ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MAISA RIBEIRO BARBOSA

**Mobilidade sustentável no Brasil: análise de impactos energéticos do incentivo
ao transporte coletivo e da eletrificação de ônibus**

São Paulo
2018

MAISA RIBEIRO BARBOSA

**Mobilidade sustentável no Brasil: análise de impactos energéticos do incentivo
ao transporte coletivo e da eletrificação de ônibus**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências pelo Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Energia e
Automação Elétricas

Orientador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Barbosa, Maisa

Mobilidade sustentável no Brasil: análise de impactos energéticos do incentivo ao transporte coletivo e da eletrificação de ônibus / M. Barbosa -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

89 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Mobilidade urbana (Planejamento) 2.Eficiência energética (Quantificação)
3.Transportes coletivos 4.Transportes coletivos - Energia (Consumo) 5.Sustentabilidade
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Dorel Soares Ramos por persistir como meu orientador mesmo com tantas alterações de rota.

Ao Prof. Dr. Erik Eduardo Rego pelo incentivo inicial para pesquisar mobilidade sustentável.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

A meus pais, Dirley e Valéria, por me criarem para o mundo e para os estudos.

À Maria Rosa Makrakis, por me acolher como um membro de sua família.

A Lucas Makrakis, Emanuelle Spaggiari e tantos amigos queridos que formaram uma rede de suporte crucial nesses três anos.

*"As cidades têm a capacidade de prover algo para todos, somente porque, e
somente quando, são criadas por todos"*
Jane Jacobs

Resumo

BARBOSA, Maisa Ribeiro. **Mobilidade sustentável no Brasil**: análise de impactos energéticos do incentivo ao transporte coletivo e da eletrificação de ônibus. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

A mobilidade de pessoas no mundo é não apenas um dos maiores desafios tecnológico e político do século XXI, como também uma área de alto impacto energético e ambiental. O presente trabalho busca analisar o transporte rodoviário de passageiros no Brasil pela perspectiva energética. Para a fundamentação teórica, aborda-se a dinâmica da mobilidade no mundo, alguns conceitos fundamentais e a relação entre o perfil de transportes, o perfil energético do setor e suas externalidades negativas. Em seguida, é apresentado o conceito de Mobilidade Sustentável, que busca apontar diretrizes para mitigação de externalidades e maior eficiência energética, dentre as quais estão a transição modal_ o incentivo a transportes públicos em detrimento dos individuais_ e a eletrificação de veículos. Como metodologia do trabalho, opta-se por simular os impactos energéticos de cenários brasileiros de eletrificação de ônibus (eletrificação progressiva, chegando a 71% da frota de ônibus até 2050) e de transição modal (manutenção de 35% da atividade de passageiros feita por ônibus), tanto individualmente, quanto combinados, através do modelo Global Transportation Roadmap. Os resultados mais expressivos de eficiência energética, economia de energia e demanda de eletricidade são observados na trajetória que combina ambas as estratégias, em que se chega a 105TWh de economia de energia no ano de 2050 e alcança-se uma demanda de energia elétrica de 67TWh. De 2020 a 2050, acumula-se uma economia de 7,6% da energia total demandada por transportes de ônibus e de automóvel no Brasil. Finalmente, analisam-se os resultados das simulações, suas limitações e recomendações de melhorias.

Palavras-chave: Mobilidade Sustentável. Eficiência Energética. Ônibus elétricos.

Abstract

BARBOSA, Maisa Ribeiro. **Sustainable mobility in Brazil: energy impact assessment of incentives to collective transport and electrification of buses.** 2018. 86p. Dissertation (Master of Science) – Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, 2018.

