo PEV [%];
D_{ICMS}	Desconto na alíquota do ICMS na aquisição de veículo PEV [%];
$D_{IPI.BEV}$	Desconto na alíquota do IPI na aquisição de veículo BEV [%];
$D_{IPI.EREV}$	Desconto na alíquota do IPI na aquisição de veículo EREV [%];
$D_{IPVA.BEV.comp}$	Desconto complementar no imposto anual do BEV [%];
$D_{IPVA.EREV.comp}$	Desconto complementar no imposto anual do EREV [%];
D_{EE}	Desconto no preço da energia elétrica residencial [%].

Variáveis auxiliares

$C_{Introdução}$	Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora no período sob análise [R\$];
$E_{Introdução}$	Emissões totais de GEE no período sob análise [kt CO ₂ eq];
$A_{PIS.f}$	Alíquota final do PIS na aquisição de veículos PEV [%];
$A_{Cofins.f}$	Alíquota final da Cofins na aquisição de veículos PEV [%];
$A_{ICMS.f}$	Alíquota final do ICMS na aquisição de veículos PEV [%];
$P_{EE.f}$	Preço final da energia elétrica residencial para veículos PEV [R\$/kWh];
P_{BEV}	Preço do BEV com impostos [R\$];
CI_{BEV}	Custo do investimento no BEV [R\$];
C_{BEV}	Custo específico de utilização do BEV por distância percorrida [R\$/km];
I_{BEV}	Imposto anual do BEV [R\$/ano];

$A_{IPI.BEV.f}$	Alíquota final do IPI na aquisição de veículos BEV [%];
$A_{total.BEV}$	Alíquota total de impostos na aquisição de veículos BEV [%];
$P_{BEV.0}$	Preço do BEV com impostos antes da otimização [R\$];
$CI_{BEV.0}$	Custo do investimento no BEV antes da otimização [R\$];
$C_{BEV.0}$	Custo específico de utilização do BEV por distância percorrida antes da otimização [R\$/km];
$I_{BEV.0}$	Imposto anual do BEV antes da otimização [R\$/ano];
$A_{total.BEV.0}$	Alíquota total de impostos na aquisição de veículos BEV antes da otimização [%];
P_{EREV}	Preço do EREV com impostos [R\$];
CI_{EREV}	Custo do investimento no EREV [R\$];
C_{EREV}	Custo específico de utilização do EREV por distância percorrida [R\$/km];
$C_{EREV.CD}$	Custo específico de utilização do EREV no modo <i>charge depleting</i> por distância percorrida [R\$/km];
$C_{EREV.CS}$	Custo específico de utilização do EREV no modo <i>charge sustaining</i> por distância percorrida [R\$/km];
$COMB_{EREV}$	Consumo anual de gasolina do EREV [l/ano];
I_{EREV}	Imposto anual do EREV [R\$/ano];
$A_{IPI.EREV.f}$	Alíquota final do IPI na aquisição de veículos EREV [%];
$A_{total.EREV}$	Alíquota total de impostos na aquisição de veículos EREV [%];
$P_{EREV.0}$	Preço do EREV com impostos antes da otimização [R\$];
$CI_{EREV.0}$	Custo do investimento no EREV antes da otimização [R\$];
$C_{EREV.0}$	Custo específico de utilização do EREV por distância percorrida antes da otimização [R\$/km];
$C_{EREV.CD.0}$	Custo específico de utilização do EREV no modo <i>charge depleting</i> por distância percorrida antes da otimização [R\$/km];
$I_{EREV.0}$	Imposto anual do EREV antes da otimização [R\$/ano];
$A_{total.EREV.0}$	Alíquota total de impostos na aquisição de veículos EREV antes da otimização [%];
C_{ICEV}	Custo específico de utilização do ICEV por distância percorrida [R\$/km];
$COMB_{ICEV}$	Consumo anual de gasolina do ICEV [l/ano];
$I_{ICEV.BEV}$	Imposto anual do ICEV similar ao BEV [R\$/ano];
$I_{ICEV.EREV}$	Imposto anual do ICEV similar ao EREV [R\$/ano];
R_{BEV}	Receita anual obtida na aquisição do BEV [R\$/ano];

VPL_{BEV}	Valor presente líquido na aquisição do BEV [R\$];
$VPL_{BEV.PPP}$	Valor presente líquido corrigido pela PPP na aquisição do BEV [US\$];
R_{EREV}	Receita anual obtida na aquisição do EREV [R\$/ano];
VPL_{EREV}	Valor presente líquido na aquisição do EREV [R\$];
$VPL_{EREV.PPP}$	Valor presente líquido corrigido pela PPP na aquisição do EREV [US\$];
V_{PEV}	Venda total anual de veículos PEV [veículos/ano];
V_{BEV}	Venda total anual de veículos BEV [veículos/ano];
V_{PHEV}	Venda total anual de veículos PHEV [veículos/ano];
ARR_{BEV}	Arrecadação anual total na venda de veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.PIS}$	Arrecadação anual do PIS na venda de veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.Cofins}$	Arrecadação anual da Cofins na venda de veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.ICMS}$	Arrecadação anual do ICMS na venda de veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.IPI}$	Arrecadação anual do IPI na venda de veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.IPVA}$	Arrecadação anual do IPVA dos veículos BEV vendidos [R\$/ano];
$EE_{Resid.MWh.BEV}$	Quantidade anual de energia elétrica recarregada nas residências por veículo BEV [MWh/veículo];
$ARR_{BEV.EE}$	Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.EE.PIS.Cofins}$	Arrecadação anual do PIS/Cofins da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.EE.ICMS}$	Arrecadação anual do ICMS da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV [R\$/ano];
$ARR_{BEV.Total}$	Arrecadação total de impostos dos veículos BEV no período sob análise [R\$];
$ARR_{BEV.Total.Fed}$	Arrecadação total de impostos federais dos veículos BEV no período sob análise [R\$];
$ARR_{BEV.Total.Est}$	Arrecadação total de impostos estaduais dos veículos BEV no período sob análise [R\$];
$ARR_{BEV.0}$	Arrecadação anual total na venda de veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
$ARR_{BEV.PIS.0}$	Arrecadação anual do PIS na venda de veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
$ARR_{BEV.Cofins.0}$	Arrecadação anual da Cofins na venda de veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];

<i>ARR_{BEV.ICMS.0}</i>	Arrecadação anual do ICMS na venda de veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{BEV.IPI.0}</i>	Arrecadação anual do IPI na venda de veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{BEV.IPVA.0}</i>	Arrecadação anual do IPVA dos veículos BEV vendidos sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{BEV.EE.0}</i>	Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{BEV.EE.PIS.Cofins.0}</i>	Arrecadação anual do PIS/Cofins da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{BEV.EE.ICMS.0}</i>	Arrecadação anual do ICMS da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{BEV.Total.0}</i>	Arrecadação total de impostos dos veículos BEV no período sob análise sem os incentivos [R\$];
<i>ARR_{BEV.Total.Fed.0}</i>	Arrecadação total de impostos federais dos veículos BEV no período sob análise sem os incentivos [R\$];
<i>ARR_{BEV.Total.Est.0}</i>	Arrecadação total de impostos estaduais dos veículos BEV no período sob análise sem os incentivos [R\$];
<i>ARR_{PHEV}</i>	Arrecadação anual total na venda de veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.PIS}</i>	Arrecadação anual do PIS na venda de veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.Cofins}</i>	Arrecadação anual da Cofins na venda de veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.ICMS}</i>	Arrecadação anual do ICMS na venda de veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.IPI}</i>	Arrecadação anual do IPI na venda de veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.IPVA}</i>	Arrecadação anual do IPVA dos veículos PHEV vendidos [R\$/ano];
<i>EE_{Resid.MWh.PHEV}</i>	Quantidade anual de energia elétrica recarregada nas residências por veículo PHEV [MWh/veículo];
<i>ARR_{PHEV.EE}</i>	Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.EE.PIS.Cofins}</i>	Arrecadação anual do PIS/Cofins da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.EE.ICMS}</i>	Arrecadação anual do ICMS da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.Total}</i>	Arrecadação total de impostos dos veículos PHEV no período sob análise [R\$];

<i>ARR_{PHEV.Total.Fed}</i>	Arrecadação total de impostos federais dos veículos PHEV no período sob análise [R\$];
<i>ARR_{PHEV.Total.Est}</i>	Arrecadação total de impostos estaduais dos veículos PHEV no período sob análise [R\$];
<i>ARR_{PHEV.0}</i>	Arrecadação anual total na venda de veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.PIS.0}</i>	Arrecadação anual do PIS na venda de veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.Cofins.0}</i>	Arrecadação anual da Cofins na venda de veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.ICMS.0}</i>	Arrecadação anual do ICMS na venda de veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.IPI.0}</i>	Arrecadação anual do IPI na venda de veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.IPVA.0}</i>	Arrecadação anual do IPVA dos veículos PHEV vendidos sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.EE.0}</i>	Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.EE.PIS.Cofins.0}</i>	Arrecadação anual do PIS/Cofins da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.EE.ICMS.0}</i>	Arrecadação anual do ICMS da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV sem os incentivos [R\$/ano];
<i>ARR_{PHEV.Total.0}</i>	Arrecadação total de impostos dos veículos PHEV no período sob análise sem os incentivos [R\$];
<i>ARR_{PHEV.Total.Fed.0}</i>	Arrecadação total de impostos federais dos veículos PHEV no período sob análise sem os incentivos [R\$];
<i>ARR_{PHEV.Total.Est.0}</i>	Arrecadação total de impostos estaduais dos veículos PHEV no período sob análise sem os incentivos [R\$];
<i>ARR_{Perda}</i>	Perda na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [R\$];
<i>ARR_{Perda.Fed}</i>	Perda na arrecadação total de impostos federais dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [R\$];
<i>ARR_{Perda.Est}</i>	Perda na arrecadação total de impostos estaduais dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [R\$];

$ARR_{Perda. \%}$	Perda percentual na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [%];
$ARR_{Perda.Fed. \%}$	Perda percentual na arrecadação total de impostos federais dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [%];
$ARR_{Perda.Est. \%}$	Perda percentual na arrecadação total de impostos estaduais dos veículos BEV e PHEV no período sob análise [%];
$R_{EE.Resid}$	Receita anual da distribuidora com a recarga dos veículos PEV nas residências [R\$/ano];
$R_{EE.Resid.Total}$	Receita total da distribuidora com a recarga dos veículos PEV nas residências no período sob análise [R\$];
$F_{PEV.Acum\ n}$	Quantidade total acumulada de veículos PEV na frota no ano n [veículos];
$F_{aut.Acum\ n}$	Frota total acumulada de veículos leves no ano n [milhares de veículos];
$F_{PEV.Acum. \% n}$	Percentual total de veículos PEV na frota no ano n [%];
$Q_{Ponto.esp\ n}$	Quantidade específica de pontos de recarga em função do percentual de veículos PEV na frota no ano n [pontos/1.000 PEVs];
$Q_{ponto\ n}$	Quantidade total de pontos de recarga no ano n [pontos];
$Q_{Ponto.Ano}$	Quantidade média de novos pontos de recarga a serem instalados em cada ano sob análise [pontos/ano];
C_{Ponto}	Custo anual de instalação dos pontos de recarga [R\$/ano];
$C_{Ponto.Total}$	Custo total de instalação dos pontos de recarga no período sob análise [R\$];
$C_{Ponto.O\&M}$	Custo anual de operação e manutenção dos pontos de recarga [R\$/ano];
$C_{Ponto.O\&M.Total}$	Custo total de operação e manutenção dos pontos de recarga no período sob análise [R\$];
EE_{Ponto}	Energia total fornecida pelos pontos de recarga no período sob análise [MWh];
$R_{EE.Ponto}$	Receita total com a venda de energia elétrica nos pontos de recarga no período sob análise [R\$];
$R_{Perda.Ponto}$	Perda de receita total da distribuidora com a implantação de estações públicas de recarga no período sob análise [R\$];
$R_{Perda.Dist}$	Perda de receita total da distribuidora no período sob análise [R\$];
$E_{geeCO_2.0}$	Emissão equivalente de GEE do gás CO ₂ no período sob análise antes da introdução de veículos PEV [kt CO ₂ eq];
$E_{gee0\ g}$	Emissão equivalente de GEE do gás g no período sob análise antes da introdução de veículos PEV [kt CO ₂ eq];

$E_{geeTotal.0}$	Emissões totais de GEE no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [kt CO ₂ eq];
E_{geeCO2}	Emissão equivalente de GEE do gás CO ₂ pelo uso de combustíveis no período sob análise após a introdução de veículos PEV [kt CO ₂ eq];
E_{gee_g}	Emissão equivalente de GEE do gás g pelo uso de combustíveis no período sob análise após a introdução de veículos PEV [kt CO ₂ eq];
$EE_{Público.MWh.BEV}$	Quantidade anual de energia elétrica recarregada em pontos públicos por veículo BEV [MWh/veículo];
$EE_{Público.MWh.PHEV}$	Quantidade anual de energia elétrica recarregada em pontos públicos por veículo PHEV [MWh/veículo];
$E_{geeResid}$	Emissão equivalente de GEE pelo uso de energia elétrica do SIN na recarga dos veículos PEV nas residências no período sob análise após a introdução de veículos PEV [kt CO ₂ eq];
$E_{geePonto}$	Emissão equivalente de GEE pelo uso de energia elétrica do SIN na recarga dos veículos PEV nas estações públicas de recarga no período sob análise após a introdução de veículos PEV [kt CO ₂ eq];
$E_{geeTotal}$	Emissões totais de GEE no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [kt CO ₂ eq];
E_{geeRed}	Redução das emissões totais de GEE no período sob análise [kt CO ₂ eq];
EA_{RCHO}	Emissão anual de Aldeídos por veículo ICEV [kg/ano];
EA_{MP}	Emissão anual de Material particulado por veículo ICEV [kg/ano];
EA_{SO2}	Emissão anual de Dióxido de enxofre por veículo ICEV [kg/ano];
EA_{NMHC}	Emissão anual de Hidrocarbonetos não-metano por veículo ICEV [kg/ano];
$E_{NMHC.0}$	Emissão de Hidrocarbonetos não-metano no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [t];
$E_{RCHO.0}$	Emissão de Aldeídos no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [t];
$E_{MP.0}$	Emissão de Material particulado no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [t];
$E_{SO2.0}$	Emissão de Dióxido de enxofre no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [t];
$E_{polTotal.0}$	Emissão total de poluentes atmosféricos no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [t];

E_{NMHC}	Emissão de Hidrocarbonetos não-metano no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [t];
E_{RCHO}	Emissão de Aldeídos no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [t];
E_{MP}	Emissão de Material particulado no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [t];
E_{SO_2}	Emissão de Dióxido de enxofre no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [t];
$E_{polTotal}$	Emissão total de poluentes atmosféricos no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [t];
E_{polRed}	Redução da emissão total de poluentes atmosféricos no período sob análise [t];
$COMB_{Total.0}$	Consumo de gasolina no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [mi l];
$ENE_{Total.0}$	Consumo total de energia no período sob análise antes da introdução dos veículos PEV [mil tep];
EE_{BEV}	Consumo anual de energia elétrica por veículo BEV [MWh/veículo];
EE_{PHEV}	Consumo anual de energia elétrica por veículo PHEV [MWh/veículo];
$COMB_{Total}$	Consumo de gasolina no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [mi l];
EE_{Total}	Consumo de energia elétrica no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [GWh];
ENE_{Total}	Consumo total de energia no período sob análise após a introdução dos veículos PEV [mil tep];
ENE_{Red}	Redução total do consumo de energéticos no período sob análise [mil tep];
$COMB_{Red}$	Redução do consumo de gasolina no período sob análise [mi l];
EE_{Aum}	Aumento do consumo de energia elétrica no período sob análise [GWh].

Definição das restrições relacionadas aos objetivos do problema

Conforme abordado na seção 5.1, o método multiobjetivo proposto apresenta dois objetivos conflitantes entre si, que são representados pelas equações (79) e (80).

Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora no período sob análise:

$$C_{Introdução} = ARR_{Perda} + R_{Perda.Dist} \quad (79)$$

Emissões totais de GEE no período sob análise:

$$E_{Introdução} = E_{geeTotal} \quad (80)$$

Função objetivo do método AUGMECON

Com base no procedimento de implementação do método AUGMECON, explanado na seção 4.1.2.1.3, a equação (81) apresenta a função objetivo do problema.

$$\min E_{Introdução} - \theta \left(\frac{s}{r} \right) \quad (81)$$

Restrição da função objetivo convertida em restrição no método AUGMECON

Na equação (82) é exibida a restrição da função objetivo convertida em restrição, conforme o procedimento de implementação do método AUGMECON.

$$C_{Introdução} + s = \varepsilon \quad (82)$$

Restrição do nível de inserção de veículos elétricos *plug-in* no mercado

A restrição (83) estabelece que a participação de mercado dos veículos PEV seja maior ou igual ao nível de inserção previamente estabelecido (1%, 3%, 5% ou 10%).

$$MS_{PEV} \geq NI \quad (83)$$

Restrições do limite superior das variáveis de decisão

As restrições (84) a (91) impõem limites superiores a cada uma das variáveis de decisão do problema.

$$D_{PIS} \leq 1 \quad (84)$$

$$D_{Cofins} \leq 1 \quad (85)$$

$$D_{ICMS} \leq 1 \quad (86)$$

$$D_{IPL.BEV} \leq 1 \quad (87)$$

$$D_{IPL.EREV} \leq 1 \quad (88)$$

$$D_{IPVA.BEV} + D_{IPVA.BEV.comp} \leq 1 \quad (89)$$

$$D_{IPVA.EREV} + D_{IPVA.EREV.comp} \leq 1 \quad (90)$$

$$D_{EE} \leq L_{Dee} \quad (91)$$

Restrições do limite superior de perda na arrecadação de impostos

As restrições (92) e (93) permitem o estabelecimento de um limite superior no valor da perda percentual na arrecadação de impostos federais e estaduais.

$$ARR_{Perda.Fed.} \% \leq LARR_{Perda.Fed} \quad (92)$$

$$ARR_{Perda.Est.} \% \leq LARR_{Perda.Est} \quad (93)$$

Restrições econômicas para cálculo da participação dos veículos PEV no mercado

As restrições (94) a (133) modelam a análise econômica da aquisição dos veículos PEV, de modo que sejam obtidos os valores de VPL na aquisição dos veículos BEV e PHEV.

Preços e alíquotas de impostos:

$$A_{PIS.f} = A_{PIS} (1 - D_{PIS}) \quad (94)$$

$$A_{Cofins.f} = A_{Cofins} (1 - D_{Cofins}) \quad (95)$$

$$A_{ICMS.f} = A_{ICMS} (1 - D_{ICMS}) \quad (96)$$

$$P_{EE.f} = P_{EE} (1 - D_{EE}) \quad (97)$$

Preços, custos e impostos dos veículos BEV:

$$A_{IPL.BEV.f} = A_{IPL.BEV} (1 - D_{IPL.BEV}) \quad (98)$$

$$A_{total.BEV} = A_{ICMS.f} + (1 - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPL.BEV.f} + \quad (99)$$

$$(1 - A_{ICMS.f} - (1 - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPL.BEV.f}) \cdot (A_{PIS.f} + A_{Cofins.f})$$

$$C_{BEV} = \frac{P_{EE.f}}{AUT_{EE.esp.BEV}} \quad (100)$$

$$P_{BEV} = \frac{P_{BEV.base}}{1-A_{total.BEV}} \quad (101)$$

$$CI_{BEV} = P_{BEV} - P_{ICEV.BEV} \quad (102)$$

$$I_{BEV} = \left(1 + \frac{\sum_{n \in N}^{v=BEV} DESV_{v.n}}{N}\right) (1 - D_{IPVA.BEV} - D_{IPVA.BEV.comp}) \cdot A_{IPVA} \cdot P_{BEV.0} \quad (103)$$

Preços, custos e impostos dos veículos BEV antes da otimização:

$$A_{total.BEV.0} = A_{ICMS} + (I - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.BEV} + \quad (104)$$

$$(I - A_{ICMS} - (I - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.BEV}) \cdot (A_{PIS} + A_{Cofins})$$

$$C_{BEV.0} = \frac{P_{EE}}{AUT_{EE.esp.BEV}} \quad (105)$$

$$P_{BEV.0} = \frac{P_{BEV.base}}{1-A_{total.BEV.0}} \quad (106)$$

$$CI_{BEV.0} = P_{BEV.0} - P_{ICEV.BEV} \quad (107)$$

$$I_{BEV.0} = \left(1 + \frac{\sum_{n \in N}^{v=BEV} DESV_{v.n}}{N}\right) (1 - D_{IPVA.BEV}) \cdot A_{IPVA} \cdot P_{BEV.0} \quad (108)$$

Preços, custos, impostos e consumo de combustível dos veículos PHEV (EREV):

$$A_{IPI.EREV.f} = A_{IPI.EREV} (I - D_{IPI.EREV}) \quad (109)$$

$$A_{total.EREV} = A_{ICMS.f} + (I - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPI.EREV.f} + \quad (110)$$

$$(I - A_{ICMS.f} - (I - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPI.EREV.f}) \cdot (A_{PIS.f} + A_{Cofins.f})$$

$$C_{EREV.CD} = \frac{P_{EE.f}}{AUT_{EE.esp.EREV}} \quad (111)$$

$$C_{EREV.CS} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.EREV}} \quad (112)$$

$$C_{EREV} = d_{CD} \cdot C_{EREV.CD} + d_{CS} \cdot C_{EREV.CS} \quad (113)$$

$$P_{EREV} = \frac{P_{EREV.base}}{1 - A_{total.EREV}} \quad (114)$$

$$CI_{EREV} = P_{EREV} - P_{ICEV.EREV} \quad (115)$$

$$I_{EREV} = \left(1 + \frac{\sum_{n \in N}^{v=PHEV} DESV_{v,n}}{N}\right) (1 - D_{IPVA.EREV} - D_{IPVA.EREV.comp}) \cdot A_{IPVA} \cdot P_{EREV.0} \quad (116)$$

$$COMB_{EREV} = d_{CS} \left(\frac{DTA}{AUT_{comb.esp.EREV}} \right) \quad (117)$$

Preços, custos e impostos dos veículos PHEV (EREV) antes da otimização:

$$A_{total.EREV.0} = A_{ICMS} + (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.EREV} + \quad (118)$$

$$(1 - A_{ICMS} - (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.EREV}) \cdot (A_{PIS} + A_{Cofins})$$

$$C_{EREV.CD.0} = \frac{P_{EE}}{AUT_{EE.esp.EREV}} \quad (119)$$

$$C_{EREV.0} = d_{CD} \cdot C_{EREV.CD.0} + d_{CS} \cdot C_{EREV.CS} \quad (120)$$

$$P_{EREV.0} = \frac{P_{EREV.base}}{1 - A_{total.EREV.0}} \quad (121)$$

$$CI_{EREV.0} = P_{EREV.0} - P_{ICEV.EREV} \quad (122)$$

$$I_{EREV.0} = \left(1 + \frac{\sum_{n \in N}^{v=PHEV} DESV_{v,n}}{N}\right) (1 - D_{IPVA.EREV}) \cdot A_{IPVA} \cdot P_{EREV.0} \quad (123)$$

Custos, impostos e consumo de combustível dos veículos ICEV:

$$I_{ICEV.BEV} = \left(1 + \frac{\sum_{n \in N}^{v=ICEV} DESV_{v,n}}{N}\right) \cdot A_{IPVA} \cdot P_{ICEV.BEV} \quad (124)$$

$$I_{ICEV.EREV} = \left(1 + \frac{\sum_{n \in N}^{v=ICEV} DESV_{v,n}}{N}\right) \cdot A_{IPVA} \cdot P_{ICEV.EREV} \quad (125)$$

$$C_{ICEV} = \frac{P_{comb}}{AUT_{comb.esp.ICEV}} \quad (126)$$

$$COMB_{ICEV} = \frac{DTA}{AUT_{comb.esp.ICEV}} \quad (127)$$

Resultados da análise econômica:

$$R_{BEV} = DTA (C_{ICEV} - C_{BEV}) + (I_{ICEV.BEV} - I_{BEV}) \quad (128)$$

$$VPL_{BEV} = \sum_{n \in N} \frac{R_{BEV}}{(1+k)^N} - CI_{BEV} \quad (129)$$

$$VPL_{BEV.PPP} = \frac{VPL_{BEV}}{PPP} \quad (130)$$

$$R_{EREV} = DTA (C_{ICEV} - C_{EREV}) + (I_{ICEV.EREV} - I_{EREV}) \quad (131)$$

$$VPL_{EREV} = \sum_{n \in N} \frac{R_{EREV}}{(1+k)^N} - CI_{EREV} \quad (132)$$

$$VPL_{EREV.PPP} = \frac{VPL_{EREV}}{PPP} \quad (133)$$

As restrições (134) a (137) representam as equações auxiliares definidas nas seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3.

Equação da participação dos veículos PEV no mercado em função do VPL:

$$MS_{PEV} = \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2 \cdot VPL_{PEV.PPP}} \quad (134)$$

Equação do VPL dos veículos PEV em função do VPL dos veículos BEV e PHEV (EREV):

$$VPL_{PEV.PPP} = \beta_1 \cdot \max\{VPL_{BEV.PPP}, VPL_{EREV.PPP}\} - \beta_2 \quad (135)$$

Equações da participação dos veículos BEV e PHEV no mercado:

$$MS_{BEV} = MS_{PEV} \cdot \frac{\varphi_1}{1 + \varphi_2 \cdot e^{\frac{\varphi_3(VPL_{BEV.PPP} - VPL_{EREV.PPP})}{1000}}} \quad (136)$$

$$MS_{PHEV} = MS_{PEV} - MS_{BEV} \quad (137)$$

As restrições (138) a (140) representam a quantidade anual de veículos elétricos vendidos.

Resultados da quantidade de veículos vendidos:

$$V_{PEV} = MS_{PEV} \cdot V_{leves} \quad (138)$$

$$V_{BEV} = V_{PEV} \cdot \frac{MS_{BEV}}{MS_{PEV}} \quad (139)$$

$$V_{PHEV} = V_{PEV} \cdot \frac{MS_{PHEV}}{MS_{PEV}} \quad (140)$$

Restrições econômicas para cálculo da arrecadação de impostos

As restrições (141) a (196) permitem o cálculo da arrecadação de impostos, incluindo o valor da *perda na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV no período sob análise*, representado pela variável auxiliar ARR_{Perda} , sendo tal variável utilizada na equação (79), que define um dos objetivos do problema.

