



MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VEÍCULOS LEVES COMO ALTERNATIVA EM FROTAS DE COMPARTILHAMENTO

Rafael Freitas Funcia Lemme

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda
Laura Silvia Bahiense da Silva
Leite

Rio de Janeiro
Maio de 2018

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VEÍCULOS LEVES
COMO ALTERNATIVA EM FROTAS DE COMPARTILHAMENTO

Rafael Freitas Funcia Lemme

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

Examinada por:

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MAIO DE 2018

Lemme, Rafael Freitas Funcia

Modelo de Otimização para Avaliação de Veículos Leves como Alternativa em Frotas de Compartilhamento / Rafael Freitas Funcia Lemme. – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2018.

XI, 126 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia de Produção, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 93 – 112.

1. Veículo elétrico. 2. Otimização. 3. Mobilidade sustentável. 4. Compartilhamento de veículos. I. Arruda, Edilson Fernandes de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

À memória do professor Rogério

Valle

*”As grandes conquistas da
humanidade foram obtidas
conversando, e as grandes falhas pela
falta de diálogo.”*

Stephen Hawking (1942 - 2018)

Agradecimentos

À Enel Brasil, por meio de Paulo Maisonnave e Helena do Valle, que fizeram o possível para viabilizar a aplicação ao projeto VAMO e inspiraram a pesquisa. À consultoria Catavento, especialmente à Clarissa Lins, que iniciou o contato com a Enel e contribuiu em diversos momentos do trabalho adicionando conhecimento e motivação. E ao CNPq (e à sociedade brasileira), pelo suporte financeiro, que garantiu 2 anos de estudo.

Aos meus orientadores, Edílson e Laura, pelo acolhimento em um momento delicado e os ensinamentos passados. Foram capazes de me transformar em pouco tempo e serei sempre grato. Ao professor Rogério Valle (*in memoriam*), orientador em espírito, que me colocou nessa trajetória. Cada minuto valeu a pena e a única tristeza é terem sido poucos.

A familiares, que compreenderam momentos de ausência. Em especial meus sogros, Ana e Gonçalo, que além de tudo deram apoio e energia todo esse tempo.

A todos os amigos, que aqui não teria espaço para citar. Pelas cervejas, conversas e peladas que tanto ajudam no equilíbrio pessoal/profissional. BD e seu churrasco, a família que chegou na hora certa; Caruso, sempre especial e trazendo os Seleccionáveis, presentes até altas horas; Peladeiros de terça e Quinta; Sageanos e a segunda família durante a semana; André, Vítor, Paçoca, Filipe e todo o pessoal da rua, que de tanto me conhecerem não me deixam mudar a essência; Putianos Friburgo, Juan, Caruso e Douglas e os debates que quase interromperam o mestrado; companheiros inseparáveis de maracanã; e Nina, que me colocou no SAGE e cumpriu a promessa de garantir que o mestrado fosse um período divertido e agradável.

Aos meus pais, individualmente. Minha mãe Sônia, que apoiou sempre que preciso, oferecendo tudo que podia para me ajudar. Meu pai Celso, que transcendeu todos os papéis que alguém pode ter na vida do outro, acumulando funções de professor, conselheiro e até motorista à de pai, sempre muito bem exercida. Sem ele este documento jamais existiria.

À minha esposa Camila, companheira eterna que a vida me deu e que eu jamais seria capaz de desejar tão especial. É a união de todos os agradecimentos anteriores: a compreensão com a ausência, a amizade que alivia os problemas e principalmente o companheirismo nas horas boas e difíceis.

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

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VEÍCULOS LEVES COMO ALTERNATIVA EM FROTAS DE COMPARTILHAMENTO

Rafael Freitas Funcia Lemme

Maio/2018

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Programa: Engenharia de Produção

Os inúmeros desafios ambientais do setor de transportes requerem estudos que avaliem alternativas para mobilidade. Nesse sentido, esta dissertação foca nos veículos leves para o transporte de passageiros, propondo e aplicando um modelo conceitual para estimar a composição ótima de frotas em projetos de pequena escala de compartilhamento de carros. A otimização tem como alvo base a ótica econômica do operador do sistema. Como diferencial, o modelo introduz parâmetros não econômicos e a ótica de outras partes interessadas, além de avaliar diferentes horizontes temporais, por meio da inclusão do princípio de Valor Compartilhado. O modelo é aplicado ao projeto VAMO, estruturado pelas empresas Serttel, operadora do sistema, e Enel, distribuidora de energia. Como o foco do VAMO são veículos 100% elétricos, essa tecnologia é incluída como principal alternativa aos convencionais, junto com os híbridos. Com isso, o modelo consegue desenvolver uma abordagem alternativa, que pode ser aprimorada, servindo como base para estudo futuros. A aplicação ao VAMO mostra que a infraestrutura existente e a tecnologia de propulsão bem estabelecida dos veículos convencionais são vantagens econômicas desses carros e as principais barreiras para os elétricos. Os veículos a etanol surgem como uma alternativa equilibrada entre custos e emissões, mas os elétricos apresentam um desempenho destacado na dimensão ambiental, considerando emissões de gases do efeito estufa (GEEs) e poluentes locais. Os resultados obtidos sugerem que as diferentes tecnologias terão um papel na transição do mercado de veículos leves para um futuro mais sustentável da mobilidade urbana.

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

OPTIMIZATION MODEL TO ASSESS LIGHT DUTY VEHICLES AS AN ALTERNATIVE IN CAR SHARING FLEETS

Rafael Freitas Funcia Lemme

May/2018

Advisors: Edilson Fernandes de Arruda

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Department: Production Engineering

The numerous environmental challenges of the transport sector require studies that evaluate alternatives to urban mobility. In this sense, this research focuses on light duty vehicles (LDVs) for passenger transportation, proposing and applying a conceptual model to estimate the optimum composition of fleets in small-scale car sharing projects. The optimization is based on the economic perspective of the system operator. As a differential, the model introduces non-economic parameters, the perspective of other stakeholders and the evaluation of different time horizons, by applying the principle of Shared Value. The model is applied to the VAMO project, operated by Serttel and with Enel Brasil as the energy distributor. As VAMO's focus is on 100% electric vehicles (EVs), this technology is included as the main alternative to conventional cars, along with hybrids. That way, the model can develop an alternative approach, which can be improved, serving as a basis for future studies. The application to VAMO shows that existing infrastructure and well-established propulsion technology of conventional vehicles are economic advantages of these cars and the main barriers to the electric ones. Ethanol vehicles emerge as a balanced alternative between costs and emissions, but EVs have a prominent performance in the environmental dimension, considering emissions of greenhouse gases (GHGs) and local pollutants together. The results suggest that different technologies will play a role in the transition from the LDV market to a more sustainable future for urban mobility.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
2 Referencial Teórico	8
2.1 Otimização de projetos de compartilhamento	9
2.2 Modelos de apoio à tomada de decisão em sustentabilidade	12
2.3 Veículos elétricos (VEs)	14
2.3.1 Mobilidade elétrica	15
2.3.2 Estudos sobre avaliação comparativa dos VEs	17
3 Método	20
3.1 Funções objetivo	21
3.2 Variáveis de decisão	22
3.3 Parâmetros econômicos	23
3.3.1 Taxa de desconto (TX), horizonte de projeto (HP) e prestações mensais equivalentes (PMT)	24
3.3.2 Custo de aquisição dos veículos (AQ)	27
3.3.3 Autonomia (AU)	27
3.3.4 Investimentos em infraestrutura (IN)	28
3.3.5 Custos de manutenção dos veículos e operação do sistema (CM)	29
3.4 Parâmetros ambientais	31
3.4.1 Emissões de GEEs (GE e CG)	32
3.4.2 Poluentes locais (PL)	34
3.5 Restrições	36
3.6 Cenários	40
3.6.1 Cenário referência	41
3.6.2 Políticas econômicas	41
3.6.3 Políticas ambientais	42
3.6.4 Parâmetros de projeto	43

3.6.5	União de cenários	44
4	Aplicação Prática	45
4.1	Projeto VAMO	45
4.1.1	Estruturação do modelo para o caso	46
4.1.2	Alternativas (VDs)	47
4.1.3	Dados de entrada ao modelo	49
4.1.4	Restrições	59
4.2	Cenários	61
4.2.1	BASE - Cenário de linha de base	62
4.2.2	SC 1 - Políticas de estímulo a VEs	62
4.2.3	SC 2 - Políticas de restrição de emissões	64
4.2.4	SC 3 - Expansão do horizonte temporal de projeto	65
4.2.5	SC 4 - Combinação entre SC 1, SC 2 e SC 3.2	66
5	Resultados e Discussão	68
5.1	Análise de importância e sensibilidade dos parâmetros	69
5.2	Resultados do modelo mono-objetivo	74
5.3	Análises de sensibilidade para o modelo mono-objetivo	76
5.4	Resultados para o cenário multi-objetivo	80
5.5	Comparação com Outros Estudos	83
5.6	Limitações e indicações para trabalhos futuros.	85
6	Conclusão	88
	Referências Bibliográficas	93
A	Notações	113
B	Linhas de código do modelo	116
C	Planilha de cálculo	120
D	Resultados Numéricos	122

Lista de Figuras

1.1	Etapas para resolução de problemas complexos.	4
1.2	Elementos do Valor Compartilhado.	6
2.1	Conexão entre decisões estratégicas, táticas e operacionais.	9
5.1	Sensibilidade da dimensão econômica aos parâmetros destacados. . .	71
5.2	Sensibilidade da dimensão ambiental (em R\$/mês) aos parâmetros. .	72
5.3	Composição da frota, custo total e emissões de GEEs para os cenários mono-objetivo.	75
5.4	Sensibilidade do resultado à adoção progressiva de SC 1.	77
5.5	Sensibilidade do resultado à adoção progressiva de SC 1.	78
5.6	Variação no custo de aquisição entre BASE e os cenários alternativos.	79
5.7	Variação no custo total entre BASE e os cenários alternativos. . . .	79
5.8	Composição da frota considerando as soluções ótimas do cenário multi-objetivo.	81
5.9	Fronteira de Pareto das soluções ótimas para o cenário multi-objetivo.	81
C.1	Planilha de cálculo (parte 1).	120
C.2	Planilha de cálculo (parte 2).	121

Lista de Tabelas

2.1	Literatura mapeada em otimização de projetos de compartilhamento.	13
2.2	Literatura sobre inclusão da sustentabilidade na otimização de problemas.	15
2.3	Literatura sobre avaliação de VEs.	19
3.1	<i>Stakeholder</i> e dimensão correspondentes para cada parâmetro.	25
3.2	Fatores de emissão (PL) para cada poluente.	35
3.3	Dimensão, <i>stakeholder</i> e unidade para cada restrição.	37
4.1	Resumo das características de cada VD.	48
4.2	Dados de entrada para os parâmetros de projeto.	50
4.3	Dados de entrada para IN.	54
4.4	Dados de entrada para CM.	56
4.5	Dados de entrada para emissão de GEEs.	58
4.6	Resultado do custo unitário de emissão por poluente local (PL_u).	59
4.7	Limite numérico para cada restrição.	60
4.8	Premissas para cada cenário.	67
5.1	Influência percentual dos parâmetros no custo mensal total do projeto.	69
5.2	Influência percentual de parâmetros no impacto financeiro das emissões.	73
D.1	Resultados do modelo mono-objetivo.	122
D.2	Resultados do modelo multi-objetivo.	123
D.3	Resultados da adoção progressiva do cenário SC 1.	124
D.4	Resultados da adoção progressiva do cenário SC 2.	125
D.5	Impacto percentual na dimensão econômica da variação de parâmetros.	126

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas, verifica-se um aumento na percepção tanto do avanço na degradação socioambiental quanto da maior responsabilidade humana pelos impactos. As discussões em torno das mudanças climáticas, por exemplo, mostram clara contribuição humana no aquecimento global, o que resulta em impactos diversos nos sistemas humano e natural (IPCC, 2014; WMO, 2013). Além disso, o horizonte temporal considerado suficiente para a adoção de ações de mitigação de impactos também reduziu. Mesmo para minimizar as consequências negativas projetadas para o longo prazo é necessário que se adotem medidas ainda no curto prazo.

Em relação à energia e às mudanças climáticas, diversos estudos defendem que as perspectivas de transformação do atual cenário global ainda não seriam suficientes para conter as emissões de dióxido de carbono (CO₂) no limite necessário, mesmo que cumpridos os compromissos firmados no Acordo de Paris (OECD e IEA, 2016a; PWC, 2016; ROGELJ *et al.*, 2016). As decisões relativas à priorização de tecnologias para atendimento da demanda energética também estão inseridas neste contexto de redução de impactos ambientais e sociais, por meio de questões como emissões de gases de efeito estufa (GEEs), poluição atmosférica, acesso à energia e desigualdades sociais (OECD e IEA, 2016a).

Na sociedade contemporânea, os setores de energia e transportes são muito representativos das oportunidades de inovação e novos modelos de negócio para empresas em temas de grande impacto social e ambiental. Enquanto a disponibilidade de

energia limpa e acessível é essencial para melhorar as condições de vida de regiões carentes (KAREKEZI *et al.*, 2012), os diversos meios de transporte têm um papel central para o desenvolvimento dos países, pois são responsáveis por conectar os insumos da atividade econômica em todas as fases de produção (EDDINGTON, 2006).

Outros fatores podem ser citados para reforçar essa importância, como a representatividade para o desenvolvimento econômico e social, o protagonismo nas discussões sobre mudanças climáticas, a criação de um ambiente propício para inovação e tecnologia de ponta e a participação relevante nas atividades básicas da sociedade (GEA, 2012; IPCC, 2014; MALLIG *et al.*, 2016; OECD e IEA, 2017; RUBULOTTA *et al.*, 2013). Há ainda um protagonismo desses setores nas discussões sobre impactos ambientais. O de transportes provoca efeitos adversos tanto em pequena (devido aos poluentes locais) quanto em larga (emissão de GEEs) escala. Segundo a UNFCCC (2015), o setor é responsável por 23% das emissões globais e apresenta o maior potencial de aumento, podendo crescer 50% até 2050 caso não haja nenhuma mudança no modelo atual.

Nesse cenário, tecnologias alternativas de propulsão para veículos leves surgem como possíveis soluções para os desafios apresentados. Uma delas é a mobilidade elétrica, que conecta energia e eletricidade a transportes, com aspectos de inovação tanto em tecnologia quanto em modelos de negócio para ambos os setores. Globalmente, a IEA (*International Energy Agency*) projeta que, em qualquer cenário de descarbonização do sistema energético para atingir as metas do Acordo de Paris, os veículos elétricos (VEs) terão papel fundamental, associado à geração de eletricidade por fontes renováveis (OECD e IEA, 2017).

Baseado nesses dados, o Acordo de Paris reforça a importância do tema para a governança global do clima a partir da Declaração sobre Mobilidade Elétrica e Mudanças Climáticas (UNFCCC, 2015). Esse último documento ressalta a necessidade de se agir no curto prazo para disseminar a mobilidade elétrica e atingir o percentual estimado de eletrificação da frota suficiente para limitar o aumento de temperatura

a 2°C, em comparação com o período pré Revolução Industrial.

No contexto brasileiro, em que 80% da frota de veículos é movida por combustíveis fósseis e, inversamente, 82% da matriz elétrica é renovável (EPE, 2017a,b), essa pode ser uma solução interessante para reduzir dos impactos dos transportes e diminuir a demanda final por energias não renováveis. Portanto, os VEs podem ser capazes de promover uma mudança de rumo, pois alteram a principal fonte energética utilizada, reduzindo a demanda por combustíveis líquidos fósseis e aumentando a de eletricidade (FARIA *et al.*, 2012). Consequentemente, esses veículos motivam um debate acerca das escolhas para geração de energia elétrica. Junto com sua disseminação, deve-se estimular a discussão em torno das escolhas entre fontes renováveis (hidráulica, biomassa, eólica, solar etc.) e fósseis (carvão, derivados de petróleo etc.) para abastecimento da rede elétrica (FARIA *et al.*, 2012).

Motivação e objetivos

As projeções de disseminação da mobilidade elétrica requerem o desenvolvimento de pesquisas consistentes para apoiar a tomada de decisão no setor de transporte de passageiros, avaliando os impactos positivos e negativos das alternativas existentes (GONZÁLEZ PALENCIA *et al.*, 2017). Os VEs muitas vezes são considerados uma alternativa com menor impacto ambiental dentre as opções convencionais de veículos leves. Porém, poucos estudos avaliam seu desempenho em casos reais para as três dimensões da sustentabilidade: social, econômica e ambiental (VASCONCELOS *et al.*, 2017).

Essa análise comparativa de performance envolvendo compensações e diferentes *stakeholders* caracteriza a formulação de problemas em sustentabilidade (MUNDA, 2008; TELES e SOUSA, 2014). Ainda segundo os autores, a aplicação de métodos de otimização e multicritério busca atender de forma estruturada a essa demanda. Sendo assim, problemas que envolvem mais de uma dimensão da sustentabilidade podem ser considerados complexos, uma vez que se trata, entre outras questões, da consideração de diferentes perspectivas, valores e preferências tanto dos responsáveis

pelos impactos quanto de quem sofre suas influências (MARTTUNEN *et al.*, 2017). MINGERS e ROSENHEAD (2004) complementam afirmando que problemas complexos incluem múltiplos atores, grandes incertezas e conflitos de interesse.

Uma boa estruturação do problema é essencial para lidar com sua complexidade (RANYARD *et al.*, 2015). Baseado em AZAPAGIC e PERDAN (2005a,b) e BELTON e STEWART (2002) e considerando o contexto de análise, esta pesquisa propõe uma abordagem sequencial para nortear a construção e aplicação do método, apresentada na Figura 1.1.

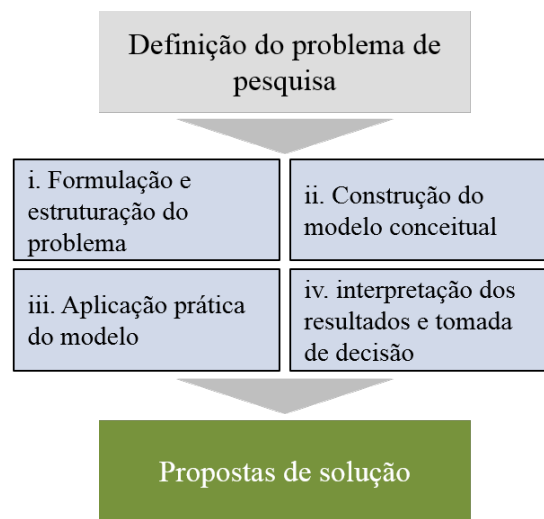


Figura 1.1: Etapas para resolução de problemas complexos.

Fonte: elaboração própria a partir de AZAPAGIC e PERDAN (2005a,b); BELTON e STEWART (2002).

O problema de pesquisa escolhido foi a comparação dos veículos elétricos com outros modelos de maior penetração no mercado. O método desenvolvido busca responder se, dentro do contexto estabelecido, os VEs são uma alternativa sustentável aos veículos convencionais. Buscando reduzir a complexidade dos parâmetros, aumentar a aderência dos resultados e enriquecer a discussão, este trabalho estabelece como ambiente de análise um projeto real de pequena escala de compartilhamento de veículos elétricos localizado em Fortaleza, nordeste do Brasil. O VAMO (Veículos Alternativos para Mobilidade) é operado pela Serttel, patrocinado pela prefeitura de Fortaleza e apoiado pela Enel, distribuidora italiana de energia que fornece infraestrutura de recarga e disponibilizou a maioria dos dados primários para a pesquisa.

Com o objetivo de garantir a visão de sustentabilidade na estruturação da pesquisa, o princípio do Valor Compartilhado (PORTER e KRAMER, 2011) norteia a etapa de formulação do problema (i na Figura 1.1). Sua origem dá-se a partir da responsabilização do sistema produtivo pela degradação ambiental registrada desde a Revolução Industrial, maior do que em todo o período precedente (HAWKEN *et al.*, 1999). A difusão do modelo capitalista e a atuação das empresas em um mundo globalizado aumenta as desigualdades sociais, devido a fatores como maior concentração de renda e diferenças salariais (PIKETTY, 2013).

Essa visão coloca as organizações no centro da discussão sobre desenvolvimento sustentável e novos modelos de negócio (TELES e SOUSA, 2014). Não só as empresas, mas também mercados e governos não adotam até então estratégias abrangentes em sustentabilidade devido ao foco em resultados de curto prazo, mesmo com comprovados casos de sucesso (UNEP, 2012). Exemplos da Shell e da Lundin Petroleum na África mostram os desafios que as grandes empresas (principalmente multinacionais) enfrentam em compreender as necessidades locais e atender as demandas das partes interessadas (referidas neste texto pelo termo em inglês *stakeholders*) (ISAKSSON *et al.*, 2014; WHEELER *et al.*, 2002).

Neste cenário, aumenta necessidade de se buscar novas formas de operação para as empresas, voltadas à criação de valor para todos os *stakeholders*. O Valor Compartilhado (VC) é criado para fomentar nas organizações a visão de que a geração de valor econômico deve ser associada à criação de valor para a sociedade (PORTER e KRAMER, 2011). A Figura 1.2 resume os principais elementos do VC, de acordo com interpretação dada para o contexto desta dissertação. Os resultados dessa abordagem e o detalhamento de como esse princípio será incorporado ao método serão discutidos ao longo dos próximos capítulos.

Para atender à etapa ii da Figura 1.1 (construção do modelo), este trabalho desenvolve um modelo de otimização focado na seleção da melhor composição da frota, com base nos parâmetros selecionados e nas restrições impostas. De acordo com MUNDA (2008); RANYARD *et al.* (2015), a aplicação de métodos da Pes-

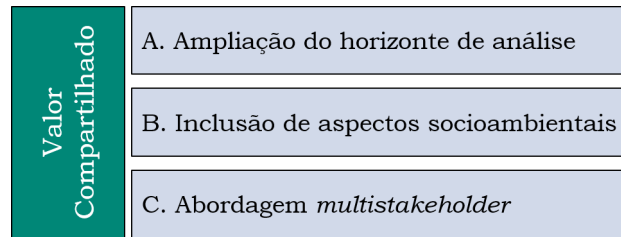


Figura 1.2: Elementos do Valor Compartilhado.

Fonte: elaboração própria a partir de PFITZER *et al.* (2013); PORTER *et al.* (2012); PORTER e KRAMER (2011).

quisa Operacional (PO) para resolução de problemas reais em sustentabilidade pode contribuir para aproximar a PO da prática e acrescentar visões complementares a problemas complexos.

Na etapa iii, aplica-se o modelo conceitual ao projeto VAMO, utilizado como piloto para a avaliação do método. Os resultados obtidos foram interpretados e direcionados para discussão de políticas setoriais (etapa iv), buscando estender o debate para contextos mais amplos, sempre respeitando as limitações de escala da análise.

Em resumo, a motivação da pesquisa é avaliar comparativamente veículos leves como alternativa ao transporte de passageiros, tendo como foco na aplicação os veículos elétricos em comparação aos convencionais. Para isso, esta pesquisa propõe a redução do contexto de análise, tendo como foco do modelo matemático a composição ótima de uma frota de compartilhamento em projetos de pequena escala, com foco na tomada de decisão pelo operador, sem desconsiderar outros *stakeholders* e aspectos não financeiros. A aplicação a um caso real busca testar a aderência dos cálculos e contextualizar os resultados. Sendo assim, Os objetivos deste estudo são:

- Construir um modelo de otimização capaz de solucionar problemas complexos em sustentabilidade, com foco inicial no setor de transportes;
- Avaliar comparativamente alternativas de veículos leves para composição de frotas de compartilhamento em pequena escala;
- Comparar o desempenho dos veículos elétricos, híbridos e convencionais dentro dos parâmetros selecionados para análise;

- Verificar os efeitos da adoção de diferentes políticas, por meio da análise de cenários;
- Propor e analisar parâmetros, primários e de literatura, que sejam capazes de avaliar comparativamente diferentes tecnologias de veículos leves;

O texto está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 examina a literatura disponível sobre os principais tópicos da pesquisa; o Capítulo 3 detalha o método de pesquisa desenvolvido, que é aplicado no Capítulo 4 ao projeto VAMO, com dados primários e secundários; O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados, comparando com estudos anteriores e trabalhos futuros na Seção 5.5; Por fim, o Capítulo 6 resume as principais conclusões obtidas na pesquisa.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Este capítulo reúne as referências consultadas para estabelecer o estado da arte no contexto da pesquisa. Mapeou-se a literatura com foco nos principais tópicos considerados no método, comparando os estudos ao que é proposto neste trabalho.

Os aspectos chave presentes nesta pesquisa não são abordados de forma linear na literatura. Tanto o número de publicações quanto a profundidade da análise variam consideravelmente de um tópico para outro. De acordo com BRANDSTATTER *et al.* (2017), ainda são poucos os estudos que avaliam os VEs dentro do contexto de compartilhamento de veículos. Para VASCONCELOS *et al.* (2017), a literatura sobre projetos de compartilhamento explora principalmente a perspectiva da mobilidade, considerando apenas o ponto de vista do operador do sistema. Dessa forma, estes autores afirmam que a ótica dos outros *stakeholders* e as questões mais abrangentes relativas às dimensões social e ambiental normalmente são desconsideradas.

Entretanto, outros aspectos já são abordados com maior profundidade na comunidade acadêmica. Muito conteúdo tem sido produzido em relação a:

- Otimização de sistemas de compartilhamento de veículos;
- Incorporação de aspectos de sustentabilidade a modelos de apoio ao processo de tomada de decisão;
- Avaliação comparativa entre VEs e outras tecnologias de propulsão para veículos leves.

As próximas seções abordam de forma extensiva esses três tópicos, comparando a literatura existente à proposta deste estudo.

2.1 Otimização de projetos de compartilhamento

Modelos para gestão de sistemas de compartilhamento podem ser divididos em duas categorias: estratégicos e operacionais (BOYACI *et al.*, 2015; WAGNER *et al.*, 2016). BOYACI *et al.* (2015) complementa essa visão identificando uma distinção na literatura entre os modelos de decisão estratégicos e táticos, apesar de estarem entrelaçados e fortemente relacionados entre si e em relação aos operacionais. Nesse contexto, estão inseridos não apenas projetos de veículos elétricos, mas também outros tipos de carros e até o compartilhamento de bicicletas (também identificado pelo termo inglês *bikesharing*). A Figura 2.1 ilustra essa divisão e as conexões existentes, categorizando os modelos aplicados a projetos de compartilhamento de acordo com o tipo de decisão que eles apoiam. Nos parágrafos seguintes, classificamos os estudos mapeados de acordo com esta terminologia.

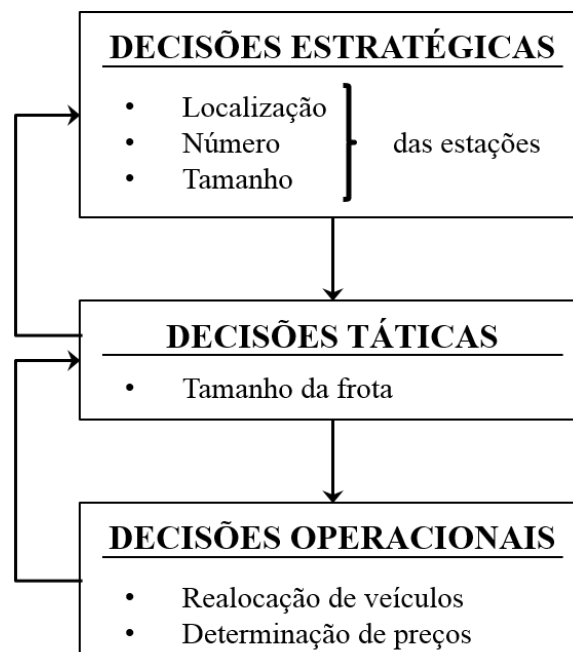


Figura 2.1: Conexão entre decisões estratégicas, táticas e operacionais.

Fonte: BOYACI *et al.* (2015).

Dentro da categoria estratégica, os estudos abordam questões relacionadas a

localização e dimensionamento tanto de frota e postos de recarga quanto das vagas exclusivas. Em relação a decisões operacionais, são avaliadas principalmente a realocação e a precificação dos serviços.

BRANDSTATTER *et al.* (2017) aplicam na cidade de Viena um modelo estratégico e tático para maximizar o retorno financeiro de um projeto de compartilhamento de veículos elétricos. O modelo otimiza tanto a distribuição dos postos de recarga quanto o tamanho da frota de veículos, além de construir projeções estocásticas de demanda. Por outro lado, o trabalho desconsidera fatores como realocação e manutenção dos veículos e assume uma frota homogênea. FASSI *et al.* (2012) focam exclusivamente em questões relativas às estações de recarga. Alguns outros estudos abordam o dimensionamento de frota e o planejamento das estações de recarga, com destaque para CEPOLINA e FARINA (2012); CHEN *et al.* (2016); GEORGE e XIA (2011). Cabe destacar que em CEPOLINA e FARINA (2012) a ótica dos usuários é incluída na minimização de custos, não restringindo o cálculo apenas ao operador. A otimização é conduzida por meio da valoração dos custos de espera, ou seja, o tempo perdido entre a escolha de utilização e o sucesso na ativação do serviço.

Em relação às decisões operacionais, BOYACI *et al.* (2015, 2017) resolvem um modelo multi-objetivo para o planejamento de sistemas de compartilhamento de carros de "sentido único"¹. Seu modelo também inclui decisões táticas, considerando aspectos técnicos e econômicos para otimizar tamanho da frota, realocação dos veículos e distribuição de estações de recarga. Já WEIKL e BOGENBERGER (2015) focam no lucro, maximizando a realocação de veículos e aplicando uma classificação considerando tanto o operador quanto o usuário. O artigo também conta com uma lista grande de referências relevantes na revisão bibliográfica. Os autores ainda consideram diferenças de realocação entre veículos convencionais e elétricos, principalmente devido à necessidade de recarga do último. Nessa abordagem opera-

¹Tradução livre do inglês *one-way car-sharing*, que representa sistemas de retirada em um posto e retorno a qualquer outro, podendo inclusive ser uma vaga de estacionamento. O oposto, *round trip car-sharing*, corresponde à obrigatoriedade de retornar o veículo no mesmo posto retirado.

cional, alguns outros estudos também merecem destaque (p.ex. BRUGLIERI *et al.*, 2014; JORGE *et al.*, 2014; KEK *et al.*, 2009; SANTOS e CORREIA, 2015). Eles desenvolvem modelos de Simulação ou Programação Linear Inteira Mista (MILP, do inglês *mixed integer linear problem*) para otimização da realocação e da manutenção dos veículos, focados na minimização de custos. Por fim, NOURINEJAD e ROORDA (2014); NOURINEJAD *et al.* (2015) são referências para a inclusão dos funcionários no processo de realocação, integrando uma decisão tática à categoria operacional.

Foram encontrados poucos artigos que abordam decisões táticas, estratégicas e operacionais em conjunto. ZOEPF e KEITH (2016) conduziram uma pesquisa aplicando um modelo de escolha discreta para quantificar como os usuários de serviços de compartilhamento de carros avaliam o preço, a distância percorrida, a disponibilidade de carro sob demanda e os tipos de veículo. A conclusão obtida foi de que os veículos híbridos são os preferidos, especialmente para distâncias curtas e médias. Já VASCONCELOS *et al.* (2017) comparam os desempenhos de veículos convencionais e alternativos para sistemas de compartilhamento de carros. A abordagem é muito próxima à desenvolvida no presente trabalho, mas com diferenças de contexto (Portugal x Brasil), escala (média x pequena) e método (análise de custo-benefício x modelo de otimização).