Worldwide, passenger mobility is not only one of the most significant political and technological challenges of the 21st century, but also a sector of high energetic and environmental impact. The present work aims to analyze road passenger transportation from the energy sector perspective. The theoretical basis approaches the dynamics of the mobility sector globally, some of its fundamental concepts and the nexus between transportation, energy consumption and negative externalities. Afterwards, it is conceptualized the Sustainable Mobility approach, and its guidelines for energy efficiency and externality mitigation, among which are Modal Shift (incentivizing the adoption of collective and efficient modes of transport) and vehicle electrification. The chosen work methodology is to simulate in the Global Transport Roadmap Model the energy impact of the following scenarios: 1) EB71: a progressive bus electrification scenario that achieves 71% of the national bus fleet electrified by 2050; 2) MS35: maintaining 35% of bus modal share, despite the historical records of bus-to-car shifts in the country; and 3) EB71.MS35: the combination of the previous strategies in a combined scenario. As a result, the EB71.MS35 scenario shows the highest rates of energy efficiency, energy savings and electricity demand: the projections for 2050 achieve 105TWh in energy savings and 67TWh of electricity demand. The cumulative energy saving from 2020 to 2050 reaches 7,6% of the energy demand for buses and automobiles in the same period. Finally, the simulation results are analyzed, and comments are made regarding limitations of the model, conclusions, and further steps for research.

Keywords: Sustainable Mobility. Energy Efficiency. Electric Buses.

Índice de Figuras

Figura 1 - Taxonomia não-exaustiva de modais motorizados de transporte	14
Figura 2 - Transporte de passageiros por modal.....	15
Figura 3 – Participação modal do automóvel vs PIB per capita, 1970-2005	16
Figura 4 - Motorização em alguns países emergentes.....	17
Figura 5 - Participação do transporte público (1995-2012)	18
Figura 6 - Consumo final de energia no mundo	19
Figura 7 - Consumo de energia por meios de transporte no mundo	20
Figura 8 - Distribuição da população urbana brasileira por perfil de município	21
Figura 9 – Matriz de modais de transportes no Brasil	23
Figura 10 – Atividade de transportes motorizados no Brasil: 2003 a 2014	23
Figura 11 - Balanço energético do Brasil (2014)	24
Figura 12 – Consumo final de energia por fonte	25
Figura 13 - Evolução do consumo de energia por modal	26
Figura 14 - Consumo de combustíveis no transporte rodoviário em TEP	27
Figura 15 - Ciclo de benefícios e impactos dos transportes.....	27
Figura 16 - Comparativo: Emissões de poluentes locais e globais por modal no Brasil	29
Figura 17 - Transportes rodoviários e emissões de CO ₂ globais	31
Figura 18 - Intensidade de emissões de GEE por modal	32
Figura 19 – Emissões veiculares no Brasil, em toneladas equivalentes de CO ₂	32
Figura 20 - Abordagem "Avoid-Shift-Improve" ou Evitar-Mudar-Melhorar	35
Figura 21 - Benefícios da Mobilidade Sustentável	37
Figura 22 - Indicadores de eficiência energética	38
Figura 23 - Quantos quilômetros se viaja com 1 litro de gasolina? Valores em passageiro-km.....	38
Figura 24 - Intensidade energética por passageiro-km	39
Figura 25 - Eficiência de automóveis e ônibus em 84 cidades de diferentes países.....	39
Figura 26 - Custo inicial vs Capacidade de transporte	41
Figura 27 – Pesquisa de preferência dos usuários	42
Figura 28 - Simulação de transição modal sustentável.....	43
Figura 29 - Vantagens da eletrificação de ônibus	44
Figura 30 - Exposição de trólebus antigo e novo ônibus elétrico em São Paulo	45
Figura 31 – Faixas de eficiência veicular para ônibus de diferentes tecnologias	46
Figura 32 - Ônibus elétricos à bateria – projetos piloto e em operação	47
Figura 33 - China: Vendas de ônibus elétricos.....	47
Figura 34 - Ônibus elétricos à bateria (azul) e híbridos (roxo) na União Européia	49
Figura 35 - Expectativa de crescimento da frota mundial de ônibus elétricos (em milhares de veículos)	50
Figura 36 - Matriz de transportes e Matriz elétrica no Brasil	51
Figura 37 - Matriz elétrica e intensidade de carbono de diferentes países	52
Figura 38 – Emissão de GEE de ônibus, em velocidade média na zona urbana.....	53
Figura 39 – Participação modal de transportes coletivos	58
Figura 40 - Metodologia GTRM simplificada	62
Figura 41 – Percentual de viagens de ônibus no Brasil e em outras regiões.....	68
Figura 42 - Atividade de passageiros no Brasil	69
Figura 43 - Matriz modal - caso base	69