Arrecadação anual de impostos na venda de veículos BEV após os incentivos:

$$ARR_{BEV.PIS} = (1 - A_{ICMS,f} - (1 - A_{ICMS,f}) \cdot A_{IPI,BEV,f}) \cdot A_{PIS,f} \cdot (P_{BEV} \cdot V_{BEV}) \quad (141)$$

$$ARR_{BEV.Cofins} = (1 - A_{ICMS,f} - (1 - A_{ICMS,f}) \cdot A_{IPI,BEV,f}) \cdot A_{Cofins,f} \cdot (P_{BEV} \cdot V_{BEV}) \quad (142)$$

$$ARR_{BEV.ICMS} = A_{ICMS,f} \cdot (P_{BEV} \cdot V_{BEV}) \quad (143)$$

$$ARR_{BEV.IPI} = (1 - A_{ICMS,f}) \cdot A_{IPI,BEV,f} \cdot (P_{BEV} \cdot V_{BEV}) \quad (144)$$

$$ARR_{BEV} = ARR_{BEV.PIS} + ARR_{BEV.Cofins} + ARR_{BEV.ICMS} + ARR_{BEV.IPI} \quad (145)$$

Arrecadação anual de impostos na venda de veículos BEV sem os incentivos:

$$ARR_{BEV.PIS.0} = (1 - A_{ICMS} - (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI,BEV}) \cdot A_{PIS} \cdot (P_{BEV.0} \cdot V_{BEV}) \quad (146)$$

$$ARR_{BEV.Cofins.0} = (1 - A_{ICMS} - (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI,BEV}) \cdot A_{Cofins} \cdot (P_{BEV.0} \cdot V_{BEV}) \quad (147)$$

$$ARR_{BEV.ICMS.0} = A_{ICMS} \cdot (P_{BEV.0} \cdot V_{BEV}) \quad (148)$$

$$ARR_{BEV.IPI.0} = (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI,BEV} \cdot (P_{BEV.0} \cdot V_{BEV}) \quad (149)$$

$$ARR_{BEV.0} = ARR_{BEV.PIS.0} + ARR_{BEV.Cofins.0} + ARR_{BEV.ICMS.0} + ARR_{BEV.IPI.0} \quad (150)$$

Arrecadação anual do IPVA dos veículos BEV vendidos após os incentivos:

$$ARR_{BEV.IPVA} = I_{BEV} \cdot V_{BEV} \quad (151)$$

Arrecadação anual do IPVA dos veículos BEV vendidos sem os incentivos:

$$ARR_{BEV.IPVA.0} = I_{BEV.0} \cdot V_{BEV} \quad (152)$$

Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV após os incentivos:

$$EE_{Resid.MWh.BEV} = \frac{DTA \cdot EE_{Resid.perfil}}{1000AUT_{EE.esp.BEV}} \quad (153)$$

$$ARR_{BEV.EE} = (EE_{Resid.MWh.BEV} \cdot V_{BEV} \cdot P_{EE,f}) \cdot (A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}) \cdot 1000 \quad (154)$$

$$ARR_{BEV.EE.PIS.Cofins} = \frac{ARR_{BEV.EE} \cdot A_{PIS.Cofins.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (155)$$

$$ARR_{BEV.EE.ICMS} = \frac{ARR_{BEV.EE} \cdot A_{ICMS.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (156)$$

Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos BEV sem os incentivos:

$$ARR_{BEV.EE.0} = (EE_{Resid.MWh.BEV} \cdot V_{BEV} \cdot P_{EE}) \cdot (A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}) \cdot 1000 \quad (157)$$

$$ARR_{BEV.EE.PIS.Cofins.0} = \frac{ARR_{BEV.EE.0} \cdot A_{PIS.Cofins.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (158)$$

$$ARR_{BEV.EE.ICMS.0} = \frac{ARR_{BEV.EE.0} \cdot A_{ICMS.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (159)$$

Arrecadação total de impostos dos veículos BEV no período sob análise após os incentivos:

$$ARR_{BEV.Total} = (\maximo\{N\} \cdot ARR_{BEV}) + (ARR_{BEV.IPVA} + ARR_{BEV.EE}) \cdot \sum_{n \in N} n \quad (160)$$

$$ARR_{BEV.Total.Fed} = \maximo\{N\} \cdot (ARR_{BEV.PIS} + ARR_{BEV.Cofins} + ARR_{BEV.IPI}) + \quad (161)$$

$$ARR_{BEV.EE.PIS.Cofins} \cdot \sum_{n \in N} n$$

$$ARR_{BEV.Total.Est} = ARR_{BEV.Total} - ARR_{BEV.Total.Fed} \quad (162)$$

Arrecadação total de impostos dos veículos BEV no período sob análise sem os incentivos:

$$ARR_{BEV.Total.0} = (\text{maximo}\{N\} \cdot ARR_{BEV.0}) + \quad (163)$$

$$(ARR_{BEV.IPVA.0} + ARR_{BEV.EE.0}) \cdot \sum_{n \in N} n$$

$$ARR_{BEV.Total.Fed.0} = ARR_{BEV.EE.PIS.Cofins.0} \cdot \sum_{n \in N} n + \quad (164)$$

$$\text{maximo}\{N\} \cdot (ARR_{BEV.PIS.0} + ARR_{BEV.Cofins.0} + ARR_{BEV.IPI.0})$$

$$ARR_{BEV.Total.Est.0} = ARR_{BEV.Total.0} - ARR_{BEV.Total.Fed.0} \quad (165)$$

Arrecadação anual de impostos na venda de veículos PHEV após os incentivos:

$$ARR_{PHEV.PIS} = (1 - A_{ICMS.f} - (1 - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPI.EREV.f}) \cdot A_{PIS.f} \cdot (P_{EREV} \cdot V_{PHEV}) \quad (166)$$

$$ARR_{PHEV.Cofins} = (1 - A_{ICMS.f} - (1 - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPI.EREV.f}) \cdot A_{Cofins.f} \cdot (P_{EREV} \cdot V_{PHEV}) \quad (167)$$

$$ARR_{PHEV.ICMS} = A_{ICMS.f} \cdot (P_{EREV} \cdot V_{PHEV}) \quad (168)$$

$$ARR_{PHEV.IPI} = (1 - A_{ICMS.f}) \cdot A_{IPI.EREV.f} \cdot (P_{EREV} \cdot V_{PHEV}) \quad (169)$$

$$ARR_{PHEV} = ARR_{PHEV.PIS} + ARR_{PHEV.Cofins} + ARR_{PHEV.ICMS} + ARR_{PHEV.IPI} \quad (170)$$

Arrecadação anual de impostos na venda de veículos PHEV sem os incentivos:

$$ARR_{PHEV.PIS.0} = (1 - A_{ICMS} - (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.EREV}) \cdot A_{PIS} \cdot (P_{EREV.0} \cdot V_{PHEV}) \quad (171)$$

$$ARR_{PHEV.Cofins.0} = (1 - A_{ICMS} - (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.EREV}) \cdot A_{Cofins} \cdot (P_{EREV.0} \cdot V_{PHEV}) \quad (172)$$

$$ARR_{PHEV.ICMS.0} = A_{ICMS} \cdot (P_{EREV.0} \cdot V_{PHEV}) \quad (173)$$

$$ARR_{PHEV.IPI.0} = (1 - A_{ICMS}) \cdot A_{IPI.EREV} \cdot (P_{EREV.0} \cdot V_{PHEV}) \quad (174)$$

$$ARR_{PHEV.0} = ARR_{PHEV.PIS.0} + ARR_{PHEV.Cofins.0} + ARR_{PHEV.ICMS.0} + ARR_{PHEV.IPI.0} \quad (175)$$

Arrecadação anual do IPVA dos veículos PHEV vendidos após os incentivos:

$$ARR_{PHEV.IPVA} = I_{EREV} \cdot V_{PHEV} \quad (176)$$

Arrecadação anual do IPVA dos veículos PHEV vendidos sem os incentivos:

$$ARR_{PHEV.IPVA.0} = I_{EREV.0} \cdot V_{PHEV} \quad (177)$$

Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV após os incentivos:

$$EE_{Resid.MWh.PHEV} = \frac{d_{CD} \cdot DTA \cdot EE_{Resid.perfil}}{1000 \cdot AUT_{EE.esp.EREV}} \quad (178)$$

$$ARR_{PHEV.EE} = (EE_{Resid.MWh.PHEV} \cdot V_{PHEV} \cdot P_{EE,f}) \cdot (A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}) \cdot 1000 \quad (179)$$

$$ARR_{PHEV.EE.PIS.Cofins} = \frac{ARR_{PHEV.EE} \cdot A_{PIS.Cofins.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (180)$$

$$ARR_{PHEV.EE.ICMS} = \frac{ARR_{PHEV.EE} \cdot A_{ICMS.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (181)$$

Arrecadação anual da energia elétrica residencial para recarga dos veículos PHEV sem os incentivos:

$$ARR_{PHEV.EE.0} = (EE_{Resid.MWh.PHEV} \cdot V_{PHEV} \cdot P_{EE}) \cdot (A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}) \cdot 1000 \quad (182)$$

$$ARR_{PHEV.EE.PIS.Cofins.0} = \frac{ARR_{PHEV.EE.0} \cdot A_{PIS.Cofins.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (183)$$

$$ARR_{PHEV.EE.ICMS.0} = \frac{ARR_{PHEV.EE.0} \cdot A_{ICMS.EE}}{A_{PIS.Cofins.EE} + A_{ICMS.EE}} \quad (184)$$

Arrecadação total de impostos dos veículos PHEV no período sob análise após os incentivos:

$$ARR_{PHEV.Total} = (ARR_{PHEV.IPVA} + ARR_{PHEV.EE}) \cdot \sum_{n \in N} n + \quad (185)$$

$$(\max\{N\} \cdot ARR_{PHEV})$$

$$ARR_{PHEV.Total.Fed} = ARR_{PHEV.EE.PIS.Cofins} \cdot \sum_{n \in N} n + \quad (186)$$

$$\max\{N\} \cdot (ARR_{PHEV.PIS} + ARR_{PHEV.Cofins} + ARR_{PHEV.IPI})$$

$$ARR_{PHEV.Total.Est} = ARR_{PHEV.Total} - ARR_{PHEV.Total.Fed} \quad (187)$$

Arrecadação total de impostos dos veículos PHEV no período sob análise sem os incentivos:

$$ARR_{PHEV.Total.0} = (\max\{N\} \cdot ARR_{PHEV.0}) + \quad (188)$$

$$(ARR_{PHEV.IPVA.0} + ARR_{PHEV.EE.0}) \cdot \sum_{n \in N} n$$

$$ARR_{PHEV.Total.Fed.0} = ARR_{PHEV.EE.PIS.Cofins.0} \cdot \sum_{n \in N} n + \quad (189)$$

$$\max\{N\} \cdot (ARR_{PHEV.PIS.0} + ARR_{PHEV.Cofins.0} + ARR_{PHEV.IPI.0})$$

$$ARR_{PHEV.Total.Est.0} = ARR_{PHEV.Total.0} - ARR_{PHEV.Total.Fed.0} \quad (190)$$

Perda na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV no período sob análise
após os incentivos:

$$ARR_{Perda} = (ARR_{BEV.Total.0} - ARR_{BEV.Total}) + (ARR_{PHEV.Total.0} - ARR_{PHEV.Total}) \quad (191)$$

$$ARR_{Perda.Fed} = (ARR_{BEV.Total.Fed.0} - ARR_{BEV.Total.Fed}) + (ARR_{PHEV.Total.Fed.0} - ARR_{PHEV.Total.Fed}) \quad (192)$$

$$ARR_{Perda.Est} = ARR_{Perda} - ARR_{Perda.Fed} \quad (193)$$

$$ARR_{Perda.\%} = \frac{ARR_{Perda}}{ARR_{BEV.Total.0} + ARR_{PHEV.Total.0}} \quad (194)$$

$$ARR_{Perda.Fed.\%} = \frac{ARR_{Perda.Fed}}{ARR_{BEV.Total.Fed.0} + ARR_{PHEV.Total.Fed.0}} \quad (195)$$

$$ARR_{Perda.Est.\%} = \frac{ARR_{Perda.Est}}{ARR_{BEV.Total.Est.0} + ARR_{PHEV.Total.Est.0}} \quad (196)$$

Restrições econômicas para cálculo da receita da distribuidora de energia elétrica

As restrições (197) a (212) permitem o cálculo da *perda de receita total da distribuidora no período sob análise*, representado pela variável auxiliar $R_{Perda.Dist}$, sendo tal variável utilizada na equação (79), que define um dos objetivos do problema.

Receita anual da distribuidora com a recarga dos veículos PEV nas residências:

$$R_{EE.Resid} = (EE_{Resid.MWh.BEV} \cdot V_{BEV} + EE_{Resid.MWh.PHEV} \cdot V_{PHEV}) \cdot (1 - APIS.Cofins.EE - AICMS.EE) \cdot P_{EE.f} \cdot 1000 \quad (197)$$

Receita total da distribuidora com a recarga dos veículos PEV nas residências no período
sob análise:

$$R_{EE.Resid.Total} = R_{EE.Resid} \cdot \sum_{n \in N} n \quad (198)$$

Percentual total de veículos PEV na frota em cada ano sob análise:

$$F_{PEV.Acum\ n} = n \cdot V_{PEV} \quad \forall n \in N \quad (199)$$

$$F_{aut.Acum\ n} = F_{aut} \cdot (1 + F_{aumentado})^n \quad \forall n \in N \quad (200)$$

$$F_{PEV.Acum.\% \ n} = \frac{F_{PEV.Acum\ n}}{1000 \cdot F_{aut.Acum\ n}} \quad \forall n \in N \quad (201)$$

Equação da quantidade específica de pontos de recarga em função do percentual de veículos PEV na frota em cada ano sob análise:

A restrição (202) representa a equação auxiliar definida na seção 5.2.4.

$$Q_{Ponto.esp\ n} = \omega_1 \cdot e^{\omega_2 \cdot F_{PEV.Acum.\% \ n}} \quad \forall n \in N \quad (202)$$

Quantidade de pontos públicos de recarga para veículos PEV a serem instalados:

$$Q_{Ponto\ n} = \frac{F_{PEV.Acum\ n} \cdot Q_{Ponto.esp\ n}}{1000} \quad \forall n \in N \quad (203)$$

$$Q_{Ponto.Ano} = \frac{Q_{Ponto\ 1} + \sum_{n \in N}^{n \neq 1} Q_{Ponto\ n} - Q_{Ponto\ n-1}}{N} \quad (204)$$

Custos de instalação e de O&M dos pontos públicos de recarga a serem instalados:

$$C_{Ponto} = C_{Ponto.esp} \cdot TC \cdot Q_{Ponto.Ano} \quad (205)$$

$$C_{Ponto.Total} = N \cdot C_{Ponto} \quad (206)$$

$$C_{Ponto.O\&M} = \zeta \cdot C_{Ponto} \quad (207)$$

$$C_{Ponto.O\&M.Total} = \zeta \cdot C_{Ponto.Total} \quad (208)$$

Receita da distribuidora com a venda de energia elétrica nos pontos de recarga no período sob análise:

$$EE_{Ponto} = (EE_{Público.MWh.BEV} \cdot V_{BEV} + EE_{Público.MWh.PHEV} \cdot V_{PHEV}) \cdot \sum_{n \in N} n \quad (209)$$

$$R_{EE.Ponto} = EE_{Ponto} \cdot P_{EE} \cdot (1 - A_{PIS.Cofins.EE} - A_{ICMS.EE}) \cdot 1000 \quad (210)$$

Perda de receita total da distribuidora com a implantação de estações públicas de recarga no período sob análise:

$$R_{\text{Perda.Ponto}} = C_{\text{Ponto.Total}} + C_{\text{Ponto.O\&M.Total}} - R_{\text{EE.Ponto}} \quad (211)$$

Resultado final da perda de receita da distribuidora no período sob análise:

$$R_{\text{Perda.Dist}} = R_{\text{Perda.Ponto}} - R_{\text{EE.Resid.Total}} \quad (212)$$

Restrições ambientais para cálculo das emissões de GEE

As restrições (213) a (223) permitem o cálculo das emissões de GEE decorrentes do uso de combustíveis e energia elétrica pelos veículos ICEV e PEV, incluindo o valor das *emissões totais de GEE no período sob análise após a introdução dos veículos PEV*, representado pela variável auxiliar $E_{\text{gee}_{\text{Total}}}$, sendo tal variável utilizada na equação (80), que define um dos objetivos do problema.

Emissões equivalentes de GEE no período sob análise antes da introdução de veículos PEV:

$$E_{\text{gee}_{\text{CO2.0}}} = \frac{\text{COMB}_{\text{ICEV}} \cdot \text{FE}_{\text{CO2}} \cdot \text{GWP}_{\text{CO2}} \cdot V_{\text{PEV}} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000000} \quad (213)$$

$$E_{\text{gee}_{0g}} = \frac{\text{DTA} \cdot V_{\text{PEV}} \cdot \text{FE}_g \cdot \text{GWP}_g \cdot \sum_{n \in N} n}{1000000000} \quad \forall g \in G \quad (214)$$

$$E_{\text{gee}_{\text{Total.0}}} = E_{\text{gee}_{\text{CO2.0}}} + \sum_{g \in G} E_{\text{gee}_{0g}} \quad (215)$$

Emissões equivalentes de GEE pelo uso de combustíveis no período sob análise após a introdução de veículos PEV:

$$E_{\text{gee}_{\text{CO2}}} = \frac{\text{COMB}_{\text{REVEV}} \cdot \text{FE}_{\text{CO2}} \cdot \text{GWP}_{\text{CO2}} \cdot V_{\text{PHEV}} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000000} \quad (216)$$

$$E_{\text{gee}_g} = \frac{\text{DTA} \cdot V_{\text{PHEV}} \cdot \text{FE}_g \cdot \text{GWP}_g \cdot \sum_{n \in N} n}{1000000000} \quad \forall g \in G \quad (217)$$

Emissões equivalentes de GEE pelo uso de energia elétrica do SIN no período sob análise após a introdução de veículos PEV:

$$EE_{P\acute{u}blico.MWh.BEV} = \frac{DTA \cdot EE_{P\acute{u}blico.perfil}}{1000 \cdot AUT_{EE.esp.BEV}} \quad (218)$$

$$EE_{P\acute{u}blico.MWh.PHEV} = \frac{DTA \cdot d_{CD} \cdot EE_{P\acute{u}blico.perfil}}{1000 \cdot AUT_{EE.esp.EREV}} \quad (219)$$

$$Egee_{Resid} = \frac{FE_{SIN} \cdot (EE_{Resid.MWh.BEV} \cdot V_{BEV} + EE_{Resid.MWh.PHEV} \cdot V_{PHEV}) \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (220)$$

$$Egee_{Ponto} = \frac{FE_{SIN} \cdot (EE_{P\acute{u}blico.MWh.BEV} \cdot V_{BEV} + EE_{P\acute{u}blico.MWh.PHEV} \cdot V_{PHEV}) \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (221)$$

Emissões equivalentes totais de GEE no período sob análise após a introdução de veículos PEV:

$$Egee_{Total} = Egee_{CO2} + Egee_{Resid} + Egee_{Ponto} + \sum_{g \in G} Egee_g \quad (222)$$

Redução das emissões equivalentes de GEE no período sob análise:

$$Egee_{Red} = Egee_{Total.0} - Egee_{Total} \quad (223)$$

Restrições ambientais para cálculo das emissões de poluentes atmosféricos

As restrições (224) a (238) modelam as emissões de poluentes atmosféricos, permitindo o cálculo da *redução da emissão total de poluentes atmosféricos no período sob análise* após a introdução dos veículos PEV, representado pela variável auxiliar $Epol_{Red}$.

Emissão anual de poluentes atmosféricos por veículo ICEV:

$$EA_{RCHO} = \frac{DTA \cdot FE_{RCHO}}{1000} \quad (224)$$

$$EA_{MP} = \frac{DTA \cdot FE_{MP}}{1000} \quad (225)$$

$$EA_{SO2} = \frac{COMB_{ICEV} \cdot FE_{SO2}}{1000} \quad (226)$$

$$E_{ANMHC} = \frac{DTA \cdot FE_{NMHC.esc} + N_{dias} \cdot FE_{NMHC.diu} + U_{Anual} \cdot (FE_{NMHC.hot} + FE_{NMHC.run})}{1000} + \frac{COMB_{ICEV} \cdot FE_{NMHC.aba}}{1000} \quad (227)$$

Emissão de poluentes atmosféricos no período sob análise antes da introdução dos veículos

PEV:

$$E_{NMHC.0} = \frac{E_{ANMHC} \cdot V_{PEV} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (228)$$

$$E_{RCHO.0} = \frac{E_{ARCHO} \cdot V_{PEV} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (229)$$

$$E_{MP.0} = \frac{E_{AMP} \cdot V_{PEV} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (230)$$

$$E_{SO2.0} = \frac{E_{ASO2} \cdot V_{PEV} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (231)$$

$$E_{polTotal.0} = E_{NMHC.0} + E_{RCHO.0} + E_{MP.0} + E_{SO2.0} \quad (232)$$

Emissão de poluentes atmosféricos no período sob análise após a introdução dos veículos

PEV:

$$E_{NMHC} = \frac{E_{ANMHC} \cdot V_{PHEV} \cdot d_{CS} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (233)$$

$$E_{RCHO} = \frac{E_{ARCHO} \cdot V_{PHEV} \cdot d_{CS} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (234)$$

$$E_{MP} = \frac{E_{AMP} \cdot V_{PHEV} \cdot d_{CS} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (235)$$

$$E_{SO2} = \frac{E_{ASO2} \cdot V_{PHEV} \cdot d_{CS} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (236)$$

$$E_{polTotal} = E_{NMHC} + E_{RCHO} + E_{MP} + E_{SO2} \quad (237)$$

Redução da emissão total de poluentes atmosféricos no período sob análise:

$$E_{polRed} = E_{polTotal.0} - E_{polTotal} \quad (238)$$

Restrições energéticas

As restrições (239) a (248) modelam o consumo de combustíveis e energia elétrica pelos veículos ICEV e PEV, incluindo a variação do consumo de tais energéticos decorrente da inserção de veículos elétricos em determinada cidade.

Consumo de energéticos no período sob análise antes da introdução de veículos PEV:

$$COMB_{Total.0} = \frac{COMB_{ICEV} \cdot V_{PEV} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000000} \quad (239)$$

$$ENE_{Total.0} = FC_1 \cdot COMB_{Total.0} \quad (240)$$

Consumo de energéticos no período sob análise após a introdução de veículos PEV:

$$EE_{BEV} = EE_{Resid.MWh.BEV} + EE_{Público.MWh.BEV} \quad (241)$$

$$EE_{PHEV} = EE_{Resid.MWh.PHEV} + EE_{Público.MWh.PHEV} \quad (242)$$

$$EE_{Total} = \frac{(EE_{BEV} \cdot V_{BEV} + EE_{PHEV} \cdot V_{PHEV}) \cdot \sum_{n \in N} n}{1000} \quad (243)$$

$$COMB_{Total} = \frac{COMB_{EREV} \cdot V_{PHEV} \cdot \sum_{n \in N} n}{1000000} \quad (244)$$

$$ENE_{Total} = FC_1 \cdot COMB_{Total} + FC_2 \cdot EE_{Total} \quad (245)$$

Variação no consumo de energéticos no período sob análise:

$$ENE_{Red} = ENE_{Total.0} - ENE_{Total} \quad (246)$$

$$COMB_{Red} = COMB_{Total.0} - COMB_{Total} \quad (247)$$

$$EE_{Aum} = EE_{Total} \quad (248)$$

Restrições de não-negatividade

As restrições (249) representam as condições de não-negatividade do modelo:

$$s \geq 0; D_{PIS} \geq 0; D_{Cofins} \geq 0; D_{ICMS} \geq 0; D_{IPL.BEV} \geq 0; D_{IPL.EREV} \geq 0; \quad (249)$$

$$D_{IPVA.BEV.comp} \geq 0; D_{IPVA.EREV.comp} \geq 0; D_{EE} \geq 0$$

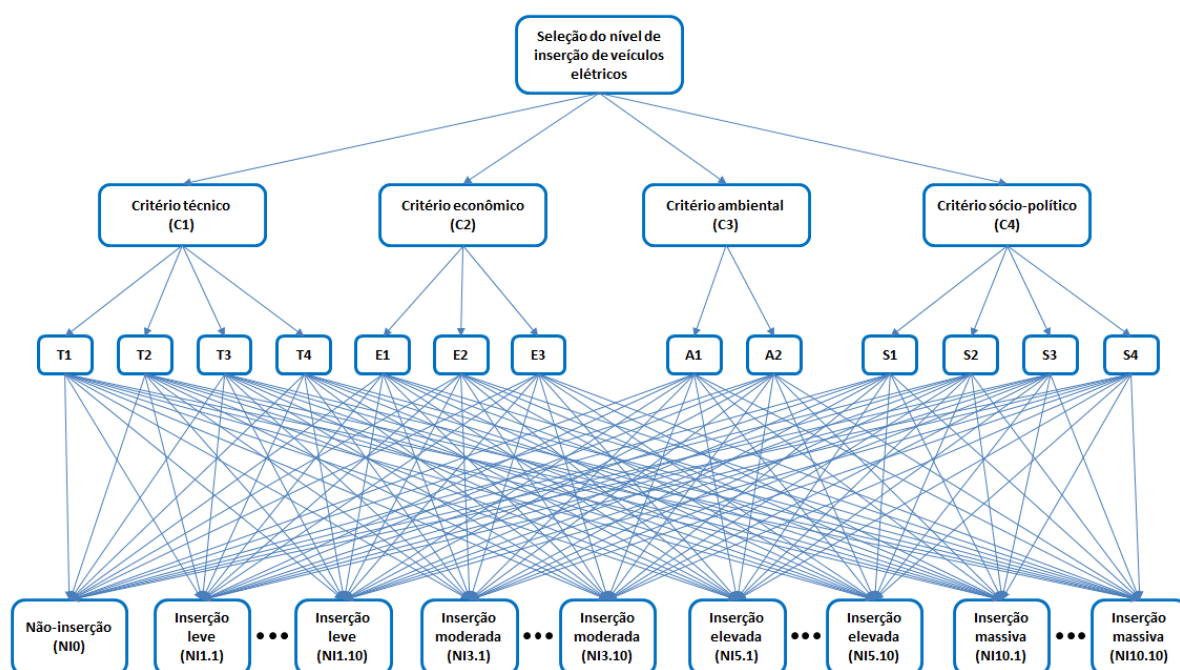
5.3.2 Seleção da solução do problema com BWM

O procedimento adotado na utilização do BWM linear foi abordado no Capítulo 4. Nesta seção, o objetivo é propor um método cuja solução seja capaz de indicar a melhor alternativa de inserção dos veículos elétricos na cidade sob análise (inserção leve, moderada, elevada, massiva ou a não-inserção), sendo tal método baseado nos conceitos e procedimentos do BWM linear. Assim, a seguir são apresentados os elementos necessários para a construção e resolução do problema.

5.3.2.1 Estruturação do problema

O objetivo do processo decisório é selecionar o nível de inserção de veículos elétricos em uma determinada cidade, conforme mostrado na estrutura hierárquica da Figura 29. No segundo e terceiro níveis da estrutura hierárquica estão, respectivamente, os critérios principais e subcritérios, enquanto que no último nível estão as alternativas disponíveis, ou seja, as diversas soluções correspondentes às quatro fronteiras de Pareto obtidas a partir do método AUGMECON, uma para cada nível de inserção de veículos elétricos, além da alternativa de não-inserção de veículos elétricos na frota.

Figura 29 - Estrutura hierárquica do problema na aplicação do método BWM linear



Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 3 são identificados os critérios principais e subcritérios adotados neste trabalho, uma vez que são considerados relevantes na avaliação do nível de inserção de veículos elétricos mais adequado para determinada cidade.