Os modelos desenvolvidos para projetos de *bike-sharing* também geram percepções importantes para os estudos de compartilhamento de carros, devido às semelhanças entre os dois serviços (BOYACI *et al.*, 2017). A localização e o número de estações, questões estratégicas, são avaliados em ROMERO *et al.* (2012) e LIN e YANG (2011). Ambos analisam os resultados para os investidores/operadores e usuários, com ROMERO *et al.* (2012) considerando aspectos sociais. BULHÕES *et al.* (2017) abordam o problema da realocação de bicicletas usando vários veículos de transporte. Além disso, listam vários estudos com abordagem análoga, comparando com a realocação utilizando um único veículo. Enquanto isso, SAYARSHAD *et al.* (2012) mesclam decisões táticas e operacionais para otimizar o tamanho da

frota e o processo de realocação, com o objetivo de minimizar simultaneamente a demanda não atendida e a ociosidade do sistema. Dois outros estudos expandem a análise (FRADE e RIBEIRO, 2015; MARTINEZ *et al.*, 2012), conduzindo uma ampla avaliação com decisões estratégicas, táticas e operacionais, incluindo localização de estações, número de bicicletas e seu processo de realocação.

A Tabela 2.1 resume essa seção, apresentando o conteúdo dos estudos mapeados e comparando-os com o presente trabalho. Esta pesquisa trata da decisão de composição da frota em um nível tático, que parece ser o aspecto menos abordado pelos estudos de otimização de compartilhamento de carros. O principal diferencial é a inclusão simultânea dos três aspectos de sustentabilidade, reunidos pelo princípio do Valor Compartilhado.

2.2 Modelos de apoio à tomada de decisão em sustentabilidade

Esta seção apresenta estudos que incluem a visão de sustentabilidade em modelos de otimização para diferentes setores. AMIRGHOLY *et al.* (2017) e KRISHNAN *et al.* (2015) propõem modelos para otimizar o sistema de transportes, selecionando a melhor alternativa a partir de uma análise social, econômica e ambiental. ALLAOUI *et al.* (2015) conduzem uma avaliação da cadeia de suprimentos agropecuária aplicando um modelo de otimização multi-objetivo (MO) que considera as três dimensões da sustentabilidade com aplicação de pesos. Visando simplificar a análise dos resultados os autores mesclam os aspectos sociais e ambientais na construção da curva de Pareto. Cabe ressaltar que essa curva é muito utilizada em problemas multi-objetivo para determinar soluções não dominadas, ou seja, que não têm uma hierarquia de prioridade entre si (RASHIDI e KHORSHIDI, 2018).

Em PRATAMA *et al.* (2017) e LIMLEAMTHONG e GUILLÉN-GOSÁLBEZ (2017), o foco está nas alternativas para geração de energia. São desenvolvidas abordagens multi objetivo contextualizadas para Indonésia e Reino Unido. Os estudos

Bibliografia mapeada	Geral	Método		VC		
	BS/CS	Otim.	Modelo	A/S	MS	HT
BOYACI <i>et al.</i> (2015)	CS	✓	MILP		✓	
BOYACI <i>et al.</i> (2017)	CS	✓	MMILP		✓	
BRANDSTATTER <i>et al.</i> (2017)	CS	✓	ILP		✓	
BULHÕES <i>et al.</i> (2017)	BS	✓	ILP			
CEPOLINA e FARINA (2012)	CS	✓	Sim.		✓	
CHEN <i>et al.</i> (2016)	CS		ABM			
FASSI <i>et al.</i> (2012)	CS		SED		✓	
FRADE e RIBEIRO (2015)	BS	✓	ILP			
GEORGE e XIA (2011)	CS	✓	SF			
KEK <i>et al.</i> (2009)	CS	✓	MILP			
LIN e YANG (2011)	BS	✓	INLP			✓
MARTINEZ <i>et al.</i> (2012)	BS	✓	MILP			
NOURINEJAD e ROORDA (2014)	CS	✓	MILP			
NOURINEJAD <i>et al.</i> (2015)	CS	✓	MILP			
ROMERO <i>et al.</i> (2012)	BS	✓	Sim.	✓	✓	
SANTOS e CORREIA (2015)	CS	✓	MILP			
SAYARSHAD <i>et al.</i> (2012)	BS	✓	MPO			
VASCONCELOS <i>et al.</i> (2017)	CS		CBA	✓	✓	
WEIKL e BOGENBERGER (2015)	CS	✓	MILP			
ZOEPF e KEITH (2016)	CS		Pesquisa			
Esta pesquisa	CS	✓	ILP	✓	✓	✓

Legenda 1 - títulos: BS/CS = *Bike-sharing* ou *car-sharing*; Otim. = Aplicação de um modelo de otimização; A/S = inclusão de aspectos Ambientais e/ou Sociais; MS = abordagem *MultiStakeholder*; HT = análise de expansão do Horizonte Temporal.

Legenda 2 - conteúdo: MILP = Programação Linear Inteira Mista; MMILP = Programação Linear Inteira Mista Multi-Objetivo; ILP = Programação Linear Inteira; Sim. = Modelo de Simulação; ABM = *Agent Based Model*; SED = Simulação de Eventos Discretos; SF = Sistema de Filas; INLP = Programação Não-Linear Inteira; MPO = Otimização multi-período; CBA = Análise de Custo-Benefício.

Tabela 2.1: Literatura mapeada em otimização de projetos de compartilhamento.

Fonte: elaboração própria.

incluem diversas tecnologias, cenários e objetivos. No mesmo tema, BALEŽENTIS e STREIMIKIENE (2017) aplicam um modelo de decisão multicritério para orde-

nar diferentes políticas para o setor energético na União Europeia. Um problema análogo é tratado por CRISTÓBAL *et al.* (2012), que aplicam um modelo MO para comparar duas tecnologias para sequestro de carbono em uma usina a carvão, com o objetivo de encontrar a que proporciona a maior redução dos impactos ambientais.

SANTIBAÑEZ-AGUILAR *et al.* (2014) realizam uma otimização para a cadeia de suprimentos de biorrefinarias, abordando simultaneamente os setores agropecuário e energético. A otimização por fronteira de Pareto também é aplicada no estudo para considerar ao mesmo tempo as dimensões técnica, econômica, social e ambiental no modelo. Finalmente, COBULOGLU e BUYUKTAHTAKIN (2015); I. e BUYUKTAHTAKIN (2014) analisam as compensações entre o cultivo de alimentos e a produção biocombustíveis sob as óticas econômica e ambiental. No estudo citado os autores aplicam um modelo MO variando os momentos de plantio e colheita.

A Tabela 2.2 apresenta os resultados e ilustra a importância de aplicar os modelos conceituais desenvolvidos na prática. Pode-se perceber também que abordagens multi-objetivo são amplamente utilizadas para lidar com problemas de múltiplas dimensões. Como esperado, por terem sido selecionados devido à abordagem em sustentabilidade, todos esses estudos avaliam os impactos além da dimensão econômica. No entanto, nenhum deles aplica os três elementos do Valor Compartilhado juntos. O presente estudo considera esses três princípios para a sustentabilidade em uma abordagem de otimização quantitativa aplicada a um caso real. No entanto, mesmo incluindo todos esses aspectos e uma abordagem multi-objetivo, o modelo proposto é simples o suficiente para ser entendido e replicado não apenas por especialistas, mas também por empresas, operadores de sistemas de compartilhamento e outros atores.

2.3 Veículos elétricos (VEs)

Esta seção visa apresentar a mobilidade elétrica e os principais modelos de VEs. Posteriormente, são levantadas as principais referências que avaliam os VEs como

Bibliografia mapeada	Geral	Método		VC		
	CR	Otim.	MO	A/S	MS	HT
ALLAOUI <i>et al.</i> (2015)	✓	MCDA	✓	✓	✓	
AMIRGHOLY <i>et al.</i> (2017)	NUM	NLP		✓	✓	
BALEŽENTIS e STREIMIKIENE (2017)	✓	MCDA		✓		✓
I. e BUYUKTAHTAKIN (2014)	✓	MILP		✓		✓
COBULOGLU e BUYUKTAHTAKIN (2015)	✓	MILP		✓		✓
CRISTÓBAL <i>et al.</i> (2012)	✓	MINLP	✓	✓		
KRISHNAN <i>et al.</i> (2015)	✓	LP		✓		✓
LIMLEAMTHONG e GUILLÉN-GOSÁLBEZ (2017)	✓		✓	✓		
PRATAMA <i>et al.</i> (2017)	✓		✓	✓		✓
SANTIBAÑEZ-AGUILAR <i>et al.</i> (2014)	✓	MILP	✓	✓	✓	
Esta pesquisa	✓	ILP	✓	✓	✓	✓

Legenda 1 - títulos: CR = Aplicação a um Caso Real; Otim. = Modelo de otimização; MO = abordagem Multi-Objetivo; A/S = inclusão de aspectos Ambientais e/ou Sociais; MS = abordagem *MultiStakeholder*; HT = análise de expansão do Horizonte Temporal; VC = Valor Compartilhado.
Legenda 2 - conteúdo: NUM = Exemplo numérico; MCDA = Método de Decisão Multi-Critério; NLP = Programação não-linear; MILP = Programação Linear Inteira Mista; MINLP = Programação Misto-Inteira Não-Linear; LP = Programação Linear.

Tabela 2.2: Literatura sobre inclusão da sustentabilidade na otimização de problemas.

Fonte: elaboração própria.

alternativa para o setor de transporte de passageiros.

2.3.1 Mobilidade elétrica

O termo “mobilidade elétrica” refere-se à adoção da eletricidade como fonte de energia para o transporte. O conceito é mais amplo que a utilização de veículos elétricos, pois envolve, por exemplo, sistemas de recarga, oferta de energia elétrica, infraestrutura de transportes, padrões de direção e a inclusão do transporte de carga, não apenas o de passageiros (UDAETA *et al.*, 2015). Os primeiros veículos elétricos datam do século XIX (ANDERSON e ANDERSON, 2010), mas tiveram um crescimento acentuado apenas a partir da segunda metade do século XX, em razão dos problemas de poluição atmosférica e de emissão de gases do efeito estufa (GEEs), além do aumento do preço do petróleo (DIJK *et al.*, 2013). Com o avanço tecnológico do século XXI as baterias de lítio deram maior autonomia de deslocamento e propiciaram aumento de potência (UDAETA *et al.*, 2015).

Três tipos de VEs podem ajudar a entender essa tecnologia: BEV (do termo inglês, *Battery Electric Vehicle*), PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) e HEV (*Hybrid Electric Vehicle*). Os dois primeiros têm um motor elétrico que pode ser recarregado a partir da rede, sendo que o PHEV tem ainda o auxílio de um motor de combustão interna (MCI), geralmente a gasolina, que aumenta sua autonomia atuando quando a carga do motor principal se encerra. Já o HEV é um sistema híbrido, mas que não permite recarga pela rede elétrica. Seu MCI é o principal propulsor e o motor elétrico é recarregado internamente, aproveitando energia da frenagem e atuando como complemento do principal (AJANOVIC e HAAS, 2016; HAO *et al.*, 2016). Dentre os modelos listados, esta pesquisa focará nos PHEV e BEV, pois são os que substituem em maior escala o motor convencional que utiliza combustíveis fósseis.

As projeções otimistas de disseminação dos veículos elétricos têm sido fortalecidas por sinais claros de compromisso por parte de vários governos. Países com diferentes níveis de desenvolvimento e maturidade no tema, como França, Alemanha, Noruega, Holanda, Índia e Reino Unido assumiram recentemente compromissos que visam estimular a substituição gradual dos veículos convencionais pelos elétricos. Algumas das medidas anunciadas são: proibição na venda ou utilização de veículos movidos a gasolina ou diesel; taxaçoão para circulação em áreas específicas das cidades; e incentivos financeiros para estímulo à produção (BBC, 2017a; b; Mallig *et al.*, 2016).

A discussão sobre introdução dos VEs abrange simultaneamente os setores de energia e transportes, que têm grande relevância para a sociedade. De acordo com o último Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2017a), 82% da matriz elétrica brasileira é composta por fontes renováveis, enquanto que mundialmente esse número cai para apenas 22,7% (OECD e IEA, 2016b). É previsto ainda um aumento da demanda por energia mundial em cerca de 30% até 2040, que se espera ser atendido por meio de expansão da utilização de fontes renováveis e da energia nuclear (OECD e IEA, 2016a). Porém, muitas questões ainda permeiam a discussão em relação ao aumento da participação de renováveis na oferta total de energia, como: acesso

à energia, viabilidade, segurança energética, mudanças climáticas e aceitação da sociedade às diferentes alternativas (OECD e IEA, 2016a).

A demanda por energia elétrica acompanha essa tendência de crescimento, devido a fatores como: adoção de veículos elétricos para o transporte de passageiros, disseminação de dispositivos eletrônicos e mudança nos padrões de consumo (OECD e IEA, 2017). Segundo alguns trabalhos (AJANOVIC e HAAS, 2016; FARIA *et al.*, 2012; MCLAREN *et al.*, 2016), a fração de renováveis na matriz é uma das principais questões associadas ao sucesso dos veículos elétricos como alternativa para redução de impactos do setor de transportes. As correlações vão além, dado que a demanda por carros elétricos pode variar diretamente com o percentual de renováveis na matriz. Isso se deve à motivação dos consumidores em adotar este modelo para o transporte individual devido ao sentimento de redução do seu impacto ambiental, que, por sua vez, está relacionado à percepção de predominância de energias limpas na geração elétrica (LI *et al.*, 2017). Assim, reforça-se a importância de se discutir a participação de renováveis na matriz junto com a disseminação dos veículos elétricos.

O setor de transportes lidera as emissões antrópicas totais associadas à matriz energética brasileira, com 45,3% (194,3 Mt CO₂) (EPE, 2017a), por conta do alto percentual de utilização de combustíveis fósseis na frota. Os veículos elétricos surgem como alternativa para mudar esse panorama, assim como energia solar, eólica e sistemas de armazenamento de energia. O desenvolvimento dessas alternativas tem o potencial de provocar uma mudança no modelo de negócios dos setores de energia e transportes (JAVID e NEJAT, 2017; OECD e IEA, 2017).

2.3.2 Estudos sobre avaliação comparativa dos VEs

Além do compartilhamento de carros, outros aspectos dos veículos elétricos também são tratados por meio de modelos quantitativos. Pode-se citar, por exemplo, o estudo de otimização de rotas para ganho de eficiência no uso e a alocação de estações públicas de recarga. Dentre vários estudos que comparam VEs a outras

tecnologias, esta seção destaca os que mais contribuem para o contexto da pesquisa.

NURHADI *et al.* (2017) comparam diferentes modelos de negócios e tecnologias de propulsão considerando aspectos ambientais (CO₂) e econômicos, sendo este a partir do Custo Total de Posse (TCO, do inglês *Total Cost of Ownership*). GONZÁLEZ PALENCIA *et al.* (2017) analisam a penetração de mercado a longo prazo para veículos convencionais e vários modelos elétricos na frota japonesa de veículos leves. HAO *et al.* (2017) estudam a relação custo-benefício e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) dos Veículos Elétricos a Bateria (BEVs) em comparação com os Veículos de Motor de Combustão Interna (ICEVs) e Veículos Elétricos Híbridos (HEVs). JOCHEM *et al.* (2016) avaliam as diferenças entre VEs e ICEVs em relação a externalidades, por meio dos aspectos poluição do ar, mudanças climáticas e ruídos. LIU *et al.* (2017), por sua vez, concentram-se apenas nos HEVs, investigando como a aquisição desses veículos por moradores da vizinhança influenciam nos demais, através de um modelo espacial geral aplicado para os Estados Unidos.

Existem estudos que abordam os impactos da infraestrutura de recarga. LEVINSON e WEST (2017) projetam cenários para 2050 considerando diferentes composições de frota e tecnologias de propulsão, com o objetivo de avaliar o impacto da infraestrutura. Finalmente, os ônibus elétricos também são um importante tema de pesquisa, com DREIER *et al.* (2018) conduzindo uma análise do ciclo completo, desde a produção até o uso, de diferentes modelos para um sistema de BRT (*Bus Rapid Transit*) no Brasil. Os autores comparam as características de propulsão e os tipos de chassi.

A Tabela 2.3 mostra que a avaliação de VEs está quase sempre relacionada a aspectos ambientais, eventualmente incluindo alguns sociais. A aplicação em casos reais é importante mesmo quando nenhum modelo de otimização é desenvolvido. Sendo assim, espera-se que esta pesquisa contribua desenvolvendo um modelo de otimização que compare diferentes tipos de veículos a partir de dados reais, aplicando análise de cenários e considerando a ampliação de horizonte temporal.

Novamente, é importante considerar uma abordagem *multistakeholder* e ir além da avaliação econômica para garantir a aplicação do princípio de Valor Compartilhado.

Bibliografia mapeada	Geral			Método		VC		
	CV	CE	CR	Otim.	MO	A/S	MS	HT
BUBECK <i>et al.</i> (2016)			✓				✓	
GONZÁLEZ PALENCIA <i>et al.</i> (2017)	✓	✓	✓	✓		✓		✓
HAO <i>et al.</i> (2017)	✓	✓	✓			✓		✓
JOCHEM <i>et al.</i> (2016)	✓	✓	✓			✓		✓
LEE e MADANAT (2017)				✓	✓	✓	✓	
LEVINSON e WEST (2017)	✓	✓	✓			✓		✓
LIU <i>et al.</i> (2017)			✓					✓
NURHADI <i>et al.</i> (2017)	✓		✓			✓	✓	
TSENG <i>et al.</i> (2013)	✓	✓				✓		✓
WANG <i>et al.</i> (2017)			NUM	✓	✓			
Esta pesquisa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Legenda 1 - títulos: VC = Valor Compartilhado; CV = Comparação entre tipos de Veículos; CE = análise de Cenários; CR = aplicação a um Caso Real; Otim. = Aplicação de um modelo de otimização; MO = abordagem Multi-Objetivo; A/S = inclusão de aspectos Ambientais e/ou Sociais; MS = abordagem *MultiStakeholder*; HT = análise de expansão do Horizonte Temporal.
Legenda 2 - conteúdo: NUM = Exemplo Numérico.

Tabela 2.3: Literatura sobre avaliação de VEs.

Fonte: elaboração própria.

Capítulo 3

Método

Como discutido no Capítulo 2, a particularidade do método desta pesquisa é considerar, simultaneamente: a otimização da composição da frota para um sistema de compartilhamento de carros, abordando uma decisão tática; a inclusão de questões de sustentabilidade do princípio de Valor Compartilhado (VC) em um modelo de otimização; e a avaliação quantitativa de VEs em comparação a outros tipos de veículos leves.

Quanto aos elementos do VC (Figura 1.2), a análise de expansão do horizonte temporal é conduzida como um cenário específico (Seção 4.2.4) e tanto os aspectos ambientais quanto a abordagem *multistakeholder* (múltiplos atores) são representados na seleção de parâmetros e restrições para o modelo, conforme explicado no decorrer deste Capítulo.

O modelo desenvolvido é um problema de programação linear inteira (ILP, do inglês *Integer Linear Programming*), que seleciona a composição ideal da frota em um sistema de compartilhamento de carros, que pode adotar veículos de diferentes tecnologias, como, por exemplo, motores elétricos, híbridos ou convencionais (por sua vez alimentados com gasolina, etanol, biodiesel e outros).

Para atender aos elementos do Valor Compartilhado, as restrições selecionadas abrangem não apenas as dimensões econômica e técnica, mas também a ambiental. Além disso, outros *stakeholders* (além do operador) são considerados ao selecionar os parâmetros. Por fim, a análise de cenários amplia a avaliação para os horizontes

de médio e longo prazo. Para uma melhor compreensão dos parâmetros e equações ao longo do texto, as notações adotadas são apresentadas no Apêndice A.

3.1 Funções objetivo

O problema principal, denominado Modelo de Otimização 1 (OTM_1), desenvolve uma função mono-objetivo que considera todos os fluxos financeiros do sistema de compartilhamento de carros para os operadores, Equação (3.1). A primeira função objetivo (FO_1) é de minimização da dimensão econômica (CT), representada pelo custo total do projeto para o operador, considerando a proporção de veículos selecionados de cada tipo.

Para garantir simultaneamente que todas as partes interessadas sejam contempladas na formulação do problema e que se considere outras dimensões além da econômica, restrições ambientais, sociais e técnicas específicas devem ser consideradas, o que é detalhado na Seção 3.5.

Como mencionado no Capítulo 2, os modelos multi-objetivo (MO) são amplamente adotados em problemas de sustentabilidade. Nesse sentido, uma formulação alternativa, Equação (3.2), é desenvolvida para ajustar OTM_1 em um modelo multi-objetivo chamado de OTM_2. Essa abordagem visa avaliar o impacto da inclusão de outros aspectos, além do econômico, como função objetivo na otimização de composição da frota. O mesmo procedimento é adotado por LEE e MADANAT (2017), que aplicam um problema bi-critério como alternativa à formulação mono-objetivo original, de minimização das emissões de GEEs.

A diferença entre OTM_1 e OTM_2 está na função objetivo alternativa de FO_2, que considera as dimensões social (CT_S) e ambiental (CT_A) por meio da soma do equivalente monetário dos impactos de cada tipo de veículo em cada aspecto selecionado. Os parâmetros mapeados são apresentados e detalhados a partir da Seção 3.3.

O cálculo global de OTM_2 consiste na minimização conjunta da soma das duas funções objetivo, utilizando pesos para projetar a fronteira de Pareto, importante

na interpretação dos resultados. No modelo global, o coeficiente i é a representação genérica das variáveis de decisão, variando de 1 a n , sendo n o número total de tipos de veículos selecionados como alternativas.

OTM_1

$$\text{FO}_1 : \text{Minimizar } \sum_{i=1}^6 CT_i \cdot x_i \quad (3.1)$$

sujeito a: (3.13), (3.17) e (3.18).

OTM_2

$$\text{FO}_2 : \text{Minimizar } \left\{ \sum_{i=1}^6 (CT_i + CT_{A_i} + CT_{S_i}) \cdot x_i \right. \quad (3.2)$$

sujeito a: (3.13), (3.17) e (3.18).

O foco do modelo nesta pesquisa é o operador do sistema. É ele que deve determinar qual a melhor composição da frota para um projeto de compartilhamento. Contudo, argumenta-se que, para ter sucesso no longo prazo, o operador precisa levar em conta aspectos não apenas econômicos. Como o Valor Compartilhado propõe uma abordagem de criação de valor conectada aos desafios do século XXI, este princípio é utilizado no trabalho para construir o modelo de decisão.

Porém, a aplicação não é limitada ao operador do sistema. Com adaptações, é possível aplicar o modelo a diferentes tomadores de decisão, mantendo a preocupação com os outros *stakeholders*, por meio do Valor Compartilhado. Um exemplo seriam os formuladores de políticas públicas, que podem usar essa análise para escolher entre diferentes alternativas, estabelecer regras para novos projetos ou avaliar os benefícios e prejuízos de apoiar iniciativas propostas.

3.2 Variáveis de decisão

Cada variável de decisão (VD) x_i representa um tipo de veículo disponível para escolha na composição da frota em um projeto de compartilhamento de carros.

A seleção das diferentes tecnologias que serão colocadas como alternativa para o modelo devem apresentar desempenhos divergentes nas diferentes dimensões para justificar a necessidade de otimização.

Outro aspecto importante é a disponibilidade de dados. Alternativas com poucas informações disponíveis, mesmo que secundárias, podem inviabilizar a comparação de alguns parâmetros e reduzir a relevância da análise. Para permitir a inclusão de veículos com poucos dados acessíveis, uma opção é fazer uma análise de sensibilidade do resultado apenas para os parâmetros conhecidos, adicionando a alternativa que foi excluída da avaliação principal. Outra opção é avaliar limitantes inferiores e superiores para os parâmetros desconhecidos, caso isso seja possível.

Como o modelo retorna como resultado um número inteiro de 0 a n , sendo n o tamanho total da frota do projeto, opções similares podem necessitar de agregação no momento análise do resultado, a partir de macro características semelhantes entre si. Pode ser o caso de veículos de mesma tecnologia de propulsão ou mesma categoria de desempenho.

Portanto, é importante que as alternativas sejam selecionadas criteriosamente. Veículos similares, mas que tenham desempenhos opostos em um ou mais parâmetros importantes para a análise, devem ser incluídos como variáveis separadas. Além disso, tecnologias estabelecidas e dominantes no mercado de veículos leves devem ser consideradas para avaliar os possíveis impactos da frota resultante no cenário atual.

3.3 Parâmetros econômicos

Dada a penetração ainda tímida dos veículos elétricos tanto na frota brasileira quanto na global, existe uma incerteza natural associada aos dados coletados para essa tecnologia (FARIA *et al.*, 2014). À medida em que a frota de VEs aumentar e os avanços tecnológicos previstos forem consolidados, pode-se esperar um ganho de precisão nos dados.

Como este trabalho visa avaliar comparativamente apenas as diferentes tecno-

logias de veículos leves para compor uma frota de compartilhamento de carros, os parâmetros que não se diferenciam dependendo da alternativa selecionada podem ser aproximados com valores idênticos para todas as opções. Pode-se citar, como exemplo, a equipe de funcionários do projeto (tanto os alocados na operação quanto a alta administração e os terceiros), a receita oriunda do pagamento pelo uso e a infraestrutura de marketing e TI.

Especificamente em relação à receita com o uso dos veículos, a equiparação dos valores entre todas as alternativas assume que não há preferência do consumidor apenas pelo tipo de carro. Em outras palavras, desde que atenda às exigências impostas para o deslocamento, qualquer veículo disponível será utilizado com a mesma probabilidade. Alguns autores discutem esse aspecto, entre os quais AJANOVIC e HAAS (2016); DIMITROPOULOS *et al.* (2013); ZOEPEF e KEITH (2016).

É importante ressaltar que os parâmetros econômicos listados no modelo foram os mais encontrados no mapeamento bibliográfico realizado. Entretanto, outros fatores podem ser incluídos, de acordo com a especificidade de cada projeto. Nesse processo, deve-se ter atenção ao cálculo correto do custo mensal equivalente, como será aprofundado ainda neste capítulo.

A Tabela 3.1 lista e contextualiza a escolha dos principais parâmetros, sejam técnicos, econômicos ou ambientais, conectando-os aos elementos do Valor compartilhado (VC).

3.3.1 Taxa de desconto (TX), horizonte de projeto (HP) e prestações mensais equivalentes (PMT)

Enquanto alguns parâmetros são investimentos únicos, concentrados em momento específico do projeto, outros são registrados como despesas mensais. Para normalizá-los e torná-los comparáveis entre si, converte-se os investimentos únicos em prestações mensais equivalentes (PMT).

Para este cálculo, é necessário definir o horizonte do projeto (HP) e a taxa de desconto (TX). O parâmetro HP representa a duração do projeto, desde sua imple-

Parâmetro	<i>Stakeholder</i>	Dimensão
Autonomia (AU)	Cliente	Técnica
Tamanho da frota (FR)	Cliente	Técnica
Emissão de GEEs (GE)	Sociedade	Ambiental
Investimentos em infraestrutura (IN)	Operador	Econômica
Poluentes locais (PL)	Comunidade Local	Ambiental
Custo de manutenção (CM)	Operador	Econômica
Gastos com abastecimento (AB)	Operador	Econômica
Valor de compra do veículo (VC)	Operador	Econômica

Tabela 3.1: *Stakeholder* e dimensão correspondentes para cada parâmetro.

Fonte: elaboração própria.

mentação até a conclusão. Quanto maior HP, mais diluídos ficam os investimentos iniciais, pois são divididos em mais períodos. Nestes casos, é importante observar a necessidade de fazer novos investimentos para repor ativos depreciados, além de observar o valor residual de liquidação de cada um deles.

A determinação da taxa de desconto (TX) é mais complexa e depende de diversos fatores. Alguns estudos dedicam-se exclusivamente à determinação de TX para projetos, o que não é o foco desta pesquisa. Ainda assim, é importante discutir os principais fatores envolvidos no processo para estimar um valor adequado.

Quando a estrutura de capital do projeto utiliza recursos próprios e de terceiros, uma das formas mais difundidas de cálculo é o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC, do inglês *Weighted Average Cost of Capital*). De forma simplificada, determina-se a composição percentual de capital próprio e de terceiros investidos e o custo (taxa) oriundo de cada uma das fontes, calculando a média ponderada BREALEY *et al.* (2011).

Para o custo do recurso de terceiros, uma alternativa é utilizar as taxas vigentes para empréstimos e financiamentos concedidos para empresas com nível de risco, refletido no *rating*, semelhante ao do projeto em análise. Para a parcela de capital próprio, pode-se utilizar o CAPM. Seleciona-se, inicialmente, a taxa livre de risco

adequada ao contexto do projeto. Estando o fluxo de caixa do projeto em moeda constante (sem inflação) e aplicando ao caso brasileiro, pode-se usar como ponto de partida a taxa dos títulos indexados pelo IPCA¹, como o IPCA⁺ 2045 (TESOURO NACIONAL, 2018). Em seguida, soma-se um prêmio de risco, destinado a compensar os investidores pelos riscos sistêmicos associados ao projeto em análise. Assim, a formulação simplificada do CAPM básico fica:

$$CCP = Rf + (Rm - Rf) \cdot \beta, \quad (3.3)$$

sendo:

CCP o custo de capital próprio (em %);

Rf a taxa livre de risco² (em %);

Rm o retorno da carteira de ativos de risco do mercado (em %);

e β o coeficiente de retorno esperado do projeto.

A ausência de experiências anteriores consolidadas em projetos de compartilhamento envolvendo tecnologias alternativas de propulsão prejudica o acesso a informações históricas para determinar com maior exatidão esses parâmetros. Uma opção seria utilizar projetos do setor de transportes, com foco em aspectos de sustentabilidade. Dependendo das alternativas selecionadas, o custo de capital de empresas ou projetos que operam com essas tecnologias pode ser utilizado.

É o caso da Tesla Motors, para veículos elétricos, e de usinas de biodiesel no Brasil, para motores alimentados com biocombustíveis. A disseminação das discussões sobre mobilidade alternativa pode aumentar o número de projetos e enriquecer as informações sobre estrutura de capital e riscos sistêmicos da atividade. Assim, seria mais precisa a estimação dos parâmetros necessários para uma TX mais próxima da realidade.

A discussão da taxa de desconto foi feita com base em KOLLER *et al.* (2010) e BREALEY *et al.* (2011), que ampliam a análise e são sugeridos como referência para aprofundar o entendimento sobre o tema. Para projetos que envolvam questões

¹Índice de Preços ao Consumidor Amplo, um dos medidores de inflação

socioambientais, CONTADOR (2014) discute taxas de desconto mais adequadas.