Figura 44 – Consumo anual de energia por ônibus (PJ)	70
Figura 45 – Economia de energia em relação ao caso base: ônibus e automóveis..	71
Figura 46 – Eficiência de viagens por tipo de veículo	72
Figura 47 – Eficiência de viagens do sistema (ônibus e automóveis)	72
Figura 48 – Demanda anual de eletricidade (Ônibus elétricos).....	73
Figura 49 - Transição modal e veículo-km (VKT).....	74
Figura 50 – Redução de emissão (TTW) de PM2,5 em relação ao caso base	75
Figura 51 – Redução de emissão (WTW) de CO2 em relação ao caso base	75
Figura 52 - Metodologia GTRM	85
Figura 53 - Modelo Sócio-econômico: Função da atividade de transportes	87
Figura 54 - Modelo Sócio-econômico: Função de participação modal	87
Figura 55 - Curva de sobrevida de veículos no Brasil	88

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Indicador de Transporte por Residente (RTR)	22
Tabela 2 – Dados Energéticos 2017 – Brasil e Mundo	25
Tabela 3 – Congestionamentos e tempo de deslocamento diário em cidades brasileiras	28
Tabela 4 - Poluentes atmosféricos e seus efeitos	30
Tabela 5 - Participação dos transportes nas emissões de CO ₂	33
Tabela 6 - Transição para a mobilidade sustentável	36
Tabela 7- Sistemas BRT e Transição Modal.....	41
Tabela 8 - Tipos de ônibus elétricos.....	46
Tabela 9 - Exemplos de transição modal para transporte público e bicicletas	56
Tabela 10 – Algumas das cidades do levantamento Deloitte Mobility Index	57
Tabela 11 - Escopo do GTRM e focos do presente estudo.....	60
Tabela 12 – Premissas de tecnologia e mistura de combustíveis - Techshare	63
Tabela 13 - Proporções de combustíveis nos veículos tipo gasolina e diesel (FuelBlend).....	64
Tabela 14 - FuelEco - Taxa de consumo (MJ/km) por tipo tecnologia	64
Tabela 15 - Cronograma proposto de eletrificação de ônibus	66
Tabela 16 – Cronograma de eletrificação de ônibus no Brasil	66
Tabela 17 – Cronograma de compra de novos ônibus elétricos no Brasil	67
Tabela 18 – Projeção de Crescimento anual do PIB	68
Tabela 19 – Análise de Sensibilidade – Economia de energia 2020-2050 (ônibus e carros)	76
Tabela 20 – Parâmetros da curva de sobrevivência de veículos no Brasil	88

Sumário

1.	Introdução	11
1.1.	Objetivos do Presente Trabalho	12
1.1.1.	Objetivo Geral.....	12
1.1.2.	Objetivos específicos:.....	13
1.2.	Justificativa	13
2.	Transportes rodoviários de passageiros – Panorama energético atual..	14
2.1.	Demanda Mundial de transportes de passageiros.....	15
2.1.1.	Energia para Mobilidade.....	19
2.2.	Mobilidade no Brasil	20
2.2.1.	Energia e Transportes no Brasil	23
2.3.	Externalidades dos transportes.....	27
2.3.1.	Congestionamentos e tempo de deslocamento.....	28
2.3.2.	Poluição do ar.....	29
2.3.3.	Impactos ambientais globais	31
2.3.4.	Mudanças climáticas e compromissos internacionais	32
3.	O conceito da Mobilidade Sustentável	35
3.1.	Intensidade energética de veículos e de viagens	37
3.2.	Oportunidades do transporte coletivo por ônibus.....	40
3.3.	Desafios do transporte coletivo por ônibus	43
3.4.	Os ônibus elétricos.....	44
3.5.	Presença dos ônibus elétricos no mundo	46
3.6.	Conexão à rede elétrica.....	50
4.	Metodologia de Simulação e de Análise de Resultados	54
4.1.	Premissas de eletrificação da frota de ônibus	55
4.2.	Premissas de transição modal sustentável.....	56
4.3.	Global Transportation Roadmap model (GTRM)	58
4.3.1.	Cálculo do consumo energético.....	61
5.	Resultados e Discussão.....	66
5.1.	Premissas de eletrificação da frota de ônibus	66
5.2.	Premissas de transição modal sustentável.....	67
5.3.	Cálculo do consumo energético pelo GTRM	68