Quadro 3 - Identificação dos critérios e subcritérios do método BWM linear

Critérios principais	Subcritérios	Tipo de subcritério
Critério técnico (C1)	Redução do consumo de gasolina (T1)	Quantitativo
	Aumento do consumo de energia elétrica (T2)	Quantitativo
	Necessidade de obras para a infraestrutura de recarga (T3)	Qualitativo
	Diversificação e progresso tecnológico da frota de veículos (T4)	Qualitativo
Critério econômico (C2)	Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora (E1)	Quantitativo
	Perda na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV (E2)	Quantitativo
	Perda de receita total da distribuidora (E3)	Quantitativo
Critério ambiental (C3)	Redução das emissões totais de GEE (A1)	Quantitativo
	Redução da emissão total de poluentes atmosféricos (A2)	Quantitativo
Critério sócio-político (C4)	Imagem da cidade/país frente à opinião pública (S1)	Qualitativo
	Incentivo a novas oportunidades no mercado de trabalho (S2)	Qualitativo
	Necessidade de gestão dos incentivos financeiros (S3)	Qualitativo
	Necessidade de regulação junto às distribuidoras de energia (S4)	Qualitativo

Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 3 observa-se um total de 13 subcritérios, sendo sete quantitativos e seis qualitativos. A descrição de cada um dos subcritérios é dada a seguir:

- **Redução do consumo de gasolina (T1)** - Refere-se a um subcritério quantitativo relacionado à redução do consumo de gasolina no período sob análise após a introdução de veículos elétricos na frota. A fim de avaliar o desempenho das diferentes alternativas neste subcritério, o valor da variável auxiliar $COMB_{Red}$, empregada na modelagem AUGMECON do problema, é utilizado.

- **Aumento do consumo de energia elétrica (T2)** - É um subcritério quantitativo que indica o aumento do consumo de energia elétrica no período sob análise após a inserção de veículos elétricos na frota. O desempenho das alternativas neste subcritério é avaliado a partir do valor da variável auxiliar EE_{Aum} , empregada na modelagem AUGMECON do problema.

- **Necessidade de obras para a infraestrutura de recarga (T3)** - Refere-se a um subcritério qualitativo destinado a avaliar o esforço e tempo dispendidos na gestão e execução de obras para a infraestrutura de recarga dos veículos elétricos em determinada cidade, a fim de disponibilizar aos potenciais compradores de veículos PEV a quantidade mínima necessária de pontos de recarga correspondente ao nível de inserção de veículos elétricos na frota.

- **Diversificação e progresso tecnológico da frota de veículos (T4)** - Subcritério qualitativo cuja finalidade é avaliar o impacto positivo que um certo nível de inserção de veículos elétricos na frota poderia gerar a favor da diversificação, desenvolvimento e evolução tecnológica dos veículos da cidade sob análise.

- **Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora (E1)** - Subcritério quantitativo cuja finalidade é avaliar a perda financeira total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora no período sob análise em decorrência da introdução de veículos elétricos em determinada cidade. De modo a avaliar o desempenho das alternativas neste subcritério, o valor da variável auxiliar $C_{Introdução}$ é utilizado.

- **Perda na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV (E2)** - Refere-se a um subcritério quantitativo relacionado à perda financeira na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV no período sob análise em virtude da inserção de veículos elétricos na frota de determinada cidade. O desempenho das alternativas neste subcritério é avaliado a partir do valor da variável auxiliar ARR_{Perda} .

- **Perda de receita total da distribuidora (E3)** - É um subcritério quantitativo que indica a perda de receita total da distribuidora no período sob análise após a entrada de veículos elétricos na frota. De modo a avaliar o desempenho das alternativas neste subcritério, o valor da variável auxiliar $R_{Perda.Dist}$ é utilizado.

- **Redução das emissões totais de GEE (A1)** - Subcritério quantitativo cuja finalidade é avaliar a redução das emissões totais de gases de efeito estufa no período sob análise em decorrência da introdução de veículos elétricos em determinada cidade. A fim de avaliar o desempenho das diferentes alternativas neste subcritério, o valor da variável auxiliar E_{geeRed} , empregada na modelagem AUGMECON do problema, é utilizado.

- **Redução da emissão total de poluentes atmosféricos (A2)** - Refere-se a um subcritério quantitativo relacionado à redução da emissão total de poluentes atmosféricos no período sob análise em virtude da inserção de veículos elétricos na frota. O desempenho das alternativas neste subcritério é avaliado a partir do valor da variável auxiliar E_{polRed} , empregada na modelagem AUGMECON do problema.

- **Imagem da cidade/país frente à opinião pública (S1)** - É um subcritério qualitativo destinado a avaliar o impacto positivo sobre a imagem da cidade frente à opinião pública local, nacional e mundial. É sabido que cidades que têm veículos elétricos na frota são invariavelmente expostas à mídia.

- **Incentivo a novas oportunidades no mercado de trabalho (S2)** - Subcritério cuja finalidade é apurar os impactos da inserção dos veículos PEV na geração de empregos e no desenvolvimento de serviços até então não existentes. Devido à dificuldade de mensurar tais benefícios, este subcritério é tratado como qualitativo.

- **Necessidade de gestão dos incentivos financeiros (S3)** - Conforme apresentado na seção 2.3, que trata da análise econômica da aquisição de veículos elétricos, a introdução destes veículos em determinada cidade é dependente de uma política de concessão de incentivos financeiros aos potenciais compradores, sejam na forma de isenções ou descontos. Assim sendo, este subcritério qualitativo visa avaliar o esforço e tempo dispendidos pelas instituições e órgãos responsáveis pela concessão de isenções e descontos na operacionalização de tais incentivos.

- **Necessidade de regulação junto às distribuidoras de energia (S4)** - Tendo em vista a interação das distribuidoras de energia na operação de estações de recarga, bem como na eventual concessão de descontos na tarifa de energia elétrica para consumidores que detenham veículos elétricos, este subcritério qualitativo é destinado a avaliar a necessidade de elaboração de novas leis e outros mecanismos que visem garantir a segurança jurídica e regulação adequada das atividades e serviços prestados pelas distribuidoras.

5.3.2.2 Construção da matriz de decisão

Na seção 4.2.1 deste trabalho, a matriz de decisão das alternativas, $\mathbf{P} = [p_{ij}]$, foi definida como a matriz formada pelos valores de desempenho p_{ij} , considerando todos os n critérios e m alternativas. Assim, a construção desta matriz depende tanto dos critérios quantitativos do problema, quanto dos qualitativos.

O valor do desempenho de uma alternativa i em relação a um critério qualitativo j , p_{ij} , é obtido diretamente na aplicação do procedimento descrito no Passo 9 do método BWM, sendo que os valores obtidos já se encontram normalizados. Entretanto, para os critérios

quantitativos, o Passo 8 do método BWM impõe a necessidade de normalizar os valores de desempenho de cada alternativa, a fim de obter os valores p_{ij} da matriz de decisão \mathbf{P} .

Há uma série de técnicas de normalização disponíveis na literatura, tanto para normalização direta, em que altos valores de desempenho da alternativa avaliada resultam em altos valores de desempenho normalizados, quanto para normalização inversa, em que altos valores de desempenho da alternativa sob análise resultam em baixos valores normalizados.

Vafaei, Ribeiro e Matos (2016) avaliaram cinco técnicas de normalização comumente empregadas em pesquisas científicas, a fim de determinar a mais adequada para problemas de tomada de decisão que utilizam métodos MCDA baseados em comparações por pares, em que o desempenho das alternativas em relação a um critério quantitativo deve ser normalizado, tal como ocorre nos métodos AHP e BWM.

Os resultados apontaram que a técnica de normalização mais adequada é a que combina duas formas lineares de normalização, uma baseada no *valor máximo de desempenho dentre as alternativas* e outra no *somatório dos valores de desempenho de cada alternativa*, conforme apresentado nas equações (250) e (251):

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad j = 1, \dots, n, \text{ para os casos de normalização direta} \quad (250)$$

$$p_{ij} = \frac{\max(r_{ij}) - r_{ij}}{\sum_{i=1}^m (\max(r_{ij}) - r_{ij})} \quad j = 1, \dots, n, \text{ para os casos de normalização inversa} \quad (251)$$

sendo,

p_{ij} : o desempenho da alternativa i em relação ao critério j , após a normalização

r_{ij} : o desempenho da alternativa i em relação ao critério j , antes da normalização

$\max(r_{ij})$: o valor máximo de r_{ij} para um dado critério j , considerando o conjunto formado por todas as m alternativas do critério j

As equações (250) e (251) são utilizadas nesta tese na obtenção dos valores normalizados do desempenho de cada alternativa i nos sete subcritérios quantitativos avaliados.

Por fim, a partir dos valores de desempenho das m alternativas em relação a cada um dos 13 subcritérios, obtém-se a matriz de decisão, \mathbf{P}_{final} , do problema em análise, conforme apresentado em (252):

$$P_{final} = \begin{bmatrix} p_{1.1} & \cdots & p_{1.13} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m.1} & \cdots & p_{m.13} \end{bmatrix} \quad (252)$$

5.3.2.3 Geração do vetor de prioridade

O vetor de prioridade dos critérios, $w = [w_j^*]^T$, foi definido na seção 4.2.1 como o vetor que contém os valores dos pesos principais $\{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$ de cada um dos n critérios principais do problema.

A estrutura hierárquica da Figura 29 indica que o problema da integração de veículos elétricos nas cidades brasileiras apresenta critérios e subcritérios, de forma que, conforme apontado no Passo 7 do método BWM, os valores dos q pesos locais $\{w_{j.1}^*, w_{j.2}^*, \dots, w_{j.q}^*\}$ dos q subcritérios pertencentes a um mesmo critério principal j devem ser determinados.

Assim, neste trabalho, os pesos locais dos 13 subcritérios devem ser calculados, de forma a obter quatro conjuntos de valores de pesos locais, um para cada critério principal, sendo que o somatório dos valores dos pesos locais dos subcritérios pertencentes a um mesmo critério deve ser igual a 1.

Nesta tese, após a obtenção dos pesos dos quatro critérios principais e dos pesos locais dos 13 subcritérios utilizando os Passos 3 a 7 do método BWM, os valores dos pesos globais dos subcritérios são calculados de acordo com a equação (253):

$$W_{Global.jt} = w_j \cdot W_{Local.jt} \quad t = 1, 2, \dots, q \ ; \ j = 1, 2, \dots, n \quad (253)$$

sendo,

$W_{Global.jt}$: o peso global do subcritério t pertencente ao critério principal j

$W_{Local.jt}$: o peso local do subcritério t pertencente ao critério principal j

w_j : o peso do critério principal j

Assim, no problema da integração de veículos elétricos nas cidades brasileiras, a partir da equação (253), obtém-se o vetor de prioridade do problema em análise, formado pelos valores dos 13 pesos globais dos subcritérios, conforme apresentado em (254):

$$W_{Global} = [W_{Global.jt}]^T = [W_{Global.11}, W_{Global.12}, W_{Global.13}, W_{Global.14}, W_{Global.21}, W_{Global.22}, W_{Global.23}, W_{Global.31}, W_{Global.32}, W_{Global.41}, W_{Global.42}, W_{Global.43}, W_{Global.44}]^T \quad (254)$$

5.3.2.4 Determinação do *ranking* de decisão

O vetor de decisão V_{final} , correspondente aos valores do desempenho final v_i de cada uma das m alternativas, é calculado de acordo com a equação (255):

$$V_{final} = P_{final} \times w_{Global} \quad (255)$$

sendo,

$V_{final} = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$ o vetor de decisão

$P_{final} = \begin{bmatrix} p_{1\ 1} & \cdots & p_{1\ 13} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m\ 1} & \cdots & p_{m\ 13} \end{bmatrix}$ a matriz de decisão das alternativas

$w_{Global} = [w_{Global.ji}]^T = [w_{Global.11}, w_{Global.12}, \dots, w_{Global.44}]^T$ o vetor de prioridade

A partir da ordenação dos valores do vetor de decisão V_{final} obtém-se o *ranking* de decisão do problema da inserção de veículos elétricos nas cidades brasileiras. A melhor alternativa é aquela que apresenta o maior valor de desempenho final v_i no *ranking* de decisão.

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Com o intuito de validar e comprovar a utilidade do método proposto nesta tese, este capítulo apresenta os resultados da aplicação do método AUGMECON-BWM no planejamento e otimização da inserção de veículos elétricos *plug-in* nas cidades de São Paulo e Brasília. A cidade de São Paulo foi selecionada pelo fato de ser a maior e mais importante cidade do país, além de apresentar a maior frota de veículos (DENATRAN, 2016). A cidade de Brasília foi escolhida pelo fato de ser a capital do Brasil e apresentar a terceira maior frota de veículos do país (DENATRAN, 2016).

Neste estudo de caso, a aplicação do método BWM é demonstrada considerando **dois cenários distintos**, um que prioriza fortemente os critérios econômicos e outro que prioriza igualmente os critérios econômicos e ambientais.

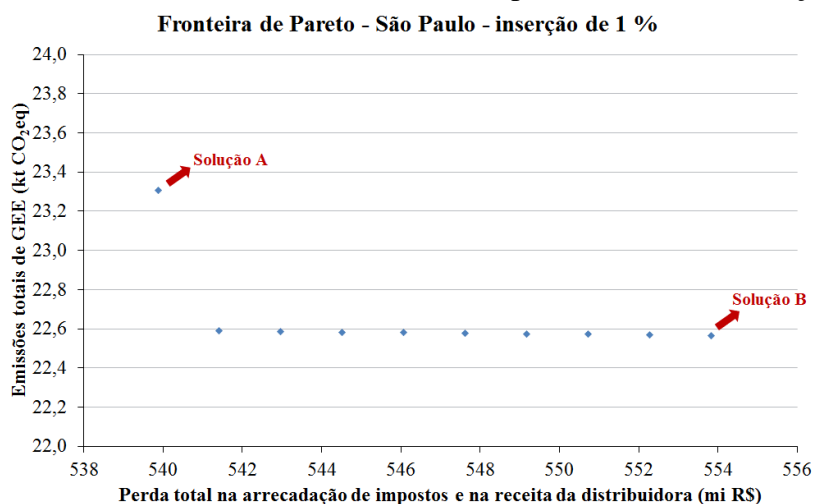
6.1 SOLUÇÃO DO MODELO AUGMECON

O modelo AUGMECON proposto no Capítulo 5, aplicado nas cidades de São Paulo e Brasília, possui um total de 218 variáveis, sendo 56 não lineares, 222 restrições, sendo 43 não lineares, e 574 coeficientes diferentes de zero, sendo 103 não lineares. Os pontos da fronteira de Pareto foram gerados utilizando-se o *software* de modelagem LINGO 10.0 em um computador com processador Intel Core i5 3,1 GHz e 8 GB de memória RAM.

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam as soluções das fronteiras de Pareto da cidade de São Paulo obtidas a partir da modelagem AUGMECON proposta nesta tese, considerando níveis de inserção de 1%, 3% e 5%, respectivamente. As Figuras 33, 34 e 35 exibem as soluções das fronteiras de Pareto da cidade de Brasília, também considerando níveis de inserção de 1%, 3% e 5%.

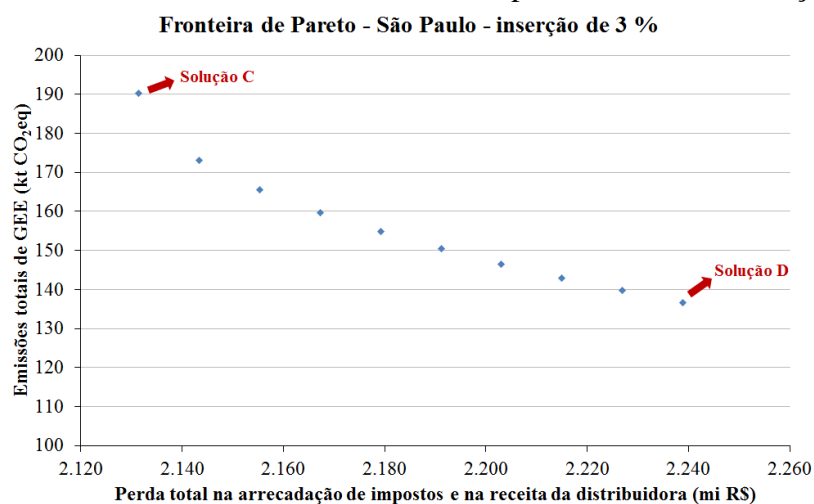
As soluções Pareto-ótimas geradas a partir do método AUGMECON, apresentadas nas Figuras 30 a 35, evidenciam o *trade-off* existente entre os objetivos econômicos e ambientais, haja vista que, a melhoria de um objetivo está atrelada à piora do outro objetivo, e vice-versa.

Figura 30 - Fronteira de Pareto da cidade de São Paulo para um nível de inserção de 1%



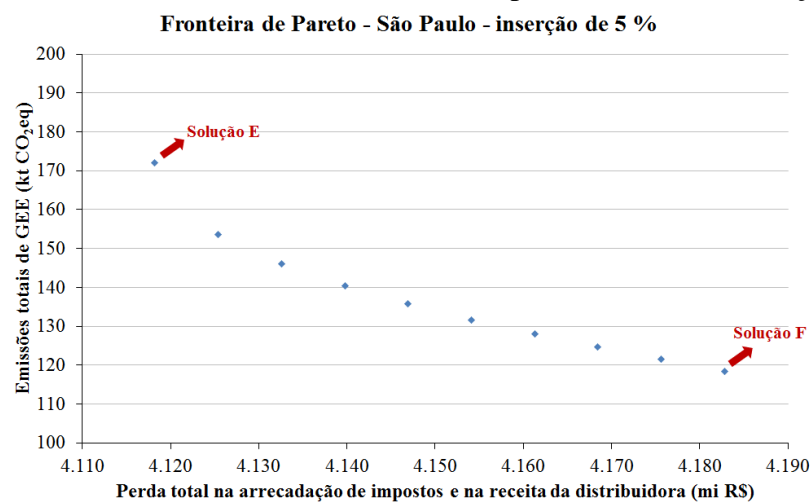
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31 - Fronteira de Pareto da cidade de São Paulo para um nível de inserção de 3%



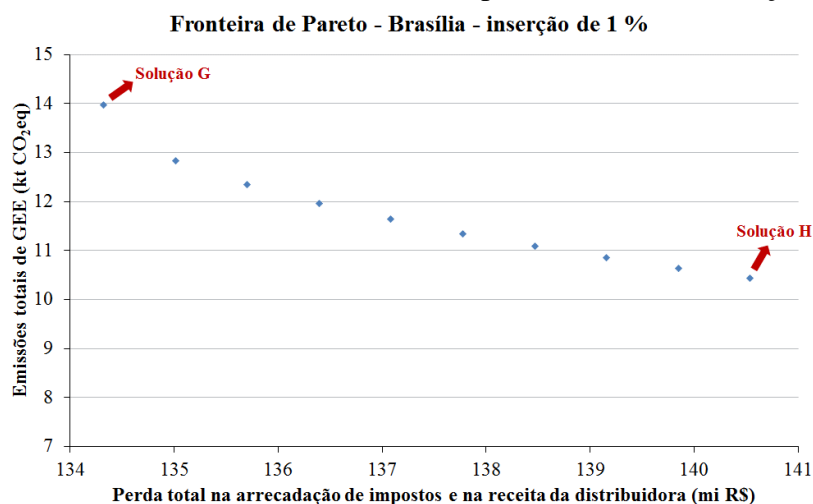
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 32 - Fronteira de Pareto da cidade de São Paulo para um nível de inserção de 5%



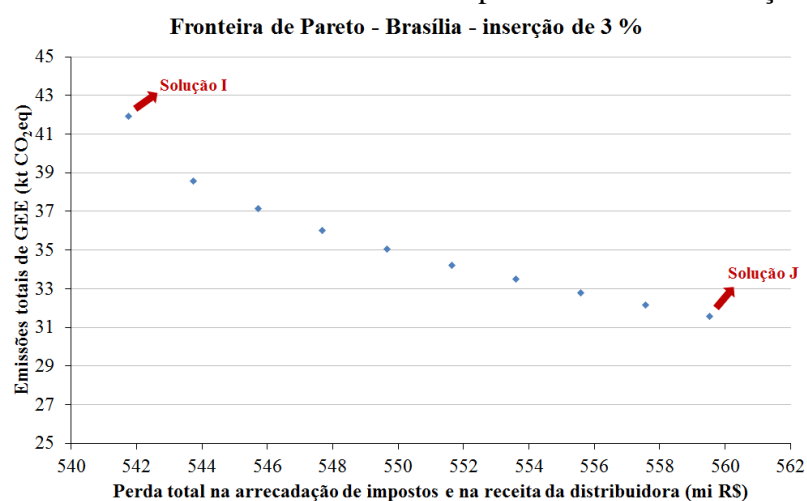
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 33 - Fronteira de Pareto da cidade de Brasília para um nível de inserção de 1%



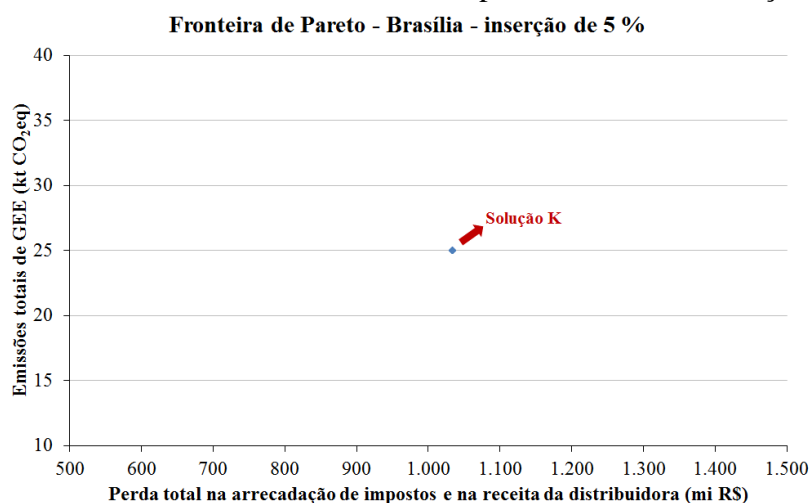
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 34 - Fronteira de Pareto da cidade de Brasília para um nível de inserção de 3%



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 35 - Fronteira de Pareto da cidade de Brasília para um nível de inserção de 5%



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 35, que trata da inserção de 5% de veículos PEV na cidade de Brasília, observa-se que apenas uma solução foi encontrada; isto se deve ao fato de que, na cidade de Brasília, a solução que minimiza as emissões de gases de efeito estufa e ao mesmo tempo impõe uma inserção de 5% de veículos PEV, respeitando todas as outras restrições, é a mesma que minimiza a perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora.

Simulações utilizando o método AUGMECON também foram realizadas considerando a inserção massiva (10%) de veículos elétricos *plug-in* na frota, tanto na cidade de São Paulo, quanto na cidade de Brasília, entretanto, não foram encontradas soluções factíveis para tal nível de inserção de veículos PEV. Este resultado revela que, mesmo com a implementação massiva de incentivos econômicos para os potenciais compradores de veículos elétricos nas cidades de São Paulo e Brasília, a inserção de 10% de veículos PEV é uma realidade distante.

Na cidade de São Paulo, considerando as fronteiras de Pareto obtidas para níveis de inserção de 1%, 3% e 5%, a Tabela 55 apresenta os valores das funções objetivo, das variáveis de decisão, da participação de mercado e de outras grandezas energéticas, econômicas e ambientais relacionadas às soluções A a F das Figuras 30 a 32. A Tabela 56 exhibe os resultados da cidade de Brasília, correspondente às soluções G a K das Figuras 33 a 35.

Nas Tabelas 55 e 56, observa-se que, quanto maior a participação de mercado dos veículos elétricos *plug-in* (MS_{PEV}), maior é a perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora ($C_{Introdução}$). Além disso, para soluções com valores iguais de participação de mercado (MS_{PEV}), as emissões totais de gases de efeito estufa ($E_{Introdução}$) são reduzidas na medida em que há um aumento das perdas econômicas ($C_{Introdução}$), desta forma, evidenciando o *trade-off* apresentado ao tomador de decisão.

Tabela 55 - Resultados obtidos para as soluções A a F das fronteiras de Pareto da cidade de São Paulo

Resultados de algumas soluções para a cidade de São Paulo no período sob análise	Símbolo	Inserção de 1%		Inserção de 3%		Inserção de 5%	
		Solução A	Solução B	Solução C	Solução D	Solução E	Solução F
Funções objetivo							
Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora (mi R\$)	$C_{\text{Introdução}}$	539,9	553,8	2.131,5	2.238,8	4.118,2	4.182,8
Emissões totais de gases de efeito estufa (kt CO ₂ eq)	$E_{\text{Introdução}}$	23,3	22,6	190,3	136,7	172,1	118,4
Participação de mercado							
Participação dos veículos PEV no mercado (%)	MS_{PEV}	1,00%	1,00%	3,00%	3,00%	5,00%	5,00%
Participação dos veículos BEV no mercado (%)	MS_{BEV}	0,95%	0,96%	0,49%	1,53%	3,64%	4,69%
Participação dos veículos PHEV no mercado (%)	MS_{PHEV}	0,05%	0,04%	2,51%	1,47%	1,36%	0,31%
Detalhamento dos resultados econômicos							
Perda total na arrecadação de impostos (mi R\$)	ARR_{Perda}	484	516	1.931	2.079	3.976	4.082
Perda total na receita da distribuidora (mi R\$)	$R_{\text{Perda,Dist}}$	56	38	201	160	142	101
Valor presente líquido na aquisição do PEV corrigido pela PPP (US\$)	$VPL_{\text{PEV,PPP}}$	3.821	3.821	10.556	10.556	13.687	13.687
Detalhamento dos resultados ambientais							
Redução das emissões totais de GEE (kt CO ₂ eq)	$E_{\text{gEE}}_{\text{Red}}$	168,6	169,4	385,5	439,1	787,5	841,2
Redução da emissão total de poluentes atmosféricos (t)	$E_{\text{pol}}_{\text{Red}}$	115,2	116,1	200,7	265,3	509,2	573,9
Detalhamento dos resultados energéticos							
Redução do consumo de gasolina (mi l)	$COMB_{\text{Red}}$	82	83	187	214	384	412
Aumento do consumo de energia elétrica (GWh)	EE_{Aum}	198	199	305	433	855	983
Redução total do consumo de energéticos (mil tep)	ENE_{Red}	46,7	46,8	117,9	127,8	223,2	233,0
Variáveis de decisão							
Desconto na alíquota do PIS (%)	D_{PIS}	100,00%	0,00%	0,00%	4,80%	100,00%	0,00%
Desconto na alíquota da Cofins (%)	D_{Cofins}	3,24%	0,00%	89,84%	100,00%	78,87%	79,51%
Desconto na alíquota do ICMS (%)	D_{ICMS}	0,00%	0,00%	87,01%	72,34%	89,22%	60,69%
Desconto na alíquota do IPI do BEV (%)	$D_{\text{IPI,BEV}}$	67,51%	86,37%	25,37%	57,71%	78,48%	99,99%
Desconto na alíquota do IPI do EREV (%)	$D_{\text{IPI,EREV}}$	0,00%	0,00%	94,59%	100,00%	100,00%	45,36%
Desconto complementar no imposto anual do BEV (%)	$D_{\text{IPVA,BEV,comp}}$	37,50%	37,50%	37,50%	37,50%	37,50%	37,50%
Desconto complementar no imposto anual do EREV (%)	$D_{\text{IPVA,EREV,comp}}$	37,50%	0,00%	37,50%	37,50%	37,50%	37,50%
Desconto no preço da energia elétrica residencial (%)	D_{EE}	25,00%	0,00%	25,00%	25,00%	25,00%	25,00%

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 56 - Resultados obtidos para as soluções G a K das fronteiras de Pareto da cidade de Brasília

Resultados de algumas soluções para a cidade de Brasília no período sob análise	Símbolo	Inserção de 1%		Inserção de 3%		Inserção de 5%
		Solução G	Solução H	Solução I	Solução J	Solução K
Funções objetivo						
Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora (mi R\$)	$C_{\text{Introdução}}$	134,3	140,5	541,8	559,5	1.033,2
Emissões totais de gases de efeito estufa (kt CO ₂ eq)	$E_{\text{Introdução}}$	14,0	10,4	41,9	31,6	25,0
Participação de mercado						
Participação dos veículos PEV no mercado (%)	MS_{PEV}	1,00%	1,00%	3,00%	3,00%	5,00%
Participação dos veículos BEV no mercado (%)	MS_{BEV}	0,17%	0,48%	0,52%	1,43%	4,81%
Participação dos veículos PHEV no mercado (%)	MS_{PHEV}	0,83%	0,52%	2,48%	1,57%	0,19%
Detalhamento dos resultados econômicos						
Perda total na arrecadação de impostos (mi R\$)	ARR_{Perda}	116	125	500	527	1.021
Perda total na receita da distribuidora (mi R\$)	$R_{\text{Perda.Dist}}$	18	15	41	32	12
Valor presente líquido na aquisição do PEV corrigido pela PPP (US\$)	$VPL_{\text{PEV.PPP}}$	3.821	3.821	10.556	10.556	13.687
Detalhamento dos resultados ambientais						
Redução das emissões totais de GEE (kt CO ₂ eq)	$E_{\text{gee.Red}}$	28,7	32,3	86,1	96,5	188,4
Redução da emissão total de poluentes atmosféricos (t)	$E_{\text{pol.Red}}$	15,0	19,3	45,1	57,6	129,3
Detalhamento dos resultados energéticos						
Redução do consumo de gasolina (mi l)	$COMB_{\text{Red}}$	14	16	42	47	92
Aumento do consumo de energia elétrica (GWh)	EE_{Aum}	23	31	69	94	222
Redução total do consumo de energéticos (mil tep)	ENE_{Red}	8,8	9,4	26,3	28,2	52,1
Variáveis de decisão						
Desconto na alíquota do PIS (%)	D_{PIS}	81,27%	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Desconto na alíquota da Cofins (%)	D_{Cofins}	22,58%	0,00%	100,00%	100,00%	59,34%
Desconto na alíquota do ICMS (%)	D_{ICMS}	67,77%	29,75%	81,39%	66,13%	87,86%
Desconto na alíquota do IPI do BEV (%)	$D_{\text{IPI.BEV}}$	10,79%	56,27%	22,83%	55,29%	100,00%
Desconto na alíquota do IPI do EREV (%)	$D_{\text{IPI.EREV}}$	49,24%	100,00%	85,59%	100,00%	0,00%
Desconto complementar no imposto anual do BEV (%)	$D_{\text{IPVA.BEV.comp}}$	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Desconto complementar no imposto anual do EREV (%)	$D_{\text{IPVA.EREV.comp}}$	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Desconto no preço da energia elétrica residencial (%)	D_{EE}	25,00%	25,00%	25,00%	25,00%	25,00%

Fonte: Produção do próprio autor.