A Equação (3.4) detalha o cálculo da PMT. Esse parâmetro é utilizado em várias equações para normalizar as despesas distribuídas ao longo do projeto e/ou parceladas em diferentes horizontes temporais em parcelas mensais iguais equivalentes.

$$PMT = \frac{TX \cdot (1 + TX)^{HP}}{(1 + TX)^{HP} - 1}. \quad (3.4)$$

3.3.2 Custo de aquisição dos veículos (AQ)

Para montar uma frota de veículos para compartilhamento, o operador do sistema pode adquiri-los em definitivo ou alugá-los. É importante que os valores considerados correspondam a veículos em condições semelhantes. A aquisição (ou aluguel) de modelos com diferença no ano de fabricação, na quilometragem percorrida e/ou no nível dos acessórios acrescentados (vidro elétrico e número de portas, por exemplo) pode gerar disparidades indesejadas nos valores. O objetivo é que as diferenças de avaliação sejam decorrentes apenas do tipo de tecnologia de propulsão e da categoria.

Na Equação (3.5), inicialmente o custo de compra de cada veículo (VC_i) é somado para obter a despesa total com a aquisição da frota (AQ), considerando a quantidade de cada alternativa na composição final da frota (x_i). Em seguida, o PMT é aplicado para transformar o custo total de aquisição inicial (AQ) em pagamentos mensais equivalentes (AQ_M).

$$AQ = \sum_{i=1}^n VC_i \cdot x_i, \quad AQ_M = AQ \cdot PMT, \quad (3.5)$$

sendo i o índice correspondente às n variáveis de decisão.

3.3.3 Autonomia (AU)

ZOEPF e KEITH (2016) mostram a importância do parâmetro autonomia dos veículos em projetos de compartilhamento a partir da análise da preferência dos consumidores. De acordo com o artigo, os proprietários e usuários de compartilha-

mento ainda têm uma resistência grande a utilizar VEs para deslocamentos longos, devido ao receio de interrupção da viagem por necessidade de recarga.

Essa frequência de reabastecimento está diretamente relacionada à autonomia do veículo e é considerada um parâmetro importante, que também é incluído no presente modelo como uma restrição. Como a exigência do cliente está relacionada a um deslocamento mínimo por viagem, o importante para o modelo é determinar a autonomia total do veículo totalmente abastecido (ou carregado).

A autonomia total do projeto (AU) é composta pela média entre as autonomies individuais (AU_i) de cada veículo disponibilizado, como exposto na Equação (3.6). O cálculo individual dependerá da tecnologia de propulsão. O Capítulo 4 apresenta a aplicação para motores a combustão interna, híbridos e elétricos.

$$AU = \frac{\sum_{i=1}^n AU_i \cdot x_i}{n}. \quad (3.6)$$

3.3.4 Investimentos em infraestrutura (IN)

Esse parâmetro abrange investimentos necessários antes do início de operação do projeto. Alguns exemplos são: estações de retirada dos veículos compartilhados, locais de estacionamento, sistemas de tecnologia da informação e infra-estrutura de recarga para VEs. Todos esses custos devem ser somados para compor IN.

Caso veículos elétricos sejam considerados como alternativa, as estações de recarga devem ser incluídas no cálculo de IN para esse tipo de carro. Segundo SCHROEDER e TRABER (2012) e SNYDER *et al.* (2012), esses custos podem variar muito de acordo com o tipo de estação de recarga utilizado. Deve-se avaliar também se essas estações estão acoplados aos postos de retirada dos veículos ou se é necessário construir uma estrutura à parte.

Os trabalhos de AGENBROAD e HOLLAND (2014); SCHROEDER e TRABER (2012); SNYDER *et al.* (2012) apresentam estimativas para valores de acordo com o nível da estação, que determina a capacidade e velocidade de recarga. Com o valor unitário (por estação) definido, basta multiplicar pelo total necessário para o

projeto. Os veículos convencionais são reabastecidos em postos de gasolina e não demandam um investimento direto para o projeto, resultando em RI igual a zero para os modelos convencionais (ICEV).

Na Equação (3.7), todas as despesas com infraestrutura de recarga para cada veículo (IR) e investimentos gerais (IG) são somadas para formar IN. Em seguida, normaliza-se IN em parcelas equivalentes por mês (IN_M), por meio do PMT. Os demais custos de infraestrutura foram considerados idênticos para todas as VDs, visto que não dependem da tecnologia de propulsão do veículo.

$$IN = \sum_{i=1}^n (IR_i + IG_i) \cdot x_i, \quad IN_M = IN \cdot PMT, \quad (3.7)$$

onde i é o índice correspondente às VDs.

3.3.5 Custos de manutenção dos veículos e operação do sistema (CM)

Os custos de manutenção dos veículos e operação do sistema (CM) dividem-se entre: inspeção mecânica, reparos, seguro, reabastecimento e lavagem dos carros, sendo o último idêntico para todos as tecnologias disponíveis. A dificuldade de monitoramento para obtenção dessas informações de forma primária exige a busca por dados secundários.

Comparando veículos convencionais (ICEVs) aos elétricos (BEVs e PHEVs), por exemplo, os primeiros têm custo de manutenção mecânica por rodagem (MR) mais alto, devido tanto ao seu sistema de propulsão quanto à existência de mais partes móveis (HAGMAN *et al.*, 2016; HAO *et al.*, 2017; RIESZ *et al.*, 2016). Da mesma forma, por ter um motor auxiliar a combustão interna (MCI), os PHEVs têm MR ligeiramente superior aos BEVs (FARIA *et al.*, 2012). Alguns autores (HAO *et al.*, 2017; NURHADI *et al.*, 2017; TSENG *et al.*, 2013) comparam esses custos e apresentam valores relativos, eventualmente incluindo impostos e despesas com seguro.

O valor total gasto para reabastecimento (VR) é um produto da eficiência do veículo, medida por meio do seu consumo de combustível (CS), pelo preço médio do combustível (PC). A eficiência (CS) pode ser obtida direto no fabricante, inclusive muitas vezes pelo site oficial de venda.

Os preços médios dos combustíveis líquidos no Brasil podem ser extraídos da página da ANP na internet (ANP, 2018). Há também uma divisão por postos brasileiros, permitindo estimativas mais precisas de acordo com a região de influência do projeto.

Esse é um parâmetro com grande variabilidade, pois depende da conjuntura econômica, energética e até política. Um exemplo de 2018 foi a greve dos caminhoneiros, que paralisou vários setores da economia e impactou diretamente no preço dos combustíveis. Em relação ao etanol, sua relação entre de preço e oferta está relacionada ao mercado de açúcar, dado que ambos têm a mesma matéria prima. Fatores externos, como preço do petróleo Brent, também podem ter impacto direto no mercado local.

Em relação aos motores de propulsão elétricos, deve-se utilizar o custo (ou tarifa) da energia elétrica (PC) paga pelo operador à distribuidora local. Como a infraestrutura ainda não está bem estabelecida no Brasil e alguns ajustes de tensão são necessários entre a transmissão e o posto de recarga, esses valores usualmente são definidos em contrato específico entre as partes. Do contrário, pode-se usar o preço médio pago pela indústria local, se disponível. Como alternativa final, para aproximação, há também a tarifa residencial cobrada na região do projeto.

É importante determinar se os postos de recarga dos VEs serão acoplados ou não às estações de coleta. Em caso afirmativo, o único custo operacional extra de reabastecimento (CR) para esses veículos é a manutenção periódica dos postos. Na hipótese de não haver dados primários para esse custo, pode-se selecionar dados secundários, presentes em CHEN *et al.* (2016) e SCHROEDER e TRABER (2012). Segundo (SNYDER *et al.*, 2012), é comum optar por valores de manutenção relativos ao investimento inicial, devido à grande variação entre os diferentes postos existentes.

Caso os postos sejam em um local diferente das estações, os VEs terão um custo extra, similar ao dos convencionais, de realocação para o local de abastecimento. O processo envolve a alocação de profissionais dedicados a monitorar o nível de abastecimento e conduzir os veículos para postos (de gasolina ou de recarga).

Este procedimento é operacionalmente comparável à realocação de veículos, usual em sistemas de compartilhamento de carro de “sentido único” e foco principal de vários estudos (BOYACI *et al.*, 2015; BRUGLIERI *et al.*, 2014; JORGE *et al.*, 2014; KEK *et al.*, 2009; NOURINEJAD *et al.*, 2015; SANTOS e CORREIA, 2015; VASCONCELOS *et al.*, 2017; WEIKL e BOGENBERGER, 2015). Segundo VASCONCELOS *et al.* (2017), esse processo acrescenta cerca de 14% da distância total média (DM) percorrida pelos veículos. NOURINEJAD *et al.* (2015), por sua vez, mostram que o tamanho da equipe dedicada à tarefa é quase constante em relação ao número de carros.

A Equação (3.8) engloba todos os parâmetros citados para cada alternativa i , resultando em um custo de manutenção para cada veículo disponível para seleção de frota do projeto (CM_i). É importante destacar que os dados de entrada devem estar em R\$/mês, pois esses gastos são recorrentes ao longo de todo o projeto.

$$VR_i = PC_i \cdot CS_i + CR_i; \quad CM = \sum_{i=1}^n (VR_i + MR_i) \cdot DM \cdot x_i. \quad (3.8)$$

3.4 Parâmetros ambientais

A inclusão de parâmetros ambientais busca garantir a consistência da abordagem de incorporação do Valor Compartilhado ao modelo, expandindo a análise para além da dimensão econômica. Assim como na Seção 3.3, a escolha dos parâmetros apresentados foi feita com base na recorrência dentro da literatura mapeada. Dessa forma, não se pode considerar esta Seção como uma lista exaustiva de parâmetros.

Para tal, outras áreas de conhecimento podem contribuir. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), por exemplo, apresenta diferentes metodologias abrangentes de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV), com diversos parâmetros, nomeados

de categorias de impacto (ISO e ABNT, 2009a,b). MENDES *et al.* (2015) analisam metodologias de AICV, que incluem categorias como: acidificação (aquática e terrestre), depleção da camada de ozônio, uso da terra e eutrofização.

As metodologias de AICV oferecem normalizações para comparação de alternativas, utilizando um indicador único agregado a partir do desempenho em cada uma delas. Porém, existe a possibilidade de extrair o resultado individual de cada categoria.

A dificuldade de normalização é um dos motivos para que o modelo apresentado considere apenas dois parâmetros: emissão de GEEs e de poluentes locais. A justificativa é a maior disponibilidade na literatura de fatores de conversão para unidades monetárias, o que facilita a interpretação conjunta das dimensões ambiental e econômica.

3.4.1 Emissões de GEEs (GE e CG)

As mudanças climáticas são uma questão global, discutida em importantes fóruns internacionais (como a Conferência das Partes (COP) e a Reunião Anual do Fórum Econômico Mundial). As implicações mundiais exigem que o fator de emissão escolhido vá além da mensuração apenas das emissões no escapamento (FARIA *et al.*, 2014; HAO *et al.*, 2016; VASCONCELOS *et al.*, 2017). No entanto, problemas de cálculo surgem quando são comparadas diferentes tecnologias de propulsão, como VEs e ICEVs (ALVAREZ, 2018). Mesmo assumindo apenas emissões no uso para o último, devemos contabilizar as emissões associadas ao *grid* de energia elétrica para avaliar os impactos do primeiro.

ALVAREZ (2018) propõe que se adote a mesma abordagem do *GHG Protocol*³, que divulga ferramentas de cálculo para inventários de emissões de GEEs. De acordo com essa classificação, as emissões dos ICEVs corresponderiam ao Escopo 1 (emissões

³Iniciativa do GVces (Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas) para registro e publicação de Inventários de Emissões de Gases do Efeito Estufa, através de uma plataforma de Registro Público de Emissões. Mais informações em <https://www.ghgprotocolbrasil.com.br/> e <http://blog.waycarbon.com/2016/08/o-que-e-o-programa-ghg-protocol-por-que-e-como-participar/>

diretas), enquanto que as emissões dos VEs pertenceriam ao Escopo 2 (emissões indiretas) para o registro em inventários de cidades ou países.

A Equação (3.9) apresenta o cálculo completo das emissões de GEEs (GE) do projeto. Os três parâmetros (CS, DM e EM) são multiplicados para cada tipo de veículo i , obtendo as emissões, em kgCO₂e, de cada alternativa por mês (GE _{i}). Em seguida, soma-se GE _{i} para todos os veículos (i variando de 1 ao total de alternativas n) e multiplica-se pelo quantitativo final de cada alternativa i selecionado pelo modelo para composição da frota, obtendo o valor total de emissões de GEEs do projeto (GE _{t}). Uma restrição advinda desse parâmetro é proposta na Seção 3.5. Dentre os fatores presentes no cálculo de cada veículo (GE _{i}), os parâmetros consumo de combustível (CS) e deslocamento médio (DM) estão detalhados na Seção 3.3.5.

$$GE_i = CS_i \cdot DM_i \cdot EM_i, \quad GE_t = \sum_{i=1}^n GE_i \cdot x_i. \quad (3.9)$$

Em relação aos fatores de emissão de GEEs (EM), cada tecnologia de propulsão tem uma métrica, correspondente à quantidade de CO₂e (em kg) por unidade de combustível (litros e kWh, por exemplo). A mesma diferença se repete na contabilização de CS, resultando em kgCO₂e/mês como unidade de GE _{i} para todas as alternativas.

Para veículos com presença de motor elétrico, deve-se usar a emissão unitária da matriz elétrica, em kgCO₂e/kWh. No caso brasileiro, é importante detalhar as premissas assumidas na seleção do valor escolhido para o parâmetro. Analisando os últimos 10 anos, a emissão do grid nacional variou de 0,025 kgCO₂e/kWh (média anual de 2009) a 0,14 kgCO₂e/kWh (média anual de 2014) MCTI (2018). Diversos fatores influenciam nesse cálculo. Como exemplo, a dependência nacional da geração por hidrelétricas faz com que períodos de seca tornem necessária a ativação de fontes mais poluentes (como térmicas a carvão), substituindo uma fonte pouco emissora por outra intensiva em emissão de GEEs.

A emissão direta dos ICEVs é extraída do *GHG Protocol* (IPCC, 2006; MMA,

2014). De acordo com MELLIOS *et al.* (2011), os fatores de emissão na fase de uso tendem a ser maiores do que os especificados na homologação dos veículos, variando na faixa de 10 a 25%, dependendo do tipo de veículo selecionado. Este ajuste deve ser considerado, mas aplica-se somente para os ICEVs, pois são os únicos que possuem emissões diretas.

A partir de GE, é possível estimar o impacto financeiro das emissões de GEEs apenas multiplicando-o pelo custo unitário de carbono (CG_u), Equação (3.10). Entretanto, deve-se destacar que a precificação de carbono ainda não é um tema consolidado e possíveis preços reais de equilíbrio de um mercado futuro ainda estão sendo discutidos, tanto na esfera pública quanto na esfera privada:

$$CG_t = \sum_{i=1}^n GE_i \cdot CG_{ui} \cdot x_i. \quad (3.10)$$

A maioria das transações atuais envolvendo carbono têm preço inferior a R\$32/tCO₂e, mas em alguns casos, esse valor pode atingir cerca de R\$450/tCO₂e (WORLD BANK *et al.*, 2017). Para cumprir com os objetivos de controle do aumento de temperatura traçados no Acordo de Paris, o relatório citado indica que os preços a médio prazo devem se estabelecer em valores entre R\$120 e R\$250/tCO₂e.

3.4.2 Poluentes locais (PL)

O efeito dos poluentes locais difere em abrangência dos GEEs, que são de escala global. Sendo assim, propõe-se considerar apenas a fase de uso para o cálculo do custo total pela emissão de poluentes locais (PL_T), já que o alcance espacial desses impactos é limitado (HAO *et al.*, 2016; VASCONCELOS *et al.*, 2017). Em comum a todas as tecnologias de veículos leves está a emissão de material particulado proveniente dos pneus e do atrito com o asfalto (MP_{10}). Todos os carros com pneus convencionais rodando em vias asfaltadas contabilizam esse poluente.

Outra parcela importante corresponde às emissões no escapamento, presente apenas em veículos equipados com motores de combustão interna. Nesse contexto, tecnologias alternativas como dos VEs podem considerar essa parcela como nula

(FARIA *et al.*, 2014). A contabilização de todos esses fatores é feita por meio do inventário nacional brasileiro (MMA, 2014).

As emissões de um veículo automotor podem ocorrer tanto pelo escapamento quanto pela evaporação do combustível, seja durante o uso ou no seu repouso (MMA, 2014). Com base nas informações disponíveis no documento, recomenda-se a inclusão dos poluentes CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio) e MP_{2,5} (material particulado) no modelo, além do já citado MP₁₀, para representar emissões com desgaste de freios, pneus e pista.

Estes são valores estimados, que podem variar de acordo com inúmeros fatores como idade do veículo, padrões de direção, hora do dia e temperatura do motor (MMA, 2014). Para obter as emissões mensais do projeto, deve-se utilizar os valores unitários de emissão (PL), em gramas de poluente por quilômetro percorrido (g/km), disponíveis em MMA (2014). Na Tabela 3.2 esses dados são apresentados em grama por metro (g/m) para melhor visualização.

Poluente	Tecnologia de abastecimento	g/m
CO	elétrico	0
CO	gasolina	270
CO	etanol	470
NO _x	elétrico	0
NO _x	gasolina e etanol	30
MP ₁₀	todos	21
MP _{2,5}	etanol e elétrico	0
MP _{2,5}	gasolina	1

Tabela 3.2: Fatores de emissão (PL) para cada poluente.

Fonte: elaboração própria, com valores de MMA (2014).

Como existe um valor de PL para cada poluente, utiliza-se o índice k para di-

ferenciá-los. Em seguida, multiplica-se esse fator pela distância média de deslocamento do projeto (DM) e pelo impacto financeiro de cada poluente (PL_{uk}), que pode ser obtido em CAVALLARO (2017), CE DELFT (2011) e HOLLAND e WATKISS (2004). O resultado é o custo total de emissão (PL), que deve ser calculado para cada veículo i . Por essa razão, a Equação (3.11) não retorna diretamente o custo total para o projeto (PL_T), e sim o referente a cada veículo (PL_{Ti}).

Para obter o valor global final do projeto, deve-se somar o resultado para os n veículos (Equação (3.12)). Multiplica-se o valor de cada um deles (PL_{Ti}) pelo número total de veículos de cada tipo selecionados para composição da frota (x_i).

$$PL_{Ti} = \sum_{k=1}^4 DM \cdot PL_k \cdot PL_{uk}, \quad (3.11)$$

$$PL_T = \sum_{i=1}^n PL_{Ti} \cdot x_i, \quad (3.12)$$

sendo $k = 1$: CO, $k = 2$: NO_x, $k = 3$: MP_{2.5}, $k = 4$: MP₁₀.

3.5 Restrições

A definição das restrições é uma etapa essencial desta pesquisa por garantir a incorporação do princípio de Valor Compartilhado ao método, por meio do elemento C: “abordagem *multistakeholder*”. No modelo matemático desenvolvido, as restrições impostas representam as perspectivas dos outros *stakeholders* que não o operador, pois este já é contemplado por boa parte da literatura e é o alvo da otimização econômica.

Por meio dos parâmetros, as restrições devem abranger aspectos importantes para os principais *stakeholders* do projeto. A definição dos limites máximos e mínimos busca atender às exigências dos atores mapeados e garantir que o projeto tenha retorno (ou ao menos não cause perda) para eles. Esta visão estratégica, na ótica do operador, visa melhorar tanto a aceitação quanto a perenidade do projeto, com aprovação de todos os envolvidos de alguma forma.

A Tabela 3.3 lista algumas restrições de diferentes *stakeholders*, destacando ainda a dimensão da sustentabilidade a que se refere. O expoente C é utilizado para diferenciar restrições de parâmetros. Novamente, o índice i nas equações refere-se às n diferentes variáveis de decisão.

Restrição	Dimensão	<i>Stakeholder</i>	Valor (Min/Max)	Unidade
AU^C	Técnica	Cliente	Min	km/veículo
DAP^C	Econômica	Cliente	Max	R\$ 1,000/mês
FR^C	Técnica	Operador/Cliente	-	veículos
GE_T^C	Ambiental	Sociedade	Max	kgCO ₂ e/mês
OR^C	Econômica	Operador	Max	R\$ 1,000/mês

Tabela 3.3: Dimensão, *stakeholder* e unidade para cada restrição.

Fonte: elaboração própria.

Autonomia mínima. A restrição de autonomia (AU^C) é descrita na Seção 3.3.3, do parâmetro correspondente (AU). O objetivo é minimizar a redução das interrupções de viagens por necessidade de reabastecimento. Assume-se que uma frota composta por veículos que não atendem à demanda de autonomia necessária para completar uma viagem inteira do usuário está propensa a ficar ociosa.

Sendo assim, é importante determinar a distância média de deslocamento dos cliente (DM) e garantir que os veículos sejam capazes, em média, de atendê-la. Assume-se que, caso todos os veículo atendam à restrição do cliente para uma viagem específica, cada usuário seleciona o tipo de veículo a ser utilizado de acordo com sua preferência pessoal. Para uma discussão mais profunda acerca de comportamento do usuário e preferências quanto à autonomia e tecnologia dos veículos pode-se consultar, por exemplo, AJANOVIC e HAAS (2016); DIMITROPOULOS *et al.* (2013); ZOEPEF e KEITH (2016).

As Equações (3.13) e (3.14) mostram duas opções de cálculo para determinar o

valor mínimo de autonomia. A primeira, Equação (3.13), calcula o produto entre o tamanho da frota (FR) e DM como valor mínimo para o somatório de AU para todos os veículos do projeto. Já a Equação (3.14) calcula a média de autonomia dos veículos e determina que seja ao menos igual a DM.

$$AU^C(1) : \sum_{i=1}^n (AU_i \cdot x_i) \geq FR \cdot DM. \quad (3.13)$$

$$AU^C(2) : AU = \frac{\sum_{i=1}^n AU_i \cdot x_i}{n} \geq DM. \quad (3.14)$$

Valor máximo do serviço e limite de gasto mensal. As restrições de disposição a pagar (DAP^C) e de orçamento (OR^C) são correlatas e representam limites econômicos para o projeto.

A conta da DAP indica o valor mensal máximo que se consegue arrecadar, utilizando para isso o limite de cobrança pelo serviço aceito pelos usuários (VARIAN, 1992). Em outras palavras, é o preço ótimo (PR) que, multiplicado pela demanda correspondente (US, número de usuários), resulta na maior arredação possível, considerando as preferências dos clientes. Esse é o valor máximo disponível como custo total (CT) do projeto.

A restrição matemática está apresentada na Equação (3.15). Essa projeção depende de um bom dimensionamento do projeto, para que os parâmetros PR e US sejam corretamente determinados.

$$DAP^C : CT \leq PR \cdot US. \quad (3.15)$$

O orçamento, por outro lado, é o limite econômico disponível para o operador investir e manter o projeto. É importante que o investimento máximo seja normalizado com o limite mensal disponível, aplicando o PMT, apresentado na Seção 3.3.1.

A restrição OR^C está matematicamente representada na Equação (3.16). O custo total do projeto (CT) não poderá exceder o orçamento (OR) disponível. No cálculo

de OR, o índice 0 indica valores estimados na fase de planejamento. São incluídos nessa conta: o custo de aquisição dos veículos (AQ), o custo de manutenção do sistema (CM) e os investimentos necessário (IN), normalizados como valores mensais por meio do fator PMT, apresentado na Equação (3.4). Podem ainda ser incluídos aportes externos ao projeto, como parcerias e patrocínios (PA).

$$\text{OR}^C : CT \leq OR, \tag{3.16}$$

sendo $OR = PA + AQ_0 + CM_0 + IN_0 \cdot PMT$.

Tamanho da frota. A restrição de frota, FR^C , determina o tamanho do projeto e é crucial para evitar, ao mesmo tempo, ociosidade dos veículos e não atendimento da demanda.

Esta restrição pode ser aplicada separadamente com mais de um limitante, para simular diferentes escalas de projeto, desde que respeitado o comportamento dos outros parâmetros: linear, quadrático, exponencial etc. Isso pode ser feito tanto em projeto na fase de operação, eventualmente avaliando os efeitos da expansão ou retração, quanto na fase de planejamento, estudando a dimensão ideal da frota. Esse não será, entretanto, o foco desta pesquisa.

$$\text{FR}^C : \sum_{i=1}^n x_i = FR. \tag{3.17}$$

Limite de emissões. A restrição de emissões de GEEs (GE_T^C) representa uma política ambiental resultante de metas públicas e privadas de combate às mudanças climáticas. Um marco global importante nas negociações foi a COP-21, na qual foi assinado o Acordo de Paris, ratificado posteriormente pela maioria das nações EXAME (2017).

Nesse documento, cada Estado definiu sua NDC (sigla do termo inglês *Nationally Determined Contributions*), com metas particulares de redução das emissões. O objetivo é conter o aumento de temperatura a no máximo 2°C em comparação com os níveis pré Revolução Industrial.

Além do Acordo de Paris, diversas políticas locais, regionais e nacionais podem ser utilizadas para estabelecer limites máximos de emissão permitidos. É importante também considerar políticas focadas no setor de transportes, buscando maior aderência com a realidade.

A Equação (3.18) apresenta o cálculo para GE_T^C . O total de emissão deve ser no máximo igual (ou inferior) aos valores atuais, de linha de base (GE_{BAU}), reduzidos do percentual p relativo à aplicação das políticas consideradas na análise.

$$GE_T^C : \sum_{i=1}^n (GE_i \cdot x_i) \leq (1 - p) \cdot FR \cdot GE_{BAU}. \quad (3.18)$$

Por fim, como a saída do modelo matemático para cada variável é o número de veículos de cada tipo presente no projeto, todas as variáveis de decisão devem retornar valores inteiros.

3.6 Cenários

Parte essencial do método proposto é a elaboração de cenários de médio e longo prazos para simular os impactos, no resultado, da adoção de premissas diferentes para alguns parâmetros. Busca-se, como consequência, gerar insumos relevantes para a discussão sobre a aplicação do modelo, etapa essencial para que o tomador de decisão possa escolher a melhor opção disponível (FRADE e RIBEIRO, 2015).

Outro objetivo da elaboração de cenários é a avaliação dos resultados para diferentes horizontes temporais, um dos elementos incorporados do Valor Comparilhado. Esse é um aspecto importante para aumentar a perenidade do negócio, buscando garantir retornos também no médio e no longo prazo.

Recomenda-se também que a estratégia de elaboração dos cenários contemple medidas previstas em todas as esferas do poder e do conhecimento. Não se deve, por exemplo, restringir a políticas exclusivas do setor de transportes. Da mesma forma, políticas locais são tão importantes quanto nacionais ou globais, sempre considerando o *stakeholder* envolvido e o real impacto em cada parâmetro listado

na avaliação.

Alguns exemplos serão apresentados para ilustrar possíveis aspectos que podem ser avaliados por meio de cenários.

3.6.1 Cenário referência

Para que o tomador de decisão possa avaliar os benefícios de cada alternativa, é importante que se construa um cenário de referência, no qual as variáveis se comportem como se não houvesse mudanças significativas no estado atual. Com isso, permite-se que se entenda claramente o impacto das alterações previstas por novas políticas e tendências de médio/longo prazo, desenvolvidas nos cenários alternativos, que são criados pelo analista através de manipulação dos parâmetros do modelo.

No cenário referência, são inseridas as projeções conservadoras, sem considerar nenhuma mudança brusca de trajetória, tanto nos parâmetros quanto nas políticas. O horizonte do projeto deve ser mais curto, visando minimizar o efeito das incertezas de médio e longo prazos. Em resumo, este primeiro cenário é o de manutenção da situação atual, assumindo as variações mais prováveis dos parâmetros, quando necessário.

É importante ressaltar a importância de considerar não só o cenários global e nacional, mas também políticas locais, uma vez que projetos de pequena escala têm abrangência limitada a regiões específicas. As próximas seções detalham possíveis análises a serem feitas para construção dos cenários. Alguns exemplos serão desenvolvidos no Capítulo 4, quando o modelo é aplicado.

3.6.2 Políticas econômicas

Cenários relacionados a políticas econômicas produzem alteração nos parâmetros de custo do projeto. Essas premissas podem ser resultado de iniciativas públicas no setor de transportes, por meio de redução de barreiras tarifárias, ou de provimento de subsídios para modais de transporte ou tipos de veículos.

Esse incentivo também pode ser impulsionado pelo setor privado, que tem ca-

pacidade de mobilizar fabricantes, fornecedores e atores da sociedade civil organizada, para promover mudanças no equilíbrio de preços atual entre as alternativas de veículos leves. Esse processo pode-se dar tanto pela via da evolução tecnológica, quanto por meio de investimentos em infraestrutura. Além disso, o setor é capaz de pressionar entidades públicas para que as políticas citadas no parágrafo anterior sejam desenvolvidas.

Atualmente no Brasil, o principal projeto em discussão para o setor de transportes é o “Rota 2030”. Apesar de enfrentar desafios devido ao cenário político, com o país em ano eleitoral, a iniciativa pode redefinir a mobilidade no país, com discussões setoriais sobre eficiência, tributos e investimentos (PORTAL BRASIL, 2017; VALOR ECONÔMICO, 2018). O programa tem a participação de diversos atores do setor, e deve atuar como continuidade do “Inovar-Auto”, extinto no final de 2017.

Cenários econômicos podem alterar parâmetros de entrada do modelo. Melhorias tecnológicas de eficiência podem reduzir custos com combustíveis, manutenção e aquisição dos veículos. Além disso, a autonomia pode ser expandida e investimentos em infraestrutura barateados ou até anulados.

3.6.3 Políticas ambientais

O setor de transportes é um dos alicerces da estratégia brasileira de redução de emissões, firmada na COP-23 (RFB, 2015). Como esse setor representa cerca de 45% do total de emissões do país (EPE, 2017a), reduções maiores podem ter impactos consideráveis no atingimento dos objetivos estabelecidos. Essa importância setorial é reforçada por estudos conduzidos por entidades independentes, como WBSCD (2015) e LUCON *et al.* (2015).

A atual frota de veículos leves no Brasil é dominada por combustíveis líquidos, com maior parte (64%) de Gasolina A, com impacto maior, e apenas 36% de etanol (EPE, 2017a). No setor como um todo, diesel e gasolina, também intensivos em emissão de GEEs e poluentes locais, ainda dominam, somando 73% (EPE, 2017a).

Dessa forma, os fatores listados contribuem para que o setor seja alvo de políticas ambientais de redução dos impactos. Tendo como base a emissão da frota atual (MMA, 2014), metas de redução podem ser aplicadas na restrição de emissões de GEEs ou até de poluentes locais. Além disso, medidas de eficiência podem alterar parâmetros de entrada do modelo, como os descritos na Seção 3.6.2.

Outra hipótese é a alteração nos parâmetros ambientais, reduzindo o fator de emissão dos veículos. Essa mudança pode ser resultado de políticas que introduzam exigências de maior eficiência dos motores. Da mesma forma, estudos futuros ou até políticas público-privadas podem alterar o fator de monetização desses poluentes, modificando o impacto final em unidades monetárias.

3.6.4 Parâmetros de projeto

Dentro da etapa de construção dos cenários, deve-se avaliar os impactos da alteração dos parâmetros do projeto. Essa análise é ainda mais importante para modelos aplicados na fase de planejamento, com possibilidade de interferência por parte do tomador de decisão desde a fase de concepção.

Uma das alterações pode ocorrer na taxa de desconto do projeto. A percepção de risco pode variar de acordo com perspectivas econômicas e políticas, além da maturidade do projeto e do custo de capital dos investidores. As referências bibliográficas citadas na Seção 3.3.1 aprofundam essa discussão.