5.4. Resultados de Consumo Energético.....	70
5.5. Resultados de Eficiência energética	71
5.6. Resultados de Demanda de Eletricidade	73
5.7. Impactos ambientais observados.....	73
5.8. Análise de sensibilidade.....	76
6. Conclusões	78
7. Referências bibliográficas	80
APÊNDICE A – Detalhamento do Modelo GTRM	85
ANEXO A – Documentação do Modelo e Guia de Usuário do GTRM	89

1. Introdução

A mobilidade urbana emerge no século XXI como um dos temas mais relevantes e estratégicos para o desenvolvimento econômico, social e a preservação ambiental. A importância e a complexidade do tema aumentam na proporção da urbanização, do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico. O percentual urbano da população mundial, que passou de 30% em 1950 para 54% em 2014, poderá chegar a 66% em 2050 (UNITED NATIONS, 2014). Adicionalmente, 1 em cada 8 habitantes viverá em “megacidades e megalópoles” como são chamadas cidades e metrópoles de mais de 10 milhões de habitantes, dentre as quais atualmente figura São Paulo, na 6ª posição, com 21 milhões de habitantes. Até 2030, a projeção é de que haja 41 megacidades, em comparação com a 28 atuais (UNITED NATIONS, 2014).

A relevância dos transportes se traduz em impactos econômicos, sociais e ambientais. Em 2010, o transporte de pessoas e cargas no mundo movimentou 6.400 bilhões de euros, correspondendo a 13% do PIB mundial (BERRONE; COSTA; T-FIGUERAS, 2016). Em relação ao uso do solo, a infraestrutura rodoviária ocupa entre 10 e 25% das áreas urbanas, mas pode chegar a 45% em cidades dos Estados Unidos (BERRONE; COSTA; T-FIGUERAS, 2016). Também, muito se discute sobre as externalidades negativas dos transportes, de engarrafamentos e problemas respiratórios até a emissão de gases de efeito estufa.

As decisões relacionadas às políticas de mobilidade, embora sejam prioritariamente pautadas por motivações urbanísticas e de tráfego, impactam diretamente o setor energético. Este trabalho pretende analisar o pujante setor de transportes sob a perspectiva energética. E para permitir uma investigação mais aprofundada e precisa, delimita-se o foco deste estudo ao transporte rodoviário de passageiros.

A presente pesquisa é constituída por seis capítulos. O primeiro capítulo, que compreende esta introdução, busca contextualizar o tema da dissertação, estabelecer os objetivos da dissertação, expor as motivações para o tema proposto e esclarecer a estruturação do trabalho.

O segundo Capítulo, de fundamentação teórica, discorre sobre o panorama do setor de transportes e como este se relaciona com o setor de energia. São analisadas as matrizes de combustíveis e modais no Brasil e no mundo, além de conceitos de

mobilidade importantes para a transdisciplinaridade desse trabalho, que apesar de ter como objetivo final uma análise energética, acaba por tratar de algumas políticas de mobilidade e seus impactos na sociedade.

O terceiro Capítulo, também de fundamentação teórica, aborda a Mobilidade Sustentável como paradigma de política energética. São traçadas as características e tendências da Mobilidade Sustentável. É discutido o conceito moderno de eficiência energética na mobilidade, como também são apresentadas duas políticas de mobilidade: (i) a transição modal de automóveis para ônibus e (ii) a eletrificação de ônibus.

No quarto Capítulo apresentam-se os métodos escolhidos para o suporte à obtenção de resultados quantitativos, abrangendo: a descrição do modelo GTRM, justificativas para as premissas do modelo, metodologia de coletas de dados complementares e a formulação da trajetória alternativa ao caso base, que contará com uma projeção de eletrificação de ônibus e com uma premissa de incentivo ao uso do ônibus em detrimento do automóvel (transição modal).

No Capítulo 5, apresentam-se: os dados e premissas coletados para o modelo, a trajetória alternativa resultante, que serve de dado de entrada para o modelo, e as próprias saídas do modelo, tanto para o caso base quanto para a trajetória alternativa. Discutem-se os impactos energéticos de ambos os casos, isolada e comparativamente, os impactos à rede elétrica e os resultados ambientais. E ponderam-se também as limitações das simulações e do próprio modelo.