6.2 MATRIZ DE DECISÃO DO MÉTODO BWM

A partir dos resultados obtidos na implementação do método AUGMECON na seção anterior, o problema do planejamento da integração de veículos elétricos na cidade de São Paulo apresenta um total de 31 alternativas disponíveis para o tomador de decisão, enquanto que, na cidade de Brasília, há 22 alternativas. A Tabela 57 apresenta a procedência de cada uma das alternativas, sendo todas elas utilizadas no método BWM.

Tabela 57 - Alternativas do método BWM na integração de PEVs em São Paulo e Brasília

Nível de inserção de veículos elétricos <i>plug-in</i> na frota	Quantidade de alternativas disponíveis	
	São Paulo	Brasília
Inserção leve (1 %)	10	10
Inserção moderada (3 %)	10	10
Inserção elevada (5 %)	10	1
Não-inserção de veículos elétricos (0 %)	1	1
TOTAL	31	22

Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com o método proposto na seção 5.3.2.2 desta tese, os valores de desempenho das alternativas em relação a cada um dos 13 subcritérios devem ser normalizados, de forma a possibilitar a construção da matriz de decisão do problema, P_{final} .

- Normalização dos subcritérios quantitativos:

Inicialmente, os valores não-normalizados de desempenho das alternativas em cada um dos sete subcritérios quantitativos descritos na seção 5.3.2.1 são apresentados nas Tabelas 58 e 59, para as cidades de São Paulo e Brasília, respectivamente.

Tabela 58 - Valores não-normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de São Paulo

Cidade de São Paulo	Subcritério T1 COMB _{Red} (mi l)	Subcritério T2 EE _{Ann} (GWh)	Subcritério E1 C _{introdução} (mi R\$)	Subcritério E2 ARR _{Perda} (mi R\$)	Subcritério E3 R _{Perda,Dist} (mi R\$)	Subcritério A1 Ege _{eRed} (kt CO2eq)	Subcritério A2 Epo _{lRed} (t)
Inserção leve (1 %)							
NI1.1	82,498	197,501	540	484	56	168,612	115,221
NI1.2	82,861	199,217	541	488	54	169,329	116,085
NI1.3	82,862	199,224	543	491	52	169,332	116,089
NI1.4	82,864	199,232	545	495	50	169,336	116,093
NI1.5	82,865	199,239	546	498	48	169,339	116,097
NI1.6	82,867	199,246	548	502	46	169,342	116,100
NI1.7	82,868	199,253	549	505	44	169,345	116,104
NI1.8	82,870	199,260	551	509	42	169,347	116,107
NI1.9	82,871	199,267	552	512	40	169,350	116,111
NI1.10	82,872	199,273	554	516	38	169,353	116,114
Inserção moderada (3 %)							
NI3.1	187	305	2.132	1.931	201	385	201
NI3.2	195	346	2.143	1.956	188	403	221
NI3.3	199	364	2.155	1.973	182	410	231
NI3.4	202	378	2.167	1.990	177	416	238
NI3.5	205	390	2.179	2.005	174	421	243
NI3.6	207	400	2.191	2.021	170	425	249
NI3.7	209	409	2.203	2.036	167	429	253
NI3.8	211	418	2.215	2.050	165	433	258
NI3.9	212	426	2.227	2.065	162	436	262
NI3.10	214	433	2.239	2.079	160	439	265
Inserção elevada (5 %)							
NI5.1	384	855	4.118	3.976	142	787	509
NI5.2	394	899	4.125	3.998	128	806	531
NI5.3	398	917	4.133	4.010	122	813	540
NI5.4	400	930	4.140	4.022	118	819	547
NI5.5	403	941	4.147	4.033	114	824	553
NI5.6	405	951	4.154	4.043	111	828	558
NI5.7	407	960	4.161	4.053	108	832	562
NI5.8	408	968	4.168	4.063	106	835	566
NI5.9	410	976	4.176	4.072	103	838	570
NI5.10	412	983	4.183	4.082	101	841	574
Não-inserção (0 %)							
NI0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 59 - Valores não-normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de Brasília

Cidade de Brasília	Subcritério T1 COMB _{Red} (mi l)	Subcritério T2 EE _{Ann} (GWh)	Subcritério E1 C _{introdução} (mi R\$)	Subcritério E2 ARR _{Perda} (mi R\$)	Subcritério E3 R _{Perda,Dist} (mi R\$)	Subcritério A1 Egee _{Red} (kt CO2eq)	Subcritério A2 Epo1 _{Red} (t)
Inserção leve (1 %)							
NI1.1	13,9	22,9	134,3	116,1	18,2	28,7	15,0
NI1.2	14,5	25,6	135,0	117,8	17,2	29,9	16,4
NI1.3	14,7	26,8	135,7	118,9	16,8	30,3	17,0
NI1.4	14,9	27,7	136,4	119,9	16,5	30,7	17,5
NI1.5	15,1	28,5	137,1	120,9	16,2	31,1	17,9
NI1.6	15,2	29,2	137,8	121,9	15,9	31,3	18,2
NI1.7	15,4	29,8	138,5	122,8	15,7	31,6	18,5
NI1.8	15,5	30,4	139,2	123,7	15,5	31,8	18,8
NI1.9	15,6	30,9	139,9	124,5	15,3	32,1	19,1
NI1.10	15,7	31,4	140,5	125,4	15,1	32,3	19,3
Inserção moderada (3 %)							
NI3.1	41,7	69	542	500	41,4	86,1	45
NI3.2	43,4	77	544	505	38,5	89,5	49
NI3.3	44,2	80	546	508	37,2	90,9	51
NI3.4	44,7	83	548	511	36,3	92,1	52
NI3.5	45,2	85	550	514	35,4	93,0	53
NI3.6	45,6	87	552	517	34,7	93,8	54
NI3.7	46,0	89	554	520	34,1	94,6	55
NI3.8	46,3	91	556	522	33,5	95,3	56
NI3.9	46,7	92	558	525	32,9	95,9	57
NI3.10	47,0	94	560	527	32,4	96,5	58
Inserção elevada (5 %)							
NI5	92	222	1.033	1.021	12	188	129
Não-inserção (0 %)							
NI0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas 58 e 59, as alternativas com valores mais altos nos subcritérios T1 (Redução do consumo de gasolina), A1 (Redução das emissões totais de GEE) e A2 (Redução da emissão total de poluentes atmosféricos) devem ser priorizadas frente às alternativas com valores mais baixos nestes mesmos subcritérios, uma vez que valores elevados contribuem positivamente para a integração dos veículos elétricos na frota de determinada cidade; deste modo, a normalização direta é utilizada para os subcritérios T1, A1 e A2. Em contrapartida, os valores de desempenho das alternativas nos subcritérios T2, E1, E2 e E3 devem ser normalizados inversamente.

Os valores normalizados de desempenho das alternativas nos sete subcritérios quantitativos são mostrados nas Tabelas 60 e 61, para as cidades de São Paulo e Brasília, respectivamente.

Tabela 60 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de São Paulo

Cidade de São Paulo	Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos						
	Subcritério T1	Subcritério T2	Subcritério E1	Subcritério E2	Subcritério E3	Subcritério A1	Subcritério A2
Inserção leve (1 %)							
NI1.1	0,0120	0,0516	0,0599	0,0589	0,0507	0,0119	0,0127
NI1.2	0,0120	0,0514	0,0599	0,0588	0,0515	0,0120	0,0128
NI1.3	0,0120	0,0514	0,0598	0,0588	0,0522	0,0120	0,0128
NI1.4	0,0120	0,0514	0,0598	0,0587	0,0529	0,0120	0,0128
NI1.5	0,0120	0,0514	0,0598	0,0587	0,0536	0,0120	0,0128
NI1.6	0,0120	0,0514	0,0597	0,0586	0,0543	0,0120	0,0128
NI1.7	0,0120	0,0514	0,0597	0,0586	0,0549	0,0120	0,0128
NI1.8	0,0120	0,0514	0,0597	0,0585	0,0556	0,0120	0,0128
NI1.9	0,0120	0,0514	0,0597	0,0584	0,0563	0,0120	0,0128
NI1.10	0,0120	0,0514	0,0596	0,0584	0,0570	0,0120	0,0128
Inserção moderada (3 %)							
NI3.1	0,0271	0,0445	0,0337	0,0352	0,0000	0,0273	0,0221
NI3.2	0,0284	0,0418	0,0335	0,0348	0,0046	0,0285	0,0244
NI3.3	0,0289	0,0406	0,0333	0,0345	0,0066	0,0291	0,0254
NI3.4	0,0293	0,0397	0,0331	0,0342	0,0081	0,0295	0,0261
NI3.5	0,0297	0,0390	0,0329	0,0340	0,0094	0,0298	0,0268
NI3.6	0,0300	0,0383	0,0327	0,0337	0,0106	0,0301	0,0273
NI3.7	0,0303	0,0377	0,0325	0,0335	0,0116	0,0304	0,0279
NI3.8	0,0306	0,0371	0,0323	0,0333	0,0126	0,0307	0,0283
NI3.9	0,0308	0,0366	0,0321	0,0330	0,0135	0,0309	0,0288
NI3.10	0,0310	0,0361	0,0320	0,0328	0,0143	0,0311	0,0292
Inserção elevada (5 %)							
NI5.1	0,0558	0,0084	0,0011	0,0017	0,0206	0,0558	0,0560
NI5.2	0,0572	0,0055	0,0009	0,0014	0,0256	0,0571	0,0585
NI5.3	0,0577	0,0044	0,0008	0,0012	0,0276	0,0576	0,0594
NI5.4	0,0581	0,0035	0,0007	0,0010	0,0291	0,0580	0,0602
NI5.5	0,0585	0,0027	0,0006	0,0008	0,0303	0,0584	0,0608
NI5.6	0,0588	0,0021	0,0005	0,0006	0,0314	0,0587	0,0614
NI5.7	0,0590	0,0015	0,0004	0,0005	0,0324	0,0589	0,0618
NI5.8	0,0593	0,0010	0,0002	0,0003	0,0333	0,0592	0,0623
NI5.9	0,0595	0,0005	0,0001	0,0002	0,0341	0,0594	0,0627
NI5.10	0,0597	0,0000	0,0000	0,0000	0,0349	0,0596	0,0631
Não-inserção (0 %)							
NI0	0,0000	0,0645	0,0687	0,0668	0,0704	0,0000	0,0000

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 61 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos para a cidade de Brasília

Cidade de Brasília	Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios quantitativos						
	Subcritério T1	Subcritério T2	Subcritério E1	Subcritério E2	Subcritério E3	Subcritério A1	Subcritério A2
Inserção leve (1 %)							
NI1.1	0,0201	0,0564	0,0607	0,0600	0,0611	0,0201	0,0179
NI1.2	0,0209	0,0556	0,0606	0,0599	0,0637	0,0209	0,0196
NI1.3	0,0212	0,0553	0,0606	0,0598	0,0648	0,0213	0,0203
NI1.4	0,0215	0,0550	0,0605	0,0598	0,0657	0,0216	0,0208
NI1.5	0,0218	0,0548	0,0605	0,0597	0,0664	0,0218	0,0213
NI1.6	0,0220	0,0546	0,0604	0,0596	0,0671	0,0220	0,0217
NI1.7	0,0222	0,0544	0,0604	0,0596	0,0677	0,0222	0,0221
NI1.8	0,0223	0,0542	0,0603	0,0595	0,0682	0,0223	0,0224
NI1.9	0,0225	0,0541	0,0603	0,0594	0,0687	0,0225	0,0227
NI1.10	0,0226	0,0540	0,0602	0,0594	0,0692	0,0226	0,0230
Inserção moderada (3 %)							
NI3.1	0,0602	0,0434	0,0332	0,0345	0,0000	0,0604	0,0539
NI3.2	0,0626	0,0411	0,0330	0,0342	0,0076	0,0628	0,0587
NI3.3	0,0637	0,0401	0,0329	0,0340	0,0109	0,0638	0,0607
NI3.4	0,0645	0,0394	0,0328	0,0338	0,0134	0,0646	0,0623
NI3.5	0,0652	0,0387	0,0326	0,0336	0,0156	0,0652	0,0637
NI3.6	0,0658	0,0382	0,0325	0,0334	0,0175	0,0658	0,0649
NI3.7	0,0663	0,0377	0,0324	0,0333	0,0192	0,0663	0,0660
NI3.8	0,0668	0,0372	0,0322	0,0331	0,0208	0,0668	0,0670
NI3.9	0,0673	0,0368	0,0321	0,0329	0,0222	0,0673	0,0679
NI3.10	0,0677	0,0364	0,0320	0,0328	0,0236	0,0677	0,0687
Inserção elevada (5 %)							
NI5	0,1330	0,0000	0,0000	0,0000	0,0777	0,1322	0,1542
Não-inserção (0 %)							
NI0	0,0000	0,0629	0,0697	0,0677	0,1091	0,0000	0,0000

Fonte: Produção do próprio autor.

- Normalização dos subcritérios qualitativos:

Conforme abordado na seção 5.3.2.2, os valores normalizados de desempenho das alternativas em relação aos subcritérios qualitativos são obtidos diretamente na aplicação do método BWM para comparação das alternativas.

As premissas adotadas nesta tese para o desempenho das alternativas nos seis subcritérios qualitativos do problema são apresentadas na Tabela 62.

Tabela 62 - Desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos

Subcritérios	Desempenho das alternativas			
	Não-inserção (0 %)	Inserção leve (1 %)	Inserção moderada (3 %)	Inserção elevada (5 %)
Necessidade de obras para a infraestrutura de recarga (T3)	Ótimo	Bom	Ruim	Péssimo
Diversificação e progresso tecnológico da frota de veículos (T4)	Péssimo	Bom	Muito bom	Ótimo
Imagem da cidade/país frente à opinião pública (S1)	Péssimo	Bom	Muito bom	Ótimo
Incentivo a novas oportunidades no mercado de trabalho (S2)	Péssimo	Regular	Bom	Muito bom
Necessidade de gestão dos incentivos financeiros (S3)	Ótimo	Regular	Muito ruim	Péssimo
Necessidade de regulação junto às distribuidoras de energia (S4)	Ótimo	Ruim	Muito ruim	Péssimo

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da comparação por pares das 31 alternativas da cidade de São Paulo em relação ao subcritério qualitativo T3 (Necessidade de obras para a infraestrutura de recarga) são mostrados na Tabela 63.

Tabela 63 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo T3 para a cidade de São Paulo

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Não-inserção NIO	Inserção leve NI1.1 - NI1.10	Inserção moderada NI3.1 - NI3.10	Inserção elevada NI5.1 - NI5.10
Melhor critério: Não-inserção	1	4	7	9

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Inserção elevada			
Não-inserção (NIO)	9			
Inserção leve (NI1.1 - NI1.10)	7			
Inserção moderada (NI3.1 - NI3.10)	3			
Inserção elevada (NI5.1 - NI5.10)	1			

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da comparação por pares das 31 alternativas da cidade de São Paulo em relação ao subcritério qualitativo T4 (Diversificação e progresso tecnológico da frota de veículos) são apresentados na Tabela 64.

Tabela 64 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo T4 para a cidade de São Paulo

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Não-inserção NIO	Inserção leve NI1.1 - NI1.10	Inserção moderada NI3.1 - NI3.10	Inserção elevada NI5.1 - NI5.10
Melhor critério: Inserção elevada	9	4	3	1

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Não-inserção			
Não-inserção (NIO)	1			
Inserção leve (NI1.1 - NI1.10)	7			
Inserção moderada (NI3.1 - NI3.10)	8			
Inserção elevada (NI5.1 - NI5.10)	9			

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 65 são mostrados os resultados da comparação por pares das 31 alternativas da cidade de São Paulo em relação ao subcritério qualitativo S1 (Imagem da cidade/país frente à opinião pública).

Os resultados da comparação por pares das 31 alternativas da cidade de São Paulo em relação ao subcritério qualitativo S2 (Incentivo a novas oportunidades no mercado de trabalho) são mostrados na Tabela 66.

Tabela 65 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S1 para a cidade de São Paulo

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Não-inserção NIO	Inserção leve NI1.1 - NI1.10	Inserção moderada NI3.1 - NI3.10	Inserção elevada NI5.1 - NI5.10
Melhor critério: Inserção elevada	9	4	3	1

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Não-inserção			
Não-inserção (NIO)	1			
Inserção leve (NI1.1 - NI1.10)	7			
Inserção moderada (NI3.1 - NI3.10)	8			
Inserção elevada (NI5.1 - NI5.10)	9			

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 66 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S2 para a cidade de São Paulo

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Não-inserção NIO	Inserção leve NI1.1 - NI1.10	Inserção moderada NI3.1 - NI3.10	Inserção elevada NI5.1 - NI5.10
Melhor critério: Inserção elevada	8	5	3	1

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Não-inserção			
Não-inserção (NIO)	1			
Inserção leve (NI1.1 - NI1.10)	5			
Inserção moderada (NI3.1 - NI3.10)	7			
Inserção elevada (NI5.1 - NI5.10)	8			

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 67 apresenta os resultados da comparação por pares das 31 alternativas da cidade de São Paulo em relação ao subcritério qualitativo S3 (Necessidade de gestão dos incentivos financeiros), enquanto que a Tabela 68 exibe os resultados da comparação por pares das 31 alternativas em relação ao subcritério qualitativo S4 (Necessidade de regulação junto às distribuidoras de energia).

Tabela 67 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S3 para a cidade de São Paulo

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Não-inserção NIO	Inserção leve NI1.1 - NI1.10	Inserção moderada NI3.1 - NI3.10	Inserção elevada NI5.1 - NI5.10
Melhor critério: Não-inserção	1	5	8	9

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Inserção elevada			
Não-inserção (NIO)	9			
Inserção leve (NI1.1 - NI1.10)	5			
Inserção moderada (NI3.1 - NI3.10)	2			
Inserção elevada (NI5.1 - NI5.10)	1			

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 68 - Comparação por pares das alternativas em relação ao subcritério qualitativo S4 para a cidade de São Paulo

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Não-inserção NI0	Inserção leve NI1.1 - NI1.10	Inserção moderada NI3.1 - NI3.10	Inserção elevada NI5.1 - NI5.10
Melhor critério: Não-inserção	1	7	8	9

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Inserção elevada
Não-inserção (NI0)	9
Inserção leve (NI1.1 - NI1.10)	3
Inserção moderada (NI3.1 - NI3.10)	2
Inserção elevada (NI5.1 - NI5.10)	1

Fonte: Produção do próprio autor.

As comparações representadas nas Tabelas 63 a 68 também são válidas para a cidade de Brasília, entretanto, ao invés de dez alternativas disponíveis para o nível de inserção elevado (NI5.1 a NI5.10), há apenas uma alternativa para tal nível de inserção (NI5).

Utilizando os vetores de prioridade *best-to-others* (BO) e *others-to-worst* (OW), calculam-se os desempenhos normalizados das alternativas em cada um dos seis subcritérios qualitativos a partir da solução do problema de Programação Linear do modelo BWM linear exibido nas equações (69)-(73). Nesta tese, o modelo BWM linear foi desenvolvido no *software* de modelagem LINGO 10.0, em um computador com processador Intel Core i5 3,1 GHz e 8 GB de memória RAM.

O modelo elaborado para o cálculo dos desempenhos normalizados das 31 alternativas em cada subcritério qualitativo para a cidade de São Paulo possui um total de 255 variáveis, 318 restrições e 819 coeficientes diferentes de zero; a título de exemplo, a modelagem BWM linear desenvolvida para o cálculo dos desempenhos em relação ao subcritério qualitativo T3 na cidade de São Paulo é apresentada no Apêndice B. De maneira análoga, para as 22 alternativas da cidade de Brasília, o modelo possui 183 variáveis, 228 restrições e 585 coeficientes diferentes de zero.

As soluções correspondentes aos valores de desempenho normalizado das alternativas nos seis subcritérios qualitativos do problema, obtidas a partir da resolução do modelo BWM linear no *software* LINGO, são mostradas nas Tabelas 69 e 70, respectivamente para as cidades de São Paulo e Brasília. Os indicadores de consistência das comparações de tais simulações (ζ^{L*}) são apresentados na Tabela 71.

Tabela 69 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos para a cidade de São Paulo

Cidade de São Paulo	Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos					
	Subcritério T3	Subcritério T4	Subcritério S1	Subcritério S2	Subcritério S3	Subcritério S4
Inserção leve (1 %)						
NI1.1	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.2	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.3	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.4	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.5	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.6	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.7	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.8	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.9	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.10	0,0465	0,0181	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
Inserção moderada (3 %)						
NI3.1	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.2	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.3	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.4	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.5	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.6	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.7	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.8	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.9	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.10	0,0266	0,0241	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
Inserção elevada (5 %)						
NI5.1	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.2	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.3	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.4	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.5	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.6	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.7	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.8	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.9	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.10	0,0121	0,0574	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
Não-inserção (0 %)						
NI0	0,1476	0,0047	0,0047	0,0056	0,1726	0,2003

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 70 - Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos para a cidade de Brasília

Cidade de Brasília	Valores normalizados de desempenho das alternativas nos subcritérios qualitativos					
	Subcritério T3	Subcritério T4	Subcritério S1	Subcritério S2	Subcritério S3	Subcritério S4
Inserção leve (1 %)						
NI1.1	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.2	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.3	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.4	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.5	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.6	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.7	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.8	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.9	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.10	0,0522	0,0374	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
Inserção moderada (3 %)						
NI3.1	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.2	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.3	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.4	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.5	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.6	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.7	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.8	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.9	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.10	0,0298	0,0498	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
Inserção elevada (5 %)						
NI5	0,0136	0,1186	0,1186	0,1293	0,0177	0,0235
Não-inserção (0 %)						
NI0	0,1657	0,0097	0,0097	0,0122	0,2001	0,2427

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 71 - Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) das alternativas em relação aos subcritérios qualitativos

Cidade	Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) das alternativas					
	Subcritério T3	Subcritério T4	Subcritério S1	Subcritério S2	Subcritério S3	Subcritério S4
São Paulo	0,0384	0,0149	0,0149	0,0147	0,0350	0,0258
Brasília	0,0431	0,0309	0,0309	0,0317	0,0405	0,0313

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 71, os valores de ζ^{L*} indicam que os julgamentos das alternativas em relação aos seis subcritérios qualitativos foram altamente consistentes, uma vez que quanto mais próximo de zero for o valor de ζ^{L*} , maior a coerência das comparações.

- Obtenção da matriz de decisão:

A matriz de decisão do problema (P_{final}) para a cidade de São Paulo, obtida utilizando os dados de desempenho normalizado das 31 alternativas em relação aos 13 subcritérios, é apresentada na Tabela 72.

Tabela 72 - Matriz de decisão para a cidade de São Paulo

	T1	T2	T3	T4	E1	E2	E3	A1	A2	S1	S2	S3	S4
NI1.1	0,0120	0,0516	0,0465	0,0181	0,0599	0,0589	0,0507	0,0119	0,0127	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.2	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0599	0,0588	0,0515	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.3	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0598	0,0588	0,0522	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.4	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0598	0,0587	0,0529	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.5	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0598	0,0587	0,0536	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.6	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0597	0,0586	0,0543	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.7	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0597	0,0586	0,0549	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.8	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0597	0,0585	0,0556	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.9	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0597	0,0584	0,0563	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI1.10	0,0120	0,0514	0,0465	0,0181	0,0596	0,0584	0,0570	0,0120	0,0128	0,0181	0,0149	0,0415	0,0323
NI3.1	0,0271	0,0445	0,0266	0,0241	0,0337	0,0352	0,0000	0,0273	0,0221	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.2	0,0284	0,0418	0,0266	0,0241	0,0335	0,0348	0,0046	0,0285	0,0244	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.3	0,0289	0,0406	0,0266	0,0241	0,0333	0,0345	0,0066	0,0291	0,0254	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.4	0,0293	0,0397	0,0266	0,0241	0,0331	0,0342	0,0081	0,0295	0,0261	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.5	0,0297	0,0390	0,0266	0,0241	0,0329	0,0340	0,0094	0,0298	0,0268	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.6	0,0300	0,0383	0,0266	0,0241	0,0327	0,0337	0,0106	0,0301	0,0273	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.7	0,0303	0,0377	0,0266	0,0241	0,0325	0,0335	0,0116	0,0304	0,0279	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.8	0,0306	0,0371	0,0266	0,0241	0,0323	0,0333	0,0126	0,0307	0,0283	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.9	0,0308	0,0366	0,0266	0,0241	0,0321	0,0330	0,0135	0,0309	0,0288	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI3.10	0,0310	0,0361	0,0266	0,0241	0,0320	0,0328	0,0143	0,0311	0,0292	0,0241	0,0248	0,0259	0,0283
NI5.1	0,0558	0,0084	0,0121	0,0574	0,0011	0,0017	0,0206	0,0558	0,0560	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.2	0,0572	0,0055	0,0121	0,0574	0,0009	0,0014	0,0256	0,0571	0,0585	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.3	0,0577	0,0044	0,0121	0,0574	0,0008	0,0012	0,0276	0,0576	0,0594	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.4	0,0581	0,0035	0,0121	0,0574	0,0007	0,0010	0,0291	0,0580	0,0602	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.5	0,0585	0,0027	0,0121	0,0574	0,0006	0,0008	0,0303	0,0584	0,0608	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.6	0,0588	0,0021	0,0121	0,0574	0,0005	0,0006	0,0314	0,0587	0,0614	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.7	0,0590	0,0015	0,0121	0,0574	0,0004	0,0005	0,0324	0,0589	0,0618	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.8	0,0593	0,0010	0,0121	0,0574	0,0002	0,0003	0,0333	0,0592	0,0623	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.9	0,0595	0,0005	0,0121	0,0574	0,0001	0,0002	0,0341	0,0594	0,0627	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI5.10	0,0597	0,0000	0,0121	0,0574	0,0000	0,0000	0,0349	0,0596	0,0631	0,0574	0,0598	0,0153	0,0194
NI0	0,0000	0,0645	0,1476	0,0047	0,0687	0,0668	0,0704	0,0000	0,0000	0,0047	0,0056	0,1726	0,2003

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 73 é mostrada a matriz de decisão (P_{final}) para a cidade de Brasília, obtida a partir dos valores de desempenho normalizado das 22 alternativas em relação aos 13 subcritérios do problema.