Quanto ao horizonte do projeto, alterações podem ser feitas tanto na duração (curto, médio ou longo prazo) quanto na data de início. O primeiro aspecto aumenta a quantidade de períodos para amortização de investimentos, podendo alterar o desempenho econômico das variáveis. Além disso, dependendo da vida útil dos ativos, pode-se criar ou eliminar a necessidade de reposição. Já o início do projeto altera os parâmetros que dependem de evoluções tecnológicas e projeções macroeconômicas, como, por exemplo, custo de aquisição e preço do combustível, respectivamente.

3.6.5 União de cenários

Após a consideração de todos os itens anteriores, adotados como alternativas ao cenário de referência, deve-se analisar a possibilidade de criação de um ou mais cenários que agreguem essas premissas, consideradas de forma separada. Nesse sentido, é importante verificar de qual *stakeholder* depende cada mudança, uma vez que a realização simultânea por *stakeholders* diferentes tende a ser mais provável.

Os avanços tecnológicos, que podem resultar em redução nos custos dos veículos, dependem das montadoras. Já os parâmetros de projeto, que foram abordados na Seção 3.6.4, são determinados pelo operador e podem ter efeitos no horizonte temporal, através de amortização em mais períodos dos custos de aquisição, reduzindo assim seu valor mensal. Dessa forma, considerar a coexistência dessas duas premissas em um novo cenário é realista e permite a avaliação de influência do parâmetro custo de aquisição (AQ) no resultado final com maior magnitude.

Capítulo 4

Aplicação Prática

4.1 Projeto VAMO

Como visto nas seções 2.2 e 2.3, testar o método em um cenário real é importante para expor os pontos fortes e fracos do método e, portanto, analisar se o modelo está pronto para ser aplicado na solução de problemas reais (WEIKL e BOGENBERGER, 2015). Dessa forma, optou-se por utilizar o projeto VAMO¹ (Veículos Alternativos para Mobilidade) como ambiente experimental de análise e aplicação do modelo desenvolvido.

A maioria dos dados primários foram fornecidos pela Enel Brasil, distribuidora de energia italiana que apoia o projeto fornecendo a infraestrutura de rede, incluindo a medição do consumo e o processo de recarga. A empresa opera uma plataforma similar no seu país sede, denominada *Car2Go*. Os dados restantes foram obtidos com a Serttel, operadora do sistema de compartilhamento. Para compreensão e contextualização do projeto houve ainda um apoio da Universidade de Fortaleza (UNIFOR), que desenvolve pesquisas acadêmicas em parceria com a Enel para estudos sobre mobilidade elétrica, com foco no projeto VAMO.

Em resumo, o VAMO é um projeto de compartilhamento de carros localizado na cidade de Fortaleza, nordeste do Brasil. Estima-se que a região metropolitana de Fortaleza, área abrangida pelo projeto, tenha uma dimensão total de 315 km

¹Para mais informações, consultar: <http://www.vamofortaleza.com/>.

², com 2.627.482 habitantes, R\$22.057 de PIB per capita e 0.754 de IDH (IBGE, 2017). Sua relevância deriva principalmente do fato de ser o primeiro projeto de compartilhamento exclusivamente composto por veículos elétricos em operação no Brasil.

A frota total possui 20 carros, sendo 15 compactos (BEV_1) e 5 SUVs (BEV_2). O projeto começou a operar em 2016 e funciona por meio de um passe mensal, revertido como crédito, acrescido de uma tarifa por uso, que varia com o tempo total de utilização dos veículos (ENEL SPA, 2017). Ao todo, existem doze estações de recarga espalhadas pela cidade de Fortaleza, além de vagas exclusivas para os usuários em posse de um dos veículos. Toda a interação para retirada e devolução dos carros, bem como para o pagamento pelo serviço são efetuados por meio de um aplicativo de celular.

4.1.1 Estruturação do modelo para o caso

Neste caso, tanto a gestora do projeto quanto a empresa de distribuição de energia são consideradas como um único operador do sistema. Quanto ao fornecimento de eletricidade para o projeto, tanto o comprador como a distribuidora são considerados um único operador do sistema, excluindo as transações entre esses atores do cálculo final.

No modelo do projeto VAMO, a função objetivo da dimensão econômica (FO₋₁) é a minimização do somatório entre os custos de aquisição (AQ), manutenção (CM) e infraestrutura (IN). As restrições (Equações (4.6), (4.8) e (4.7)) incluem as dimensões ambiental e técnica, garantindo o elemento B do Valor Compartilhado (Figura 1.2, Capítulo 1).

O modelo multi-objetivo, OTM₂, adiciona uma função objetivo (FO₂) ao OTM₁, que considera a dimensão ambiental através da soma do equivalente monetário de emissão tanto de poluentes locais (PL_T) quanto de GEEs (CG_T). A Equação (4.2) apresenta a minimização multi-objetivo construída para o projeto VAMO.

O cálculo global de OTM_2 consiste na soma da FO_1 com a FO_2, utilizando pesos para projetar a fronteira de Pareto, ilustrada no Capítulo 5. Em ambas abordagens, o coeficiente i é a representação genérica das variáveis de decisão, variando de 1 (x_1) a 6 (x_6).

OTM_1

$$\text{FO}_1 : \text{Minimizar } \sum_{i=1}^6 (AQ_{M_i} + CM_i + IN_{M_i}) \cdot x_i \quad (4.1)$$

sujeito a: (4.6), (4.8) e (4.7).

OTM_2

$$\text{FO}_2 : \text{Minimizar } \begin{cases} \sum_{i=1}^6 (AQ_{M_i} + CM_i + IN_{M_i}) \cdot x_i \\ \sum_{i=1}^6 (PL_{T_i} + CG_{T_i}) \cdot x_i \end{cases} \quad (4.2)$$

sujeito a: (4.6), (4.8) e (4.7).

4.1.2 Alternativas (VDs)

As categorias de veículos selecionados para análise foram:

- Dois 100% elétricos (BEV), utilizados no projeto VAMO (VDs x_1 e x_2);
- Um híbrido (PHEV), alimentado na rede, mas com um motor a combustão interna (MCI) auxiliar (VD x_3); e
- Um convencional (ICEV), abastecido a etanol, gasolina ou 50% de cada um (VDs x_4 , x_6 e x_5 , respectivamente).

Os dois primeiros, BEV₁ e BEV₂, são VEs de marcas chinesas que compõem atualmente a frota do projeto VAMO e dispõem de dados primários. O primeiro, BEV₁ (VD x_1), é um veículo compacto da fabricante Zhidou e o segundo, BEV₂ (VD x_2), é um SUV (*Sport Utility Vehicle*) da BYD. Para representar a categoria dos PHEVs (VD x_3) são usados dados secundários do novo Toyota Prius 2018 (TOYOTA, 2018). Por fim, o veículo convencional escolhido é o Nissan New Versa 10, selecionado por

ser uma alternativa eficiente e confortável que atende às demandas dos usuários relacionadas a desempenho e autonomia. Por ser *flex-fuel*, o carro pode ser abastecido com etanol (ICEV_e), gasolina (ICEV_g) ou ambos (ICEV_{e+g}).

A VD x_4 , correspondente ao ICEV_e, considera que o veículo é sempre abastecido com etanol hidratado brasileiro, derivado da cana-de-açúcar; a VD x_6 , por outro lado, representa o veículo ICEV alimentado exclusivamente por Gasolina C (ICEV_g). Considera-se aqui a gasolina comercializada nos postos brasileiros, composta 73% por gasolina pura (chamada de Gasolina A) e 27% por etanol anidro. Por fim, a VD x_5 (ICEV_{e+g}) considera uma divisão igualitária (50%) de abastecimento entre etanol hidratado e Gasolina C. Os cálculos de todos os parâmetros levam em conta esta ponderação.

A fatia de mercado real do etanol em 2016 no setor de transportes brasileiro foi de 42%, dos quais 31% pelo uso em veículos *flex-fuel* (EPE, 2017a). No entanto, este dado varia muito, principalmente de acordo com os preços dos combustíveis (EPE, 2017b). Por este motivo, optou-se por adotar a divisão de 50-50%. Sendo assim, as VDs x_4 , x_5 e x_6 representam o mesmo veículo ICEV, apenas reabastecido de formas diferentes. Cabe ressaltar que os dados assumem todos os veículos como novos no momento da compra. As especificações para as VDs estão resumidas na Tabela 4.1.

VD	ME	MCI	Etanol	Gasolina	Compacto	SUV	VAMO
x_1 (BEV ₁)	✓				✓		✓
x_2 (BEV ₂)	✓					✓	✓
x_3 (PHEV)	✓	✓		✓		✓	
x_4 (ICEV _e)		✓	✓		✓		
x_5 (ICEV _{e+g})		✓	✓	✓	✓		
x_6 (ICEV _g)		✓		✓	✓		

Legenda: ME = Motor Elétrico; MCI = Motor de Combustão Interna; SUV = *Sport Utility Vehicle*.

Tabela 4.1: Resumo das características de cada VD.

Fonte: elaboração própria.

Apesar de, na prática, o projeto ter apenas veículos 100% elétricos na sua frota (BEV₁ e BEV₂), opta-se por incluir outras alternativas nessa pesquisa para analisar os impactos positivos e negativos resultantes dessa premissa assumida na concepção do projeto. Além disso, é importante que a avaliação do VAMO seja conduzida de forma ampla para resultar em aprendizados para projetos futuros.

4.1.3 Dados de entrada ao modelo

A seleção dos dados de entrada priorizou fontes primárias do projeto VAMO, contextualizando ao máximo a aplicação neste capítulo. Em casos de confidencialidade, a informação real foi utilizada no modelo, mas os dados são apresentados de forma relativa. Para contornar eventuais informações não monitoradas pelo operador, dados secundários foram obtidos na literatura.

Como este estudo visa avaliar comparativamente as diferentes tecnologias de propulsão para veículos leves para composição da frota de compartilhamento, alguns parâmetros que não dispunham de dados primários e eram igualmente aplicáveis com o mesmo valor para todas as alternativas foram desconsiderados, dado que não influenciariam no resultado final. O objetivo foi reduzir a incerteza da análise e manter a confiabilidade dos dados inseridos no modelo. Um exemplo é o gasto mensal com a equipe de funcionários do projeto, que compreende não apenas os alocados na operação, mas também a alta administração e os terceiros.

A Tabela 4.2 resume os dados de entrada para todas as variáveis de decisão (VDs) e as seções a seguir descrevem esses parâmetros. O Capítulo 3 servirá como base para a descrição dos parâmetros e equações do modelo desenvolvido.

O Apêndice C apresenta as planilhas de cálculo, com os dados de entrada para o modelo, nas Figuras C.1 e C.2.

Parâmetro	Unidade (/veículo)	BEV ₁	BEV ₂	PHEV	ICEV _e	ICEV _{e+g}	ICEV _g
AQ _M	-	2,0	2,5	2,5	1,0	1,0	1,0
AU	-	1,0	2,5	7,1	3,0	3,7	4,4
IN _M	1,000 R\$	4,1	4,1	4,1	0,0	0,0	0,0
CM	1.000 R\$/mês	0,2	0,2	0,3	0,7	0,7	0,7
GE	kCO ₂ e/mês	1,2	2,5	4,1	1,2	14,9	28,6
CG _t	R\$/mês	0,3	0,6	1,0	0,3	3,7	7,0
PL _T	R\$/mês	1,8	1,8	1,9	2,3	2,3	2,3

Tabela 4.2: Dados de entrada para os parâmetros de projeto.

Fonte: elaboração própria.

Taxa de desconto (TX), horizonte de projeto (HP) e prestações mensais equivalentes (PMT)

Devido à falta de informações históricas sobre projetos relacionados à mobilidade elétrica e compartilhamento de veículos, a estimativa precisa da taxa de desconto (TX) seria difícil e está além do escopo desta pesquisa. Dessa forma, foi utilizada uma abordagem simplificada, como apresentado na Seção 3.3.1, com uma discussão posterior no Capítulo 5 sobre a influência do valor no resultado final.

A própria definição de uma estrutura de capital para projetos dessa natureza seria prematura, devendo ficar mais clara à medida que empresas, investidores e financiadores comecem a atuar mais intensamente na área. Considerou-se, então, um projeto integralmente suportado por recursos próprios dos empreendedores, que exigiriam prêmio de risco de 9,6% sobre a taxa livre de risco, valor correspondente à mediana para o caso brasileiro, obtida por FERNANDEZ *et al.* (2017), supondo-se o valor de 1,0 para o coeficiente beta.

Como taxa livre de risco, selecionou-se um título de dívida do governo brasileiro de longo prazo, o IPCA⁺ 2035, que oferecia uma taxa de juros real de 5,1% ao ano (TESOURO NACIONAL, 2018) no momento da realização da pesquisa. A escolha deveu-se ao prazo de vencimento do título, que por ser longo é considerado apropriado para representar projetos com expectativa de retorno em horizontes de

tempo maiores. Além disso, como é uma taxa real, já descontada a inflação, sua aplicação é consistente com fluxos de caixa em moeda constante, como os aplicados nesta pesquisa. Dessa forma, a taxa de desconto real final ficou estimada em 14,7% ao ano.

O valor escolhido poderia ser considerado tanto sub como superestimado. No primeiro caso, pode-se argumentar que, sendo um projeto pouco difundido e com baixa maturidade no Brasil, além de envolver tecnologias de veículos não-estabelecidas, o risco seria maior, refletindo em exigência superior de retorno.

Por outro lado, seria possível considerar que o Brasil atravessa séria crise econômica e política, que acentua exageradamente a percepção de risco dos investidores, a ser atenuada no longo prazo com a consequente redução significativa dos retornos requeridos dos investimentos. Está além dos limites dessa pesquisa considerar os impactos resultantes desses processos e suas interações. Além disso, um debate mais amplo acerca da adoção de uma taxa de desconto social é desenvolvido em CONTADOR (2014), ajustando os parâmetros a partir de preços reais para o projeto. Nesse contexto, a ampliação do olhar de curto prazo, aceitando maiores investimentos para retornos apenas no longo prazo, também pode influenciar no valor assumido para TX.

De forma análoga, investir agora em um mercado com perspectivas futuras proporcionaria às empresas uma vantagem competitiva caso o mercado se consolide futuramente. Isso pode ser especialmente importante no Brasil, um país que atualmente carece de competitividade no setor automotivo. Para lidar com a incerteza na taxa de desconto, MORRISON *et al.* (2018) propõem em sua pesquisa o tratamento do valor em uma análise de sensibilidade, que será desenvolvida no Capítulo 5.

Para o parâmetro de duração do projeto (HT), são considerados 60 meses, equivalente a 5 anos. Além de ser um período aproximado para o projeto VAMO, esse é o tempo de depreciação contábil de veículos leves. Essa discussão será aprofundada na seção 4.2.4, com cenários que consideram diferentes horizontes de projeto.

Os valores de HT e TX são utilizados na Equação (3.4) para o cálculo da PMT,

importante para normalização dos custos.

Custo de aquisição dos veículos (AQ)

No modelo desta pesquisa, assume-se que toda a frota é comprada no início do projeto, como ocorre no projeto VAMO. Para os BEVs (VDs x_1 e x_2), usamos dados primários confidenciais do VAMO para determinar o valor dos veículos. Por isso, AQ_M na Tabela 4.2 é exibido com valores relativos, utilizando como base o veículo do tipo ICEV_g (VD x_6), o mais barato.

Vale ressaltar que as diferenças nos preços de aquisição (VC_i) decorrem tanto da tecnologia (MCI, elétrico ou híbrido) quanto da categoria (SUV ou compacto) dos veículos. Os valores são introduzidos na equação 3.5. As especificações dos veículos escolhidos estão detalhadas na Tabela 4.1

Autonomia (AU)

Os dados de entrada para AU consideram as três tecnologias de propulsão disponibilizadas como alternativa, de acordo com a Seção 3.2: motor convencional a combustão interna (MCI), elétrico (ME) ou híbrido. A autonomia do primeiro, presente nos carros híbridos e convencionais, é igual ao produto da capacidade do seu o tanque de combustível (CA , em litros) pela sua eficiência (CS , em km/litro), Equação (4.3).

$$AU_{ICEV} = CA \cdot CS. \quad (4.3)$$

Os híbridos *plug-in* (PHEV) ainda possuem uma bateria elétrica, que, por sua vez, é a única fonte de energia para os veículos elétricos a bateria (BEV). Nesses casos, deve-se considerar a capacidade total da bateria, em km, divulgada pelo fabricante. As Equações (4.4) e (4.5) detalham o cálculo para cada um dos três tipos de veículos considerados no projeto.

Os dados para o caso prático são apresentados na Tabela 4.2 como valores relativos baseados no veículo BEV₁, a opção com menor autonomia, visando manter a

confidencialidade dos dados do VAMO.

$$AU_{BEV} = ME. \quad (4.4)$$

$$AU_{PHEV} = ME + CA \cdot CS. \quad (4.5)$$

Investimentos em infraestrutura (IN)

A primeira parcela dos investimento em infraestrutura corresponde às estações de recarga (IR). Como mencionado na Seção 3.3.4, os veículos convencionais (ICEV_g, ICEV_{g+e} e ICEV_e) têm IR igual a zero, por serem abastecidos nos postos de gasolina já existentes.

Como os veículos elétricos do projeto VAMO são recarregados enquanto estão estacionados nos postos de serviço, a configuração das estações suficiente para anteder à demanda por velocidade de recarga corresponde ao nível II. Os custos para uma única estação de recarga pública nível II estão em torno de R\$ 14.500 por estação (AGENBROAD e HOLLAND, 2014; SCHROEDER e TRABER, 2012; SNYDER *et al.*, 2012). Este valor é multiplicado pelas 20 estações do VAMO e IR é definido para os VEs (BEV₁, BEV₁ e PHEV).

Em relação aos investimentos gerais (IG), não se obteve dados primários precisos do projeto. Os dados secundários, por sua vez, podem apresentar ordem de grandeza muito diferente da realidade do VAMO, principalmente pela sua escala piloto. Por isso, visando não poluir os números e, como consequência, aumentar a incerteza do resultado, essas parcelas foram ignoradas do cálculo. É importante ressaltar que os valores são iguais para todas as VDs, pois são relativos à infraestrutura básica do projeto.

O cálculo é feito a partir da Equação (3.7), com n igual a 6. Todas as despesas com infraestrutura de recarga para cada veículo (IR) são somadas, resultando em IN. Em seguida, normaliza-se IN em parcelas equivalentes por mês (IN_M), por meio do PMT. Os demais custos de infraestrutura são obtidos de forma primário e

considerados idênticos para todas as VDs, visto que não dependem da tecnologia de propulsão do veículo.

A Tabela 4.3 resume todos os dados de entrada para IN.

Parâmetro	Unidade	BEV ₁	BEV ₂	PHEV	ICEV _e	ICEV _{e+g}	ICEV _g
IN	1,000 R\$	174	174	174	0	0	0
TX	por mês	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%
HP	meses	60	60	60	60	60	60
IN _M	R\$1,000/veículo	4,1	4,1	4,1	0.0	0.0	0.0

Tabela 4.3: Dados de entrada para IN.

Fonte: elaboração própria.

Custos de manutenção dos veículos e operação do sistema (CM)

Para o projeto VAMO são considerados custos com inspeção mecânica, reparos, reabastecimento e lavagem dos carros. Os custos com impostos e seguro dos veículos são desconsiderados, uma vez que esses parâmetros não foram incluídos na tomada de decisão e não se obteve informação primária para os dois veículos BEV existentes.

Com relação à lavagem (e a outras manutenções não mecânicas), todas as variáveis assumirão um valor estimado pelos operadores do projeto para os veículos BEV. Por serem fatores que não dependem do tipo de carro, será atribuído o mesmo valor a todas as alternativas.

Quanto à inspeção mecânica e aos reparos, é apresentado na Seção 3.3.5 que os motores a combustão interna (MCI), presentes em veículos convencionais e híbridos, elevam o custo com manutenção, em comparação com o motor elétrico. Além da justificativa apresentada para os reparos, as inspeções rotineiras são menos frequentes e mais baratas. Sendo assim, as três alternativas do tipo ICEV terão maior CM que o PHEV, por sua vez superior ao BEV.

Os dados primários do projeto VAMO para esse parâmetro são imprecisos pela pequena amostragem do projeto. Sendo assim, serão utilizados dados secundários de

HAO *et al.* (2017); NURHADI *et al.* (2017); TSENG *et al.* (2013). Os estudos selecionados determinam valores de custos relativos de manutenção de aproximadamente 30% para a relação BEV/ICEV e 65% para BEV/PHEV, que serão utilizados neste caso. Um cenário de custo médio para manutenção de um BEV é definido como R\$0,09/km por CHEN *et al.* (2016).

O dado de deslocamento médio (DM) do projeto VAMO é confidencial, mas pode ser aplicado como informação primária na Equação (3.8). Essa informação é utilizada como fator para multiplicar os custos de manutenção por quilômetro rodado dos BEVs (x_1 e x_2) e obter o custo total mensal. A partir das proporções entre BEVs, PHEVs e ICEVs apresentadas, extrapola-se o resultado para todas as alternativas.

Veículos convencionais e elétricos diferem quanto à definição do preço dos combustíveis (PC). Para combustíveis líquidos, etanol e gasolina, aplicam-se dados secundários da ANP (ANP, 2018), relativos aos postos da região metropolitana de Fortaleza, área de influência do VAMO. Os valores encontrados, com sua respectiva incerteza, foram $3,27 \pm 0,09$ para o etanol e $3,92 \pm 0,16$ R\$/l para a gasolina.

Já a tarifa de energia corresponde ao acordado em contrato entre a gestora Serttel e a distribuidora Enel. Cabe ressaltar que ambas são consideradas em conjunto como operadoras do sistema e parte interessada do resultado da avaliação do modelo. Sendo assim, transferências internas entre esses atores não influenciariam, na prática, a tomada de decisão. Entretanto, visando manter a isonomia entre as alternativas, o valor do preço da energia (PC) será considerado na análise.

Para manter a confidencialidade desses dados, os valores serão omitidos, sendo apresentados de forma relativa na Tabela 4.4. A alternativa BEV₁ (VD x_1) é utilizada como base para a representação em kWh/km e o ICEV_e (VD x_4) cumpre o mesmo papel em l/km. Os dados referentes ao consumo do PHEV (VD x_3) foram extraídos da página oficial da Toyota (TOYOTA, 2018).

No projeto VAMO, as estações de coleta são também postos de recarga. Dessa forma, o único custo extra operacional de reabastecimento (CR) para esses veículos

é a manutenção mensal dos postos. São usados os valores relativos apresentados na Seção 3.3.5, conforme CHEN *et al.* (2016), balanceado com valores de SCHROEDER e TRABER (2012). O valor de CR para os VEs é definido como 2% do investimento inicial (ver IN na Tabela 4.3).

Quanto aos ICEVs, assume-se um custo operacional de realocação em que o operador dirige periodicamente para um posto de gasolina. Essa premissa visa equilibrar as condições de uso para os usuários do VAMO independente da tecnologia escolhida, evitando externalizar um custo e desbalancear os cálculos. Sendo assim, são adicionados de 14% ao valor inicial da distância total média (DM) percorrida pelos veículos (VASCONCELOS *et al.*, 2017). Não há alteração no dimensionamento da equipe alocada para o projeto (NOURINEJAD *et al.*, 2015).

Todos os dados usados como entrada do modelo matemático são apresentados na Tabela 4.4.

Parâmetro	Unidade (/mês)	BEV ₁	BEV ₂	PHEV	ICEV _e	ICEV _{e+g}	ICEV _g
PC	R\$/l	✓	✓	✓	3,3	-	3,9
CS	-	y	$2,1y$	-	$1,5z$	-	z
CR	x1.000 R\$/veículo	0,17	0,17	0,24	0,60	0,60	0,60
MR	R\$/km	0,09	0,09	0,19	0,29	0,29	0,29
CM	x1.000 R\$/veículo	0,20	0,21	0,33	0,72	0,72	0,71

Tabela 4.4: Dados de entrada para CM.

Fonte: elaboração própria.

Emissões de GEEs (GE e CG_t)

Dentre os parâmetros da Equação (3.9), apenas o fator de emissão de GEEs (EM) será abordado nesta seção. Os outros dois fatores, consumo de combustível (CS) e deslocamento médio (DM), são discutidos nas seções específicas.

Para os motores elétricos, presentes nos BEVs e no PHEV (alternativas $x_{1,2,3}$), será utilizado o fator de emissão da matriz elétrica brasileira, em kgCO₂e/kWh.

Embora o *GHG Protocol* adote a média anual para o cálculo dos inventários, nesta pesquisa o horizonte será expandido para a média dos últimos dez anos, 0,075 kgCO₂e/kWh (MCTI, 2018), visto que se pretende avaliar o projeto VAMO no longo prazo. Na seção de análise de sensibilidade, Capítulo 5, discute-se as implicações desse valor e possíveis alterações no resultado decorrentes de escolhas diferentes.

Para emissão direta dos ICEVs (alternativas $x_{4,5,6}$), aplica-se o valor adotado pelo *GHG Protocol* (IPCC, 2006; MMA, 2014), com a correção média de 17,5% (MELLIOS *et al.*, 2011). Dessa forma, obtém-se 1,98 kgCO₂e/l para Gasolina C e 0,06 kgCO₂e/l para o etanol, determinando EM para os ICEVs.

Considerando a autonomia de cada motor e o deslocamento médio do projeto VAMO, considera-se que o PHEV (VD x_3) emite 89% do tempo como um veículo elétrico (BEV) e 11% como um ICEV_g. Essa proporção é calculada a partir do percentual de viagens (em total de quilômetros) que pode ser atendido exclusivamente pelo motor elétrico. Já para o ICEV_{e+g}, as contas têm como base a média entre os outros dois veículos convencionais (ICEV_g e ICEV_e), visto que se assume o abastecimento igualmente dividido entre etanol e gasolina.

Para calcular o impacto financeiro (CG_t) das emissões, multiplica-se o total de GEEs emitidos (GE) pelo custo unitário de carbono (CG_u), como na Equação (3.10) da Seção 3.4.1. Dentre os dados do Banco Mundial (WORLD BANK *et al.*, 2017) apresentados na referida seção, será adotado o valor limite superior da faixa de preços indicada como necessária para o médio prazo, caso o objetivo seja cumprir as metas do do Acordo de Paris, equivalente a R\$250/tCO₂e.

Na Tabela 4.5, os dados para os cálculos de GE_t e CG_t são apresentados. Como CS é confidencial para os veículos do VAMO (BEV₁ e BEV₂), assim como DM para todo o projeto, os valores correspondentes na tabela são apresentados em números relativos.

Parâmetro	Unidade	BEV ₁	BEV ₂	PHEV	ICEV _e	ICEV _{e+g}	ICEV _g
CS	-	y	$2,1y$	-	$1,5z$	-	z
EM	kCO ₂ e/kWh ou /l	0,07	0,07	-	0,06	-	1,98
GE	kCO ₂ e/veículo.mês	1,2	2,5	4,2	1,2	14,9	28,6
CG _u	R\$/kCO ₂ e	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
CG _T	R\$/veículo.mês	0,3	0,6	1,0	0,3	3,7	7,2

Tabela 4.5: Dados de entrada para emissão de GEEs.

Fonte: elaboração própria.

Poluentes locais (PL_T)

A diferença na tecnologia de propulsão entre as alternativas de veículos para o VAMO resulta na distinção de contabilização para o parâmetro poluentes locais (PL_T). Os veículos BEV_{1,2}, 100% elétricos, contabilizam emissões apenas para o MP₁₀, correspondente ao atrito durante o deslocamento.

Já os veículos ICEV e PHEV, que possuem um motor a combustão interna (MCI), têm emissões relevantes no escapamento, além da evaporação do combustível, que é muito volátil MMA (2014). Os dados adotados como fator de emissão de todos os poluentes (PL) foram do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas MMA (2014), apresentados na Tabela 4.6, Seção 3.4.2.

Para definição do custo unitário, em reais, por poluente, utilizou-se as referências indicadas na Seção 3.4.2 (CAVALLARO (2017); CE DELFT (2011); HOLLAND e WATKISS (2004)). Fez-se uma média ponderada entre os valores disponíveis, considerando a importância científica do documento e a data de publicação. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 4.6.

É importante ressaltar que os fatores que podem modificar PL (idade do veículo, padrão de direção, hora do dia e temperatura do motor) são homogêneos, independente da alternativa escolhida para compor a frota. Sendo assim, opta-se por não

Poluente	R\$/kg	Referências
CO	0,6	CAVALLARO (2017)
NO _x	29,3	CAVALLARO (2017); CE DELFT (2011); HOLLAND e WATKISS (2004)
MP ₁₀	518,3	CE DELFT (2011); HOLLAND e WATKISS (2004)
MP _{2,5}	418,4	CAVALLARO (2017); CE DELFT (2011)

Tabela 4.6: Resultado do custo unitário de emissão por poluente local (PL_u).

Fonte: elaboração própria.

considerar nenhuma alteração nos valores decorrente desses fatores.

4.1.4 Restrições

Com base na Seção 3.5, a aplicação para o projeto VAMO considerou apenas as restrições AU^C, FR^C e GE_T^C. As duas econômicas, DAP^C e OR^C, não foram incluídas por ausência de dados primários disponibilizados pelo operador acerca das projeções de arrecadação e/ou orçamento para o VAMO.

Ainda assim, o modelo aplicado garante uma abordagem *multistakeholder*, com a inclusão dos *stakeholders* cliente e sociedade, como apresentado na Tabela 4.7, obedecendo ao o princípio de Valor Compartilhado. Aplica-se também a restrição de integralidade das variáveis.

Outro elemento importante da Tabela 4.7 é a coluna ”dimensão”, que apresenta uma restrição ambiental ao modelo, incluindo o limite de emissão de GEEs (GE_T^C). Por fim, são apresentados ainda os valores assumidos para cada restrição, detalhados ao longo desta Seção.

Para cálculo de AU^C, será utilizada a Equação (3.13), ajustada para a Equação (4.6). O valor limite para essa restrição na Tabela 4.7 não é mostrado porque o parâmetro de deslocamento médio para o projeto (DM) é um dado considerado sensível para o operador do VAMO.

Restrição	Dimensão	Stakeholder	Valor (Min/Max)	Unidade (por veículo)	Valor
AU^C	Técnica	Cliente	Min	km	✓
GE_T^C	Ambiental	Sociedade	Max	kgCO ₂ e/mês	221,7
FR^C	Técnica	Operador/Cliente	-	-	20

Tabela 4.7: Limite numérico para cada restrição.

Fonte: elaboração própria.

$$AU^C : \sum_{i=1}^6 (AU_i \cdot x_i) \geq 20 \cdot DM. \quad (4.6)$$

A frota (FR) é definida como 20, pois era o valor real do projeto no momento da coleta de dados. Esse valor é utilizado também na Equação (3.17), do Capítulo 3, adaptada aqui para a Equação (4.7). Isso caracteriza o VAMO como um projeto compartilhamento de pequena escala.

$$FR^C : \sum_{i=1}^6 x_i = 20. \quad (4.7)$$

Não há, dentro do projeto VAMO, uma meta específica de controle ou redução de emissão de GEEs. Apesar do contato direto para coleta de dados demonstrar uma clara preocupação dos gestores com o tema (inclusive com o requisito de adquirir apenas veículos elétricos), não há uma política, seja interna ou do poder público que apoia o projeto, que estabelece metas claras.

Sendo assim, a definição da restrição ambiental, de emissões (GE_T^C), terá como base o Acordo de Paris, marco importante das negociações globais do clima. Com isso, será usada a NDC brasileira, constante no Acordo de Paris firmado na COP-21 (RFB, 2015) e ratificada em setembro de 2016 (GOVERNO DO BRASIL, 2016).