Finalmente, o sexto capítulo traz uma análise crítica do estudo, retomando pontos chave e propondo aprimoramentos e recomendações para trabalhos futuros.

1.1. Objetivos do Presente Trabalho

1.1.1. Objetivo Geral

- Analisar como a utilização do transporte público e a eletrificação de ônibus influenciam o consumo de energia nos transportes rodoviários de passageiros no Brasil, tendo como ferramenta de simulações o modelo Global Transport Roadmap.

1.1.2. *Objetivos específicos:*

- Analisar a dinâmica atual dos transportes rodoviários de passageiros no Brasil sob a perspectiva energética.
- Formular um cenário alternativo para o Brasil de eletrificação de ônibus e de transição modal, aplicando diretrizes de Mobilidade Sustentável.
- Explorar o modelo *Global Transport Roadmap* (GTRM) e suas funcionalidade para a quantificação de impactos energéticos, tendo como ponto de partida o caso base do próprio modelo e adicionando o cenários alternativo proposto.

1.2. ***Justificativa***

O presente tema de pesquisa se justifica tanto do ponto de vista social quanto acadêmico. Em relação aos aspectos sociais, presume-se que propostas de melhorias dos sistemas de transportes possuem impacto direto sobre a qualidade de vida, já que este setor permeia as atividades diárias da população.

Adicionalmente, a implementação da mobilidade sustentável traz significativos benefícios ambientais, tanto do ponto de vista de poluentes locais quanto em relação a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Em relação às justificativas acadêmicas, a presente pesquisa busca inserir um tema multidisciplinar e pouco explorado entre especialistas em energia, a Mobilidade Sustentável. Além de tratar da mobilidade elétrica, a abordagem à eficiência energética é feita de forma ampla, visando a eficiência do sistema como um todo. Espera-se que a presente pesquisa sirva de base teórica e incentivo para novas pesquisas nessa área.

2. Transportes rodoviários de passageiros – Panorama energético atual

O presente capítulo busca servir de referencial teórico. Inicialmente, será apresentada a demanda de transportes no mundo e o nexo entre energia e transportes. Na sequência, exploram-se as particularidades brasileiras, referentes à demanda de transportes e ao perfil energético. Finalmente, o item 2.3 aborda as externalidades negativas dos transportes, finalizando a revisão da dinâmica atual dos transportes, para que no capítulo subsequente discutam-se soluções e tendências futuras.

Antes de entrar propriamente em informações referentes à demanda de transportes de passageiros no mundo, faz-se necessário delimitar o escopo do estudos e fornecer de antemão algumas classificações de transportes utilizadas ao longo do trabalho.

Na atividade de transportes de cargas e passageiros, os diversos meios de transportes podem ser categorizados quanto à via utilizada, finalidade, capacidade, entre outros. De maneira simplificada, a taxonomia adotada neste trabalho está representada na Figura 1 a seguir, com categorizações não exaustivas do setor.

Figura 1 - Taxonomia não-exaustiva de modais motorizados de transporte¹

Elaborado pela autora - Fonte: (ICCT, 2012, 2017; ITF, 2017; SISTRAN ENGENHARIA; ANTP, 2014)

¹ O objetivo deste diagrama não é elaborar uma lista exaustiva de transportes, mas delimitar os tipos específicos de modais a serem estudados no presente trabalho

O presente trabalho tem como foco os transportes rodoviários (excluindo os transportes aéreos, aquaviários e ferroviários) de passageiros (excluindo portanto o transporte de cargas). Dentre os transportes rodoviários de passageiros, serão divididos para critérios comparativos os transportes individuais (automóveis e motocicleta, principalmente) e os transportes coletivos (ônibus, vans e etc). O foco das simulações será a análise comparativa de automóveis (o meio individual mais preponderante no Brasil), ônibus convencionais a diesel (o meio coletivo mais preponderante no Brasil), e ônibus puramente elétricos (a alternativa sustentável proposta).

2.1. Demanda Mundial de transportes de passageiros

A demanda de transportes motorizados de passageiros no mundo é da ordem de 40 trilhões de passageiros.km/ano, e estima-se que essa demanda quase dobre até 2050 (WBCSD, 2004).