Tabela 73 - Matriz de decisão para a cidade de Brasília

	T1	T2	T3	T4	E1	E2	E3	A1	A2	S1	S2	S3	S4
NI1.1	0,0201	0,0564	0,0522	0,0374	0,0607	0,0600	0,0611	0,0201	0,0179	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.2	0,0209	0,0556	0,0522	0,0374	0,0606	0,0599	0,0637	0,0209	0,0196	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.3	0,0212	0,0553	0,0522	0,0374	0,0606	0,0598	0,0648	0,0213	0,0203	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.4	0,0215	0,0550	0,0522	0,0374	0,0605	0,0598	0,0657	0,0216	0,0208	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.5	0,0218	0,0548	0,0522	0,0374	0,0605	0,0597	0,0664	0,0218	0,0213	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.6	0,0220	0,0546	0,0522	0,0374	0,0604	0,0596	0,0671	0,0220	0,0217	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.7	0,0222	0,0544	0,0522	0,0374	0,0604	0,0596	0,0677	0,0222	0,0221	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.8	0,0223	0,0542	0,0522	0,0374	0,0603	0,0595	0,0682	0,0223	0,0224	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.9	0,0225	0,0541	0,0522	0,0374	0,0603	0,0594	0,0687	0,0225	0,0227	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI1.10	0,0226	0,0540	0,0522	0,0374	0,0602	0,0594	0,0692	0,0226	0,0230	0,0374	0,0322	0,0481	0,0391
NI3.1	0,0602	0,0434	0,0298	0,0498	0,0332	0,0345	0,0000	0,0604	0,0539	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.2	0,0626	0,0411	0,0298	0,0498	0,0330	0,0342	0,0076	0,0628	0,0587	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.3	0,0637	0,0401	0,0298	0,0498	0,0329	0,0340	0,0109	0,0638	0,0607	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.4	0,0645	0,0394	0,0298	0,0498	0,0328	0,0338	0,0134	0,0646	0,0623	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.5	0,0652	0,0387	0,0298	0,0498	0,0326	0,0336	0,0156	0,0652	0,0637	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.6	0,0658	0,0382	0,0298	0,0498	0,0325	0,0334	0,0175	0,0658	0,0649	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.7	0,0663	0,0377	0,0298	0,0498	0,0324	0,0333	0,0192	0,0663	0,0660	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.8	0,0668	0,0372	0,0298	0,0498	0,0322	0,0331	0,0208	0,0668	0,0670	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.9	0,0673	0,0368	0,0298	0,0498	0,0321	0,0329	0,0222	0,0673	0,0679	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI3.10	0,0677	0,0364	0,0298	0,0498	0,0320	0,0328	0,0236	0,0677	0,0687	0,0498	0,0537	0,0301	0,0342
NI5	0,1330	0,0000	0,0136	0,1186	0,0000	0,0000	0,0777	0,1322	0,1542	0,1186	0,1293	0,0177	0,0235
NI0	0,0000	0,0629	0,1657	0,0097	0,0697	0,0677	0,1091	0,0000	0,0000	0,0097	0,0122	0,2001	0,2427

Fonte: Produção do próprio autor.

6.3 CENÁRIOS DE DECISÃO DO MÉTODO BWM

Tendo em vista o dilema existente entre os objetivos de ordem econômica e os de ordem ambiental, rotineiramente vivenciado pelos tomadores de decisão, tanto em âmbito local, quanto em âmbito nacional, dois cenários distintos são considerados na aplicação do método BWM no problema da integração de veículos elétricos na frota das cidades brasileiras, um que prioriza fortemente os critérios econômicos e outro que prioriza igualmente os critérios econômicos e ambientais.

6.3.1 Cenário I: Priorização de critérios econômicos

De acordo com a estrutura hierárquica apresentada na Figura 29, a classificação e escolha da melhor alternativa de inserção dos veículos elétricos na frota de determinada cidade depende de quatro critérios principais (C1, C2, C3 e C4). No cenário I, que prioriza os critérios econômicos, as premissas adotadas na fase de comparação por pares dos critérios principais levam em consideração tal priorização, de forma que o critério principal C2 (Critério econômico) é tomado como o mais importante.

6.3.1.1 Vetor de prioridade

A obtenção do vetor de prioridade (w_{Global}) dá-se a partir da aplicação do método proposto na seção 5.3.2.3. Assim, primeiramente devem ser calculados os valores dos pesos dos quatro critérios principais e, posteriormente, os valores dos pesos locais dos 13 subcritérios, ambos utilizando os Passos 3 a 7 do método BWM. Em seguida, calculam-se os valores dos pesos globais dos 13 subcritérios, de forma a gerar o vetor de prioridade do problema em análise.

Iniciando a fase de julgamentos, a Tabela 74 apresenta os resultados da comparação por pares dos quatro critérios principais em relação ao objetivo principal do problema. Observa-se que o critério econômico (C2) foi adotado como o mais importante (Cenário I).

Tabela 74 - Comparação por pares dos critérios principais em relação ao objetivo principal do problema no cenário I

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Critério técnico (C1)	Critério econômico (C2)	Critério ambiental (C3)	Critério sócio-político (C4)
Melhor critério: Critério econômico (C2)	8	1	5	9

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Critério sócio-político (C4)
Critério técnico (C1)	2
Critério econômico (C2)	9
Critério ambiental (C3)	5
Critério sócio-político (C4)	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da comparação por pares dos quatro subcritérios técnicos (T1, T2, T3 e T4) em relação ao critério técnico (C1) são mostrados na Tabela 75.

Tabela 75 - Comparação por pares dos subcritérios técnicos em relação ao critério técnico

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	T1	T2	T3	T4
Melhor critério: Diversificação e progresso tecnológico da frota de veículos (T4)	9	3	7	1

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Redução do consumo de gasolina (T1)
Redução do consumo de gasolina (T1)	1
Aumento do consumo de energia elétrica (T2)	7
Necessidade de obras para a infraestrutura de recarga (T3)	3
Diversificação e progresso tecnológico da frota de veículos (T4)	9

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da comparação por pares dos três subcritérios econômicos (E1, E2 e E3) em relação ao critério econômico (C2) são exibidos na Tabela 76.

Tabela 76 - Comparação por pares dos subcritérios econômicos em relação ao critério econômico

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	E1	E2	E3
Melhor critério: Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora (E1)	1	3	9

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Perda de receita total da distribuidora (E3)
Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora (E1)	9
Perda na arrecadação total de impostos dos veículos BEV e PHEV (E2)	7
Perda de receita total da distribuidora (E3)	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 77 são mostrados os resultados da comparação por pares dos dois subcritérios ambientais (A1 e A2) em relação ao critério ambiental (C3).

Tabela 77 - Comparação por pares dos subcritérios ambientais em relação ao critério ambiental

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	A1	A2
Melhor critério: Redução das emissões totais de GEE (A1)	1	5

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Redução da emissão total de poluentes atmosféricos (A2)
Redução das emissões totais de GEE (A1)	5
Redução da emissão total de poluentes atmosféricos (A2)	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da comparação por pares dos quatro subcritérios sócio-políticos (S1, S2, S3 e S4) em relação ao critério sócio-político (C4) são exibidos na Tabela 78.

Tabela 78 - Comparação por pares dos subcritérios sócio-políticos em relação ao critério sócio-político

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	S1	S2	S3	S4
Melhor critério: Imagem da cidade/país frente à opinião pública (S1)	1	5	7	9

Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Necessidade de regulação junto às distribuidoras de energia (S4)
Imagem da cidade/país frente à opinião pública (S1)	9
Incentivo a novas oportunidades no mercado de trabalho (S2)	5
Necessidade de gestão dos incentivos financeiros (S3)	3
Necessidade de regulação junto às distribuidoras de energia (S4)	1

Fonte: Produção do próprio autor.

Utilizando os vetores de prioridade *best-to-others* (BO) e *others-to-worst* (OW) das Tabelas 74 a 78, calculam-se os pesos dos quatro critérios principais e os valores dos pesos locais dos 13 subcritérios a partir da solução do problema de Programação Linear do modelo BWM linear mostrado nas equações (69)-(73).

Os modelos elaborados para o cálculo dos pesos dos critérios principais nos cenários I e II, bem como para os subcritérios técnicos e sócio-políticos, possuem um total de 39 variáveis, 48 restrições e 117 coeficientes diferentes de zero, em cada modelo; para os subcritérios econômicos, o modelo possui 30 variáveis, 37 restrições e 89 coeficientes diferentes de zero; por fim, o modelo elaborado para os subcritérios ambientais possui 21 variáveis, 26 restrições e 61 coeficientes diferentes de zero.

Na Tabela 79 são apresentadas as soluções correspondentes aos pesos dos quatro critérios principais e aos pesos locais dos 13 subcritérios do problema, obtidas a partir da resolução do modelo BWM linear no *software* LINGO. Na mesma tabela, são mostrados os valores dos pesos globais dos subcritérios, calculados de acordo com a equação (253). Os indicadores de consistência das comparações de tais simulações (ζ^L) estão representados na Tabela 80.

Tabela 79 - Valores dos pesos dos critérios principais e dos pesos locais e globais dos subcritérios no cenário I

Critérios principais	Pesos dos critérios principais	Subcritérios	Pesos locais dos subcritérios	Pesos globais dos subcritérios	Ranking dos subcritérios
Critério técnico (C1)	0,1016	T1	0,0527	0,0054	12
		T2	0,2425	0,0246	8
		T3	0,1039	0,0106	9
		T4	0,6009	0,0611	4
Critério econômico (C2)	0,6759	E1	0,6706	0,4533	1
		E2	0,2706	0,1829	2
		E3	0,0588	0,0398	6
Critério ambiental (C3)	0,1626	A1	0,8333	0,1355	3
		A2	0,1667	0,0271	7
Critério sócio-político (C4)	0,0599	S1	0,6663	0,0399	5
		S2	0,1602	0,0096	10
		S3	0,1145	0,0069	11
		S4	0,0590	0,0035	13

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 80 - Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) dos critérios principais e dos subcritérios no cenário I

	Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*})
Critérios principais	0,1369
Subcritérios técnicos (C1)	0,1265
Subcritérios econômicos (C2)	0,1412
Subcritérios ambientais (C3)	0,0000
Subcritérios sócio-políticos (C4)	0,1349

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 79, os valores dos pesos globais dos subcritérios compõem o vetor de prioridade do problema (w_{Global}).

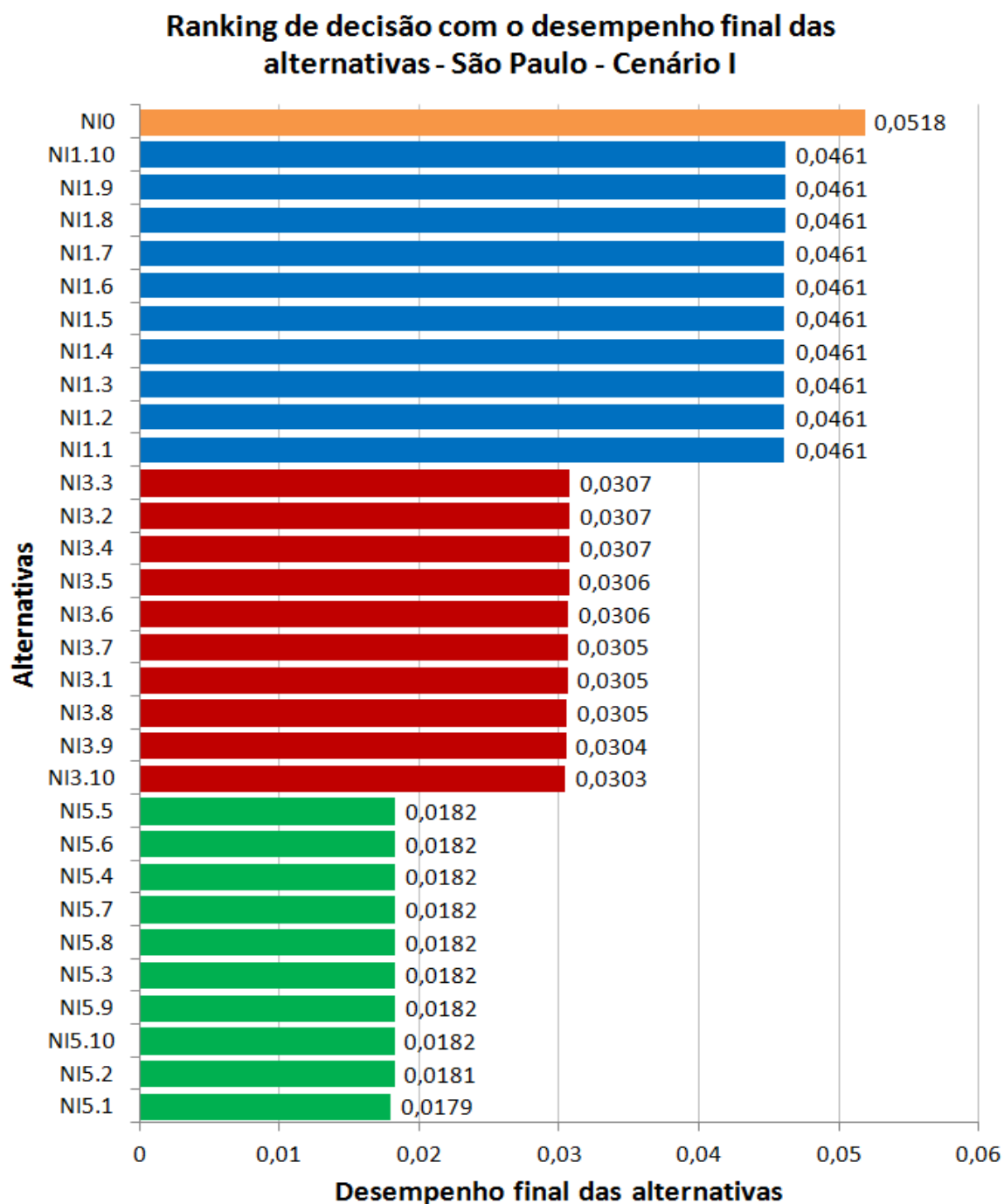
Os valores de ζ^{L*} na Tabela 80 variaram de 0 a 0,1412, sendo que o valor 0, obtido nos subcritérios ambientais, indica que as comparações foram 100% consistentes. Diferente de outros métodos MCDA, em que a razão de consistência aponta a eventual necessidade de refazer as comparações por pares devido a incoerências, no método BWM não há tal necessidade, uma vez que, conforme apontado por Rezaei (2015), o método BWM garante que os resultados sejam sempre consistentes entre si.

6.3.1.2 Vetor de decisão

A partir da implementação do método proposto na seção 5.3.2.4, os valores de desempenho final (v_i) das alternativas é calculado por meio da equação (255), de forma a obter o vetor de decisão do problema (V_{final}). O *ranking* de decisão é obtido a partir da ordenação dos valores do vetor de decisão.

O *ranking* de decisão da cidade de São Paulo é apresentado na Figura 36, no qual também são exibidos os valores do desempenho final de cada uma das 31 alternativas disponíveis.

Figura 36 - *Ranking* de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de São Paulo no cenário I

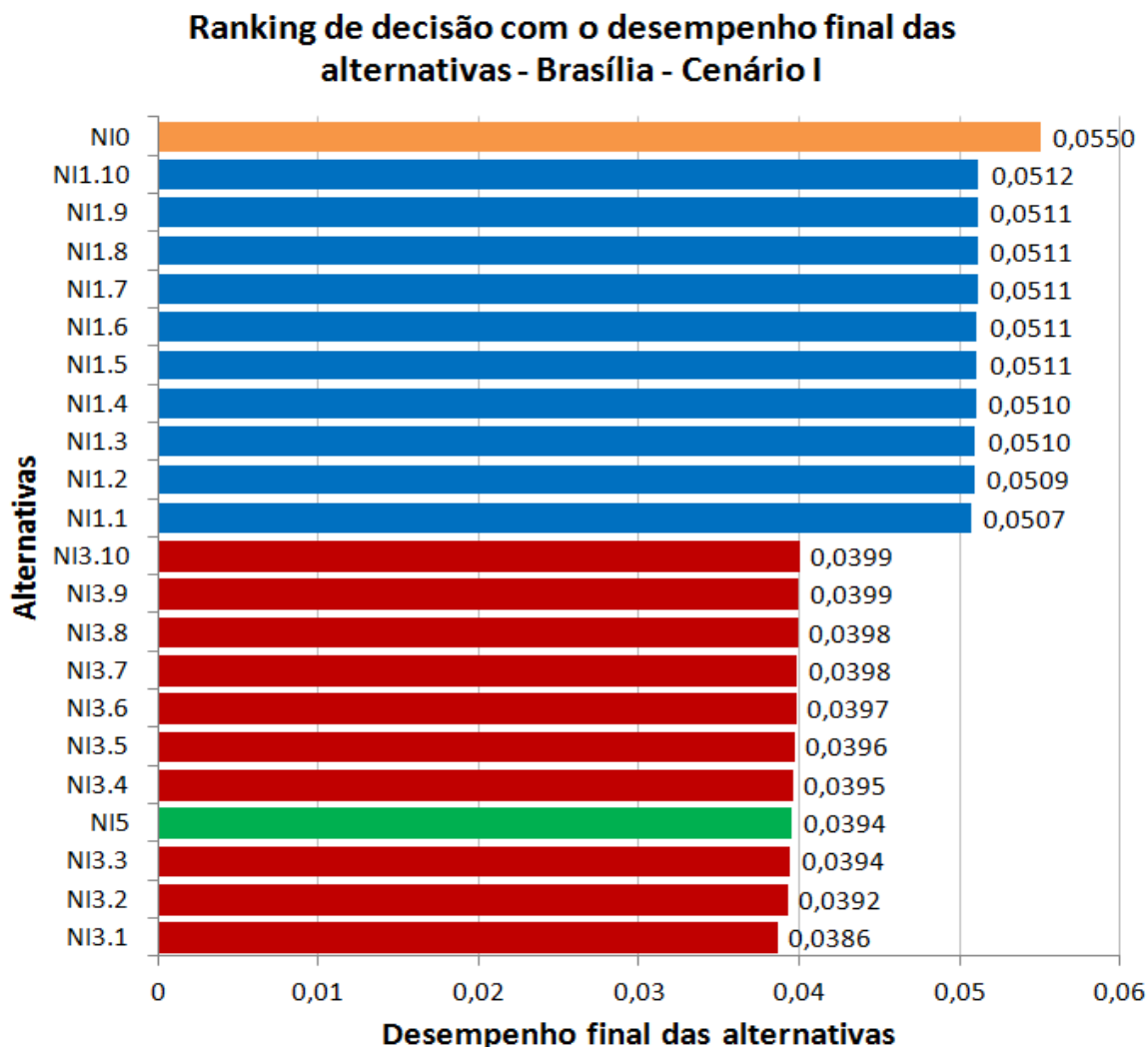


Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 37 é exibido o *ranking* de decisão da cidade de Brasília, bem como os valores do desempenho final das 22 alternativas disponíveis.

Os *rankings* de decisão das Figuras 36 e 37 indicam que, considerando a priorização dos critérios econômicos, o tomador de decisão deve optar pela não-inserção de veículos elétricos nas frotas das cidades de São Paulo e Brasília (alternativa NIO).

Figura 37 - *Ranking* de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de Brasília no cenário I



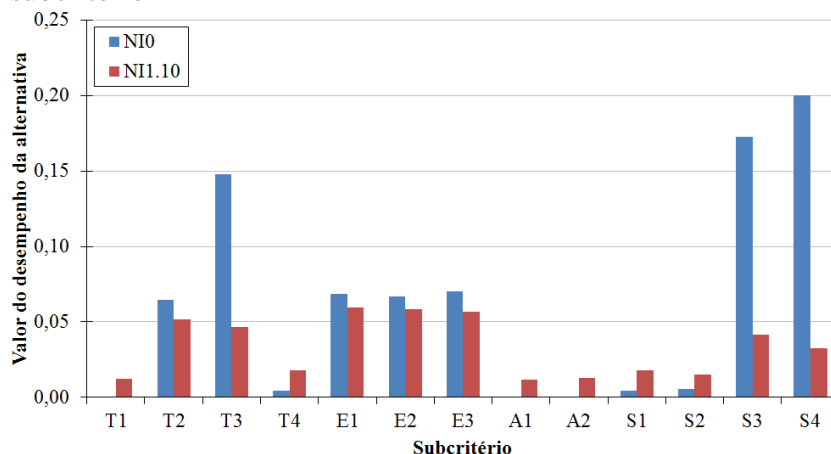
Fonte: Produção do próprio autor.

6.3.1.3 Análise dos resultados

Nos *rankings* de decisão das Figuras 36 e 37, a opção de não-inserção de veículos elétricos nas cidades de São Paulo e Brasília, quando comparada com a alternativa NI1.10, classificada em segundo lugar nos rankings, apresentou um melhor desempenho em sete dos 13 subcritérios avaliados, conforme mostrado nas Figuras 38 e 39.

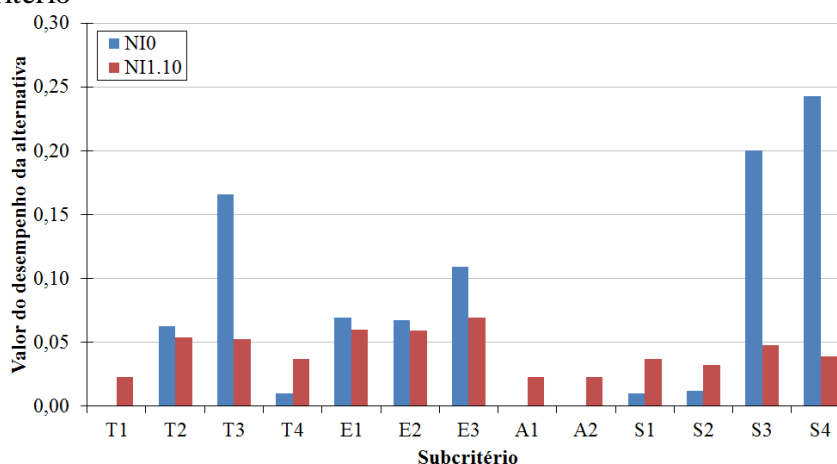
Destaca-se ainda que, após a aplicação dos pesos do vetor de prioridade (w_{Global}) no desempenho das alternativas, o subcritério E1 (Perda total na arrecadação de impostos e na receita da distribuidora) foi o que apresentou a maior diferença no valor da contribuição do subcritério no desempenho final das alternativas NIO e NI1.10, em ambas as cidades, como pode ser observado nas Figuras 40 e 41.

Figura 38 - Desempenho das duas alternativas melhores classificadas no cenário I de São Paulo em cada subcritério



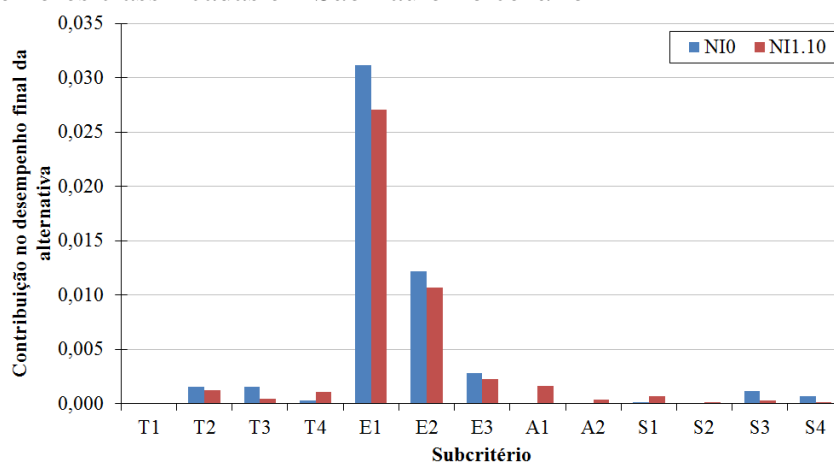
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 39 - Desempenho das duas alternativas melhores classificadas no cenário I de Brasília em cada subcritério



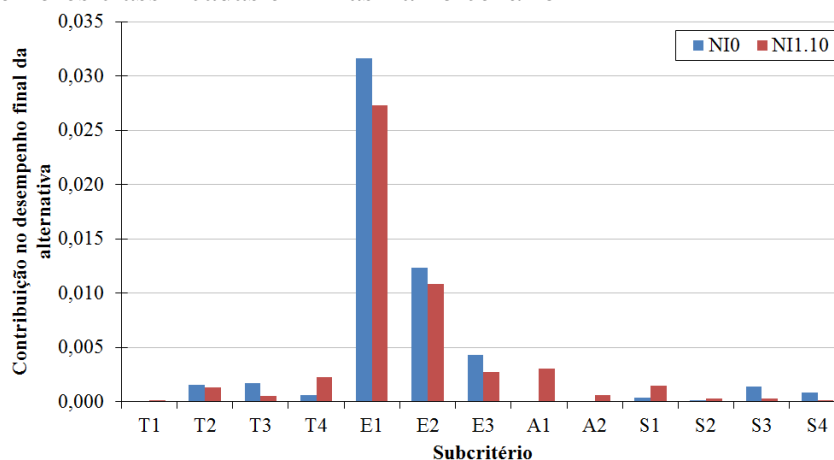
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final das duas alternativas melhores classificadas em São Paulo no cenário I



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 41 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final das duas alternativas melhores classificadas em Brasília no cenário I



Fonte: Produção do próprio autor.

Neste contexto, quando o legislador prioriza os aspectos econômicos, em detrimento dos critérios ambientais, conclui-se que a melhor decisão, sob o ponto de vista do tomador de decisão, é não incentivar financeiramente a integração de veículos elétricos nas cidades de São Paulo e Brasília, haja vista que, após a aplicação do método proposto nesta tese, evidenciou-se a superioridade da alternativa relacionada à não-inserção de veículos elétricos na frota.

Por fim, ficou comprovada a utilidade do método AUGMECON-BWM proposto neste trabalho no planejamento da integração de veículos elétricos *plug-in* em nível local. Por se tratar de uma abordagem consistente e inovadora, entende-se que ela deve trazer uma contribuição metodológica para as pesquisas que envolvem o equacionamento das questões ligadas aos veículos elétricos no Brasil e no mundo.