O documento estabelece uma meta de redução de 37% das emissões de GEEs brasileiras até 2025, comparadas aos níveis de 2005. Este cálculo resulta em 1,3 GtCO₂e. Utilizando os dados de SEEG (2017), este número corresponderia a uma

redução de 25,6% em relação aos valores de 2016, ano considerando os dados mais recentes disponíveis.

Os dados serão aplicados à Equação (3.18), resultando na Equação (4.8). Para os valores de linha de base (GE_{BAU} na Equação (3.18)), será considerada uma frota composta metade por etanol e o restante por gasolina, como discutido na Seção 4.1.2. Dessa forma, o parâmetro GE_5 na Equação (3.18) é inserido para representar o fator de emissão de GEEs do veículo $ICEV_{e+g}$ (VD x_5).

Já o percentual p da Equação (3.18) é igual aos 25,6% calculados nesta Seção. Cabe ressaltar que este valor, obtido a partir da NDC brasileira, considera uma média entre todos os setores da economia, não apenas o de transportes. Entretanto, será utilizado como uma aproximação intermediária para o limite mínimo de redução das emissões na concepção do projeto em relação ao cenário atual.

$$\begin{aligned}
 GE_T^C : \sum_{i=1}^6 (GE_i \cdot x_i) &\leq (1 - 25,6\%) \cdot FR \cdot GE_5 ; \\
 GE_T^C : \sum_{i=1}^6 (GE_i \cdot x_i) &\leq (1 - 25,6\%) \cdot 20 \cdot 14,9 ; \\
 GE_T^C : \sum_{i=1}^6 (GE_i \cdot x_i) &\leq 221,7 .
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

4.2 Cenários

Como preconizado pelo modelo conceitual no Capítulo 3, esta seção tem como objetivo a expansão da análise para avaliação dos efeitos caso fossem adotadas premissas diferentes para alguns parâmetros. Os resultados obtidos são discutidos no Capítulo 5, com contribuições relevantes desta Seção.

Quatro cenários alternativos são propostos e detalhados a seguir. Cada um aplica diferentes políticas relacionadas ao setor de transportes, à administração pública e/ou à tomada de decisão por atores do setor. Dessa forma, encaminha-se também uma orientação para trabalhos futuros no Capítulo 5, aprofundando questões tratadas ou inserindo novos aspectos para análise.

4.2.1 BASE - Cenário de linha de base

BASE é o cenário de referência, alimentado com dados primários do projeto VAMO e complementado com dados secundários da literatura, por meio do mapeamento feito no Capítulo 2.

Para identificação no restante do texto, o cenário será nomeado como BASE, que consiste em um modelo mono-objetivo focado na minimização de custos, problema (4.1). As restrições, (4.6), (4.7) e (4.8) determinam, respectivamente, uma autonomia mínima, um tamanho fixo da frota e um limite superior de emissões. Nessa primeira abordagem, os poluentes locais são desconsiderados, um vez que a dimensão ambiental não faz parte da função objetivo (FO) e o maior emissor, $ICEV_g$, já atende aos limites estabelecidos pela legislação, inviabilizando sua aplicação como uma restrição.

Para lidar com essa limitação, uma abordagem multi-objetivo é definida (problema (4.2)), adicionando uma FO focada em minimização dos custos ambientais ao cenário BASE, resultando no cenário M-OBJ. Cabe ressaltar que o M-OBJ utiliza a FO e as restrições do BASE, mas adiciona a minimização conjunta do custo de poluição local (PL_T) e global (CG_T). Em ambos, o horizonte de projeto é definido como cinco anos, período correspondente à depreciação dos veículos para fins contábeis.

4.2.2 SC 1 - Políticas de estímulo a VEs

O primeiro cenário alternativo abrange a adoção de políticas públicas para promover a disseminação dos VEs. No Brasil, assume-se que essas mudanças podem resultar não apenas da política pública nacional, mas também da consolidação dos veículos elétricos nos países desenvolvidos (HAO *et al.*, 2016). As premissas adotadas neste cenário correspondem às políticas econômicas, Seção 3.6.2.

Atualmente, os países desenvolvidos são os principais precursores de políticas que limitam o comércio e a circulação de carros movidos a gasolina e a diesel, além de se comprometerem com um mercado mínimo para os veículos elétricos (BBC, 2017a,b,

2018; HAO *et al.*, 2016; THE TIMES, 2018). O setor privado também demonstra sinais na direção dos VEs, principalmente através do envolvimento de montadoras, distribuidoras de energia e até companhias de petróleo (BUSINESSGREEN, 2017; ENEL, 2017; STARTSE, 2017; THE GUARDIAN, 2018).

Um maior apoio dessas empresas pode resultar em mudanças na política fiscal, reduzindo ou eliminando as atuais barreiras existentes no Brasil aos VEs. Este debate vem sendo travado no Brasil por meio do projeto “Rota 2030”, apresentado na Seção 3.6.2. A iniciativa que pode reduzir as barreiras fiscais em até 75% a partir de 2018 (PORTAL BRASIL, 2017; VALOR ECONÔMICO, 2018).

Segundo HAO *et al.* (2017), a redução de impostos, ainda que por um curto período, é importante para alavancar este novo mercado, que tem potencial de ser uma alternativa aos veículos convencionais, pelo menos no aspecto ambiental. Deve-se reforçar que este cenário propõe apenas reduções nas barreiras fiscais. Subsídios e outros incentivos econômicos mais avançados, como isenção de impostos, vagas gratuitas de estacionamento e pistas exclusivas, não estão contemplados.

Este cenário também considera que parcerias públicas e/ou privadas seriam firmadas para construir uma infraestrutura de recarga mínima que atenda às necessidades dos usuários de VEs, removendo este custo do orçamento do projeto. Essa abordagem é observada em YARIME (2009), que descreve a política de transição do diesel para o gás natural veicular em Tóquio. Nesse estudo foi fundamental a cooperação entre montadoras, governo e usuários para construir uma infraestrutura mínima que permitisse a adoção da nova tecnologia. Considerando o atual nível de desenvolvimento tecnológico, com altos investimentos em P&D, e um mercado consumidor maior que o existente naquele caso, seria razoável supor que há potencial para que os VEs trilhem um caminho similar (DIJK *et al.*, 2013).

Outro argumento que embasa a retirada dos investimentos com postos de recarga dos gastos do do projeto é que, enquanto estes são atribuídos aos operadores do sistema, os postos de gasolina são de responsabilidade de terceiros e tornam-se uma externalidade do projeto. Para o equilíbrio do processo de tomada de decisão,

é razoável igualar essas condições e avaliar os resultados obtidos. Pensando em horizontes de longo prazo, a depreciação da infraestrutura existente terá que ser reposta e este investimento pode ser direcionado para os VEs ao invés de para reposição destes ativos.

Assim como no cenário BASE, em SC 1 resolve-se o problema (4.1). A diferença é que alguns parâmetros são alterados. O custo de aquisição de BEV_1 é igualado ao dos ICEVs, pois ambos são de categorias equivalentes. Para as alternativas BEV_2 e PHEV reduz-se proporcionalmente o valor considerado. Os investimentos em infraestrutura de recarga para os VEs são zerados e os resultados são apresentados em relação a $ICEV_g$, pois o preço dos veículos BEV são confidenciais do projeto VAMO.

4.2.3 SC 2 - Políticas de restrição de emissões

O cenário SC 2 está conectado às políticas ambientais, apresentadas na Seção 3.6.3. Nela, foram compilados dados de emissão, frota e uso final de combustíveis líquidos no Brasil que ratificam a importância do setor na estratégia climática brasileira de mitigação de emissões, como compromisso assumido na COP-21 e ratificado posteriormente.

É importante ressaltar que, apesar de não haver sanções previstas pelo descumprimento do Acordo de Paris, esta pesquisa considera que o atingimento do valor mínimo de redução firmado no documento pelo Brasil é básico e entra como restrição ao modelo principal já no cenário BASE. Nesse sentido, o cenário SC 2 considera que as restrições de emissões no setor de transportes brasileiro irão além da média nacional assumida em Paris, representando uma parte maior das emissões evitadas quando comparado ao restante da economia.

No modelo, isso se reflete em um limite superior menor para a restrição GE^C , Equação (4.8), que será arbitrariamente assumido como metade do limite imposto no cenário BASE. Novamente, resolve-se o problema (4.1), mas desta vez a alteração proposta é uma maior restrição em (4.8).

Por ausência de dados precisos e pela indecisão e pouca divulgação das metas do programa “Rota 2030”, não são incluídas alterações tecnológicas nos veículos, como ganho de eficiência dos motores ou tecnologias de abatimento.

4.2.4 SC 3 - Expansão do horizonte temporal de projeto

Esta Seção apresenta alternativas aos parâmetros básicos do projeto estabelecidos no cenário BASE. O objetivo é avaliar o impacto do horizonte temporal no modelo. Para isso, assume-se BASE como um cenário de curto prazo tanto quanto à extensão (60 meses) como em relação ao ano de início (2018). O primeiro cenário alternativo é o SC 3.1, que mantém o ano de início em 2018, mas dura 10 anos (120 meses), encerrando ao final de 2027. Já o SC 3.2, com o mesmo horizonte de 10 anos, inicia 5 anos depois, em 2023.

À medida que o horizonte de tempo aumenta, a vida útil da infra-estrutura e dos veículos passa a ser importante para o cálculo do projeto, devendo ser considerada. Nesta Seção, não há dados primários do projeto VAMO disponíveis para os parâmetros considerados, pois não se atingiu ainda a vida útil dos ativos. Dessa forma, serão considerados dados secundários para construção dos cenários.

Com base na literatura, determina-se 10 anos como vida-útil para a infraestrutura de recarga (SNYDER *et al.*, 2012). Em relação aos veículos, CEPOLINA e FARINA (2012) consideram uma durabilidade de 8 anos, enquanto que GONZÁLEZ PALENCIA *et al.* (2017) adotam de 13 a 15 anos. MORRISON *et al.* (2018), por sua vez, consideram que após 5 anos o valor de revenda do veículo é de 38% do preço original. Em uma análise de sensibilidade, os autores desse artigo avaliam os impactos de assumir a durabilidade total de 15 anos, zerando o valor de revenda dos carros.

Em relação ao tempo de duração da bateria, o intervalo de dados é ainda maior, variando de 4 (CEPOLINA e FARINA, 2012) a 10 anos (RIESZ *et al.*, 2016), ou 160.000 km (IRENA, 2013; WU *et al.*, 2015). Nesta pesquisa será adotada uma durabilidade intermediária de 10 anos para os veículos, com necessidade de reposição

da bateria a cada 5 anos. Sendo assim, apenas os investimentos na reposição das baterias precisam ser repostos para os cenários SC 3.1 e SC 3.2.

Considerando a penetração dos VEs na frota, diversos estudos assumem custos decrescentes ao longo do tempo, tanto relativos à aquisição quanto aos equipamentos utilizados nos veículos e nos postos de recarga, dado que esta é uma tecnologia em evolução (NYKVIST e NILSSON, 2015; RIESZ *et al.*, 2016; SNYDER *et al.*, 2012).

Prevê-se que a redução de custos seja motivada pelo barateamento do valor das baterias (HAGMAN *et al.*, 2016; WEISS *et al.*, 2012; WU *et al.*, 2015). De acordo com MORRISON *et al.* (2018), as projeções de redução no valor deste equipamento para os próximos 5, 10, 15 e 20 anos são de 10, 28, 48 e 54%, respectivamente. A capacidade de armazenamento da bateria determina a razão entre o seu valor e o valor total de aquisição dos veículos. Para o presente estudo, assume-se 25% tanto para o BEV₁ quanto para o PHEV e 50% para o BEV₂, com base em VAN VLIET *et al.* (2011).

Em resumo, SC 3.1 altera o horizonte de projeto de 60 para 120 meses e adiciona o custo de substituição da bateria para as alternativas BEV₁, BEV₂ e PHEV (VDs $x_{1,2,3}$). Já o SC 3.2 considera ainda a paridade de preço entre VEs e ICEVs, devido à evolução tecnológica. O principal fator que impacta nos resultados desses dois cenários é o tempo de amortização dos investimentos em ativos, que dilui os investimentos em mais períodos.

4.2.5 SC 4 - Combinação entre SC 1, SC 2 e SC 3.2

O último cenário proposto é uma combinação de todas as premissas anteriores de SC 1 e SC 2 junto com a expansão de horizonte temporal proposta em SC 3.2. Como apontado na Seção 3.6.5, a viabilidade de se considerar a hipótese de adoção simultânea desses cenários deve-se ao fato de cada um deles ser atrelado a ações ligadas a um *stakeholder* diferente, o que é detalhado na Tabela 4.8.

As revisões de política fiscal e as restrições ambientais são ações de governo em linha com pressões do setor privado, que pode ser liderado pelas montadoras,

caso a política dos países desenvolvidos leve à disseminação dos VEs. A pressão aconteceria pela ausência de um parque industrial nacional forte no setor, estando sujeito às determinações das matrizes internacionais.

Nas políticas ambientais, o poder público é um ator relevante, mas frequentemente as determinações são fruto de pressão da sociedade civil organizada. Por fim, as questões ligadas aos parâmetros de projeto são definidas pelos operadores, mas há também influência das montadoras nesse cenário por serem elas as responsáveis pelos avanços tecnológicos.

Sendo assim, é razoável imaginar uma conjunção desses fatores, levando à implementação simultânea dos cenários anteriores. Além dos *stakeholders* correspondentes, a Tabela 4.8 apresenta as premissas adotadas para cada cenário.

Cenário	Stakeholder	Objetivo		VC		
		Custo	Emissões	A/S	MS	HT
BASE	-	✓		✓	✓	
M-OBJ	-	✓	✓	✓	✓	
SC 1	Governo e/ou Montadoras	✓		✓	✓	
SC 2	Sociedade e/ou Governo	✓	*	✓	✓	
SC 3.1	Operador e/ou Montadoras	✓		✓	✓	✓
SC 3.2	Operador e/ou Montadoras	✓		✓	✓	✓
SC 4	-	✓	*	✓	✓	✓

Legenda: A/S = inclusão de aspectos ambientais e/ou sociais ; MS = abordagem *multistakeholder*
HT = análise de expansão do horizonte temporal.

Tabela 4.8: Premissas para cada cenário.

Fonte: elaboração própria.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

A hipótese inicial do estudo é que a frota atual de veículos leves para o transporte de passageiros tem impactos negativos importantes e tecnologia alternativas, como os VEs, podem melhorar o desempenho global do setor. As principais razões seriam as emissões de poluentes na fase de uso, além dos avanços esperados nessas novas tecnologias.

Para confrontar essa hipótese, este capítulo apresenta uma discussão detalhada dos resultados para todos os cenários propostos no Capítulo 3. Além disso, busca-se fazer uma análise crítica do modelo. Como o modelo matemático desenvolvido nesta dissertação é aplicado ao projeto VAMO e restringe-se a sistemas de compartilhamento de pequena escala, defende-se que as análises de sensibilidade, cenário e parâmetros são ao menos tão importantes quanto o resultado de composição da frota em si para estimular e ampliar o debate. A relevância dessas análises complementares tanto para refinar a qualidade das conclusões quanto para analisar o comportamento dos parâmetros selecionados também é destacada em LIN e YANG (2011).

Para facilitar a interpretação dos resultados, os gráficos deste capítulo eventualmente agregam uma ou mais das seis alternativas (variáveis de decisão x_1 a x_6) por tipo de tecnologia, de acordo com o contexto de análise. As escolhas e critérios para agregação serão detalhados na discussão de cada resultado, quando pertinente.

O modelo foi construído utilizando o software FICO® Xpress-IVE 1.24.18, tendo

sido executado em um computador pessoal com processador Intel® Core™ 3.4 GHz com 8 GB RAM. O tempo de execução e resposta do problema foi de aproximadamente 0,01 segundos para os cenários mono-objetivo e aproximadamente 0,20 segundos para o multi-objetivo (M-OBJ). As linhas de código do modelo estão apresentadas no Apêndice B e a planilha de cálculo pode ser encontrada no Apêndice C.

5.1 Análise de importância e sensibilidade dos parâmetros

Como primeiro elemento para a discussão, destaca-se a Tabela 5.1. Ela detalha a importância dos parâmetros de custo para a composição da dimensão econômica de cada veículo disponível.

Parâmetro	Notação	BEV ₁ (x_1)	BEV ₂ (x_2)	PHEV (x_3)	ICEV (x_4, x_5 e x_6)
Infraestrutura	IN	61%	56%	55%	0%
Custo de aquisição	AQ	35%	40%	39%	57%
Custo de manutenção	CM	4%	4%	6%	43%
Custo total	CT	100%	100%	100%	100%

Tabela 5.1: Influência percentual dos parâmetros no custo mensal total do projeto.

Fonte: elaboração própria.

A partir dos números apresentados, fica claro o peso da ausência de infraestrutura de recarga (IN) para os veículos elétricos. Destaca-se ainda o percentual correspondente ao preço de aquisição (AQ), que corresponde a quase metade do valor total. Por outro lado, os veículos convencionais têm uma maior participação do custo de manutenção (CM), pelas razões expostas na Seção 3.3.5.

A avaliação de parâmetros pode ainda ser feita por meio de análises de sensi-

bilidade, como nas Figuras 5.1 e 5.2. Essa discussão está diretamente conectada à análise de cenários, visto que esses são apenas uma avaliação conjunta da variação de parâmetros em relação ao cenário de linha de base.

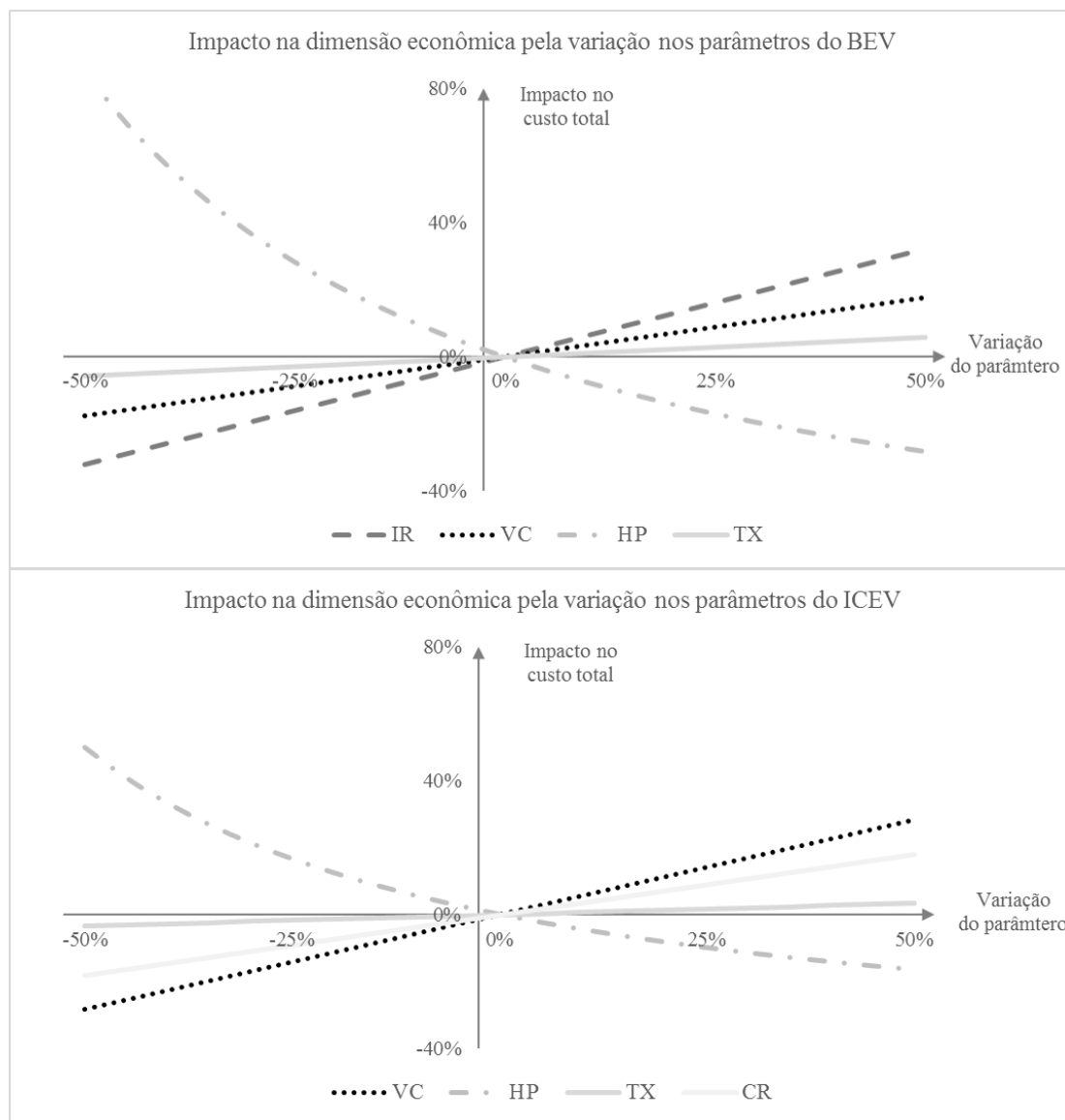
De acordo com MITROPOULOS e PREVEDOUROS (2015), parâmetros com grande incerteza ou que provocam um impacto significativo no resultado final precisam ser testados. Os parâmetros estudados nas Figuras 5.1 e 5.2 foram selecionados pelos dois motivos. Dessa forma, considerou-se essencial avaliar seus impactos nas dimensões econômica e ambiental para determinar se sua variação poderia modificar as conclusões da pesquisa.

Optou-se por apresentar os resultados apenas para as alternativas BEV_1 e $ICEV_e$, uma vez que o comportamento desses parâmetros entre veículos com mesma tecnologia de propulsão é similar. Na Figura 5.2, o $ICEV_g$ foi incluído no gráfico de emissão de GEEs por esta opção ter um comportamento diferencial nesta dimensão, sendo o que mais impacta.

Importante destacar que, enquanto os gráficos da Figura 5.1 mostram a sensibilidade de cada veículo a todos os parâmetros econômicos, na Figura 5.2 cada gráfico representa um parâmetro diferente da dimensão ambiental, com as curvas correspondendo às diferentes alternativas de tecnologia de propulsão.

O que mais chama a atenção na Figura 5.1 é a diferença de inclinação da curva referente ao parâmetro horizonte de projeto (HP) entre os gráficos de BEV e ICEV. Este comportamento está associado ao maior custo de investimento inicial dos veículos elétricos (VEs), principalmente devido ao grande impacto da infraestrutura de recarga, como pode ser confirmado na Tabela 5.1. Amortizar os investimentos iniciais em mais períodos beneficia mais os VEs que os ICEVs. Destaca-se, portanto, a importância de considerar o horizonte temporal na avaliação comparativa entre as diferentes tecnologias de propulsão.

Já na dimensão ambiental, Figura 5.2, há um destaque para o parâmetro distância média percorrida (DM). Uma possível explicação é o escopo de análise da pesquisa, que só considera a fase de uso das emissões, tanto locais (PL) quanto



Legenda: IR = investimentos em infraestrutura de recarga; VC = valor de compra do veículo; HP = horizonte de projeto; TX = taxa de desconto; CR = custo de realocação para recarga.

Figura 5.1: Sensibilidade da dimensão econômica aos parâmetros destacados.

Fonte: elaboração própria.

globais (GEEs). Sendo assim, quanto maior o deslocamento, mais impactante será a dimensão ambiental, variando positivamente com a intensidade de uso dos carros. Além, disso, o comportamento mais acentuado da curva referente aos ICEVs deve-se à maior emissão total desses carros, que é calculada por meio do fator unitário por quilômetros percorridos.

Como esperado, apenas o $ICEV_g$ tem influência considerável das emissões de

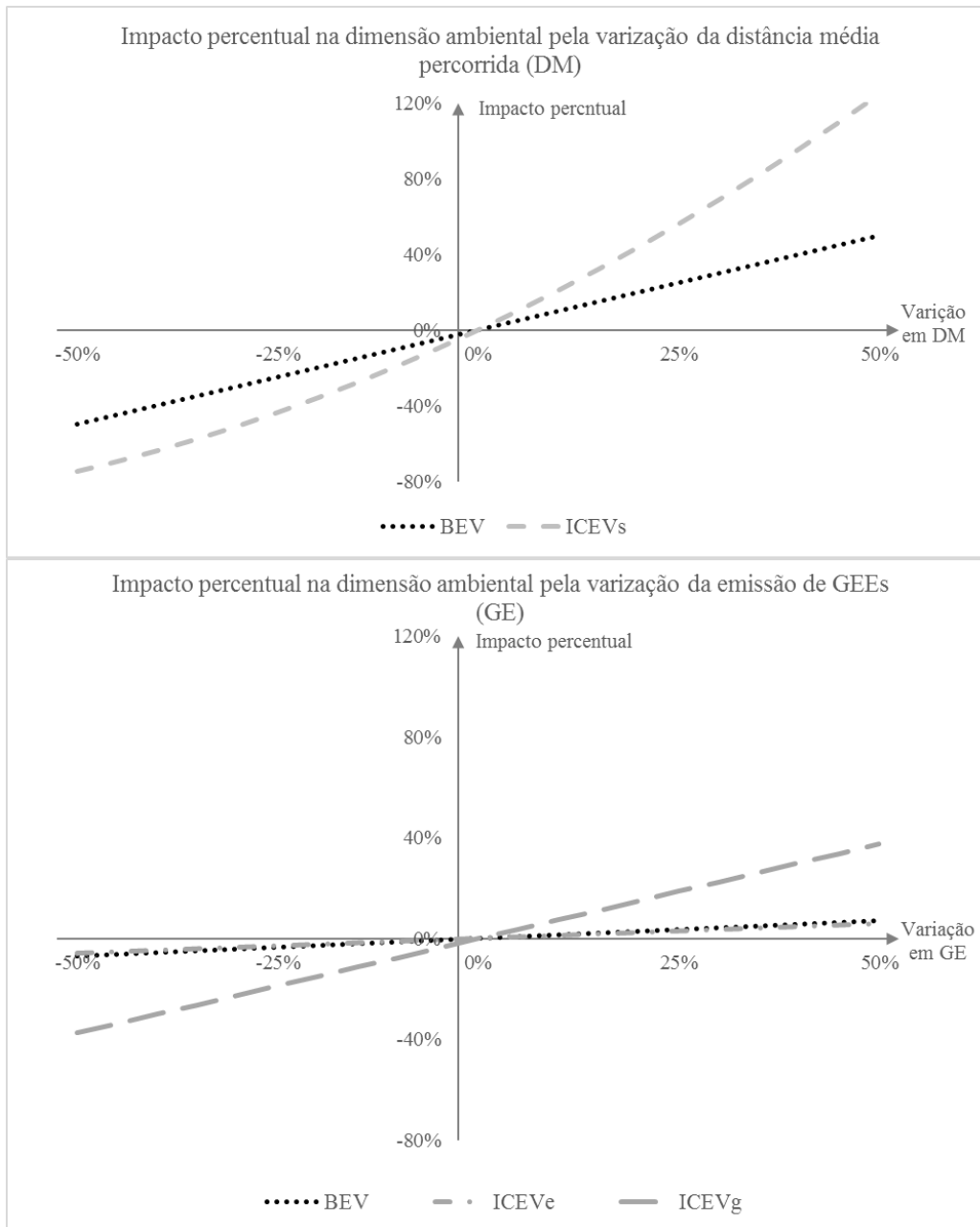


Figura 5.2: Sensibilidade da dimensão ambiental (em R\$/mês) aos parâmetros.

Fonte: elaboração própria.

GEEs (GE) no cálculo final de impacto financeiro da dimensão ambiental. A relação é direta ao nível de emissões, muito superior nestes veículos em comparação aos elétricos ou etanol.

Em adição aos gráficos apresentados, a dimensão ambiental tem uma sensibilidade grande à emissão de poluentes locais (PL). A análise gráfica não foi realizada por serem quatro poluentes considerados, cada um com um fator de emissão (g/km)

e um custo unitário (R\$/g) para cada veículo. Sendo assim, optou-se por reproduzir a importância em relação ao cálculo final da dimensão ambiental na Tabela 5.2

Parâmetro (custo)	Notação	BEV ₁ (x_1)	BEV ₂ (x_2)	PHEV (x_3)	ICEV _e (x_4)	ICEV _g (x_6)
Material Particulado 2,5	MP _{2,5}	-	-	0%	0%	1%
Material Particulado 10	MP ₁₀	86%	74%	63%	80%	22%
Monóxido de Carbono	CO	-	-	0%	2%	0%
Óxidos de Nitrogênio	NO _x	-	-	1%	6%	2%
Emissão de GEEs	CG _T	14%	26%	36%	12%	75%
Total (R\$/veículo*mês)	PL _T +CG _T	2,1	2,4	2,9	2,6	9,3

Tabela 5.2: Influência percentual de parâmetros no impacto financeiro das emissões.

Fonte: elaboração própria.

Para os convencionais, o poluente mais emitido é o monóxido de carbono (CO). Porém, o PM₁₀ e o NO_x superam o CO no custo final, por terem custos unitários maiores. Na dimensão ambiental, testou-se também a importância do fator de emissão do *grid* brasileiro (EM) no resultado final. O valor utilizado no cenário BASE foi a média dos últimos dez anos, resultando em 0,075 kgCO₂e/kWh (MCTI, 2018). Averiguou-se o impacto do pior ano desta série. Segundo a EPE (2015), em 2014 o fator de emissão atingiu 0,136 kgCO₂e/kWh, principalmente devido à menor participação das renováveis na matriz brasileira (74,6% em 2014 contra 81,7% em 2016).

Este valor de EM faria com que mesmo o veículo elétrico mais eficiente, BEV₁, emitisse 70% mais GEEs que o veículo a etanol (ICEV_e), mas ainda 92% menos que o ICEV_G. Ainda assim, a análise global do custo de emissão somando GEEs com poluentes locais daria um resultado favorável ao BEV₁ em comparação com o ICEV_e. Dessa forma, não haveria alteração dos resultados obtidos pela pesquisa.

É importante acrescentar que o fator de emissão do grid que iguala as emissões de GEEs (GE) para os veículos BEV₁ e ICEV_e é 0,076 kgCO₂e/kWh, praticamente

o valor encontrado como média dos últimos dez anos. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (MME/EPE, 2017), a projeção mais pessimista para participação de renováveis na matriz brasileira é de 81% (cenário Alternativo). Esse número é superior ao de 2014, pior ano da série analisada (EPE, 2015).

Em relação aos poluentes locais, há uma incerteza maior em relação aos fatores de emissão (PL) e custos unitários (PL_u), também identificado em (MITROPOULOS e PREVEDOUROS, 2015). Por fim, os preços de combustíveis e eletricidade (PC), os custos de manutenção por rodagem (CM) e a eficiência, traduzida pelo consumo médio de cada veículo (CS) não têm impacto relevante no resultado final dentro das respectivas incertezas.

Os resultados apresentados nesta seção são importantes para explorar diferentes análises resultantes do modelo desenvolvido, a partir das informações disponíveis. Além disso, pode-se considerar uma primeira referência para comparação com estudos futuros, em diferentes contextos, escalas e/ou alternativas de veículos.