O método desenvolvido e os resultados alcançados tendem a contribuir para o entendimento do que deve ser feito para que os veículos elétricos sejam de fato integrados na matriz do modal rodoviário de qualquer cidade do mundo, além de auxiliar no processo decisório da determinação do nível de inserção de veículos elétricos mais adequado para cada cidade, levando em consideração as percepções dos tomadores de decisão, além das especificidades e restrições locais, inerentes a qualquer tomada de decisão.

6.3.2 Cenário II: Priorização de critérios econômicos e ambientais

Cada vez mais os aspectos ligados ao meio ambiente têm sido considerados nas decisões tomadas na esfera político-econômica. A necessidade de ponderar não somente os

aspectos financeiros, mas também os impactos ambientais decorrentes de diferentes ações incentivadas pelo poder público, juntamente com a política automotiva brasileira *Rota 2030*, que define metas de emissões de gases de efeito estufa para produtores de veículos, evidencia a importância de avaliar o problema da introdução dos veículos elétricos de forma mais harmonizada, de forma que tanto os aspectos econômicos, quanto os ambientais, sejam analisados para a definição das políticas públicas.

Neste contexto, o cenário II deste trabalho prioriza igualmente os critérios econômicos e ambientais, de forma que as premissas adotadas na fase de julgamentos dos critérios principais levam em consideração tal priorização. Desta forma, assume-se que os critérios principais C2 (Critério econômico) e C3 (Critério ambiental) são os mais importantes no processo de tomada de decisão.

6.3.2.1 Vetor de prioridade

A obtenção do vetor de prioridade (w_{Global}) está condicionada ao cálculo dos valores dos pesos dos critérios principais e dos pesos locais dos subcritérios. Na seção 6.3.1.1 foram determinados os valores dos pesos dos 13 subcritérios para o cenário I, de forma que não há necessidade de refazer tais cálculos, uma vez que os valores dos pesos dos subcritérios são os mesmos, tanto no cenário I, quanto no cenário II. Em contrapartida, os pesos dos critérios principais devem ser recalculados, haja vista que, no cenário II, tanto os critérios econômicos, quanto os ambientais, são priorizados.

Na Tabela 81 são apresentados os resultados da comparação por pares dos quatro critérios principais em relação ao objetivo principal do problema. Observa-se que os critérios econômico (C2) e ambiental (C3) foram adotados como os mais importantes (Cenário II).

Tabela 81 - Comparação por pares dos critérios principais em relação ao objetivo principal do problema no cenário II

Vetor de prioridade <i>best-to-others</i> (BO)	Critério técnico (C1)	Critério econômico (C2)	Critério ambiental (C3)	Critério sócio-político (C4)
Melhor critério: Critério ambiental (C3)	8	1	1	9
Vetor de prioridade <i>others-to-worst</i> (OW)	Pior critério: Critério sócio-político (C4)			
Critério técnico (C1)			2	
Critério econômico (C2)			9	
Critério ambiental (C3)			9	
Critério sócio-político (C4)			1	

Fonte: Produção do próprio autor.

Utilizando os vetores de prioridade *best-to-others* (BO) e *others-to-worst* (OW), calculam-se os pesos dos quatro critérios principais a partir da solução do problema de Programação Linear do modelo BWM linear mostrado nas equações (69)-(73), sendo os resultados exibidos na Tabela 82. Na mesma tabela, são mostrados os valores dos pesos locais dos subcritérios, previamente calculados na seção 6.3.1.1, bem como os valores dos pesos globais dos subcritérios, calculados de acordo com a equação (253).

Na Tabela 82, os valores dos pesos globais dos subcritérios compõem o vetor de prioridade do problema (w_{Global}).

Tabela 82 - Valores dos pesos dos critérios principais e dos pesos locais e globais dos subcritérios no cenário II

Critérios principais	Pesos dos critérios principais	Subcritérios	Pesos locais dos subcritérios	Pesos globais dos subcritérios	Ranking dos subcritérios
Critério técnico (C1)	0,0599	T1	0,0527	0,0032	12
		T2	0,2425	0,0145	8
		T3	0,1039	0,0062	10
		T4	0,6009	0,0360	5
Critério econômico (C2)	0,4470	E1	0,6706	0,2998	2
		E2	0,2706	0,1210	3
		E3	0,0588	0,0263	7
Critério ambiental (C3)	0,4470	A1	0,8333	0,3725	1
		A2	0,1667	0,0745	4
Critério sócio-político (C4)	0,0461	S1	0,6663	0,0307	6
		S2	0,1602	0,0074	9
		S3	0,1145	0,0053	11
		S4	0,0590	0,0027	13

Fonte: Produção do próprio autor.

Os indicadores de consistência das comparações do cenário II (ζ^{L*}) estão representados na Tabela 83.

Tabela 83 - Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*}) dos critérios principais e dos subcritérios no cenário II

	Indicadores de consistência das comparações (ζ^{L*})
Critérios principais	0,0323
Subcritérios técnicos (C1)	0,1265
Subcritérios econômicos (C2)	0,1412
Subcritérios ambientais (C3)	0,0000
Subcritérios sócio-políticos (C4)	0,1349

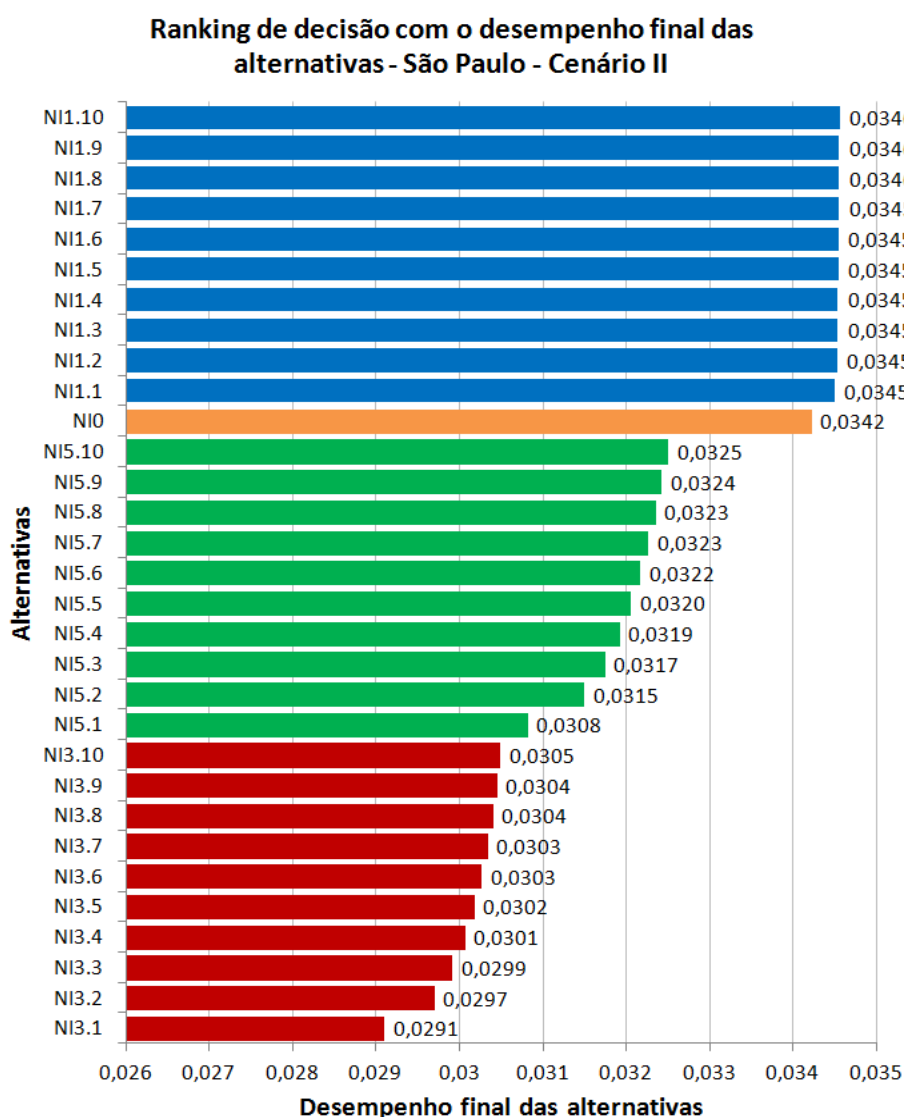
Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 83, os valores de ζ^{L*} no cenário II variaram de 0 a 0,1412, sendo seus valores exatamente iguais aos obtidos no cenário I, com exceção do indicador de consistência das comparações dos critérios principais.

6.3.2.2 Vetor de decisão

De modo a obter o vetor de decisão (V_{final}) para o cenário II, os valores de desempenho final (v_i) das alternativas são calculados a partir da equação (255). O *ranking* de decisão da cidade de São Paulo é apresentado na Figura 42, no qual também são exibidos os valores do desempenho final de cada uma das 31 alternativas disponíveis.

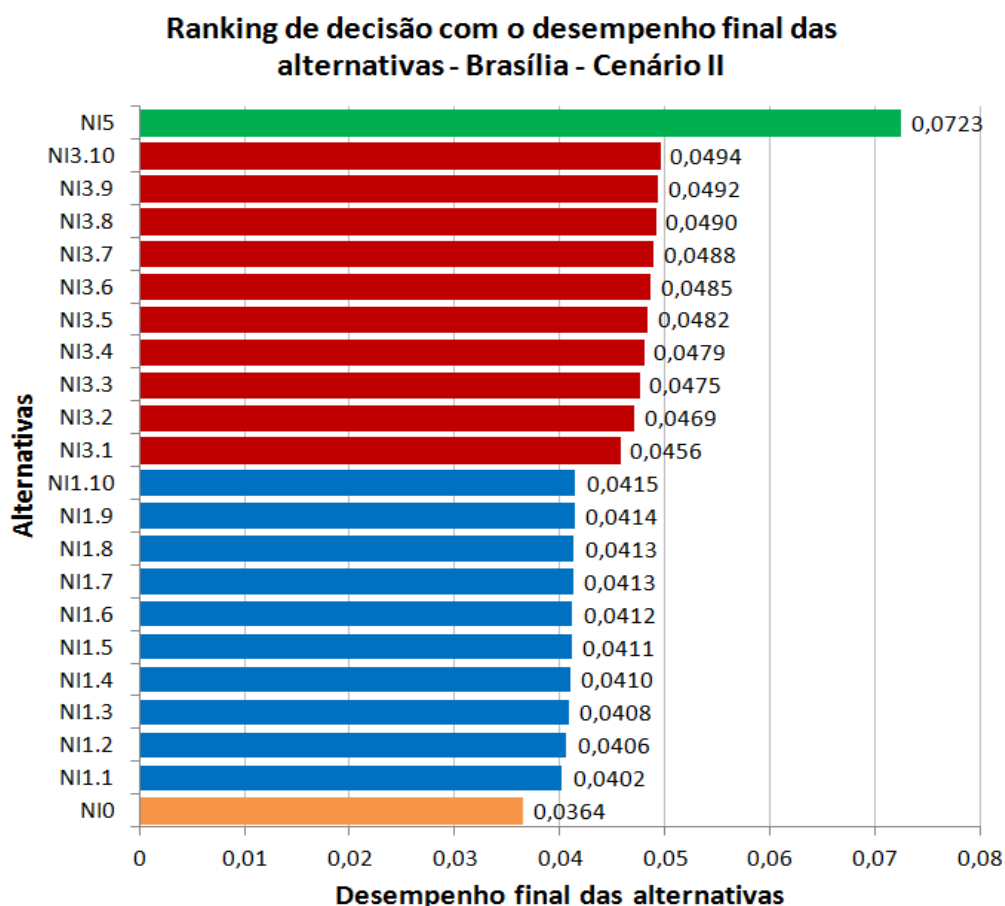
Figura 42 - *Ranking* de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de São Paulo no cenário II



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 43 é apresentado o *ranking* de decisão da cidade de Brasília, bem como os valores do desempenho final das 22 alternativas disponíveis no cenário II.

Figura 43 - *Ranking* de decisão e valores de desempenho final do vetor de decisão da cidade de Brasília no cenário II



Fonte: Produção do próprio autor.

Nos *rankings* de decisão das Figuras 42 e 43, constata-se que, quando os critérios econômicos e ambientais são igualmente priorizados, a melhor alternativa sob a percepção do tomador de decisão é a inserção leve (1%) de veículos elétricos na frota da cidade de São Paulo, enquanto que na cidade de Brasília a melhor alternativa é a inserção elevada (5%) de veículos elétricos.

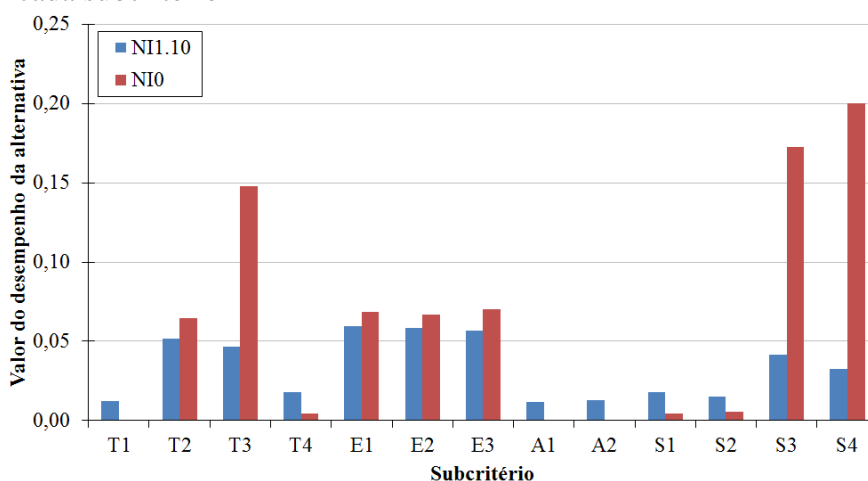
6.3.2.3 Análise dos resultados

No *ranking* de decisão da Figura 42, a opção de inserção leve de veículos elétricos na cidade de São Paulo, quando comparada com a alternativa N10, que representa o nível de inserção classificado em segundo lugar no ranking, apresentou um melhor desempenho em

seis dos 13 subcritérios avaliados, conforme exibido na Figura 44. No *ranking* de decisão da Figura 43, a opção de inserção elevada de veículos elétricos na cidade de Brasília, quando comparada com a alternativa NI3.10, que representa o nível de inserção classificado em segundo lugar no ranking, apresentou um melhor desempenho em sete dos 13 subcritérios avaliados, conforme apresentado na Figura 45.

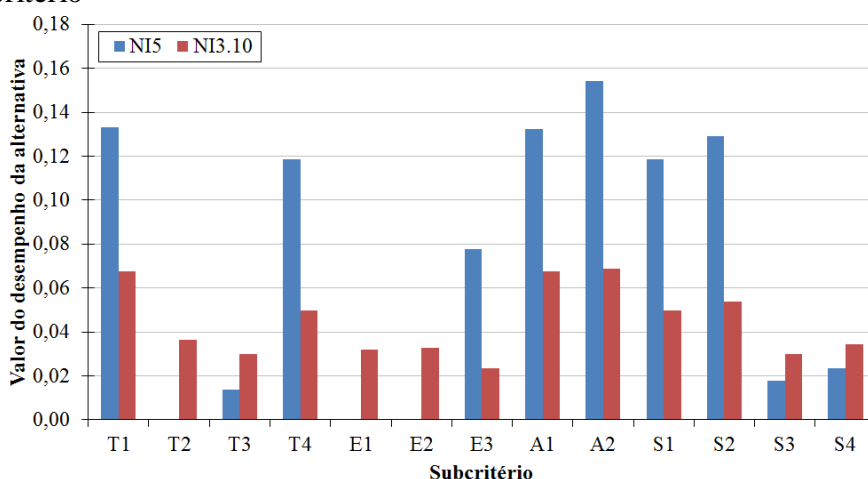
Observa-se que, após a aplicação dos pesos do vetor de prioridade (w_{Global}) no desempenho das alternativas, o subcritério A1 (Redução das emissões totais de GEE) foi o que apresentou as maiores diferenças no valor da contribuição do subcritério no desempenho final das alternativas NI1.10 e NI0 na cidade de São Paulo e NI5 e NI3.10 na cidade de Brasília, como pode ser observado nas Figuras 46 e 47.

Figura 44 - Desempenho dos dois níveis de inserção melhores classificados no cenário II de São Paulo em cada subcritério



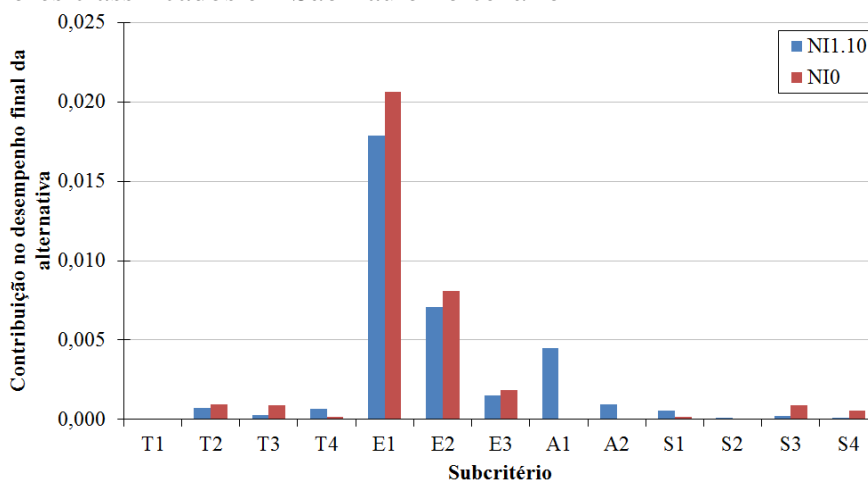
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 45 - Desempenho das duas alternativas melhores classificadas no cenário II de Brasília em cada subcritério



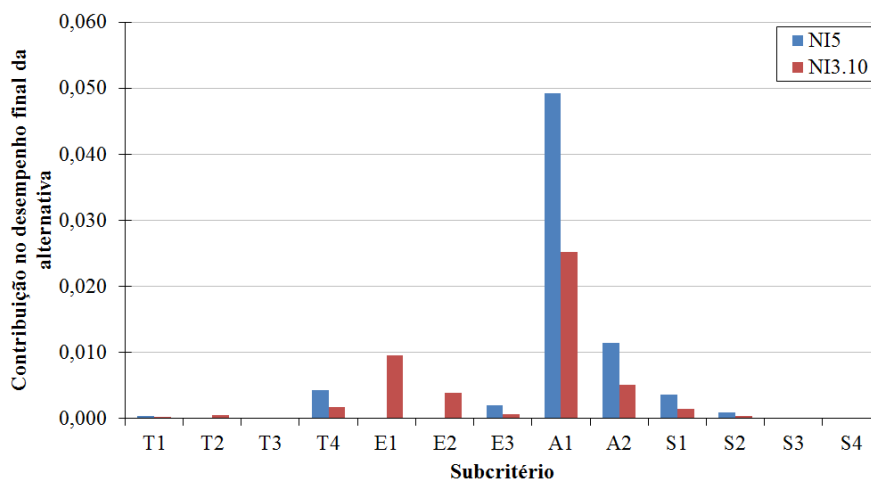
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 46 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final dos dois níveis de inserção melhores classificados em São Paulo no cenário II



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 47 - Contribuição de cada subcritério no valor do desempenho final das duas alternativas melhores classificadas em Brasília no cenário II



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, com o intuito de enriquecer a análise dos resultados, são sugeridas ações e políticas governamentais que podem ser desenvolvidas pelos legisladores (tomadores de decisão) de modo a alcançar o nível de inserção indicado nos resultados do cenário II, que, neste caso, é a inserção leve de veículos elétricos na frota de São Paulo e a inserção elevada de veículos elétricos em Brasília.

A Tabela 84 apresenta os valores das variáveis de decisão obtidos na solução do modelo AUGMECON relacionado às alternativas apontadas pelo método BWM linear no cenário II, ou seja, para a cidade de São Paulo são mostrados os resultados correspondentes à alternativa NI1.10, enquanto que para a cidade de Brasília são exibidos os resultados das variáveis de decisão da alternativa NI5.

Tabela 84 - Valores das variáveis de decisão da solução do modelo AUGMECON correspondente à melhor alternativa apontada pelo método BWM linear no cenário II para as cidades de São Paulo e Brasília

Variável de decisão no modelo AUGMECON proposto	Símbolo	Valor final da variável de decisão	
		São Paulo (NI1.10)	Brasília (NI5)
Desconto na alíquota do PIS na aquisição de veículo PEV	D _{PIS}	100,0%	0,0%
Desconto na alíquota da Cofins na aquisição de veículo PEV	D _{Cofins}	3,2%	59,3%
Desconto na alíquota do ICMS na aquisição de veículo PEV	D _{ICMS}	0,0%	87,9%
Desconto na alíquota do IPI na aquisição de veículo BEV	D _{IPI.BEV}	67,5%	100,0%
Desconto na alíquota do IPI na aquisição de veículo EREV	D _{IPI.EREV}	0,0%	0,0%
Desconto complementar no imposto anual do BEV	D _{IPVA.BEV.comp}	37,5%	100,0%
Desconto complementar no imposto anual do EREV	D _{IPVA.EREV.comp}	37,5%	0,0%
Desconto no preço da energia elétrica residencial	D _{EE}	25,0%	25,0%

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores das variáveis de decisão indicados na Tabela 84 apontam a melhor estratégia para a introdução leve de veículos elétricos na cidade de São Paulo e para a introdução elevada de veículos elétricos em Brasília, sendo que há uma série de conclusões e sugestões que podem ser extraídas de tais resultados, conforme apresentado a seguir:

- Impostos federais na aquisição de veículos elétricos:

Os dados da Tabela 84 indicam a necessidade da criação de leis federais que visem isentar integralmente os compradores de veículos BEV do pagamento do IPI na cidade de Brasília, enquanto que na cidade de São Paulo, a isenção deveria ser parcial, de 67,5%. A isenção do pagamento do IPI na aquisição de veículos automotores atualmente é prevista no Brasil para taxistas e portadores de deficiência e, desta forma, deveria ser ampliada para os veículos BEV.

Em ambas as cidades, a otimização da inserção dos veículos elétricos na frota, de modo a obter a máxima eficiência econômica, não está relacionada à concessão de desconto no IPI para veículos EREV, de forma que, conforme exibido na alternativa NI1.10 da Tabela 55 (vide solução B), obtenha-se 0,96% de veículos BEV e 0,04% de veículos EREV na frota, totalizando 1%. Para a cidade de Brasília, conforme mostrado na alternativa NI5 da Tabela 56 (vide solução K), a frota seria formada por 4,81% de veículos BEV e 0,19% de veículos EREV, totalizando 5%. Assim, observa-se que as frotas de veículos elétricos de ambas as cidades seriam formadas prioritariamente por veículos BEV.

Destaca-se também a necessidade de intervenção legislativa para a criação de normas que possibilitem a isenção parcial do pagamento da Cofins na aquisição de veículos elétricos,

uma vez que a otimização da inserção de veículos elétricos nas cidades de São Paulo e Brasília é dependente deste tipo de incentivo.

Finalmente, com relação ao pagamento do PIS na aquisição de veículos elétricos, sugere-se a isenção integral do pagamento para veículos PEV na cidade de São Paulo.

- Impostos estaduais na aquisição de veículos elétricos:

Os resultados do modelo AUGMECON apontam que os governos estaduais também devem participar ativamente na discussão e criação de políticas de incentivo fiscal para compradores de veículos elétricos. No Distrito Federal, sugere-se que, a fim de garantir uma introdução de 5% de veículos elétricos na frota da cidade de Brasília, seja elaborada lei que garanta, no mínimo, 87,9% de desconto no pagamento de ICMS relativo à aquisição de veículos PEV.

A isenção do pagamento do ICMS na aquisição de veículos automotores atualmente é prevista em diversos Estados brasileiros para taxistas e portadores de deficiência, de forma que deveria ser adaptada para o caso dos veículos elétricos *plug-in*.

- Imposto anual dos veículos elétricos (IPVA):

Outra conclusão interessante quanto à estratégia que deveria ser adotada pelos tomadores de decisão é que a otimização da inserção leve de veículos elétricos na frota de São Paulo dependeria da isenção total do pagamento anual do IPVA, tanto para os veículos BEV, quanto para os EREV. Quanto à cidade de Brasília, a alternativa mais eficiente para a introdução elevada de veículos elétricos seria isentar somente os veículos BEV, conforme apresentado na Tabela 85.

Tabela 85 - Valores finais de isenção do pagamento anual do IPVA para inserção leve de veículos elétricos na cidade de São Paulo e inserção elevada em Brasília

Variável de decisão e parâmetro no modelo AUGMECON	Símbolo no modelo AUGMECON	Valor final da variável e parâmetro	
		São Paulo (NI1.10)	Brasília (NI5)
Veículos BEV			
Desconto no imposto anual do BEV	$D_{IPVA.BEV}$	62,5%	0,0%
Desconto complementar no imposto anual do BEV	$D_{IPVA.BEV.comp}$	37,5%	100,0%
TOTAL		100,0%	100,0%
Veículos EREV			
Desconto no imposto anual do EREV	$D_{IPVA.EREV}$	62,5%	0,0%
Desconto complementar no imposto anual do EREV	$D_{IPVA.EREV.comp}$	37,5%	0,0%
TOTAL		100,0%	0,0%

Fonte: Produção do próprio autor.

- Energia elétrica:

Nas simulações realizadas utilizando a modelagem AUGMECON, as soluções correspondentes às alternativas NI1.10 em São Paulo e NI5 em Brasília indicam que a otimização da inserção de veículos elétricos na frota de tais cidades depende do desenvolvimento de políticas públicas que visem a concessão de descontos nas tarifas de energia elétrica para os consumidores residenciais que recarreguem os veículos elétricos em seus domicílios.

Por fim, cabe destacar que os resultados obtidos na aplicação do método AUGMECON-BWM no problema da introdução de veículos elétricos nas cidades brasileiras levaram em consideração, na fase de julgamentos dos critérios e alternativas, um conjunto de premissas que foram adotadas a título de demonstrar a utilidade do método elaborado no problema em questão.

É fato que, dependendo das condições político-econômicas do país e da cidade sob análise, diferentes premissas e pontos de vista podem ser adotados, de forma a proporcionar resultados diversos dos exibidos nos cenários I e II deste trabalho, conforme ocorre em quaisquer outros métodos MCDA utilizados para tomada de decisão. Mesmo neste caso, de alteração dos princípios norteadores dos julgamentos dos tomadores de decisão, o método elaborado nesta tese garante que os decisores tomem conhecimento do melhor caminho, da estratégia economicamente mais eficiente, para implementação das políticas necessárias ao estabelecimento do nível de inserção de veículos elétricos apontado pelo método BWM linear.

7 CONCLUSÕES

7.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DE PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um novo método de otimização e decisão para auxiliar na solução do problema da viabilidade de integração de veículos elétricos *plug-in* nas cidades brasileiras.

Inicialmente, a relação existente entre a participação dos veículos elétricos *plug-in* no mercado e a viabilidade econômica de aquisição de tais veículos em cidades norte-americanas, europeias e chinesas foi examinada, tendo sido constatada a tendência de aumento da participação dos veículos elétricos nos mercados avaliados na medida em que os benefícios financeiros também são incrementados.

No Brasil, os resultados financeiros obtidos indicam que a viabilidade econômica de aquisição dos veículos elétricos por parte dos consumidores representa o principal gargalo para a integração dos modelos elétricos no país.

Posteriormente foram quantificados os impactos ambientais, epidemiológicos, energéticos e na infraestrutura de recarga decorrentes da utilização dos veículos elétricos nas cidades brasileiras, apontando as principais diferenças e consequências do uso de tais veículos em detrimento dos veículos convencionais.