5.2 Resultados do modelo mono-objetivo

A Figura 5.3 apresenta os resultados para o modelo mono-objetivo, tanto do cenário BASE quanto dos alternativos. Para facilitar a análise, os gráficos desta seção mostram BEV_1 e BEV_2 como um só carro BEV, visto que o compacto (BEV_1) domina o SUV por conta do preço inferior e da maior eficiência. Já o $ICEV_{e+g}$ está dividido igualmente entre $ICEV_e$ e $ICEV_g$, pois a criação da variável intermediária (x_5) teve como objetivo principal a suavização dos resultados do modelo. Com esses agrupamentos busca-se focar apenas nas diferenças existentes entre as tecnologias de propulsão. Eventuais distinções relevantes entre as variáveis agrupadas serão apresentadas e discutidas quando oportuno.

Os resultados da Figura 5.3 evidenciam as particularidades de cada veículo analisado na pesquisa. No cenário BASE é selecionada uma frota misturando ICEVs movidos a etanol ($ICEV_e$) e a gasolina ($ICEV_g$). Isto se deve basicamente à vantagem econômica destes veículos, que também têm autonomia maior que os BEVs.

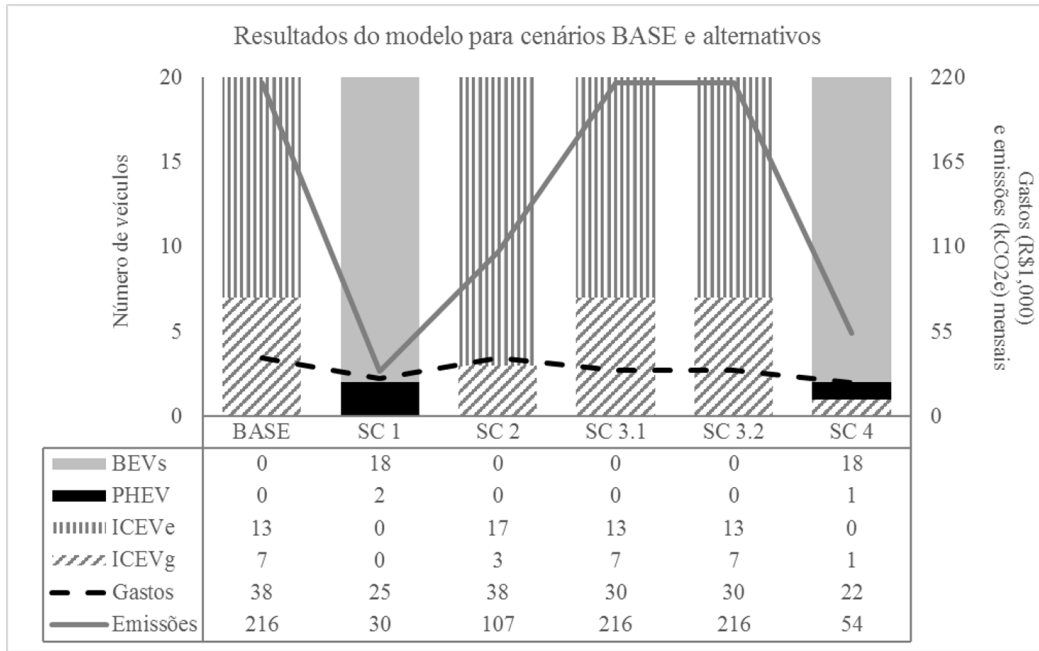


Figura 5.3: Composição da frota, custo total e emissões de GEEs para os cenários mono-objetivo.

Fonte: elaboração própria.

O modelo escolhe o número máximo de $ICEV_g$ que não viola o limite superior de emissões estabelecido pela restrição. Em seguida, a frota é preenchida com veículos $ICEV_e$, uma opção com menor impacto ambiental e a segunda melhor economicamente.

O pareamento dos custos de investimento dos VEs aos convencionais no cenário SC 1 resulta na adoção dessa alternativa em detrimento dos ICEVs. Sem barreiras tarifárias para aquisição e com igualdade de condições na infraestrutura, o menor custo de manutenção e de abastecimento dos elétricos prevalece, além da já consolidada vantagem na dimensão ambiental. Vale destacar que a categoria compacta (BEV_1) responde pela totalidade dos BEVs, uma vez que a principal vantagem do BEV_2 , a autonomia, é compensada pelo híbrido (PHEV). Nesse caso, o MCI auxiliar confere a esse veículo a maior autonomia dentre todas as alternativas, com a vantagem de emitir pouco por rodar a maior parte do tempo com o motor elétrico.

As redução do limite de emissões aplicada no cenário SC2 praticamente elimina da frota os veículos a gasolina. Sua presença residual deve-se ao melhor desempenho econômico em relação ao etanol. O modelo, assim como no cenário BASE, escolhe

o máximo de $ICEV_g$ possível dada a restrição de emissões. Neste cenário, o $ICEV_e$ surge como uma opção econômica e com baixo impacto ambiental.

Os cenários de ampliação do horizonte temporal, SC 3.1 e SC 3.2, não alteram os resultados obtidos no BASE. Apesar dos veículos elétricos serem mais beneficiados pela amortização dos investimentos iniciais, o mesmo ocorre com os convencionais, que mantêm a proporção do resultado BASE. Nos resultados, o único impacto é no custo mensal total do projeto.

Por fim, o cenário SC 4, que reúne os anteriores, praticamente reitera os resultados do SC 1, reduzindo o custo mensal pela amortização dos investimentos, contribuição do SC 3.2. Neste caso não há impacto do cenário SC 2, pois o total de emissões já é muito inferior ao limite estabelecido.

Em resumo, o cenário que representa menos emissões de GEEs é o SC 1, que iguala as condições econômicas de competição entre elétricos e convencionais. O resultado sugere que a viabilização econômica dos VEs é mais efetiva para redução de emissões do que a política ambiental em si.

5.3 Análises de sensibilidade para o modelo mono-objetivo

Nesta seção, são apresentadas as análises de sensibilidade para os cenários do modelo mono-objetivo, visando identificar as principais mudanças no resultado. Inicialmente o foco é nos cenários SC 1 e SC 2, pois são os únicos que permitem uma variação gradual para estudar a sensibilidade do modelo ao longo de sua implantação. Os resultados estão apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5. É importante ressaltar o nível 100% no eixo x das duas Figuras equivale ao resultado da Seção 5.2 - Figura 5.3 para SC 1 e SC 2. Os parâmetros foram alterados de 0 a 100% com um intervalo de 5%.

A Figura 5.4 mostra o comportamento do modelo para diferentes níveis de implantação do SC 1. O percentual de adoção vai de 0 (BASE) a 100% (SC 1). A

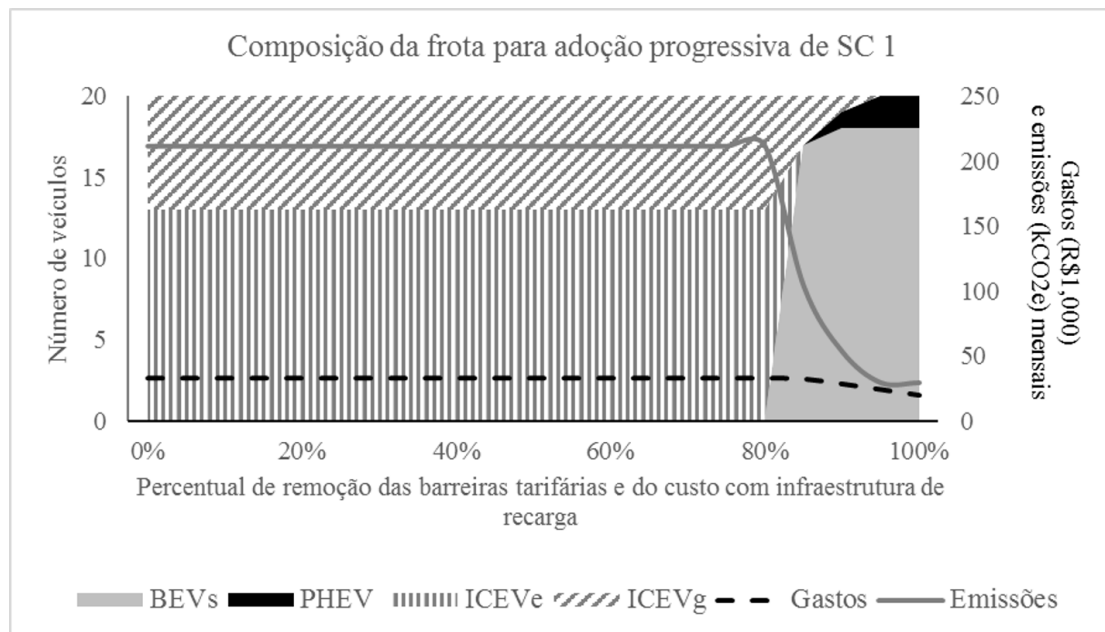


Figura 5.4: Sensibilidade do resultado à adoção progressiva de SC 1.

Fonte: elaboração própria.

variação é feita simultaneamente para os parâmetros redução das barreiras tarifárias para aquisição dos VEs e construção de infraestrutura mínima de recarga. Em outras palavras, com um nível de adoção igual a 50% a barreira tarifária do cenário BASE (25%) cai à metade (12,5%) e o custo com a infraestrutura fica dividido igualmente entre o operador do sistema e atores externos (governo e/ou iniciativa privada).

Pode-se observar na Figura 5.4 que a introdução dos veículos elétricos ocorre antes da adoção completa de SC 1, mais especificamente em 85%. Isto significaria uma redução tarifária de IPI de 25% para cerca de 4%. Além disso, deixaria o operador do projeto com 15% do investimento em infraestrutura de recarga. O resultado vai ao encontro da tendência atual, com anúncio recente de redução do IPI para 7% (JORNAL DO COMÉRCIO, 2018), além de iniciativas ao redor do mundo para construção de uma infraestrutura mínima para viabilizar os VEs (STARTSE, 2017; THE GUARDIAN, 2018).

Portanto, apesar de representar um percentual alto que requer uma política financeira agressiva na dimensão econômica, a Figura 5.4 também mostra que os VEs são uma alternativa atraente mesmo com alguma desvantagem financeira. Além disso, o contexto nacional e global caminha para atender à redução necessária para

viabilizar essa tecnologia. Por fim, como esperado, há uma redução acentuada no total de emissões à medida que os VEs começam a ser adotados.

Em relação aos parâmetros alterados pelo cenário SC 1 (VC e IN), cabe acrescentar que nenhum dos dois por si só mostrou-se capaz de alterar o resultado do modelo, substituindo os ICEVs pelos os VEs. Mesmo a eliminação total dos investimento em infraestrutura, parâmetro mais significativo da dimensão econômica, dependeria de uma redução em 33% das barreiras tarifárias para viabilizar os VEs.

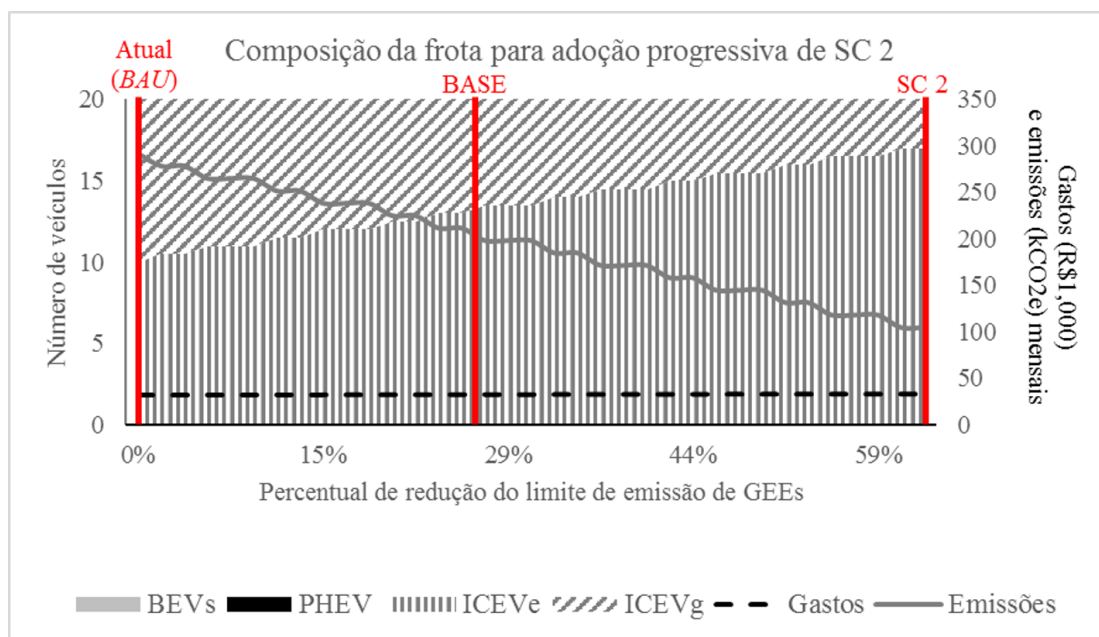


Figura 5.5: Sensibilidade do resultado à adoção progressiva de SC 1.

Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.5 representa a variação do limite de emissões entre o cenário atual (BAU, *Business as Usual*), com 0% de redução, até o SC 2 (63% de redução), passando pelo BASE (25,6%). A opção que mais se beneficia nesse caso é o ICEV_e, que substitui o ICEV_g de forma linear ao aumento da restrição. Como ambos têm custos similares, não há uma alteração significativa na dimensão econômica. Já a ambiental está sempre próxima do limite permitido pela restrição GE^C e, portanto, reduz linearmente.

Para complementar as análises de cenários, optou-se por apresentar as variações dos custos totais (CT = AQ + CM + IN) e de aquisição (AQ) desde BASE até SC 4. As Figuras 5.6 e 5.7 restringem a análise às alternativas BEV₁ e ICEV_g, por serem

estas as opções mais econômicas para os motores elétrico e de combustão interna, respectivamente. O cenário SC 2 não foi incluído porque não incorpora políticas que impactem na dimensão econômica.

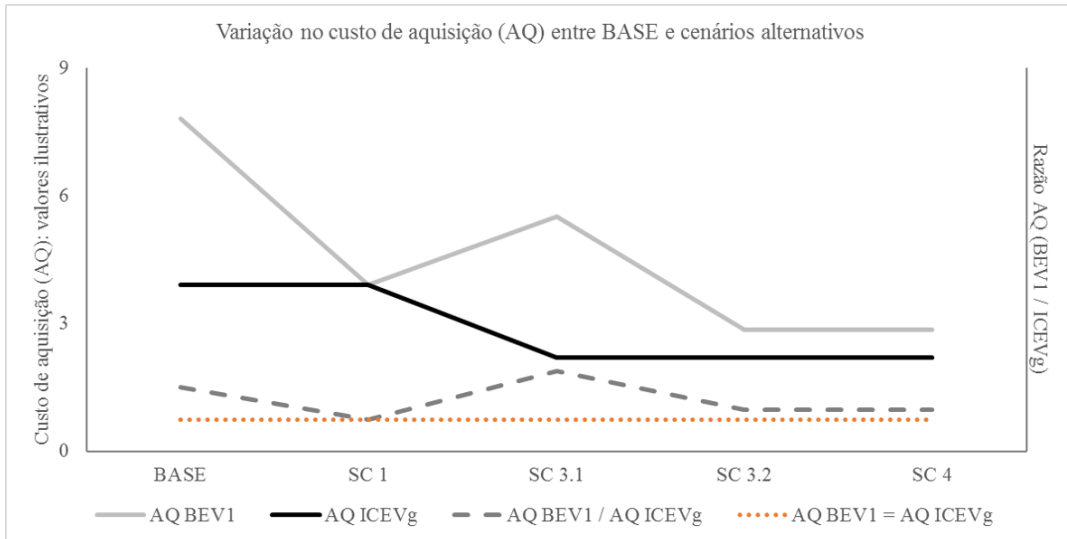


Figura 5.6: Variação no custo de aquisição entre BASE e os cenários alternativos.

Fonte: elaboração própria.

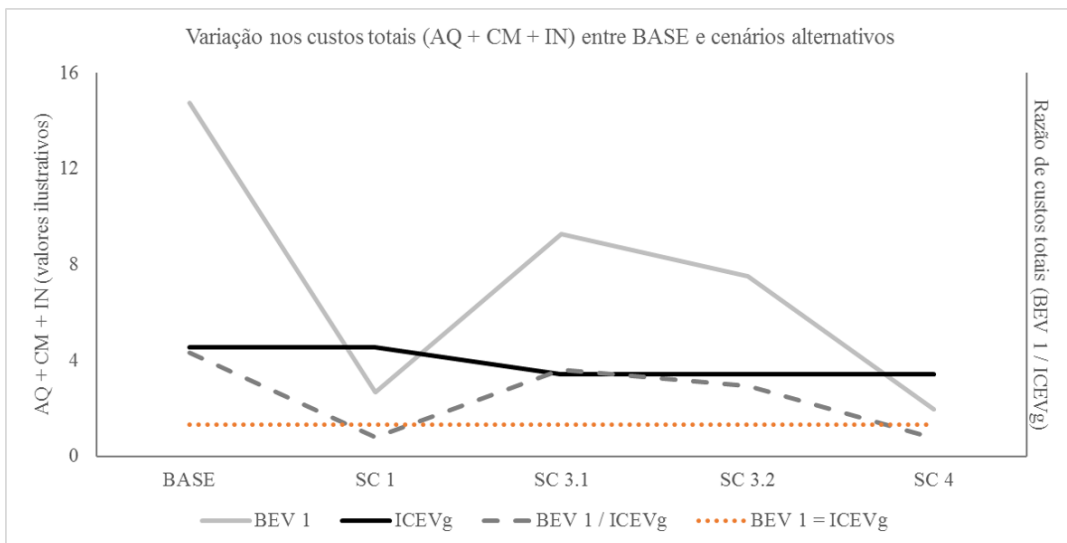


Figura 5.7: Variação no custo total entre BASE e os cenários alternativos.

Fonte: elaboração própria.

Nota-se, na Figura 5.6 que as políticas de equilíbrio competitivo para os VEs na dimensão econômica adotadas em SC 1, igualam AQ para os dois tipos e deixam os VEs com um custo total inferior aos ICEVs. O principal motivo é o menor custo com manutenção e reabastecimento dessa alternativa em relação tanto ao convencional

quanto ao híbrido (PHEV).

Pode-se destacar ainda que apenas a ampliação do horizonte de projeto em SC 3.1 compensa a necessidade de reposição da bateria do motor elétrico, fazendo com que AQ tenha um valor menor do que em BASE. O mesmo não se verifica quando comparado com a eliminação da barreira tarifária em SC 1, que é capaz de reduzir mais AQ.

No cenário SC 3.2 os avanços tecnológicos igualam o valor de compra dos VEs com o SC 1. Com isso, AQ difere em relação ao horizonte temporal (5 anos no SC 1 e 10 no SC 3.2) e à necessidade de reposição da bateria em SC 3.2. Nesse caso, a amortização em mais períodos supera o custo da bateria deixando SC 3.2 como o cenário de menor AQ junto com SC 4.

Ainda sobre o cenário SC 3.2, este representa a maior redução absoluta no custo de aquisição do veículo elétrico, pois combina avanços tecnológicos com amortização do investimento em mais períodos. Porém, na análise relativa, é em SC 1 que o BEV_1 iguala AQ ao $ICEV_g$, uma vez que, diferente de SC 3.2, apenas o elétrico é beneficiado pelas políticas propostas e o $ICEV_g$ só é afetado pelo horizonte temporal.

Na Figura 5.7, o cenário SC 1 é o que apresenta melhor resultado final para o BEV_1 , tanto absoluto quanto relativo. Atribui-se esta resposta à predominância do investimento em infraestrutura de recarga como principal custo dos VEs, resultado apresentado também na Tabela 5.1.

5.4 Resultados para o cenário multi-objetivo

Expandindo a análise para os outros parâmetros do método, uma abordagem multi-objetivo foi conduzida, chamada de cenário M-OBJ. Para calcular a dimensão ambiental foram utilizados os custos equivalentes de emissão de GEEs e de poluentes locais.

A Figura 5.8 apresenta a composição da frota para as soluções ótimas, considerando diferentes pesos das dimensões econômica e ambiental. Já a Figura 5.9 representa a fronteira de Pareto, composta por três pontos diferentes.

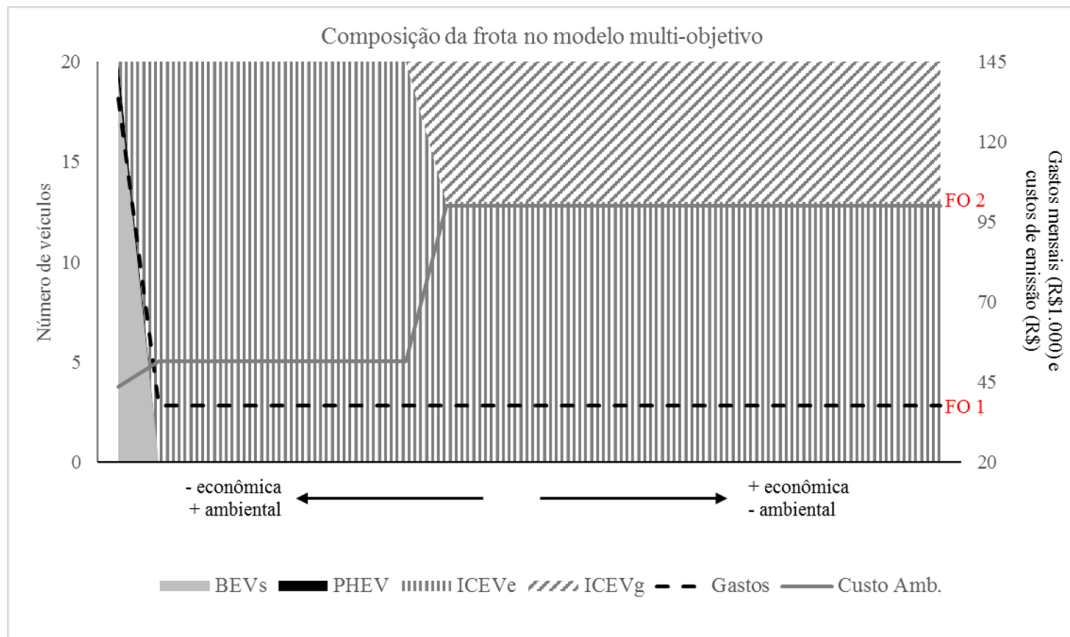


Figura 5.8: Composição da frota considerando as soluções ótimas do cenário multi-objetivo.

Fonte: elaboração própria.

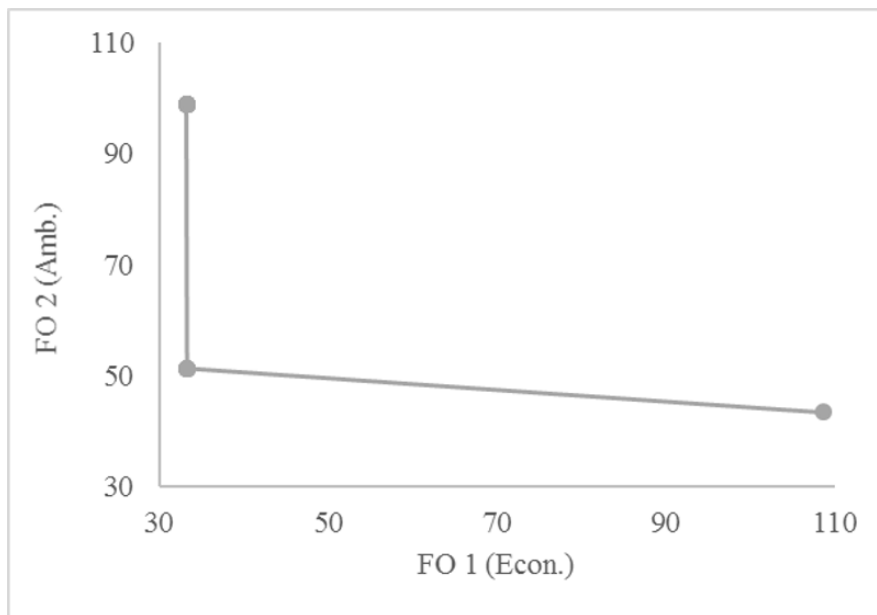


Figura 5.9: Fronteira de Pareto das soluções ótimas para o cenário multi-objetivo.

Fonte: elaboração própria.

Os resultados refletem a diferença de ordem de grandeza (10^3) entre as duas dimensões. Na Figura 5.8, os VEs são selecionados apenas quando o problema tem um comportamento quase mono-objetivo, Isso ocorre com minimização da dimensão ambiental, por meio da atribuição de peso 1 para esta e 0 para a econômica e também

alguns pontos na vizinhança, com peso bem pequeno para a dimensão econômica.

No geral, o $ICEV_e$ é o principal beneficiado pela aplicação do modelo multi-objetivo, devido ao seu equilíbrio entre custos e emissões. Entretanto, a presença dos BEVs no lado esquerdo do eixo x indica que essa tecnologia prevalece quando se prioriza a dimensão ambiental, nesse caso representada pela soma dos custo de emissão de GEEs e de poluentes locais

O $ICEV_g$, por sua vez, perde espaço na frota quando aumenta o peso da dimensão ambiental, pois o $ICEV_e$ passa a ser mais competitivo com um custo global menor. Tanto o etanol quanto o VE apresentam resultados interessantes quando se inclui a dimensão ambiental no cálculo. O primeiro já tem um custo baixo pela tecnologia consolidada e infraestrutura estabelecida. O segundo representa um ganho importante em relação aos poluentes locais e envolve aspectos tecnológicos inovadores, com capacidade de utilização como gestão de demanda na rede elétrica, conexão com sistemas inteligentes e criação de uma nova cadeia de fornecimento.

Para o estudo do projeto VAMO, esta seção apresenta resultados no sentido da adoção de combustíveis de propulsão diferentes da gasolina, inclusive com novas tecnologias. Esse caminho dá sinais de ser factível, uma vez que já se discute a ampliação de participação do etanol anidro na gasolina (FOLHA DE SÃO PAULO, 2018), a redução das taxas para VEs (JORNAL DO COMÉRCIO, 2018) e o desenvolvimento de PHEVs adaptados ao etanol (G1, 2018). Além disso, os biocombustíveis estão sendo fortalecidos, com publicação recente da Lei 13.576/2017 (BRASIL, 2017).

Os resultados numéricos de todos os gráficos apresentados neste capítulo podem ser conferidos no Apêndice D. Em resumo, os veículos BEV_2 e PHEV praticamente não são selecionados pelo modelo. O primeiro perde na dimensão econômica para o BEV_1 , tanto pelo maior preço de aquisição quanto pela menor eficiência no consumo de combustível. Além disso, sua maior autonomia, principal vantagem comparativa, não compensa no resultado final.

Já o PHEV, uma tecnologia intermediária, destaca-se mais pelos elementos ne-

gativos que absorve de cada tecnologia do que pelos positivos. Suas emissões são menores apenas que as do $ICEV_g$ e seu custo é elevado, em parte pelo fato de existirem apenas opções de padrão alto (SUV) à venda no Brasil. A presença destes veículos nos cenários SC 1 e SC 4 se deve à grande autonomia que proporcionam, permitindo que poucos carros elevem bastante o valor máximo de deslocamento médio alcançado do projeto.

Notícias recentes que projetam tecnologia de abastecimento do MCI dos híbridos com etanol podem indicar uma mudança nesse resultado quando for implantada. De qualquer forma, estes veículos são importantes para a transição tecnológica dos parques industriais da indústria automotiva e para criação de uma cultura de recarga na rede para os usuários.

Os gastos superiores com VEs no curto prazo por conta de seu maior custo podem ser interpretados como investimentos de retorno futuro devido à projeção de crescimento da fatia de mercado dessa tecnologia no longo prazo. Este processo pode ocorrer por meio da pressão do mercado externo, sede das montadoras, e/ou pela conexão desses veículos com modelos de negócio do futuro, como Cidades Inteligentes¹ e Internet das Coisas².

5.5 Comparação com Outros Estudos

O melhor desempenho econômico dos veículos convencionais (ICEVs) no curto prazo associado à vantagem ambiental dos veículos elétricos (VEs) é um resultado importante do VAMO, que é compartilhado por diversos estudos dentre os mapeados no Capítulo 2 (p.ex., GONZÁLEZ PALENCIA *et al.*, 2017; HAO *et al.*, 2016; JOCHEM *et al.*, 2016; TSENG *et al.*, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 2017).

Entretanto, esta pesquisa tem um diferencial metodológico em relação à literatura citada, que é a aplicação do modelo a um projeto específico de pequena escala de compartilhamento localizado em uma grande cidade brasileira. Muitos estudos

¹Do inglês *Smart Cities*. Mais informações em: <https://abr.ai/2GQhqJR>.

²Do inglês *Internet of Things*. Para saber mais, consulte <https://bit.ly/2qQFIxo>.

conduzem aplicações práticas dos seus métodos, mas os ambientes de análise são muito diferentes.

Além disso, os resultados são obtidos por meio da aplicação de um modelo de otimização, que só é construído em GONZÁLEZ PALENCIA *et al.* (2017), dentre os trabalhos destacados. A semelhança nos resultados, mesmo incluindo a perspectiva de outros *stakeholders* também é importante ressaltar, visto que apenas VASCONCELOS *et al.* (2017) adota a mesma prática. Considera-se importante reforçar as principais conclusões de estudos anteriores mesmo com a introdução de outros elementos na análise e aplicando a um contexto diferente.

De acordo com VASCONCELOS *et al.* (2017) e HAO *et al.* (2016), incentivos como vagas gratuitas e benefícios tarifários no preço de aquisição viabilizariam financeiramente os VEs, uma conclusão que é reforçada no Capítulo 5 para o segundo aspecto.

Outro resultado da aplicação conduzida, que o melhor desempenho dos ICEVs na dimensão econômica para o curto prazo deve-se principalmente à ausência de infraestrutura de recarga, é uma conclusão partilhada por SIERZCHULA *et al.* (2014) e TSENG *et al.* (2013). Além disso, as análises reforçam a afirmação destes autores de que a avaliação monetária da dimensão ambiental é insuficiente para mudar a decisão de curto prazo em prol dos ICEVs, confirmando a importância da redução de barreiras fiscais para equilibrar as condições de competição entre os veículos

MERSKY *et al.* (2016) acrescentam que os incentivos econômicos e a disponibilização de uma infraestrutura mínima de estações de recarga podem ser as melhores políticas para aumentar as vendas de veículos elétricos. Como vantagens competitivas dos VEs, JOCHEM *et al.* (2016) incluem, além da menor emissão de GEEs, os poluentes locais e o ruído. Em contraste com nossa análise, o resultado encontrado por esses autores mostra-se sensível à composição das fontes de geração. No presente estudo, este fator não altera o resultado, dentro da oscilação recente da matriz brasileira.

Com relação ao modelo multi-objetivo, LEE e MADANAT (2017) encontram soluções similares entre esta abordagem e a mono-objetivo. Isso implica dizer que a minimização das emissões poderia minimizar também o custo total do projeto. Esse resultado é distinto do encontrado no Capítulo 5, no qual o equilíbrio do custo é mais efetivo para redução de emissões do que as políticas restritivas em si.

Alguns trabalhos (GONZÁLEZ PALENCIA *et al.*, 2017; MORRISON *et al.*, 2018) projetam o futuro do mercado de veículos leves com espaço para todos os tipos de veículos, atendendo às necessidades de todos os usuários. Esta conclusão pode ser considerada válida também para esta pesquisa, pois a substituição da tecnologia mais difundida atualmente, MCI a gasolina, é proposta de forma gradual e dividida entre as duas tecnologias alternativas mais consolidadas: BEV e etanol.

5.6 Limitações e indicações para trabalhos futuros.

É importante considerar que, embora o modelo proposto tenha relações lineares entre os parâmetros e o resultado, os resultados que ele produz são comparáveis com a literatura. Mais importante é o sucesso em obter resultados a partir da avaliação conjunta das dimensões econômica e ambiental simultaneamente.

A dimensão social, outro pilar do Valor Compartilhado, não foi considerada devido à falta de dados confiáveis. No entanto, acredita-se ser importante incluí-la em pesquisas futuras, a fim de avaliar comparativamente o impacto social de cada tipo de veículo. Para isso, é importante incorporar conhecimentos das ciências sociais. Alguns impactos sociais dos veículos leves já mapeados em literatura são:

- acessibilidade, financeira e/ou física (NILSSON e NYKVIST, 2016);
- congestionamento (NILSSON e NYKVIST, 2016; WU *et al.*, 2015);
- estabilidade da rede elétrica (LOISEL *et al.*, 2014; QUDDUS *et al.*, 2018);

- saldo de postos de trabalho, criados - destruídos (MUNEER *et al.*, 2015; NURHADI *et al.*, 2017);
- segurança, pelo risco de acidentes (DEGIRMENCI e BREITNER, 2017; NILSSON e NYKVIST, 2016).

A dimensão ambiental também pode ser melhor desenvolvida com o aumento de abrangência dos parâmetros incluídos, como abordado na Seção 3.4. Para isso, é necessário que se obtenha fatores de conversão em unidades monetárias para os novos parâmetros ou que se acrescente ao modelo soluções multi-objetivo que agreguem as diferentes dimensões a partir de uma normalização não monetária, como ocorre em estudos multi-critério.

Além disso, com exceção da restrição de autonomia, o modelo não contempla as preferências do consumidor em relação à tecnologia do veículo, dependendo da finalidade da viagem. Com relação aos tipos de veículo, os VEs foram selecionados porque a pesquisa pretendia aplicar o modelo desenvolvido ao projeto VAMO, que utiliza apenas BEVs. No entanto, há uma forte discussão no Brasil sobre biocombustíveis e um mercado consumidor bem estabelecido de gás natural. Por isso, é importante que pesquisas futuras também avaliem essas e outras alternativas aos ICEVs.

Considera-se que o modelo proposto pode ser replicado em outros contextos, desde que os dados sejam disponibilizados. Uma aplicação similar que poderia ser desenvolvida refere-se à minimização da dimensão ambiental com a dimensão econômica como restrição, limitada pelo orçamento do operador e/ou a disposição a pagar dos clientes. Desta forma, o foco principal seriam os impactos ambientais, com garantia de viabilidade econômica do sistema.

Como melhoria, o modelo também poderia ser adaptado a sistemas mais complexos, como uma frota de passageiros local ou nacional. Esta ampliação exigiria uma avaliação dinâmica da interferência entre os parâmetros para estabelecer com solidez as premissas e cenários analisados. Além disso, um estudo exaustivo sobre o processo de seleção dos parâmetros poderia ampliar o entendimento sobre a comple-

tude dos indicadores selecionados para as dimensões técnica, econômica e ambiental (e eventualmente social).

Aspectos qualitativos também poderiam ser incluídos, como o impacto sobre a estabilidade da rede elétrica e a demanda de eletricidade, atuando como restrição ao percentual máximo de VEs pela capacidade do sistema de suportar a eletrificação da frota. Analisando a perspectiva de mercado, o potencial de liderança em mercados futuros também é relevante de ser analisado, sendo incluído como um benefício qualitativo ou monetizado, por meio de referências atuais de empresas líderes do setor.

É importante ressaltar que o objetivo deste trabalho é discutir alternativas para composição de uma frota de veículos leves para transporte de passageiros. Porém, olhando para o setor de transportes como um todo, HAO *et al.* (2016) e JOCHEM *et al.* (2016) destacam que o próprio transporte privado por carros precisa ser reduzido em prol da ampliação do transporte público ou do não motorizado.

Por fim, os sistemas de compartilhamento de veículos necessitam de estudos mais aprofundados dos aspectos ambientais, técnicos e de mobilidade para compreender seu real papel na transformação dos modelos de negócio no transporte de passageiros. ZOEPF e KEITH (2016) determinam que os usuários que utilizam prioritariamente transporte público são mais propensos a andar maiores distâncias até um veículo compartilhado. Segundo os autores, esses sistemas podem substituir mais o serviço ineficiente de transporte público do que ser uma alternativa para redução dos veículos privados.

LANGBROEK *et al.* (2017) reforçam esta ideia afirmando que os VEs são considerados menos impactantes ao meio ambiente que o próprio transporte público convencional. Como consequência, usuários de VEs tendem a fazer mais deslocamentos utilizando seus veículos pessoais do que os proprietários de carros convencionais.

Capítulo 6

Conclusão

Esta pesquisa desenvolveu um modelo de otimização para composição de uma frota heterogênea em sistemas de compartilhamento de veículos a partir de alternativas com diferentes tecnologias de propulsão. Para garantir a inclusão da sustentabilidade na tomada de decisão, o princípio de Valor Compartilhado (VC) foi aplicado, considerando aspectos ambientais, uma abordagem *multistakeholder* e diferentes horizontes temporais.

Até onde se sabe, pelo mapeamento feito da literatura, este é o primeiro estudo que desenvolve uma otimização para comparação de veículos elétricos, híbridos e convencionais, em projetos de carros compartilhados e considerando a sustentabilidade do sistema.

Uma vantagem apresentada pelo modelo desenvolvido é a facilidade de adaptação a outros contextos e de inclusão dos parâmetros desconsiderados. A partir da estrutura proposta no método, relacionada tanto ao modelo quanto à seleção de parâmetros, outros trabalhos com acesso a diferentes dados podem obter resultados consistentes. Uma contribuição importante que se pretende dar é a concepção de um modelo inicial que possa aumentar de complexidade a partir de trabalhos futuros.

Dessa forma, será possível expandir as análises para composição de frotas mais abrangentes e avaliar impactos de tecnologias alternativas para veículos leves seja em grandes projetos de compartilhamento ou em cidades e até países. Para isso, será necessário lidar com o equilíbrio dinâmico entre os parâmetros e conduzir estudos

mais aprofundados sobre premissas e cenários de médio e longo prazos.

A aplicação também mostrou que a incorporação do Valor Compartilhado trouxe um diferencial ao modelo. A partir dos resultados, foi possível constatar que a incorporação da dimensão ambiental influenciou no resultado, tanto na restrição, como limite de emissão de GEEs, quanto no modelo multi-objetivo, com monetização dos impactos. Apesar disso, ainda há uma grande disparidade na ordem de grandeza entre as dimensões, abrindo espaço para a incorporação de outros métodos que possam refinar essa etapa do modelo.

A etapa de elaboração de cenários também se mostrou importante, sendo capaz de influenciar no resultado a partir da alteração de composição da frota. O comportamento do modelo nas diferentes premissas possibilitou analisar com mais detalhes as variações existentes dentro do próprio projeto, tendo em vista também os totais de custo mensal e emissões.

Essa avaliação é importante para o tomador de decisão, neste caso o operador do sistema. Além da óbvia análise de custo, a incorporação do Valor Compartilhado auxilia no relacionamento com as partes interessadas do projeto, que podem dificultar ou facilitar muito sua perenidade. A dimensão ambiental, por exemplo, pode preparar o projeto para legislações e contestações futuras, apresentando a alternativa que equilibra melhor os impactos ao custo total. Cabe ressaltar que, com alterações pontuais, é possível aplicar o modelo a diferentes decisores, considerando a ótica dos outros atores envolvidos.

Quanto às tecnologias de veículos leves, os elétricos, estudados como principal alternativa no projeto VAMO, ainda estão em estágio inicial de penetração no Brasil. Resta saber se o caminho para disseminá-los será por meio de políticas públicas com incentivos econômicos (podendo ser como restrição ao convencional) ou se a partir do maior engajamento da sociedade e dos setores privados, com pressões para melhoria das condições de aquisição e uso.

Nesse sentido, as análises de cenários e de sensibilidade dos parâmetros conduzidas neste trabalho também contribuem para a tomada de decisão em projetos como

o VAMO, uma vez que testam o efeito de diferentes políticas na priorização dos veículos disponíveis para a frota. O principal resultado foi a constatação de que o equilíbrio da dimensão econômica por meio da remoção de barreiras aos VEs é mais efetiva para a redução das emissões do que ampliar as restrições ambientais. Esse resultado é influenciado pela menor emissão do veículo elétrico, que quando tem iguais condições de competição é selecionado para compor parte da frota.

Para que esse resultado seja válido, o trabalho considera que os avanços tecnológicos e de ganho de escala previstos para a próxima década serão capazes de tornar o custo total do VE comparável ao dos convencionais, quando considerado todo o ciclo dos veículos. Existe ainda uma discussão mais ampla envolvendo questões como estabilidade da rede elétrica, capacidade de atendimento da demanda por renováveis e priorização do transporte público e não motorizado que não são abordadas nesta pesquisa. Esses fatores são alvo de outros trabalhos e devem ser incluídos nos processos decisórios para o setor de transportes.

Também foi obtido como resultado específico que, apesar dos veículos a gasolina ainda serem importantes por conta de tecnologia, cadeia de suprimentos e infraestrutura bem estabelecidos, sua fatia de mercado terá que ser reduzida gradualmente caso a sociedade brasileira tenha como objetivo atingir suas metas climáticas traçadas. Tanto o $ICEV_e$ quanto os VEs aparecem como alternativas ao $ICEV_g$, sugerindo que a substituição dos combustíveis fósseis no setor de transportes não ocorrerá a partir de uma única tecnologia. Além disso, diversas políticas já foram implantadas ou estão em fase de discussão para incentivar essa transição. Todas as opções estudadas apresentaram benefícios e impactos, dependendo do aspecto considerado.

Em relação aos VEs, a principal desvantagem ainda são os elevados custos. Na dimensão econômica, a maior barreira encontrada foi a ausência de infraestrutura. Entretanto, um olhar de longo prazo exigiria que a depreciação das infraestruturas existentes para os veículos convencionais fosse resposta e esses investimentos poderiam ser redirecionados para a mobilidade elétrica.

A presença do etanol como alternativa mais viável em diversos cenários deve-se ao seu equilíbrio entre as dimensões econômica e ambiental. Em relação aos custos, o ICEV_e beneficia-se da tecnologia consolidada de propulsão, que disponibiliza os veículos a um preço mais acessível. Além disso, a infraestrutura estabelecida de postos de combustível permite a esse modelo não gerar um custo extra no abastecimento. Na dimensão ambiental, apesar das emissões de poluentes locais na fase de uso ser alta, o fator de emissão utilizado para GEEs considera que todo o CO₂ emitido é biogênico, ou seja, foi absorvido da atmosfera na fase de plantio e crescimento da cana. Sendo assim, o valor final de emissão é muito mais próximo dos VEs do que dos convencionais a gasolina.

Por fim, o contexto brasileiro é heterogêneo e apresenta condições favoráveis para diversas tecnologias alternativas, como etanol da cana e biocombustíveis. Esse cenário reforça o argumento de que o futuro do transporte de passageiros no país pode ser uma combinação de diferentes tipos de veículos leves de acordo com as particularidades locais e com os períodos econômicos e políticos. Os VEs têm potencial, junto com outras alternativas, de ocupar parte desse mercado, principalmente sendo o Brasil um país com alto percentual de renováveis dentre as fontes de geração de eletricidade.

A partir dos resultados obtidos e da discussão apresentada, este trabalho pretende contribuir, junto com a literatura existente e estudos futuros, com a avaliação entre manter os investimentos atuais em ICEVs ou direcionar os novos aportes para uma tecnologia alternativa, como os VEs, na busca por sistemas de transportes de passageiros mais sustentáveis. Em resumo, as principais contribuições são:

- Desenvolvimento de um modelo abrangente que pode ser replicado e adaptado a múltiplos contextos de avaliação entre alternativas de veículos leves;
- Incorporação de princípios do Valor Compartilhado (aspectos não financeiros, abordagem *multistakeholder* e ampliação de horizonte temporal) ao modelo de otimização, alterando a composição da frota;

- Comparação entre veículos elétricos e de combustão interna, no âmbito do projeto VAMO;
- Conexão entre uma abordagem quantitativa e uma formulação qualitativa de problemas complexos envolvendo aspectos de sustentabilidade;
- Seleção de parâmetros que permitem a avaliação comparativa entre diferentes tecnologias de propulsão para veículos leves;

Referências Bibliográficas

- AGENBROAD, J., HOLLAND, B., 2014, *What's the true cost of EV charging stations?* Relatório técnico, RMI. Disponível em: <<http://www.greenbiz.com/blog/2014/05/07/rmi-whats-true-cost-ev-charging-stations>>.
- AJANOVIC, A., HAAS, R., 2016, “Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success”, *Energy*, v. 115 (nov), pp. 1451–1458. ISSN: 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2016.05.040. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216306508>>.
- ALLAOUI, H., GUO, Y., CHOUDHARY, A., et al., 2015, “Sustainable agro-food supply chain design using two-stage hybrid multi-objective decision-making approach”, *Computers and Operations Research*, v. 89, pp. 369–384. ISSN: 03050548. doi: 10.1016/j.cor.2016.10.012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.10.012>>.
- ALVAREZ, R., 2018, “A more realistic approach to electric vehicle contribution to greenhouse gas emissions in the city”, *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 949–959. ISSN: 0959-6526. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.158. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0959652617324654>><<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.158>>.
- AMIRGHOLY, M., SHAHABI, M., GAO, H. O., 2017, “Optimal design of sustainable transit systems in congested urban networks: A macroscopic approach”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 103, pp. 261–285. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2017.03.006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2017.03.006>>.
- ANDERSON, C. D., ANDERSON, J., 2010, *Electric and Hybrid Cars: A History*. 2ª ed. Carolina do Norte, EUA, McFarland & Company, Inc., Publishers. ISBN: 978-0-7864-3301-8.

- ANP, 2018. “Levantamento de preços da ANP”. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/>>.
- AZAPAGIC, A., PERDAN, S., 2005a, “An integrated sustainability decision-support framework Part II: Problem analysis”, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, v. 12, n. 2 (jun), pp. 112–131. ISSN: 1350-4509. doi: 10.1080/13504500509469623. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13504500509469623>>.
- AZAPAGIC, A., PERDAN, S., 2005b, “An integrated sustainability decision-support framework Part I: Problem structuring”, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, v. 12, n. 2 (jun), pp. 98–111. ISSN: 1350-4509. doi: 10.1080/13504500509469622. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13504500509469622>>.
- BALEŽENTIS, T., STREIMIKIENE, D., 2017, “Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation”, *Applied Energy*, v. 185, pp. 862–871. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.085.
- BBC, 2017a. “New diesel and petrol vehicles to be banned from 2040 in UK”. a. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/uk-40723581>>.
- BBC, 2017b. “France set to ban sale of petrol and diesel vehicles by 2040”. b. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/world-europe-40518293>>.
- BBC, 2018. “Most new cars must be electric by 2030, ministers told”. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/science-environment-42709763>>.
- BELTON, V., STEWART, T. J., 2002, *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. 1 ed. Boston, EUA, Springer US. ISBN: 978-1-4613-5582-3.
- BOYACI, B., ZOGRAFOS, K. G., GEROLIMINIS, N., 2015, “An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems”, *European Journal of Operational Research*, v. 240, n. 3 (feb), pp. 718–733. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2014.07.020. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1509.00398http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221714005864>>.
- BOYACI, B., ZOGRAFOS, K. G., GEROLIMINIS, N., 2017, “An integrated optimization-simulation framework for vehicle and personnel relocations

- of electric carsharing systems with reservations”, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 95, pp. 214–237. ISSN: 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2016.10.007.
- BRANDSTATTER, G., KAHR, M., LEITNER, M., 2017, “Determining optimal locations for charging stations of electric car-sharing systems under stochastic demand”, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 104 (oct), pp. 17–35. ISSN: 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2017.06.009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261516308359>>.
- BRASIL, 2017. “Lei N° 13.576/2017”. Disponível em: <<https://bit.ly/2HmJCbh>>.
- BREALEY, R. A., MYERS, S., ALLEN, F., 2011, *Principles of Corporate Finance*. 10^aed. New York, McGraw-Hill.
- BRUGLIERI, M., COLORNI, A., LUÈ, A., 2014, “The Vehicle Relocation Problem for the One-way Electric Vehicle Sharing: An Application to the Milan Case”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 111, n. February (feb), pp. 18–27. ISSN: 18770428. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.01.034. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.034><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042814000354>>.
- BUBECK, S., TOMASCHEK, J., FAHL, U., 2016, “Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany”, *Transport Policy*, v. 50 (aug), pp. 63–77. ISSN: 0967070X. doi: 10.1016/j.tranpol.2016.05.012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967070X16302839>>.
- BULHÕES, T., SUBRAMANIAN, A., ERDOĞAN, G., et al., 2017, “The static bike relocation problem with multiple vehicles and visits”, *European Journal of Operational Research*, v. 264, n. 2 (jan), pp. 508–523. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2017.06.028. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221717305672>>.
- BUSINESSGREEN, 2017. “Nissan reveals ‘revolutionary’ new wave of EVs”. Disponível em: <<https://bit.ly/2vCP70j>>.
- CAVALLARO, F., 2017, “Policy implications from the economic valuation of freight transport externalities along the Brenner corridor”, *Case Studies on Transport Policy*, v. 6, n. July, pp. 1–14. ISSN: 22136258. doi:

10.1016/j.cstp.2017.11.008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cstp.2017.11.008>>.

CE DELFT, 2011, *External Costs of Transport in Europe*. Relatório técnico, CE Delft, Delft. Disponível em: <<https://bit.ly/2K8CxsL>>.

CEPOLINA, E. M., FARINA, A., 2012, “A new shared vehicle system for urban areas”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 21, n. 1, pp. 230–243. ISSN: 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2011.10.005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2011.10.005>>.

CHEN, T. D., KOCKELMAN, K. M., HANNA, J. P., 2016, “Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 94, pp. 243–254. ISSN: 09658564. doi: 10.1016/j.tra.2016.08.020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.020>>.

COBULOGLU, H. I., BUYUKTAHTAKIN, I. E., 2015, “Food vs. biofuel: An optimization approach to the spatio-temporal analysis of land-use competition and environmental impacts”, *Applied Energy*, v. 140 (feb), pp. 418–434. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.080. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.080><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914012501>>.

CONTADOR, C. R., 2014, *Projetos Sociais: Avaliação e Prática*. 5ª ed. São Paulo, Brasil, ATLAS S.A.

CRISTÓBAL, J., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., JIMÉNEZ, L., et al., 2012, “Multi-objective optimization of coal-fired electricity production with CO2 capture”, *Applied Energy*, v. 98, pp. 266–272. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.03.036.

DEGIRMENCI, K., BREITNER, M. H., 2017, “Consumer purchase intentions for electric vehicles: Is green more important than price and range?” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 51, pp. 250–260. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.01.001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.001>>.

DIJK, M., ORSATO, R. J., KEMP, R., 2013, “The emergence of an electric mobility trajectory”, *Energy Policy*, v. 52 (jan), pp. 135–145. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2012.04.024. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512003242>>.

- DIMITROPOULOS, A., RIETVELD, P., VAN OMMEREN, J. N., 2013, “Consumer valuation of changes in driving range: A meta-analysis”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 55, pp. 27–45. ISSN: 09658564. doi: 10.1016/j.tra.2013.08.001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2013.08.001>>.
- DREIER, D., SILVEIRA, S., KHATIWADA, D., et al., 2018, “Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 58, pp. 122–138. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.10.015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.015>>.
- EDDINGTON, R., 2006, *The Eddington Transport Study. Main report: Transport’s role in sustaining the UK’s productivity and competitiveness*. Relatório técnico, Crown, Londres, RU.
- ENEL, 2017. “E-mobility revolution: Enel presents the charging infrastructure plan for Italy”. Disponível em: <<https://bit.ly/2H1VLNL>>.
- ENEL SPA, 2017. “Car Sharing”. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/pr/quemosos/iniciativas/a201701-car-sharing.html>>.
- EPE, 2015, *Balanço Energético Nacional 2015: Relatório Síntese. Ano Base 2014*. Relatório técnico, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, Brasil.
- EPE, 2017a, *Balanço Energético Nacional 2017: Relatório Síntese. Ano Base 2016*. Relatório técnico, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, Brasil, a.
- EPE, 2017b, *Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do Ciclo Otto: Versão Estendida 2030*. Relatório técnico, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, Brasil, b. Disponível em: <<https://bit.ly/2HYLofU>>.
- EXAME, 2017. “Acordo de Paris completa 2 anos em cenário político desafiador”. Disponível em: <<https://abr.ai/2Pme4CU>>.
- FARIA, M. V., BAPTISTA, P. C., FARIAS, T. L., 2014, “Electric vehicle parking in European and American context: Economic, energy and environmental analysis”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 64, pp. 110–121. ISSN: 09658564. doi: 10.1016/j.tra.2014.03.011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.03.011>>.

- FARIA, R., MOURA, P., DELGADO, J., et al., 2012, “A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system”, *Energy Conversion and Management*, v. 61 (sep), pp. 19–30. ISSN: 01968904. doi: 10.1016/j.enconman.2012.02.023. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890412000945>>.
- FASSI, A. E., AWASTHI, A., VIVIANI, M., 2012, “Evaluation of carsharing network’s growth strategies through discrete event simulation”, *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 8, pp. 6692–6705. ISSN: 09574174. doi: 10.1016/j.eswa.2011.11.071. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.071>>.
- FERNANDEZ, P., PERSHIN, V., FERNANDEZ ACCN, I., 2017, “Discount Rate (Risk-Free Rate and Market Risk Premium) Used for 41 Countries in 2017: A Survey”, *SSRN Electronic Journal*, pp. 1–15. ISSN: 1556-5068. doi: 10.2139/ssrn.2954142. Disponível em: <<https://www.ssrn.com/abstract=2954142>>.
- FOLHA DE SÃO PAULO, 2018. “Decreto pode elevar para até 40% percentual de etanol na gasolina”. Disponível em: <<https://bit.ly/2tGuIGF>>.
- FRADE, I., RIBEIRO, A., 2015, “Bike-sharing stations: A maximal covering location approach”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 82, n. December 2014 (dec), pp. 216–227. ISSN: 09658564. doi: 10.1016/j.tra.2015.09.014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.014http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965856415002487>>.
- G1, 2018. “Toyota começa testes com 1º híbrido elétrico flex do mundo e ‘sonha’ com sua produção no Brasil”. Disponível em: <<https://glo.bo/2FPYgXW>>.
- GEA, 2012, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge, RU, Nova Iorque, EUA e Laxemburgo, Áustria, Cambridge University Press.
- GEORGE, D. K., XIA, C. H., 2011, “Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks”, *European Journal of Operational Research*, v. 211, n. 1 (may), pp. 198–207. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2010.12.015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2010.12.015http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221710008817>>.

- GONZÁLEZ PALENCIA, J. C., OTSUKA, Y., ARAKI, M., et al., 2017, “Scenario analysis of lightweight and electric-drive vehicle market penetration in the long-term and impact on the light-duty vehicle fleet”, *Applied Energy*, v. 204, pp. 1444–1462. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.054.
- GOVERNO DO BRASIL, 2016. “Brasil ratifica Acordo de Paris nesta segunda (12)”. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/meio-ambiente/2016/09/brasil-ratifica-acordo-de-paris-nesta-segunda-12>>.
- HAGMAN, J., RITZÉN, S., STIER, J. J., et al., 2016, “Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion”, *Research in Transportation Business and Management*, v. 18, pp. 11–17. ISSN: 22105395. doi: 10.1016/j.rtbm.2016.01.003.
- HAO, H., GENG, Y., SARKIS, J., 2016, “Carbon footprint of global passenger cars: Scenarios through 2050”, *Energy*, v. 101 (apr), pp. 121–131. ISSN: 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2016.01.089. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216300263>>.
- HAO, H., CHENG, X., LIU, Z., et al., 2017, “Electric vehicles for greenhouse gas reduction in China: A cost-effectiveness analysis”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 56, n. August (oct), pp. 68–84. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.07.025. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920916302218>>.
- HAWKEN, P., LOVINS, A. B., LOVINS, L. H., 1999, *Natural Capitalism: The Next Industrial Revolution*. Londres, RU, Earthscan. ISBN: 9781844071708. Disponível em: <<https://books.google.it/books?id=Kiep0n7khp0C>>.
- HOLLAND, M., WATKISS, P., 2004, *Benefits Table database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe*. Relatório técnico, European Commission DG Environment. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/enveco/air/pdf/betaec02a.pdf>>.
- I., H., BUYUKTAHTAKIN, I. E., 2014, “A mixed-integer optimization model for the economic and environmental analysis of biomass production”, *Biomass and Bioenergy*, v. 67, pp. 8–23. ISSN: 09619534. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.03.025. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953414001433>>.

- IBGE, 2017. “IBGE - dados sobre Fortaleza”. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>>.
- IPCC, 2006, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Relatório técnico, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), -. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf>.
- IPCC, 2014, *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*. Relatório técnico, International Panel on Climate Change, Genebra, Suíça.
- IRENA, 2013, *Road transport: the cost of renewable solutions*. Relatório técnico, International Renewable Energy Agency (IRENA). Disponível em: <http://www.irena.org/documentdownloads/publications/road_transport.pdf>.
- ISAKSSON, L., KIESSLING, T., HARVEY, M., 2014, “Corporate social responsibility: Why bother?” *Organizational Dynamics*, v. 43, n. 1, pp. 64–72. ISSN: 00902616. doi: 10.1016/j.orgdyn.2013.10.008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.orgdyn.2013.10.008>>.
- ISO, ABNT, 2009a, *ABNT NBR ISO 14044*. Relatório técnico, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, a.
- ISO, ABNT, 2009b, *ABNT NBR ISO 14040*. Relatório técnico, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil, b.
- JAVID, R. J., NEJAT, A., 2017, “A comprehensive model of regional electric vehicle adoption and penetration”, *Transport Policy*, v. 54 (feb), pp. 30–42. ISSN: 0967070X. doi: 10.1016/j.tranpol.2016.11.003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967070X16303584>>.
- JOCHEM, P., DOLL, C., FICHTNER, W., 2016, “External costs of electric vehicles”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 42, pp. 60–76. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2015.09.022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.022>>.
- JORGE, D., CORREIA, G. H. A., BARNHART, C., 2014, “Comparing Optimal Relocation Operations With Simulated Relocation Policies in One-Way

Carsharing Systems”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 15, n. 4 (aug), pp. 1667–1675. ISSN: 1524-9050. doi: 10.1109/TITS.2014.2304358. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6754142/>>.

JORNAL DO COMÉRCIO, 2018. “Brasil dará primeiro passo com corte de IPI a elétricos”. mar. Disponível em: <<https://bit.ly/2qVSAkL>>.

KAREKEZI, S., MCDADE, S., BOARDMAN, B., et al., 2012, “Energy, Poverty, and Development”. In: Lustig, N. (Ed.), *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, 1 ed., Cambridge University Press e International Institute for Applied Systems Analysis, cap. 2, pp. 151–190, Cambridge, RU, Nova Iorque, EUA e Laxemburgo, Áustria.

KEK, A. G., CHEU, R. L., MENG, Q., et al., 2009, “A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 45, n. 1, pp. 149–158. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2008.02.008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.008>>.

KOLLER, T., GOEDHART, M., WESSELS, D., 2010, *Valuation - Measuring and Managing the Value of Companies*. 5 ed. New Jersey, John Wiley & Sons.

KRISHNAN, V., KASTROUNI, E., PYRIALAKOU, V. D., et al., 2015, “An optimization model of energy and transportation systems: Assessing the high-speed rail impacts in the United States”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 54, pp. 131–156. ISSN: 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2015.03.007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.007>>.

LANGBROEK, J. H., FRANKLIN, J. P., SUSILO, Y. O., 2017, “Electric vehicle users and their travel patterns in Greater Stockholm”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 52 (may), pp. 98–111. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.02.015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.015><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920915302315>>.

LEE, J., MADANAT, S., 2017, “Optimal design of electric vehicle public charging system in an urban network for Greenhouse Gas Emission and cost minimization”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 85, n. May (dec), pp. 494–508. ISSN: 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2017.10.008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X17302814>>.

- LEVINSON, R. S., WEST, T. H., 2017, “Impact of public electric vehicle charging infrastructure”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, , n. October, pp. 0–1. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.10.006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.006>>.
- LI, X., CHEN, P., WANG, X., 2017, “Impacts of renewables and socioeconomic factors on electric vehicle demands – Panel data studies across 14 countries”, *Energy Policy*, v. 109, n. July, pp. 473–478. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2017.07.021. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517304512>>.
- LIMLEAMTHONG, P., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., 2017, “Rigorous analysis of Pareto fronts in sustainability studies based on bilevel optimization: Application to the redesign of the UK electricity mix”, *Journal of Cleaner Production*, v. 164, pp. 1602–1613. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.134.
- LIN, J.-R., YANG, T.-H., 2011, “Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 47, n. 2 (mar), pp. 284–294. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2010.09.004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.004><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554510000839>>.
- LIU, X., ROBERTS, M. C., SIOSHANSI, R., 2017, “Spatial effects on hybrid electric vehicle adoption”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 52, pp. 85–97. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.02.014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.014>>.
- LOISEL, R., PASAOGLU, G., THIEL, C., 2014, “Large-scale deployment of electric vehicles in Germany by 2030: An analysis of grid-to-vehicle and vehicle-to-grid concepts”, *Energy Policy*, v. 65, pp. 432–443. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2013.10.029.
- LUCON, O., ROMEIRO, V., FRANSEN, T., 2015, *Bridging the gap between energy and climate policies in Brazil*. Relatório técnico, World Resources Institute (WRI), Washington, USA. Disponível em: <http://www.wri.org/sites/default/files/bridging-the-gap-energy-climate-brazil_{_}1.pdf>.

- MALLIG, N., HEILIG, M., WEISS, C., et al., 2016, “Modelling the weekly electricity demand caused by electric cars”, *Future Generation Computer Systems*, v. 64 (nov), pp. 140–150. ISSN: 0167739X. doi: 10.1016/j.future.2016.01.014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167739X16000273>>.
- MARTINEZ, L. M., CAETANO, L., EIRÓ, T., et al., 2012, “An Optimisation Algorithm to Establish the Location of Stations of a Mixed Fleet Biking System: An Application to the City of Lisbon”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 54, n. 1965, pp. 513–524. ISSN: 18770428. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.769. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042812042310>>.
- MARTTUNEN, M., LIENERT, J., BELTON, V., 2017, “Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations”, *European Journal of Operational Research*, v. 263, n. 1 (nov), pp. 1–17. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2017.04.041. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221717303880>>.
- MCLAREN, J., MILLER, J., O’SHAUGHNESSY, E., et al., 2016, “CO2 emissions associated with electric vehicle charging: The impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type”, *Electricity Journal*, v. 29, n. 5 (jun), pp. 72–88. ISSN: 10406190. doi: 10.1016/j.tej.2016.06.005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tej.2016.06.005><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1040619016300690>>.
- MCTI, 2018, *Fatores médios de emissão de CO2 do grid brasileiro*. Relatório técnico, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, Brasília, Brasil. Disponível em: <<http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao{ }corporativos.html>>.
- MELLIOS, G., HAUSBERGER, S., KELLER, M., et al., 2011, *Parameterisation of fuel consumption and CO2 emissions of passenger cars and light commercial vehicles for modelling purposes*. Relatório técnico, JRC, European Commission, Luxembourg. Disponível em: <<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/22474/1/co2{ }report{ }jrc{ }format{ }final2.pdf>>.