O problema do planejamento da introdução dos veículos elétricos em determinada cidade foi modelado por meio de uma abordagem inovadora, que integra os conceitos dos métodos AUGMECON e BWM.

Na modelagem do problema, os diversos aspectos econômicos, técnicos, ambientais e energéticos foram equacionados, de forma a relacionar os interesses e restrições dos consumidores, do poder público e das distribuidoras de energia, tendo sido consideradas quatro alternativas de inserção dos veículos elétricos, de 1%, 3%, 5% e 10%, e ainda a não-inserção de veículos elétricos na frota da cidade sob análise.

Com o intuito de validar a utilidade do método AUGMECON-BWM proposto, o mesmo foi aplicado no estudo de caso do planejamento e otimização da inserção de veículos elétricos nas cidades de São Paulo e Brasília, considerando dois cenários distintos, um que priorizou os critérios econômicos e outro que priorizou igualmente os critérios econômicos e ambientais.

Os resultados revelaram que quando os critérios econômicos são priorizados, a melhor alternativa para as cidades de São Paulo e Brasília, sob a percepção do tomador de decisão, é *não incentivar* financeiramente a introdução dos veículos elétricos na frota, uma vez que tal alternativa obteve os melhores valores de desempenho final nos vetores de decisão.

No cenário II, que prioriza igualmente os critérios econômicos e ambientais, conclui-se que a melhor alternativa para a cidade de São Paulo seria a *inserção leve (1%)* de veículos elétricos na frota, enquanto que na cidade de Brasília a melhor alternativa seria a *inserção elevada (5%)*, sendo que, em ambos os casos, as frotas seriam formadas prioritariamente por veículos BEV, em detrimento dos veículos PHEV.

Com base nos resultados do cenário II, foi determinado o melhor caminho para estímulo aos veículos elétricos nas cidades avaliadas, sob a ótica do tomador de decisão, tendo sido sugeridas ações e políticas governamentais que podem ser desenvolvidas pelos legisladores a fim de permitir a integração efetiva dos veículos elétricos no mercado e garantir a máxima eficiência econômica na introdução de tais veículos nas cidades supramencionadas.

Cabe frisar que os resultados do cenário II foram obtidos considerando um conjunto de premissas voltadas à adoção de uma política automotiva e ambiental em consonância com a atual necessidade de ponderar tanto os aspectos financeiros, quanto os ambientais, na determinação de políticas relacionadas à mobilidade urbana. Além disso, tal cenário vai ao encontro da nova política automotiva brasileira, o *Rota 2030*. Assim, sugere-se que o poder público adote a estratégia indicada no cenário II como ponto de suporte na tarefa de inserir os veículos elétricos nas cidades brasileiras.

Com os resultados obtidos nos modelos AUGMECON, foi possível concluir que a *inserção massiva (10%)* de veículos elétricos nas frotas das cidades de São Paulo e Brasília ainda é uma realidade distante, uma vez que, a partir dos dados considerados neste trabalho, não foram encontradas soluções factíveis para tal nível de inserção de veículos elétricos. Este resultado indica que, além da eventual redução do preço dos veículos elétricos, benefícios adicionais deveriam ser implementados de modo a permitir a introdução massiva dos veículos elétricos na frota destas cidades.

7.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho apresenta algumas contribuições interessantes para a literatura, sendo algumas delas citadas nesta seção.

O problema da inserção dos veículos elétricos em determinada cidade foi modelado por meio de conceitos dos métodos AUGMECON e BWM, sendo tal desenvolvimento uma importante contribuição desta tese, uma vez que, conforme mencionado na seção 1.4, não há referências bibliográficas relacionadas ao uso de um método de Programação Não-Linear, aliado a um método de análise de decisão, para tratar da introdução de veículos elétricos na frota.

Adicionalmente, esta tese fornece subsídios para o equacionamento das questões que envolvem os veículos elétricos no Brasil, bem como em outras cidades do mundo, de forma a colaborar com as pesquisas e decisões relacionadas ao assunto.

Finalmente, destaca-se que o método AUGMECON-BWM proposto neste trabalho contribui não só para a literatura acadêmica de pesquisas relacionadas aos veículos elétricos, mas também de outras linhas de pesquisa, uma vez que a mesma abordagem pode ser estabelecida, por exemplo, na identificação da melhor estratégia para a otimização da introdução de determinado produto ou tecnologia no mercado, considerando diferentes níveis de inserção, ou ainda, na definição de políticas públicas voltadas às áreas de energia, meio ambiente, transportes e saúde.

7.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como proposta para trabalhos futuros, são deixadas as seguintes sugestões:

1. Aplicar o método AUGMECON-BWM proposto nesta tese na avaliação da viabilidade de integração de veículos elétricos em todas as capitais brasileiras, de modo a obter uma visão completa da situação do país;
2. Incluir a lógica *fuzzy* na fase de julgamento dos critérios e alternativas do método AUGMECON-BWM proposto nesta pesquisa;
3. Avaliar o comportamento da participação dos veículos elétricos *plug-in* no mercado em relação à viabilidade econômica de aquisição de tais veículos em cidades norte-americanas, europeias e chinesas em diferentes anos, de forma a aprimorar as equações que relacionam tais valores;

4. Desenvolver um método para quantificar monetariamente os benefícios decorrentes da liberação do rodízio de veículos e da permissão de acesso às faixas exclusivas para compradores de veículos elétricos nas cidades onde ele é aplicado;
5. Elaborar um método para quantificar os benefícios financeiros da disponibilização de pontos de recarga gratuitos para os veículos elétricos;
6. Aplicar a abordagem desenvolvida neste trabalho no planejamento da instalação de futuras centrais termonucleares no país, de modo a determinar o nível de inserção mais adequado, tanto em localização e quantidade de usinas, quanto em capacidade instalada; e
7. Implementar a abordagem desenvolvida nesta pesquisa no planejamento da instalação de centrais solares de energia elétrica no Brasil, a fim de determinar o nível de inserção mais adequado desta tecnologia no país.

REFERÊNCIAS

- ABVE. **Imposto sobre a propriedade de veículos automotores para veículos elétricos**. Associação Brasileira do Veículo Elétrico. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/diversos/15/legislacao>>. Acesso em: 29 dez. 2016.
- AGARWAL, M.; KUMAR, N.; VIG, L. Non-additive multi-objective robot coalition formation. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 41, n. 8, jun. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- AHMAD, W. N. K. W. **Contextual factors of sustainable supply chain management practices in the oil and gas industry**. 2016. 187 f. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2016. Disponível em: <<https://pure.tudelft.nl/portal/>>. Acesso em: 30 nov. 2017.
- AHMAD, W. N. K. W. et al. Evaluation of the external forces affecting the sustainability of oil and gas supply chain using Best Worst Method. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 153, jun. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- ALONSO, D. R. **Explaining technology dominance in the standards battle between battery electric vehicles and hydrogen fuel cell electric vehicles by means of using the multi-criteria decision-making tool known as the Best Worst Method**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Faculty of Technology, Policy and Management, Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2017. Disponível em: <<https://pure.tudelft.nl/portal/>>. Acesso em: 04 dez. 2017.
- ALVIM, D. S. **Estudo dos principais precursores de ozônio na Região Metropolitana de São Paulo**. 2013. 161 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em: 29 mar. 2017.
- ANEEL. **Biblioteca virtual**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://biblioteca.aneel.gov.br/index.html>>. Acesso em: 02 mar. 2017.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. **Brazilian automotive industry yearbook 2017**. São Paulo: ANFAVEA, 2017a.
- ANFAVEA. **Produção, vendas e exportação de autoveículos**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. 2017b. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estat%C3%ADsticas.html>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- ANP. **Levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/levantamento-de-precos>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

ANSARI, Z. N.; KANT, R. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, n. 4, jan. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ARDILES, L. G. **Risco à saúde atribuído à poluição do ar e variáveis meteorológicas na Região Metropolitana de Curitiba**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

AUTOCAR. **Mitsubishi Outlander PHEV 2012-2015 performance**. Disponível em: <<http://www.autocar.co.uk/car-review/mitsubishi/outlander-phev-2012-2015/performance>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

BAKONYI, S. M. C. et al. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 38, n. 5, out. 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rsp/v38n5/21758.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 2012. 124 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. The introduction of electric vehicles in Brazil: impacts on oil and electricity consumption. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 80, n.5, p. 907-917, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BARNETT, A. G. et al. The effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular disease in elderly people in Australian and New Zealand cities. **Environmental Health Perspectives**, Bethesda, v. 114, n. 7, jul. 2006. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16835053>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BITTENCOURT, S. A. M. **Modelo para mensuração de desempenho de uma cadeia de suprimentos da indústria automotiva**. 2016. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

BLOOMBERG. **Gasoline prices around the world: the real cost of filling up**. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/graphics/gas-prices/#20162:United-States:USD:l>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

BOECK, L. D.; BELIËN, J.; EGYED, W. Dose optimization in high-dose-rate brachytherapy: a literature review of quantitative models from 1990 to 2010. **Operations Research for Health Care**, Amsterdam, v. 3, n. 2, jun. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BONGES III, H. A.; LUSK, A. C. Addressing electric vehicle (EV) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation. **Transportation Research Part A: Policy and**

Practice, Amsterdam, v. 83, jan. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BOOTAKI, B.; MAHDAVI, I.; PAYDAR, M. M. New criteria for configuration of cellular manufacturing considering product mix variation. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 98, ago. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BORBA, B. S. M. C. **Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro**. 2012. 166 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **1º inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventarionacional20110209.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

BRASIL. Lei n. 12.715, de 17 de setembro de 2012. Institui o Programa de incentivo à inovação tecnológica e adensamento da cadeia produtiva de veículos automotores. 2012.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil – 2. ed.** Brasília: MCTI, 2014a. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706227/Estimativasd.pdf/0abe2683-e0a8-4563-b2cb-4c5cc536c336>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013: ano-base 2012**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014b. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2017.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Fatores médios de emissão de CO₂**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#_ancora>. Acesso em: 31 mar. 2017.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Ministro Marcos Pereira lança Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/noticias/2447-ministro-marcos-pereira-lanca-rota-2030-mobilidade-e-logistica>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

BRUCHÊZ, A. et al. Metodologia de pesquisa de dissertações sobre inovação: análise bibliométrica. In: MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO, 15., 2015, Caxias do Sul. **Apresentações...** Caxias do Sul: UCS, 2015. Disponível em: < <http://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/mostraucspgga/xvmostrappga/schedConf/presentations> >. Acesso em: 26 abr. 2018.

BUBECK, S.; TOMASCHEK, J.; FAHL, U. Perspectives of electric mobility: total cost of ownership of electric vehicles in Germany. **Transport Policy**, Amsterdam, v. 50, ago. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

CAMBERO, C.; SOWLATI, T. Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 178, set. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

CARROS. **IPVA**. Carros na web. Disponível em: <<http://www.carrosnaweb.com.br/ipva.asp>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

CENTERPOINT. **TrueCost electric portal**. CenterPoint Energy. Disponível em: <<http://centerpointenergy.force.com/>>. Acesso em: 30 abr. 2016.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Plano de controle de poluição veicular 2014-2016**. São Paulo: CETESB, 2014.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016a.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016b.

CHIANDUSSI, G.; CODEGONE, M.; FERRERO, S.; VARESIO F. E. Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications. **Computers & Mathematics with Applications**, Amsterdam, v. 63, n. 5, mar. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

CHINA. Ministry of Industry and Information Technology. **Automobile fuel consumption**. Disponível em: <<http://chinaafc.miit.gov.cn/>>. Acesso em: 14 set. 2016.

CHINA AUTO WEB. **Chinese brands**. Disponível em: <<http://chinaautoweb.com/>>. Acesso em: 06 set. 2016.

CLARK, O. A. C.; CLARK, L. Risco ambiental nas grandes metrópoles brasileiras. **Jornal Brasileiro de Economia da Saúde**, São Paulo, v. 2, n. 1, mar. 2010. Disponível em: <<http://www.evidencias.com.br/pdf/publicacoes/04c546acc0e9c5edc5c6ba69e4af273e.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

COMMONWEALTH. **My bill & usage**. Commonwealth Edison Company. Disponível em: <<https://www.comed.com/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

CON EDISON. **About your bill & rates**. Consolidated Edison. Disponível em: <<https://www.coned.com/en/accounts-billing/your-bill>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

CUI, Y. et al. Review: multi-objective optimization methods and application in energy saving. **Energy**, Amsterdam, v. 125, abr. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DÄCHERT, K.; GORSKI, J.; KLAMROTH, K. An augmented weighted Tchebycheff method with adaptively chosen parameters for discrete bicriteria optimization problems. **Computers & Operations Research**, Amsterdam, v. 39, n. 12, dez. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DÄCHERT, K. **Adaptive parametric scalarizations in multicriteria optimization**. 2014. 246 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Matemática e Ciências Naturais, Universidade de Wuppertal, Wuppertal, Alemanha, 2014. Disponível em: <<http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/>>. Acesso em: 05 ago. 2017.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. Poluição do ar como causa de morbidade e mortalidade da população urbana. **Revista Ra'e Ga**, Curitiba, v. 15, 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/14249>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DATASUS. **Informações de saúde - TABNET**. Departamento de informática do SUS. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sih/cnv/niSP.def>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

DELUCCHI, M. A. et al. An assessment of electric vehicles: technology, infrastructure requirements, greenhouse-gas emissions, petroleum use, material use, lifetime cost, consumer acceptance and policy initiatives. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, Bethesda, v. 372, n. 2006, jan. 2014. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24298079>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DEMIR, E.; BEKTAŞ, T.; LAPORTE, G. The bi-objective pollution-routing problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 232, n. 3, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DENATRAN. **Frota de veículos - 2012**. Departamento Nacional de Trânsito. 2012. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/237-frota-veiculos>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

DENATRAN. **Frota de veículos - 2016**. Departamento Nacional de Trânsito. 2016. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016&*>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

DIAS, M. V. X. **Impacto no consumo de energia elétrica e nas emissões decorrente da introdução de carros elétricos na frota de automóveis**. 2013. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em: <<http://unifeiitajuba.phlnet.com.br/>>. Acesso em: 05 fev. 2017.

DIAS, M. V. X. et al. The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 65, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

DOST, F.; GEIGER, I. Value-based pricing in competitive situations with the help of multi-product price response maps. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v. 76, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

EAF0. **Vehicle stats**. European alternative fuels observatory. Disponível em: <<http://www.eafo.eu/vehicle-statistics/m1>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional 2016: ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

ESPÍRITO-SANTO, H.; DANIEL, F. Calcular e apresentar tamanhos do efeito em trabalhos científicos (1): as limitações do $p < 0,05$ na análise de diferenças de médias de dois grupos. **Revista Portuguesa de Investigação Comportamental e Social**, Coimbra, v. 1, n. 1, fev. 2015. Disponível em: <<http://rpics.ismt.pt/index.php/ISMT/article/view/14>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ESPÍRITO-SANTO, H.; DANIEL, F. Calcular e apresentar tamanhos do efeito em trabalhos científicos (2): guia para reportar a força das relações. **Revista Portuguesa de Investigação Comportamental e Social**, Coimbra, v. 3, n. 1, fev. 2017. Disponível em: <<http://rpics.ismt.pt/index.php/ISMT/article/view/48>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. **2016 vehicle buyer's guide**. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/vehicle_buyers_guide.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

ESTADOS UNIDOS. **Fuel economy**. Department of Energy. 2017a. Disponível em: <<http://fueleconomy.gov/>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

ESTADOS UNIDOS. **Alternative Fuels Data Center**. Department of Energy. 2017b. Disponível em: <<http://www.afdc.energy.gov/laws/state>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. **Fuel economy guide: model year 2017**. [S.l.], 2017c. Disponível em: <<https://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/guides/FEG2017.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

EUROSTAT. **Electricity prices by type of user**: 2016. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>>. Acesso em: 24 ago. 2016.

EVERSOURCE. **Billing & rates**. Eversource Energy. Disponível em: <<https://www.eversource.com/Content/ema-c/residential/my-account>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

EV RESEARCH. **Articles**. Electric vehicles research. 2013. Disponível em: <<http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/5060/shanghai-offers-extra-subsidies-for-electric-vehicles>>. Acesso em: 02 set. 2016.

EV SALES. **China**. 2013. Disponível em: <<http://ev-sales.blogspot.com.br/2013>>. Acesso em: 06 jan. 2018.

EV SALES. **China**. 2014. Disponível em: <<http://ev-sales.blogspot.com.br/2014>>. Acesso em: 06 jan. 2018.

EV SALES. **China**. 2015. Disponível em: <<http://ev-sales.blogspot.com.br/2015>>. Acesso em: 06 set. 2016.

EV SALES. **China**. 2016. Disponível em: <<http://ev-sales.blogspot.com.br/2016>>. Acesso em: 06 jan. 2018.

EV SALES. **China**. 2017. Disponível em: <<http://ev-sales.blogspot.com.br/2017>>. Acesso em: 06 jan. 2018.

ELECTRIC VEHICLE TRANSPORTATION CENTER - EVTC. **Electric vehicle life cycle cost assessment**. Cocoa: EVTC, 2014.

FARBER, S. et al. Assessing social equity in distance based transit fares using a model of travel behavior. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Amsterdam, v. 67, set. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

FAUVEL, C. et al. A flexible design methodology to solve energy management problems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Amsterdam, v. 97, abr. 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

FIPE. **Preço médio de veículos**. Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. Disponível em: <<http://veiculos.fipe.org.br/>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

FLORIDES, G. A.; CHRISTODOULIDES, P.; MESSARITIS, V. Reviewing the effect of CO₂ and the sun on global climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 26, out. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

FPL. **Rates and your bill**. Florida Power & Light Company. Disponível em: <<https://www.fpl.com/rates.html>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

FREITAS, C. U. et al. Poluição do ar em cidades brasileiras: selecionando indicadores de impacto na saúde para fins de vigilância. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 22, n.3, 2013. Disponível em: <<http://scielo.iec.gov.br/pdf/ess/v22n3/v22n3a09.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

FRIDSTRØM, L.; ØSTLI, V. The vehicle purchase tax as a climate policy instrument. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Amsterdam, v. 96, fev. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

GAS BUDDY. **Average prices by metro area**. Disponível em: <http://www.washingtongasprices.com/Prices_Nationally.aspx>. Acesso em: 20 abr. 2016.

GIL, A. B.; LÓPEZ, A. R&D determinants: accounting for the differences between research and development. **Research Policy**, Amsterdam, v. 43, n. 9, nov. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

GONG, D. et al. Interactive evolutionary algorithms with decision-maker's preferences for solving interval multi-objective optimization problems. **Neurocomputing**, Cham, v. 137, ago. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-31837-5_4>. Acesso em: 01 jun. 2018.

GOUVEIA, N. et al. Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 12, n. 1, mar. 2003. Disponível em: <<http://scielo.iec.gov.br/pdf/ess/v12n1/v12n1a04.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

GOUVEIA, N. et al. Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 12, dez. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v22n12/15.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HAN, C. et al. Association between ambient particulate matter and disorders of vestibular function. **Environmental Research**, Bethesda, v. 155, maio 2017. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28236785>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HAO, H. et al. China's electric vehicle subsidy scheme: rationale and impacts. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 73, out. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HARGREAVES, A. J. Representing the dwelling stock as 3D generic tiles estimated from average residential density. **Computers, Environment and Urban Systems**, Amsterdam, v. 54, nov. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HIGGINS, C. D.; MOHAMED, M.; FERGUSON, M. R. Size matters: how vehicle body type affects consumer preferences for electric vehicles. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Amsterdam, v. 100, jun. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HOU, C. et al. Energy management of plug-in hybrid electric vehicles with unknown trip length. **Journal of the Franklin Institute**, Amsterdam, v. 352, n. 2, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HU, X. B.; WANG, M.; PAOLO, E. D. Calculating complete and exact pareto front for multiobjective optimization: a new deterministic approach for discrete problems. **IEEE Transactions on Cybernetics**, New York City, v. 43, n. 3, jun. 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6343239/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HUANG, I. B.; KEISLER, J.; LINKOV, I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 409, n. 19, set. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

IBGE. **Censo demográfico: 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

IBGE. **Estimativas de população para 1º de julho de 2016**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2016/estimativa_tcu.shtm>. Acesso em: 21 mar. 2017.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION - ICCT. **Assessment of leading electric vehicle promotion activities in United States cities**. Washington: ICCT, 2015a.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION - ICCT. **Supporting the electric vehicle market in U.S. cities**. [Washington]: ICCT, 2015b.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION - ICCT. **Principles for effective electric vehicle incentive design**. [Washington]: ICCT, 2016a.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION - ICCT. **Comparison of leading electric vehicle policy and deployment in Europe**. [Berlin]: ICCT, 2016b.

IDAHO NATIONAL LABORATORY - INL. **EV project electric vehicle charging infrastructure summary report**. [S.l.]: INL, 2014.

IDAHO NATIONAL LABORATORY - INL. **Plug-in electric vehicle and infrastructure analysis**. Idaho Falls: INL, 2015.

INSIDE EVS. **Tesla roadblock in Shanghai?** 2014. Disponível em: <<http://insideevs.com/tesla-roadblock-shanghai/>>. Acesso em: 25 set. 2016.

INSIDE EVS. **Monthly plug-in sales scorecard**. 2018. Disponível em: <<http://insideevs.com/monthly-plug-in-sales-scorecard/>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

INTERNAL REVENUE SERVICE. **Plug-in electric drive vehicle credit**. 2017. Disponível em: <<https://www.irs.gov/businesses/plug-in-electric-vehicle-credit-irc-30-and-irc-30d>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama: IGES, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: anthropogenic and natural radiative forcing**. Geneva: IPCC, 2014b.

ISHIZAKA, A; NEMERY, P. **Multi-criteria decision analysis: methods and software**. 1. ed. Editora Wiley, 2013.

JAKOBSSON, N. et al. Are multi-car households better suited for battery electric vehicles? – driving patterns and economics in Sweden and Germany. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 65, abr. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

JEYADEVI, S. et al. Solving multiobjective optimal reactive power dispatch using modified NSGA-II. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Amsterdam, v. 33, n. 2, fev. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

JOŠEVSKI, M.; ABEL, D. Flatness-based model predictive control for the fuel optimization of hybrid electric vehicles. In: IFAC CONFERENCE ON NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL NMPC 2015, 5., 2015, Seville. **IFAC-PapersOnLine**.

Amsterdam, v. 48, n. 23, p. 464-470, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

KANAFI, A. G.; KHORRAM, E. A new scalarization method for finding the efficient frontier in non-convex multi-objective problems. **Applied Mathematical Modelling**, Amsterdam, v. 39, n. 23-24, dez. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

KÄLSCH, H. et al. Are air pollution and traffic noise independently associated with atherosclerosis: the Heinz Nixdorf recall study. **European Heart Journal**, Bethesda, v. 35, n.13, abr. 2014. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24194529>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

KIM, I. Y.; WECK, O. L. Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: a new method for Pareto front generation. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Cham, v. 31, n. 2, 2006. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-005-0557-6>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

KÖHN, H. F. A review of multiobjective programming and its application in quantitative psychology. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdam, v. 55, n. 5, out. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LADWP. **Electric rates**. Los Angeles department of water and power. Disponível em: <https://www.ladwp.com/ladwp/faces/ladwp/aboutus/a-financesandreports/a-fr-electricrates?_adf.ctrl-state=zmqioqazcy_4&_afzLoop=1879798990451097>. Acesso em: 10 abr. 2016.

LARSEN, M. T. The implications of academic enterprise for public science: an overview of the empirical evidence. **Research Policy**, Amsterdam, v. 40, n. 1, fev. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LETMATHE, P.; SUARES, M. A consumer-oriented total cost of ownership model for different vehicle types in Germany. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Amsterdam, v. 57, dez. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LI, B.; CHANG, X. Application of analytic hierarchy process in the planning of energy supply network for electric vehicles. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 12, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LI, J. et al. The falling tide algorithm: a new multi-objective approach for complex workforce scheduling. **Omega**, Amsterdam, v. 40, n. 3, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LI, R.; LEUNG, Y. Multi-objective route planning for dangerous goods using compromise programming. **Journal of Geographical Systems**, Cham, v. 13, n. 3, set. 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10109-010-0124-6>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LIMA, J. C.; LOURENÇO, E. M.; FILHO, M. M. Impacto da conexão de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

AUTOMÁTICA - CBA 2012, 19., 2012, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande, 2012. Disponível em: <<http://cba2012.dee.ufcg.edu.br/anais>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

LIN, Z. et al. Estimation of energy use by plug-in hybrid electric vehicles: validating Gamma distribution for representing random daily driving distance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Newbury Park, v. 2287, 2012. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2287-05>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LIN, Z.; DONG, J.; GREENE, D. L. Hydrogen vehicles: impacts of DOE technical targets on market acceptance and societal benefits. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdam, v. 38, n. 19, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

LUEKING, A. D.; COLE, M. W. Energy and mass balances related to climate change and remediation. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 590-591, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MALAK, F. F. A. et al. Applying decision-making techniques to civil engineering projects. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences**, Amsterdam, v. 6, n. 4, dez. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARINO, M. J. How often should we expect to be wrong? Statistical power, P values, and the expected prevalence of false discoveries. **Biochemical Pharmacology**, Bethesda, v. 151, maio 2018. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29248599>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MARKLINES. **CATARC report - october 2014: new energy vehicle trends in China**. 2014. Disponível em: <https://www.marklines.com/en/report_all/catarc003_201411>. Acesso em: 04 set. 2016.

MARTTUNEN, M.; LIENERT, J.; BELTON, V. Structuring problems for multi-criteria decision analysis in practice: a literature review of method combinations. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 263, n. 1, nov. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MAVROTAS, G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. **Applied Mathematics and Computation**, Amsterdam, v. 213, n. 2, jul. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MI, X. et al. Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 175, ago. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MOMBER, A. W. et al. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions. **Progress in Organic Coatings**, Amsterdam, v. 108, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

NARDOCCI, A. C. et al. Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 9, set. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v29n9/a25v29n9.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

NEGÓCIOS. **Mitsubishi PHEV**: Outlander elétrico-híbrido recarregável. 2014. Disponível em: <http://www.jornaldenegocios.pt/weekend/detalhe/mitsubishi_phev___outlander_electrico_hibrido_recarregavel>. Acesso em: 15 fev. 2017.

NETO, G. C. S. **Um método para solução de problemas de otimização multiobjetivo em ambiente fuzzy**. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Matemática, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2011. Disponível em: <<http://tede.ufam.edu.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

NATIONAL HOUSEHOLD TRAVEL SURVEY - NHTS. **Travel profile of the United States**. [S.l.]: NHTS, 2012.

NOORI, M.; GARDNER, S.; TATARI, O. Electric vehicle cost, emissions, and water footprint in the United States: development of a regional optimization model. **Energy**, Amsterdam, v. 89, set. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

NUVOLONE, D. et al. Short-term association between ambient air pollution and risk of hospitalization for acute myocardial infarction: results of the cardiovascular risk and air pollution in Tuscany (RISCAT) study. **American Journal of Epidemiology**, Bethesda, v. 174, n. 1, jul. 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21597098>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

OECD. **Purchasing power parities (PPP)**. Organisation for Economic Co-operation and Development. Disponível em: <<https://data.oecd.org/conversion/purchasing-power-parities-ppp.htm#indicator-chart>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

ORIOLO, A.; GANGI, A. D. Six-years-long effects of the Italian policies for photovoltaics on the pay-back period of grid-connected PV systems installed in urban contexts. **Energy**, Amsterdam, v. 122, mar. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ORLANDO, J. P. **Estudo dos precursores de ozônio da cidade de São Paulo através de simulação computacional**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

PAIVA, R. F. P. S. O custo da poluição atmosférica na cidade de Volta Redonda. In: CONGRESO DE MEDIO AMBIENTE, 7., 2012, La Plata. **Actas 7mo congreso de medio**

ambiente AUGM... La Plata: UNLP, 2012. p. 1-28. Disponível em: <<http://www.congresos.unlp.edu.ar/index.php/CCMA/7CCMA/paper/viewFile/881/200>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

PARRY, K. et al. Qualitative and historiometric methods in leadership research: a review of the first 25 years of *The Leadership Quarterly*. **The Leadership Quarterly**, Amsterdam, v. 25, n. 1, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PASAOGLU, G. et al. Travel patterns and the potential use of electric cars – results from a direct survey in six European countries. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 87, set. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PAULA, G. A. **Modelos de regressão com apoio computacional**. São Paulo: USP, 2013. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~giapaula/texto_2013.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2018.

PEARRE, N. S. et al. Electric vehicles: how much range is required for a day's driving? **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 19, n. 6, dez. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PEPCO. **Choices and rates**. Potomac Electric Power Company. Disponível em: <<http://www.pepco.com/Choices-and-Rates.aspx>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

PEREIRA, B. B.; LIMONGI, J. E. Epidemiologia de desfechos na saúde humana relacionados à poluição atmosférica no Brasil: uma revisão sistemática. **Cadernos Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cadsc/v23n2/1414-462X-cadsc-23-2-91.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PG&E. **Rate plans**. Pacific Gas and Electric Company. Disponível em: <<https://www.pge.com/>>. Acesso em: 09 abr. 2016.

PLAS, C. V. D. **Evolutionary multi-objective optimization and preference modeling in green logistics**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Erasmus School of Economics, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam, Holanda, 2012. Disponível em: <<https://thesis.eur.nl/pub/>>. Acesso em: 06 set. 2017.

PORTAL BRASIL. **Caderneta de poupança**. Disponível em: <https://www.portalbrasil.net/poupanca_mensal.htm>. Acesso em: 11 mar. 2017.

POULLIKKAS, A. Sustainable options for electric vehicle technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 41, jan. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

POURABDOLLAH, M. et al. Effect of driving, charging, and pricing scenarios on optimal component sizing of a PHEV. **Control Engineering Practice**, Amsterdam, v. 61, abr. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PSC. **Utility bill calculator**. Georgia Public Service Commission. Disponível em: <<http://www.psc.state.ga.us/Default.aspx>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

RAMACHANDRA, T. V.; AITHAL, B. H.; SREEJITH, K. GHG footprint of major cities in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 44, abr. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, Amsterdam, v. 53, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model. **Omega**, Amsterdam, v. 64, out. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei n. 2.877, de 22 de dezembro de 1997. Dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA). 1997.

RODRIGUEZ, G. H. **Multiobjective optimization of natural gas transportation networks**. 2011. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos e Meio Ambiente) – Institut National Polytechnique de Toulouse, Universidade de Toulouse, Toulouse, França, 2011. Disponível em: <<http://oatao.univ-toulouse.fr/>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdam, v. 15, n. 3, jun. 1977. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SAATY, T. L. **Decision making with dependence and feedback: the analytic network process**. 1. ed. Pittsburgh: RWS Publications, 1996.

SAFARI, J. Multi-objective reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies. **Reliability Engineering & System Safety**, Amsterdam, v. 108, dez. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SALIMI, N.; REZAEI, J. Evaluating firms' R&D performance using best worst method. **Evaluation and Program Planning**, Bethesda, v. 66, fev. 2018. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29091790>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SALOMON, V. A. P. AHP. In: MARINS, F. A. S. et al. **Métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios: aplicações na indústria aeroespacial**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. cap. 1.

SAMANLIOGLU, F. A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 226, n. 2, abr. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. **Metodologia de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 164, out. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SÃO PAULO (Estado). Lei n. 13.296, de 23 de dezembro de 2008. Estabelece o tratamento tributário do imposto sobre a propriedade de veículos automotores - IPVA. 2008.

SÃO PAULO (Município). Lei n. 15.997, de 27 de maio de 2014. Estabelece a política municipal de incentivo ao uso de carros elétricos ou movidos a hidrogênio, e dá outras providências. 2014.

SAZVAR, Z. et al. A bi-objective stochastic programming model for a centralized green supply chain with deteriorating products. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 150, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SCHROEDER, A.; TRABER, T. The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 43, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SEATTLE. **Rates**. Seattle City Light. Disponível em: <<http://www.seattle.gov/light/>>. Acesso em: 06 abr. 2016.

SHABASHEVICH, A. et al. Analysis of powertrain design on effective waste heat recovery from conventional and hybrid electric vehicles. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 157, nov. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SHAFIEI, E. et al. Energy, economic, and mitigation cost implications of transition toward a carbon-neutral transport sector: a simulation-based comparison between hydrogen and electricity. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 141, jan. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SHAH, A. S. V. et al. Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis. **The Lancet**, Bethesda, v. 382, set. 2013. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23849322>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SHAMPINE, L. F.; THOMPSON, S. Moving averages of solutions of ODEs. **Applied Mathematics and Computation**, Amsterdam, v. 193, n. 1, out. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SHOJAEI, P.; HAERI, S. A. S.; MOHAMMADI, S. Airports evaluation and ranking model using Taguchi loss function, best-worst method and VIKOR technique. **Journal of Air Transport Management**, Amsterdam, v. 68, maio 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SILVA, J. M. C. S.; TENREYRO, S. On the existence of the maximum likelihood estimates in Poisson regression. **Economics Letters**, Amsterdam, v. 107, n. 2, maio 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SILVA, R. E. **Análise do impacto da política estadual de mudanças climáticas no estado de São Paulo**: estudo de caso no setor industrial e perspectivas futuras. 2012. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

SILVIA, C.; KRAUSE, R. M. Assessing the impact of policy interventions on the adoption of plug-in electric vehicles: an agent-based model. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 96, set. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SINUFF, T.; COOK, D. J.; GIACOMINI, M. How qualitative research can contribute to research in the intensive care unit. **Journal of Critical Care**, Bethesda, v. 22, n. 2, jun. 2007. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17548020>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SOUSA, S. I. V. et al. Short-term effects of air pollution on respiratory morbidity at Rio de Janeiro — part II: health assessment. **Environment International**, Bethesda, v. 43, ago. 2012. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22446713>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SØRENSEN, M. et al. Road traffic noise and stroke: a prospective cohort study. **European Heart Journal**, Bethesda, v. 32, n.6, mar. 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21266374>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

STEPONAVIČĖ, I. et al. A solution process for simulation-based multiobjective design optimization with an application in the paper industry. **Computer-Aided Design**, Amsterdam, v. 47, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

STEVANOVIC, A. et al. Multi-criteria optimization of traffic signals: mobility, safety, and environment. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 55, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

STRANTZALI, E.; ARAVOSSIS, K. Decision making in renewable energy investments: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 55, mar. 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SULAIMAN, N. et al. A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: issues and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 52, dez. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

THE WORLD BANK; DRC. **Urban China**: toward efficient, inclusive, and sustainable urbanization. Washington, 2014.

TOYOTA. **Modelos**. Disponível em: <<http://www.toyota.com.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

TRADING ECONOMICS. **Indicators**. Disponível em: <<http://www.tradingeconomics.com/>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Petroleum & other liquids**. 2017. Disponível em: <http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_gnd_a_epmr_pte_dpgal_a.htm>. Acesso em: 08 fev. 2017.

VAF AEI, N.; RIBEIRO, R. A.; MATOS, L. M. C. Normalization techniques for multi-criteria decision making: analytical hierarchy process case study. In: DOCTORAL CONFERENCE ON COMPUTING, ELECTRICAL AND INDUSTRIAL SYSTEMS 2016, 7., 2016, Costa de Caparica. **Technological Innovation for Cyber-Physical Systems**. New York City, v. 470, IFIP AICT series, p. 261-269, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

VELDHUIZEN, D. A. V.; LAMONT, G. B. Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art. **Evolutionary Computation**, Bethesda, v. 8, n. 2, 2000. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10843518>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

VIEIRA, M.; VARELA, T. P.; PÓVOA, A. P. B. Production and maintenance planning optimisation in biopharmaceutical processes under performance decay using a continuous-time formulation: a multi-objective approach. **Computers & Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 107, dez. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

VILLANUEVA, D.; FEIJÓO, A. Comparison of logistic functions for modeling wind turbine power curves. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 155, fev. 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

WANG, S.; LI, J.; ZHAO, D. The impact of policy measures on consumer intention to adopt electric vehicles: evidence from China. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Amsterdam, v. 105, nov. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

WĄTRÓBSKI, J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "GREEN CITIES - GREEN LOGISTICS FOR GREENER CITIES", 2., 2016, Szczecin, Poland. **Transportation Research Procedia**. v. 16, p. 537-552, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

WONG, C. Y.; GOH, K. L. Growth behavior of publications and patents: a comparative study on selected Asian economies. **Journal of Informetrics**, Amsterdam, v. 4, n. 4, out. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

WU, Y. et al. Energy consumption and CO₂ emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 48, set. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

XINSHENG. **News center**. Xinsheng Auto. 2014. Disponível em: <<http://english.xinshengauto.com/news/html/?392.html>>. Acesso em: 05 set. 2016.

ZEEV. **Veículos**. Zeev - mobility for people. Disponível em: <<http://www.zeev.pt/carros-eletricos/mitsubishi/outlander-phev/>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

ZOU, P. X. W. et al. A mixed methods design for building occupants' energy behavior research. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 166, maio 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ZYOUNG, S. H.; HANUSCH, D. F. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 78, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

APÊNDICE A – Distância percorrida em cada modo de operação nos veículos PHEV

A economia obtida com o uso de veículos PHEV, incluindo os EREV, é minimizada ou incrementada em função do perfil de utilização do veículo pelo consumidor. Em particular, veículos com baterias de maior capacidade e que percorrem distâncias diárias inferiores à autonomia das baterias, obtêm um melhor retorno financeiro, uma vez que, nesta situação, os veículos tendem a operar maiores distâncias no modo *charge depleting*. Desta forma, a distância diária total percorrida por um veículo PHEV, que varia aleatoriamente de um dia para o outro, juntamente com a autonomia das baterias do veículo, são parâmetros importantes que influenciam no cálculo da viabilidade econômica de aquisição de um veículo PHEV.

Diversas distribuições de probabilidade têm sido utilizadas para representar a distância diária percorrida por veículos leves. Em particular, as distribuições mais empregadas são a distribuição Gama (HOU et al., 2015; LIN; DONG; GREENE, 2013), a distribuição Weibull (POURABDOLLAH et al., 2016) e a distribuição Log-normal (FARBER et al., 2014; JAKOBSSON et al., 2016).

Estudos realizados por Lin et al. (2012) compararam as distribuições Gama, Weibull e Log-normal para utilização em pesquisas envolvendo a distância diária percorrida de veículos PHEV. Foram utilizados dados reais de distância diária percorrida de 382 veículos convencionais, monitorados durante 18 meses na região metropolitana de Seattle, nos Estados Unidos. Como resultado, concluíram que a distribuição Gama é a que mais se aproxima do perfil de distância percorrida da maioria dos veículos monitorados, e por este motivo é a distribuição adotada nesta tese.

A função densidade de probabilidade da distribuição Gama é dada por (HARGREAVES, 2015):

$$f(x; k, \theta) = \frac{1}{\theta^k \Gamma(k)} x^{k-1} e^{-x/\theta} \quad \text{para } x > 0 \text{ e } k, \theta > 0 \quad (\text{A.1})$$

sendo,

x : a variável aleatória

k : o parâmetro de forma

θ : o parâmetro de escala

$\Gamma(k)$: a função Gama avaliada em k

A função de distribuição acumulada da distribuição Gama é dada por (HARGREAVES, 2015):

$$F(x; k, \theta) = \frac{\gamma(k, x/\theta)}{\Gamma(k)} \quad (\text{A.2})$$

sendo,

$$\gamma: \text{ a função Gama incompleta, definida como } \gamma(k, x/\theta) = \int_0^{x/\theta} t^{k-1} e^{-t} dt$$

O *valor esperado* e a *moda* de uma variável aleatória x que é representada por uma distribuição Gama são obtidos a partir das seguintes equações:

$$E(x) = k\theta \quad (\text{A.3})$$

$$Mo(x) = (k - 1) \cdot \theta \quad \text{para } k > 1 \quad (\text{A.4})$$

Quando a distância diária percorrida por um veículo é representada por uma distribuição Gama, as variáveis e parâmetros das equações (A.1) a (A.4) têm os seguintes significados:

x : é a distância diária percorrida [mi/dia de uso] (variável aleatória)

$E(x)$: é a média da distância diária percorrida em um ano [mi/dia de uso] (valor esperado)

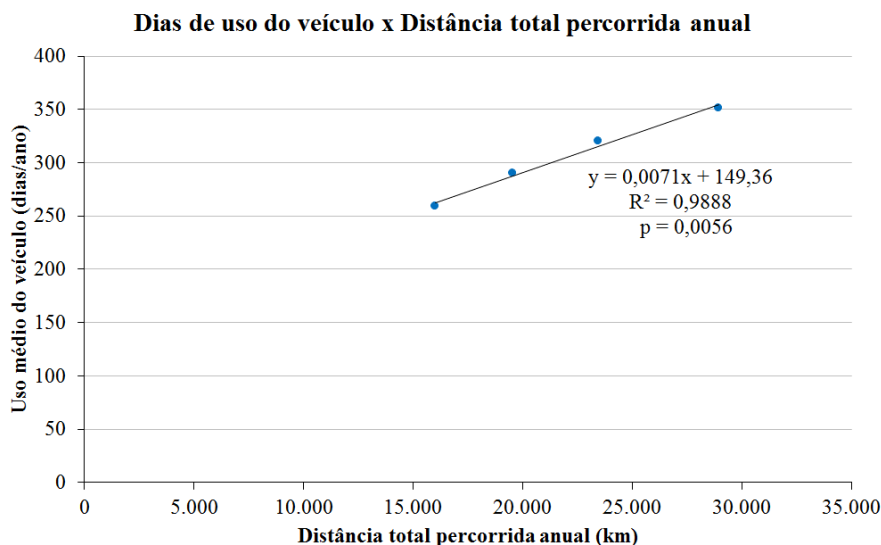
$Mo(x)$: é o valor mais frequente da distância diária percorrida em um ano [mi/dia de uso] (moda)

Considerando uma distância total percorrida anual (DTA) de 20.000 km por veículo (CETESB⁴⁶, 2009 apud DIAS et al., 2014; NHTS, 2012; PASAOGLU et al., 2014; WU et al., 2012), estima-se o número médio de dias que o veículo é utilizado no período de um ano, utilizando para tal a equação apresentada na Figura A.1 (PEARRE et al., 2011), sendo que o valor obtido é de 291,36 dias de uso por ano. Assim, a média da distância diária percorrida em um ano, $E(x)$, é de 68,64 km/dia de uso.

A Tabela A.1 apresenta uma análise de sensibilidade dos valores do parâmetro de forma (k), parâmetro de escala (θ), percentual da distância total percorrida anual no modo *charge depleting* (d_{CD}) e percentual da distância total percorrida anual no modo *charge sustaining* (d_{CS}) em função de valores distintos de moda da distância diária percorrida (Mo) para diferentes veículos fabricados nos Estados Unidos, Europa e China nos anos de 2014 e 2017.

⁴⁶ CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2008**. São Paulo: Littera Conteúdos Editoriais, 2009. 340 p.

Figura A.1 - Número médio de dias que o veículo é utilizado no ano em função da distância total percorrida anual



Fonte: Produção do próprio autor, utilizando dados de Pearre et al. (2011)

Tabela A.1 - Análise de sensibilidade para determinação do percentual da distância total percorrida anual em cada modo de operação

	Símbolo	Análise de sensibilidade em função da moda da distância diária					Média aritmética
		Mo=10 km	Mo=15 km	Mo=20 km	Mo=25 km	Mo=30 km	
Parâmetro de forma ¹	k	1,17	1,28	1,41	1,57	1,78	-
Parâmetro de escala ²	θ	36,42	33,32	30,21	27,11	24,00	-
Autonomia da bateria do veículo							
Chevrolet Volt 2014 (km) ³		61,18	61,18	61,18	61,18	61,18	-
Toyota Prius PHV 2014 (km) ³		17,71	17,71	17,71	17,71	17,71	-
Mitsubishi Outlander PHEV 2014 (km) ⁴		41,06	41,06	41,06	41,06	41,06	-
BYD Qin 2014 (km) ⁵		70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	-
Toyota Prius Plug-in 2017 (km) ³		40,25	40,25	40,25	40,25	40,25	-
Operação no modo <i>charge depleting</i> ⁶							
	d_{CD}						
Chevrolet Volt 2014		61%	62%	64%	65%	67%	64%
Toyota Prius PHV 2014		23%	24%	24%	24%	25%	24%
Mitsubishi Outlander PHEV 2014		47%	48%	49%	50%	51%	49%
BYD Qin 2014		66%	68%	69%	71%	72%	69%
Toyota Prius Plug-in 2017		46%	47%	48%	49%	50%	48%
Operação no modo <i>charge sustaining</i> ⁶							
	d_{CS}						
Chevrolet Volt 2014		39%	38%	36%	35%	33%	36%
Toyota Prius PHV 2014		77%	76%	76%	76%	75%	76%
Mitsubishi Outlander PHEV 2014		53%	52%	51%	50%	49%	51%
BYD Qin 2014		34%	32%	31%	29%	28%	31%
Toyota Prius Plug-in 2017		54%	53%	52%	51%	50%	52%

Fonte: Produção do próprio autor.

¹ Nota: Utilizando as equações (A.3) e (A.4), tem-se: $k = E(x) / [E(x) - Mo(x)]$.

² Nota: Utilizando as equações (A.3) e (A.4), tem-se: $\theta = E(x) - Mo(x)$.

³ Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017a).

⁴ Fonte: AUTOCAR (2017).

⁵ Fonte: CHINA AUTO WEB (2016).

⁶ Nota: Cálculo utilizando a função de distribuição acumulada da distribuição Gama.

Os valores apresentados na última coluna da Tabela A.1 são adotados neste trabalho.

APÊNDICE B – Exemplo da estrutura de programação do modelo BWM linear

MODEL:

!Modelo BWM linear para cálculo dos desempenhos normalizados das 31 alternativas da cidade de São Paulo em relação ao subcritério qualitativo T3;

!DEFINIÇÃO DOS CONJUNTOS DO MODELO;

SETS:

!Estabelece a quantidade de 10 alternativas para os níveis de inserção de 1, 3 e 5 %;

PONTO / 1..10/: aB_NI1, aB_NI3, aB_NI5, aNI1_W, aNI3_W, aNI5_W;

ENDSETS

!DADOS DE ENTRADA;

DATA:

!Preferência da melhor alternativa (B) em relação às alternativas de não-inserção, inserção leve, moderada e elevada;

aB0 = 1;

aB1 = 4;

aB3 = 7;

aB5 = 9;

!Preferência das alternativas de não-inserção, inserção leve, moderada e elevada em relação à pior alternativa (W);

a0W = 9;

a1W = 7;

a3W = 3;

a5W = 1;

ENDDATA

!ATRIBUIÇÃO DOS VALORES DOS DADOS DE ENTRADA NOS PARÂMETROS UTILIZADOS NAS RESTRIÇÕES DO MODELO BWM LINEAR;

aB_NI0 = aB0;

@FOR(PONTO(i): aB_NI1(i) = aB1);

@FOR(PONTO(i): aB_NI3(i) = aB3);

@FOR(PONTO(i): aB_NI5(i) = aB5);

aNI0_W = a0W;

@FOR(PONTO(i): aNI1_W(i) = a1W);

@FOR(PONTO(i): aNI3_W(i) = a3W);

@FOR(PONTO(i): aNI5_W(i) = a5W);

!FUNÇÃO OBJETIVO DO MÉTODO BWM LINEAR;

[OBJETIVO] MIN = csiL;

!RESTRIÇÕES DO MÉTODO BWM LINEAR;

@abs(wB - aB_NI0 * wNI0) <= csiL;

@FOR(PONTO(i): @abs(wB - aB_NI1(i) * wNI1) <= csiL);

@FOR(PONTO(i): @abs(wB - aB_NI3(i) * wNI3) <= csiL);

@FOR(PONTO(i): @abs(wB - aB_NI5(i) * wNI5) <= csiL);

@abs(wNI0 - aNI0_W * wW) <= csiL;

```

@FOR ( PONTO(i) : @abs(wNI1 - aNI1_W(i) * wW) <= csiL);
@FOR ( PONTO(i) : @abs(wNI3 - aNI3_W(i) * wW) <= csiL);
@FOR ( PONTO(i) : @abs(wNI5 - aNI5_W(i) * wW) <= csiL);

wNI0 + @SIZE(PONTO) * wNI1 + @SIZE(PONTO) * wNI3 + @SIZE(PONTO) * wNI5 =
1;

!RESTRICÇÕES DE NÃO-NEGATIVIDADE;
wNI0 >= 0;
wNI1 >= 0;
wNI3 >= 0;
wNI5 >= 0;

!DEFINIÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA E DA PIOR ALTERNATIVA;
wB = wNI0; !Define que a melhor alternativa é a relacionada à não-
inserção de veículos elétricos na frota;
wW = wNI5; !Define que a pior alternativa é a relacionada à inserção
elevada de veículos elétricos na frota;

END

```


APÊNDICE C – Produção bibliográfica

- Publicações em periódicos:

SILVA, R. E.; SOBRINHO, P. M.; SOUZA, T. M. How can energy prices and subsidies accelerate the integration of electric vehicles in Brazil? An economic analysis. **The Electricity Journal**, Amsterdam, v. 31, n. 3, abr. 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>.

- Submissões em periódicos:

SILVA, R. E.; SOBRINHO, P. M.; SOUZA, T. M. Electric vehicles in the United States and Europe: economic and market integration analyses. **Energy Policy**. Submetido em ago. 2018.

- Publicações em congressos:

SILVA, R. E.; SOBRINHO, P. M.; SOUZA, T. M. How can energy prices and subsidies leverage the integration of electric vehicles in brazil? An economic analysis. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE 2017, 12., 2017, Mar del Plata. **Proceedings and Book of Abstracts of The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2017...** Mar del Plata, 2017. Disponível em: <<http://www3.fi.mdp.edu.ar/clagtee/2017/book.html>>.

ANEXO A – Características técnicas de veículos automotores

As características técnicas de alguns modelos de veículos ICEV e HEV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017 são apresentadas na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Características técnicas de alguns modelos de veículos ICEV e HEV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017

Modelo	Transmissão	Motor	Cilindros	Tecnologia	Autonomia (km)	Autonomia específica (km/l)
Toyota Prius	AV	1.8L	4	HEV	947	22,12
Honda Accord Hybrid	AV	2.0L	4	HEV	1.220	20,42
Ford Fusion Hybrid FWD	AV	2.0L	4	HEV	947	17,87
Hyundai Sonata Hybrid	AM-6	2.0L	4	HEV	1.191	17,01
Toyota Camry Hybrid LE	AV	2.5L	4	HEV	1.095	17,01
Honda Civic	AV	1.5L	4	ICEV	718	15,31
Chevrolet Cruze	A-S6	1.4L	4	ICEV	750	14,46
Nissan Versa	AV-S7	1.6L	4	ICEV	617	13,61
Toyota Corolla	AV	1.8L	4	ICEV	679	13,61
Ford Fiesta FWD	AM-S6	1.6L	4	ICEV	618	13,19
Ford Focus FWD	A-S6	1.0L	3	ICEV	618	13,19
Fiat 500	A-6	1.4L	4	ICEV	489	12,34
Volkswagen Golf	A-S6	1.8L	4	ICEV	617	12,34
Hyundai Sonata	A-S6	2.0L	4	ICEV	774	11,06
Ford Fusion FWD	A-S6	2.0L	4	ICEV	663	10,63

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017c)

As características técnicas de alguns modelos de veículos BEV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017 são apresentadas na Tabela A.3.

Tabela A.3 - Características técnicas de alguns modelos de veículos BEV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017

Modelo	Motor (kW)	Tipo de bateria	Autonomia (km)	Autonomia específica (km/kWh)	Tempo de recarga em 240 V (horas)
Tesla Model S AWD - 100D	193 + 193	Li-Ion	539	4,88	4,8 / 12
Tesla Model 3 Long Range	192	Li-Ion	499	5,96	8,5 / 12
Tesla Model S (75 kWh)	285	Li-Ion	401	4,74	4,8 / 12
Chevrolet Bolt EV	150	Li-Ion	383	5,75	9,3
BYD e6	75	Li-Ion	301	3,43	5
Volkswagen e-Golf	100	Li-Ion	201	5,75	5,3
Ford Focus Electric	107	Li-Ion	185	5,19	5,5
Nissan Leaf	80	Li-Ion	172	5,37	6
Kia Soul Electric	81	Li-Ion	150	5,03	4
Honda Clarity EV	120	Li-Ion	143	5,37	4
Fiat 500e	82	Li-Ion	135	5,37	4
BMW i3 BEV (60 Ah)	125	Li-Ion	130	5,96	4
Mitsubishi i-MiEV	49	Li-Ion	95	5,37	7

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017c)

Na Tabela A.4 são exibidas as características técnicas de alguns modelos de veículos PHEV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017.

Tabela A.4 - Características técnicas de alguns modelos de veículos PHEV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017

Modelo	Transmissão	Motores	Cilindros	Autonomia		Autonomia específica		
				Somente no modo CD (km)	Total (km)	Gasolina (km/l)	Energia (km/kWh)	Modo CS
Toyota Prius Prime	AV	1.8L 16 e 37 kW	4	40	1.030	22,97	-	6,44
BMW i3 REX	A-1	0.6L 125 kW	2	156	290	14,89	-	5,37
Chevrolet Volt	AV	1.5L 48 e 87 kW	4	85	676	17,87	-	5,19
Hyundai Sonata Plug-in Hybrid	AM-6	2.0L 50 kW	4	43	950	16,59	-	4,74
Ford Fusion Energi Plug-In Hybrid	AV	2.0L 68 kW	4	35	982	17,87	-	4,60
Ford C-MAX Energi Plug-In Hybrid	AV	2.0L 68 kW	4	32	918	16,59	-	4,60
BMW i8	A-6	1.5L 96 kW	3	24	531	11,91	425,36	3,74
Mercedes-Benz C350e	A-7	2.0L 60 kW	4	14	660	12,76	212,68	2,88
Volvo XC90 AWD PHEV	A-S8	2.0L 34 e 65 kW	4	23	564	10,63	425,36	2,68
Mercedes-Benz GLE550e 4matic	A-7	3.0L 85 kW	6	19	741	8,93	141,79	2,33

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017c)

Na Tabela A.5 são exibidas as características técnicas de alguns modelos de veículos FCV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017.

Tabela A.5 - Características técnicas de alguns modelos de veículos FCV comercializados nos Estados Unidos no ano de 2017

Modelo	Tipo de célula de combustível	Motor (kW)	Tipo de bateria	Combustível	Autonomia (km)
Toyota Mirai	Membrana de eletrólito polimérico	113	Ni-MH	Hidrogênio	502
Honda Clarity	Membrana de eletrólito polimérico	130	Li-Ion	Hidrogênio	589
Hyundai Tucson Fuel Cell	Membrana de eletrólito polimérico	100	Li-Ion	Hidrogênio	427

Fonte: ESTADOS UNIDOS (2017c)