- MENDES, N. C., BUENO, C., OMETTO, A. R., 2015, “Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos”, *Production*, v. 26, n. 1, pp. 160–175. ISSN: 1980-5411. doi: 10.1590/0103-6513.153213. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_{_}arttext{&}pid=S0103-65132015005010112{&}lng=pt{&}nrm=iso{&}tlng=en>.
- MERSKY, A. C., SPREI, F., SAMARAS, C., et al., 2016, “Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 46 (jul), pp. 56–68. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2016.03.011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.011http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920916000407>>.
- MINGERS, J., ROSENHEAD, J., 2004, “Problem structuring methods in action”, *European Journal of Operational Research*, v. 152, n. 3, pp. 530–554. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00056-0.
- MITROPOULOS, L. K., PREVEDOUROS, P. D., 2015, “Life cycle emissions and cost model for urban light duty vehicles”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 41, pp. 147–159. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2015.09.024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.024>>.
- MMA, 2014, *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Relatório técnico, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, Brasil. Disponível em: <<https://bit.ly/2r1Ngy1>>.
- MME/EPE, 2017, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Relatório técnico, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética., Brasília. Disponível em: <<https://bit.ly/2vS3BJQ>>.
- MORRISON, G., STEVENS, J., JOSECK, F., 2018, “Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 87, n. January, pp. 183–196. ISSN: 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2018.01.005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X18300056>>.
- MUNDA, G., 2008, *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Springer. ISBN: 978-3-540-73702-5.

- MUNEER, T., MILLIGAN, R., SMITH, I., et al., 2015, “Energetic, environmental and economic performance of electric vehicles: Experimental evaluation”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 35 (mar), pp. 40–61. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2014.11.015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920914001783>>.
- NILSSON, M., NYKVIST, B., 2016, “Governing the electric vehicle transition – Near term interventions to support a green energy economy”, *Applied Energy*, v. 179 (oct), pp. 1360–1371. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.056. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916303762>>.
- NOURINEJAD, M., ROORDA, M. J., 2014, “A dynamic carsharing decision support system”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 66, pp. 36–50. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2014.03.003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.03.003>>.
- NOURINEJAD, M., ZHU, S., BAHRAMI, S., et al., 2015, “Vehicle relocation and staff rebalancing in one-way carsharing systems”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 81, pp. 98–113. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2015.06.012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.06.012>>.
- NURHADI, L., BORÉN, S., NY, H., et al., 2017, “Competitiveness and sustainability effects of cars and their business models in Swedish small town regions”, *Journal of Cleaner Production*, v. 140 (jan), pp. 333–348. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.045. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616303134>>.
- NYKVIST, B., NILSSON, M., 2015, “Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles”, *Nature Climate Change*, v. 5, n. 4 (apr), pp. 329–332. ISSN: 1758-678X. doi: 10.1038/nclimate2564. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nclimate2564>>.
- OECD, IEA, 2016a, *World Energy Outlook, 2016*. Relatório técnico, International Energy Agency, Paris, França, a.
- OECD, IEA, 2016b, *Electricity Information*. Relatório técnico, International Energy Agency e Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, França, b.

- OECD, IEA, 2017, *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*. Relatório técnico, International Energy Agency.
- PFITZER, M., BOCKSTETTE, V., STAMP, M., 2013, “Innovating for Shared Value”, *Harvard Business Review*, v. 91, n. September, pp. 100–+. ISSN: 00178012.
- PIKETTY, T., 2013, *O Capital no Século XXI*. Intrínseca. ISBN: 978-85-8057-582-8. Disponível em: <<http://www.intrinseca.com.br/ocapital/index.html>{%}5Cndelubio.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2015/02/0-Capital-no-Seculo-XXI-Thomas-Piketty-2.pdf}>.
- PORTAL BRASIL, 2017. “Governo prepara política para a indústria automotiva”. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/04/governo-prepara-politica-para-a-industria-automotiva>>.
- PORTER, M., HILLS, G., PFITZER, M., et al., 2012, “Measuring shared value: How to unlock value by linking social and business results”, *Conference Report available ...*, pp. 1–24. ISSN: 02710633. doi: 10.1002/tl.37219810504. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%}&btnG=Search{%}&q=intitle:Measuring+Shared+Value:+How+to+Unlock+Value+by+Linking+Social+and+Business+Results{%}#0>>.
- PORTER, M. E., KRAMER, M. R., 2011, “Creating Shared Value”, *Harvard Business Review*, v. 89, pp. 62–77.
- PRATAMA, Y. W., PURWANTO, W. W., TEZUKA, T., et al., 2017, “Multi-objective optimization of a multiregional electricity system in an archipelagic state: The role of renewable energy in energy system sustainability”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, n. February 2017, pp. 423–439. ISSN: 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.021>>.
- PWC, 2016, *The Paris Agreement: A turning point? The Low Carbon Economy Index 2016*. Relatório técnico, PricewaterhouseCoopers LLP, Reino Unido.
- QUDDUS, M. A., SHAHVARI, O., MARUFUZZAMAN, M., et al., 2018, “A collaborative energy sharing optimization model among electric vehicle charging stations, commercial buildings, and power grid”, *Applied Energy*, v. 229, n. August (nov), pp. 841–857. ISSN: 03062619. doi:

10.1016/j.apenergy.2018.08.018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918311735>>.

RANYARD, J. C., FILDES, R., HU, T. I., 2015, “Reassessing the scope of or practice: The Influences of Problem Structuring Methods and the Analytics Movement”, *European Journal of Operational Research*, v. 245, n. 1, pp. 1–13. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2015.01.058. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.058>>.

RASHIDI, H., KHORSHIDI, J., 2018, “Exergoeconomic analysis and optimization of a solar based multigeneration system using multiobjective differential evolution algorithm”, *Journal of Cleaner Production*, v. 170, pp. 978–990. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.201. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.201>>.

RFB, 2015, *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Relatório técnico, República Federativa do Brasil (RFB), Brasília, Brasil. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/images/ed{ }desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf>>.

RIESZ, J., SOTIRIADIS, C., AMBACH, D., et al., 2016, “Quantifying the costs of a rapid transition to electric vehicles”, *Applied Energy*, v. 180 (oct), pp. 287–300. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.131. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916310789>>.

ROGELJ, J., ELZEN, M. D., FRANSEN, T., et al., 2016, “Perspective : Paris Agreement climate proposals need boost to keep warming well below 2° C”, *Nature Climate Change*, v. 534, n. June, pp. 631–639. ISSN: 0028-0836. doi: 10.1038/nature18307. Disponível em: <<http://0-www.nature.com.wam.city.ac.uk/nature/journal/v534/n7609/pdf/nature18307.pdf>>.

ROMERO, J. P., IBEAS, A., MOURA, J. L., et al., 2012, “A Simulation-optimization Approach to Design Efficient Systems of Bike-sharing”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 54 (oct), pp. 646–655. ISSN: 18770428. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.782. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042812042449>>.

RUBULOTTA, E., IGNACCOLO, M., INTURRI, G., et al., 2013, “Accessibility and Centrality for Sustainable Mobility: Regional Planning Case

Study”, *Journal of Urban Planning and Development*, v. 139, n. 2 (jun), pp. 115–132. ISSN: 0733-9488. doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000140. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/{%}28ASCE{%}29UP.1943-5444.0000140>>.

SANTIBAÑEZ-AGUILAR, J. E., GONZÁLEZ-CAMPOS, J. B., PONCE-ORTEGA, J. M., et al., 2014, “Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives”, *Journal of Cleaner Production*, v. 65, pp. 270–294. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>>.

SANTOS, G., CORREIA, G., 2015, “A MIP model to optimize real time maintenance and relocation operations in one-way carsharing systems”, *Transportation Research Procedia*, v. 10, n. July, pp. 384–392. ISSN: 23521465. doi: 10.1016/j.trpro.2015.09.088. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.088>>.

SAYARSHAD, H., TAVASSOLI, S., ZHAO, F., 2012, “A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 10, pp. 4944–4951. ISSN: 0307904X. doi: 10.1016/j.apm.2011.12.032. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.032>>.

SCHROEDER, A., TRABER, T., 2012, “The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles”, *Energy Policy*, v. 43 (apr), pp. 136–144. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2011.12.041. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.041><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421511010470>>.

SEEG, 2017. “Total Emissions”. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/tabela-geral-de-emissoes/>>.

SIERZCHULA, W., BAKKER, S., MAAT, K., et al., 2014, “The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption”, *Energy Policy*, v. 68, pp. 183–194. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.043. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043>>.

SNYDER, J., CHANG, D., ERSTAD, D., et al., 2012, *Financial Viability Of Non-Residential Electric Vehicle Charging Stations*. Relatório Técnico August, UCLA and Luskin Center. Disponível em: <<http://luskin.ucla.edu/sites/default/files/Non-ResidentialChargingStations.pdf>>.

- STARTSE, 2017. “Volks investe US\$ 2 bilhões em infraestrutura para carros elétricos nos EUA”. Disponível em: <<https://conteudo.startse.com.br/mundo/lucas-bicudo/volkswagen-investimento-carros-eletricos/>>.
- TELES, M. D. F., SOUSA, J. F. D., 2014, “Environmental Management and Business Strategy: Structuring the Decision-Making Support in a Public Transport Company”, *Transportation Research Procedia*, v. 3, n. July, pp. 155–164. ISSN: 23521465. doi: 10.1016/j.trpro.2014.10.101. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146514002646http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146514002646>>.
- TESOURO NACIONAL, 2018. “Tesouro direto - preços e taxas dos títulos”. Disponível em: <<http://www.tesouro.fazenda.gov.br/tesouro-direto-precos-e-taxas-dos-titulos>>.
- THE GUARDIAN, 2018. “BP to install charging points for electric cars at UK petrol stations”. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/30/bp-charging-points-electric-cars-uk-petrol-stations>>.
- THE TIMES, 2018. “Charge: India in ambitious drive for all cars to be electric by 2030”. Disponível em: <<https://bit.ly/2mdbzVL>>.
- TOYOTA, 2018. “Monte o seu Prius”. Disponível em: <<http://www.toyota.com.br/modelos/prius/monte/>>.
- TSENG, H. K., WU, J. S., LIU, X., 2013, “Affordability of electric vehicles for a sustainable transport system: An economic and environmental analysis”, *Energy Policy*, v. 61, pp. 441–447. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.026.
- UDAETA, M. E. M., CHAUD, C. A., GIMENES, A. L. V., et al., 2015, “Electric Vehicles Analysis inside Electric Mobility Looking for Energy Efficient and Sustainable Metropolis”, *Open Journal of Energy Efficiency*, v. 04, n. 01, pp. 1–14. ISSN: 2169-2637. doi: 10.4236/ojee.2015.41001. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/ojee{%}5Cnhttp://dx.doi.org/10.4236/ojee.2015.41001{%}5Cnhttp://creativecommons.org/licenses/by/4.0/http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ojee.2015.41001>>.

- UNEP, 2012, *The Business Case for the Green Economy: Sustainable Return on Investment*. Relatório técnico, United Nations Environment Programme.
- UNFCCC, 2015, *Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change & Call to Action*. Relatório técnico, International Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em: <<http://newsroom.unfccc.int/media/521376/paris-electro-mobility-declaration.pdf>>.
- VALOR ECONÔMICO, 2018. “Sem consenso entre Fazenda e Mdic, Rota 2030 trava e Temer deve intervir”. jan. Disponível em: <<https://bit.ly/2F8HbDq>>.
- VAN VLIET, O., BROUWER, A. S., KURAMOCHI, T., et al., 2011, “Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 4, pp. 2298–2310. ISSN: 03787753. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.09.119.
- VARIAN, H. R., 1992, *Microeconomic Analysis*. Norton International edition. Norton. ISBN: 9780393960266. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=m20iQAAACAAJ>>.
- VASCONCELOS, A. S., MARTINEZ, L. M., CORREIA, G. H., et al., 2017, “Environmental and financial impacts of adopting alternative vehicle technologies and relocation strategies in station-based one-way carsharing: An application in the city of Lisbon, Portugal”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 57 (dec), pp. 350–362. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.08.019. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920916300992>>.
- WAGNER, S., BRANDT, T., NEUMANN, D., 2016, “In free float: Developing Business Analytics support for carsharing providers”, *Omega*, v. 59 (mar), pp. 4–14. ISSN: 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2015.02.011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.02.011http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305048315000481>>.
- WANG, Y., BI, J., GUAN, W., et al., 2017, “Optimising route choices for the travelling and charging of battery electric vehicles by considering multiple objectives”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, n. 3, pp. 0–1. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2017.08.022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.022>>.
- WBSCD, 2015, *Methodology and indicator calculation method for sustainable urban mobility*. Relatório técnico, WBSCD - World Bu-

Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland. Disponível em: <http://cebds.org/wp-content/uploads/2016/01/SMP2.0_{ }Sustainable-Mobility-Indicators_{ }2ndEdition.pdf>.

WEIKL, S., BOGENBERGER, K., 2015, “A practice-ready relocation model for free-floating carsharing systems with electric vehicles - Mesoscopic approach and field trial results”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 57, pp. 206–223. ISSN: 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2015.06.024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.06.024>>.

WEISS, M., PATEL, M. K., JUNGINGER, M., et al., 2012, “On the electrification of road transport - Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles”, *Energy Policy*, v. 48, pp. 374–393. ISSN: 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2012.05.038. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.038>>.

WHEELER, D., FABIG, H., BOELE, R., 2002, “Paradoxes and Dilemmas for Firms Stakeholder Responsive in the Extractive Sector : Lessons from the Case of Shell and the O go ni David Wheeler”, *Journal of Business*, v. 39, n. 3, pp. 297 – 318. doi: 10.1023/A. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/25074843>{%}5Cn<http://about.jstor.org/terms>>.

WMO, 2013, *The Global Climate 2001 - 2010: A Decade of Climate Extremes. Summary Report*. Relatório técnico, World Meteorological Organization, Genebra.

WORLD BANK, ECOFYS, VIVID ECONOMICS, 2017, *State and Trends of Carbon Pricing 2017*. Relatório técnico, World Bank, Washington, DC. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28510>>.

WU, X., FREESE, D., CABRERA, A., et al., 2015, “Electric vehicles’ energy consumption measurement and estimation”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 34 (jan), pp. 52–67. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2014.10.007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920914001485>>.

YARIME, M., 2009, “Public coordination for escaping from technological lock-in: its possibilities and limits in replacing diesel vehicles with compressed natural gas vehicles in Tokyo”, *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 14, pp. 1281–1288. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2009.03.010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.03.010>>.

ZOEPEF, S. M., KEITH, D. R., 2016, “User decision-making and technology choices in the U.S. carsharing market”, *Transport Policy*, v. 51, pp. 150–157. ISSN: 1879310X. doi: 10.1016/j.tranpol.2016.01.010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.01.010>>.

Apêndice A

Notações

Tabelas de notações utilizadas ao longo do texto.

Notação 1 - *Parâmetros*

AB - gastos com ABastecimento por veículo (R\$ 1,000/mês)

AQ - custo total de AQuisição dos veículos (R\$ 1,000)

AQ_M - AQ em equivalente Mensal (R\$ 1,000/mês)

AU - AUtonomia do veículo (km)

AU_E - AUtonomia do motor Elétrico (km);

CA - CApacidade do tanque de combustível (*l*)

CG_u - Custo unitário de emissão de GEEs (R\$ / kgCO_{2e})

CG_T - Custo total de emissão de GEEs (R\$ 1.000)

CM - Custo de manutenção por veículo (R\$ 1.000/mês)

CR - Custo operacional de Realocação para abastecimento (R\$/mês)

CS - ConSumo de combustível (*l*/km ou kWh/km)

CT - Custo Total (R\$ 1,000/mês)

CT_A - Custo Ambiental Total (R\$ 1,000/mês)

CT_S - Custo Social Total (R\$ 1,000/mês)

DAP - Disposição A Pagar (R\$ 1,000/mês)

DM - Distância média Percorrida (km)

EM - fator de EMISSão de GEEs (kgCO_{2e}/*l* ou kgCO_{2e}/kWh)

FR - tamanho da FRota

GE - Emissões de GEEs (kgCO_{2e}/veículo)

HP - Horizonte de Projeto (meses)

IG - Investimentos Gerais (\times R\$ 1.000)

IN - INvestimentos em infraestrutura (R\$ 1,000)

IN_M - IN em equivalente Mensal (R\$ 1,000/mês)

IR - Investimentos em infraestrutura de Recarga (\times R\$ 1,000)

MR - Manutenção por Rodagem ($R\$/km$)
 OR - ORçamento ($R\ \$1,000/mês$)
 PA - PATrocínios e PARcerias ($R\ \$1,000$ ou $R\ \$1,000 / mês$)
 PC - Preço do combustível ($R\ \$/kWh$ or $R\ \$/l$)
 PL_u - custo Unitário de emissão de Poluentes Locais ($R\ \$/g$)
 PL - emissão de Poluentes Locais por veículo (g/km ou g/m)
 PL_T - custo mensal Total de emissão de poluentes locais ($\times R\ \$1,000$)
 PR - PReço do serviço ($R\ \$/h$ ou $R\ \$/mês$)
 TE - Tarifa média de Energia ($R\ \$/kWh$)
 TX - Taxa de Desconto (%)
 US - total de USuários do sistema
 VC - Valor de Compra do veículo ($R\ \$1,000$)
 VR - Valor total de Reabastecimento do veículo ($R\ \$/mês$)

Notação 2 *Variáveis de decisão (VDs)*

x_1 - BEV Zhidou EEC L7e-80 (compacto)
 x_2 - BEV BYD e6 (SUV)
 x_3 - PHEV com MCI abastecido como x_5
 x_4 - veículo com MCI abastecido 100% com etanol brasileiro
 x_5 - veículo com MCI abastecido 50% com etanol e 50% com gasolina-C
 x_6 - veículo com MCI abastecido 100% com gasolina-C brasileira

Restrições

AU^C - AUtonomia do veículo
 DAP^C - Disposição A Pagar
 FR^C - tamanho da FRota
 GE^C - Emissão de GEEs
 OR^C - ORçamento

Apêndice B

Linhas de código do modelo

Código desenvolvido para construção do modelo de otimização para o método da pesquisa, escrito no Xpress-MP IVE 1.24.18.

```
model "dissertacaoRL"  
uses "mmxprs"  
uses "mmsheet"  
  
parameters  
DATA_XLSX = "modelo.xlsx"  
end-parameters  
  
declarations  
Cars = 1..6  
ECON: array(Cars) of real  
ENV_LOCAL: array(Cars) of real  
ENV_GLOBAL: array(Cars) of real  
ENV_GLOBAL_COSTS: array(Cars) of real  
ENV_COSTS: array(Cars) of real  
DRIV_RANGE: array(Cars) of real
```

```
DR: real
GE: real
FS: integer
BU: real
x: array(Cars) of mpvar
alfa: real
pace: real
obj: integer
end-declarations

initializations from 'mmsheet.excel:' + DATA_XLSX
ECON as 'noindex;[Resumo$D3:I3]'
ENV_GLOBAL as 'noindex;[Resumo$D4:I4]'
ENV_COSTS as 'noindex;[Resumo$D7:I7]'
DRIV_RANGE as 'noindex;[Resumo$D11:I11]'
GE as 'noindex;[Resumo$K8:K8]'
DR as 'noindex;[Resumo$K9:K9]'
FS as 'noindex;[Resumo$K10:K10]'
end-initializations

alfa:=1
pace:=0.05
obj:=1
```



```

forall (i in Cars) x(i) is_integer
Total_Emissions := sum(i in Cars) ENV_GLOBAL(i)*x(i) <= GE*FS
Total_Driv_Range := sum(i in Cars) DRIV_RANGE(i)*x(i) >= DR*FS
Total_Fleet := sum(i in Cars) x(i) = FS
Total_ECON := sum(i in Cars) ECON(i)*x(i)
Total_ENV_COSTS := sum(i in Cars) ENV_COSTS(i)*x(i)

if obj=1 then
minimize (Total_ECON)
forall (i in Cars) writeln(getsol(x(i)), "cars from the vehicle type ",i,";")
writeln("At a total cost of R$ ", getobjval, " thousand monthly.")
fopen("solution.dat", F_OUTPUT)
writeln(getobjval)
forall (i in Cars) writeln(getsol(x(i)))
fclose(F_OUTPUT)
else
fopen("solutionMO.dat",F_OUTPUT)
writeln("(Econ. weight ; Env. weight)")
writeln("x1")
writeln("x2")
writeln("x3")
writeln("x4")
writeln("x5")
writeln("x6")
writeln ("_____")

```

```
while (alfa>=0) do
MULTIOBJECTIVE := (1-alfa)*Total_ECON + alfa*Total_ENV_COSTS
minimize(MULTIOBJECTIVE)
writeln(" ",1-alfa,"; ",alfa,"")
forall (i in Cars) writeln(getsol(x(i)))
alfa:=alfa - pace

end-do
fclose(F_OUTPUT)

end-if
end-model
```

Apêndice C

Planilha de cálculo

Este apêndice apresenta a planilha de cálculo construída no Microsoft Excel® 2016 e referenciada no código apresentado no Apêndice B.

Restrições	Valor
GE@T	221.7
FR@	20
AU@	###

= dados confidenciais

Autonomia (AU)	x1	x2	x3	x4	x5	x6
ME (km)	###	###	40	-	-	-
CA (l)	-	-	43	41	-	41
CS (l/km)	-	-	###	###	-	###
AU (km)	###	###	###	###	###	###

Custo de Aquisição (AQ)	x1	x2	x3	x4	x5	x6
Valor	###	###	###	###	###	###
TX (% a.m.)	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%
HP (meses)	60	60	60	60	60	60
AQM (R\$mil/veículo*mês)	###	###	###	###	###	###

Custo de manutenção (CM)	x1	x2	x3	x4	x5	x6
PC	###	###	###	3.3	-	3.9
CS (kWh/km ou l/km)	###	###	###	###	###	###
CR (R\$mil/veículo*mês)	0.17	0.17	0.24	0.60	0.60	0.60
MR (R\$/km)	0.09	0.09	0.19	0.29	0.29	0.29
CM (R\$mil/veículo*mês)	0.20	0.21	0.33	0.72	0.72	0.71

Emissões de GEE (GE)	x1	x2	x3	x4	x5	x6
CS (kWh/km ou l/km)	###	###	###	###	###	###
DM	###	###	###	###	###	###
EM (kgCO ₂ e/kWh ou l)	0.07	0.07	-	0.06	-	1.98
GE (kgCO ₂ e/veículo*mês)	1.2	2.5	4.2	1.2	14.9	28.6
CGu (R\$/veículo*mês)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
CGt (R\$/veículo*mês)	0.3	0.6	1.0	0.3	3.7	7.2

Poluentes locais (PLT) - ex. PM10	x1	x2	x3	x4	x5	x6
DM	###	###	###	###	###	###
PL PM10 (g/m)	21	21	21	21	21	21
PLu PM10 (R\$/kg)	518	518	518	518	518	518
PLT (R\$/veículo*mês)	###	###	###	###	###	###

Investimentos (IN)	x1	x2	x3	x4	x5	x6
Total de investimentos (IN)	174	174	174	0	0	0
Taxa de desconto (% a.m.)	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%
HP (meses)	60	60	60	60	60	60
INM (R\$mil/veículo*mês)	4.1	4.1	4.1	0.0	0.0	0.0

Figura C.1: Planilha de cálculo (parte 1).

Código	Parâmetro	Sx_1\$	Sx_2\$	Sx_3\$	Sx_4\$	Sx_5\$	Sx_6\$	Restrição
ECON	CT (R\$/mil/veic*mês)	6.6	7.2	7.3	1.9	1.9	1.9	-
ENV_GLOBAL	GE (kgCO2e/veic*mês)	1.2	2.5	4.2	1.2	14.9	28.6	-
-	CGt (R\$/veiculo*mês)	0.3	0.6	1.0	0.3	3.7	7.2	-
-	PLT (R\$/veiculo*mês)	1.8	1.8	1.9	2.3	2.3	2.3	-
ENV_COSTS	CGt + PLT (R\$/veiculo*mês)	2.1	2.4	2.9	2.6	6.0	9.5	-
GE	GE©T	-	-	-	-	-	-	221.7
DRIV_RANGE DR	DR©	-	-	-	-	-	-	###
FS	FS©	-	-	-	-	-	-	20

Figura C.2: Planilha de cálculo (parte 2).

Apêndice D

Resultados Numéricos

Tabelas de resultados numéricos obtidos.

Cenário	BEV ₁ (x_1)	BEV ₂ (x_2)	PHEV (x_3)	ICEV _e (x_4)	ICEV _{e+g} (x_5)	ICEV _g (x_6)	Gastos (R\$/mês)	Emissões (kgCO ₂ e/mês)
BASE	0	0	0	13	0	7	38	216
SC 1	18	0	2	0	0	0	25	30
SC 2	0	0	0	14	6	0	38	107
SC 3.1	0	0	0	13	0	7	30	216
SC 3.2	0	0	0	13	0	7	30	216
SC 4	18	0	2	0	0	0	22	54

Tabela D.1: Resultados do modelo mono-objetivo.

ECON	AMB	BEV ₁ (x_1)	BEV ₂ (x_2)	PHEV (x_3)	ICEV _e (x_4)	ICEV _{e+g} (x_5)	ICEV _g (x_6)	FO 1	FO 2
0.00	1.00	17	2	1	0	0	0	133,7	43,5
0.05	0.95	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.10	0.90	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.15	0.85	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.20	0.80	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.25	0.75	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.30	0.70	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.35	0.65	0	0	0	20	0	0	37,8	51,6
0.40	0.60	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.45	0.55	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.50	0.50	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.55	0.45	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.60	0.40	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.65	0.35	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.70	0.30	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.75	0.25	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.80	0.20	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.85	0.15	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.90	0.10	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
0.95	0.05	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0
1.00	0.00	0	0	0	6	14	0	37,7	100,0

Tabela D.2: Resultados do modelo multi-objetivo.

Percentual de adoção	BEV ₁ (x_1)	BEV ₂ (x_2)	PHEV (x_3)	ICEV _e (x_4)	ICEV _{e+g} (x_5)	ICEV _g (x_6)	Gastos (R\$/mês)	Emissões (kgCO ₂ e/mês)
0%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
5%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
10%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
15%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
20%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
25%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
30%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
35%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
40%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
45%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
50%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
55%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
60%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
65%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
70%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
75%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
80%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
85%	17	0	0	0	0	3	32.6	104.1
90%	18	0	1	0	0	1	28.8	53.3
95%	18	0	2	0	0	0	24.5	29.4
100%	18	0	2	0	0	0	20.1	29.4

Tabela D.3: Resultados da adoção progressiva do cenário SC 1.

Percentual de restrição	BEV ₁ (x ₁)	BEV ₂ (x ₂)	PHEV (x ₃)	ICEV _e (x ₄)	ICEV _{e+g} (x ₅)	ICEV _g (x ₆)	Gastos (R\$/mês)	Emissões (kgCO ₂ e/mês)
0%	0	0	0	10	0	10	33.2	292.2
2%	0	0	0	9	3	8	33.2	278.8
3%	0	0	0	10	1	9	33.2	278.8
5%	0	0	0	10	2	8	33.2	265.4
7%	0	0	0	11	0	9	33.2	265.4
9%	0	0	0	11	0	9	33.2	265.4
11%	0	0	0	10	3	7	33.2	252.0
13%	0	0	0	11	1	8	33.2	252.0
15%	0	0	0	11	2	7	33.2	238.5
16%	0	0	0	12	0	8	33.2	238.5
18%	0	0	0	12	0	8	33.2	238.5
20%	0	0	0	11	3	6	33.2	225.1
22%	0	0	0	12	1	7	33.2	225.1
24%	0	0	0	12	2	6	33.2	211.7
26%	0	0	0	13	0	7	33.2	211.7
28%	0	0	0	13	1	6	33.2	198.3
29%	0	0	0	7	13	0	33.2	198.3
31%	0	0	0	7	13	0	33.2	198.3
33%	0	0	0	8	12	0	33.2	184.9
35%	0	0	0	8	12	0	33.2	184.9
37%	0	0	0	9	11	0	33.2	171.5
39%	0	0	0	9	11	0	33.2	171.5
41%	0	0	0	9	11	0	33.2	171.5
42%	0	0	0	10	10	0	33.2	158.0
44%	0	0	0	10	10	0	33.2	158.0
46%	0	0	0	11	9	0	33.3	144.6
48%	0	0	0	11	9	0	33.3	144.6
50%	0	0	0	11	9	0	33.3	144.6
52%	0	0	0	12	8	0	33.3	131.2
54%	0	0	0	12	8	0	33.3	131.2
55%	0	0	0	13	7	0	33.3	117.8
57%	0	0	0	13	7	0	33.3	117.8
59%	0	0	0	13	7	0	33.3	117.8
61%	0	0	0	14	6	0	33.3	104.4
63%	0	0	0	14	6	0	33.3	104.4

Tabela D.4: Resultados da adoção progressiva do cenário SC 2.

Variação Percentual	Resultado para BEV ₁				Resultado para ICEV _e			
	IR	VC	HP	TX	VC	HP	TX	CR
-50%	-32%	-18%	85%	-6%	-28%	50%	-3.3%	-18%
-45%	-29%	-16%	69%	-5%	-25%	41%	-3.0%	-16%
-40%	-26%	-14%	56%	-5%	-23%	33%	-2.7%	-14%
-35%	-23%	-12%	46%	-4%	-20%	27%	-2.3%	-13%
-30%	-19%	-11%	36%	-3%	-17%	21%	-2.0%	-11%
-25%	-16%	-9%	28%	-3%	-14%	17%	-1.7%	-9%
-20%	-13%	-7%	21%	-2%	-11%	12%	-1.3%	-7%
-15%	-10%	-5%	15%	-2%	-8%	9%	-1.0%	-5%
-10%	-6%	-4%	9%	-1%	-6%	6%	-0.7%	-4%
-5%	-3%	-2%	4%	-1%	-3%	3%	-0.3%	-2%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.0%	0%
5%	3%	2%	-4%	1%	3%	-2%	0.3%	2%
10%	6%	4%	-8%	1%	6%	-5%	0.7%	4%
15%	10%	5%	-11%	2%	8%	-6%	1.0%	5%
20%	13%	7%	-14%	2%	11%	-8%	1.4%	7%
25%	16%	9%	-17%	3%	14%	-10%	1.7%	9%
30%	19%	11%	-19%	3%	17%	-11%	2.0%	11%
35%	23%	12%	-22%	4%	20%	-13%	2.4%	13%
40%	26%	14%	-24%	5%	23%	-14%	2.7%	14%
45%	29%	16%	-26%	5%	25%	-15%	3.1%	16%
50%	32%	18%	-28%	6%	28%	-17%	3.4%	18%

Tabela D.5: Impacto percentual na dimensão econômica da variação de parâmetros.