Essa demanda pode ser atendida pelos mais diversos modais, sendo a proporção desses modais determinante para o consumo de energia e os recursos necessários para tal demanda. Num cenário de uso racional de energia, os modos de transporte mais eficientes realizariam o maior percentual das viagens. Não obstante, o cenário atual ilustra justamente o oposto, sendo quase metade das viagens realizada em veículos individuais, conforme a Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Transporte de passageiros por modal

Fonte: (WBCSD, 2004)

As projeções mundiais indicam intensificação da demanda de transportes em passageiros.km, acompanhando o ritmo de crescimento econômico, demográfico e de acesso a veículos motorizados, sendo o automóvel o modal mais utilizado.

Uma pesquisa realizada em 60 importantes cidades localizadas nos diversos Continentes busca traçar perfis de mobilidade para cidades desenvolvidas e emergentes, comparando dados de 1995, 2001 e 2012 (UITP, 2015). Apesar de limitada a poucas cidades e não a países, esse estudo indica algumas tendências urbanas globais. Primeiramente, observa-se um acoplamento entre a renda per capita e a utilização dos automóveis e motocicletas, conforme indicado na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Participação modal do automóvel vs PIB per capita, 1970-2005

Fonte: (IEA, 2009)

Entretanto, as diferentes curvas traçadas sugerem diferentes padrões de urbanização e mobilidade. O padrão mais eficiente é apresentado no gráfico pela curva azul, seguido do padrão europeu, representado em amarelo. Dentre as cidades mais eficientes, destacam-se Tóquio, Amsterdã, Hong Kong e Madri, que apesar de altos níveis de renda per capita, mantêm baixos os percentuais de viagens em automóvel, mais baixos do que as cidades brasileiras pesquisadas, que estão mais próximas à curva amarela.

Os países emergentes e suas cidades figuram como elementos chave para a futura matriz de transportes. Apesar dos atuais patamares de deslocamento motorizado serem baixos, neles se observam as maiores taxas de crescimento de população, renda, demanda de transportes e frota de veículos (EURIST, 2012; UNEP,

2012; UNITED NATIONS, 2014). Países desenvolvidos (OECD²), que hoje são responsáveis por 65% do consumo de energia em transportes, terão essa proporção reduzida para 40% em 2050 (WBCSD, 2004).

Na América Latina, estima-se um crescimento anual da atividade de transportes (passageiros-km) de 2,9% de 2000 a 2050. Essa intensificação deve gerar um aumento anual de consumo de energia de 1,7% para o mesmo período (WBCSD, 2004).

Ainda segundo o estudo das cidades mundiais, as cidades desenvolvidas encontram-se em patamares superiores de motorização (418 veículos por 1000 habitantes) e registraram crescimento de 1995 a 2012. As cidades emergentes apresentaram taxa de motorização mais baixa (117 veículos por 1000 habitantes) porém o crescimento relativo de 1995 e 2012 das cidades emergentes mostrou-se mais abrupto (117% contra 21% nas cidades de países desenvolvidos) (UITP, 2015).

De fato, os principais países emergentes apresentaram alto crescimento das taxas de motorização, apesar dos patamares relativamente baixos em relação aos países desenvolvidos (ITF, 2017). Na Figura 4 a seguir, observa-se que o Brasil, se comparado a países como África do Sul, Índia e China, é o país mais motorizado em números absolutos e um dos que mais cresceu de 2005 a 2014:

Em relação ao número de viagens realizadas, as cidades desenvolvidas mostraram aumento de 21% na proporção de viagens de transporte coletivo, apesar das altas

² Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico, que tem como membros 35 países, em geral de economias avançadas.

taxas de motorização, já que a distância média anual percorrida por automóveis diminuiu. Já nas cidades emergentes estudadas, houve redução percentual das viagens de transporte público. Note-se que a oferta de transporte público têm crescido nessas cidades, mas ainda em ritmo inferior ao aumento da demanda (UITP, 2015), conforme pode ser observado na Figura 5.

Adaptado pela autora - Fonte: (UITP, 2015)

Além de renda e motorização, a pesquisa da UITP indica ainda as seguintes correlações: altos percentuais de viagens sustentáveis (não motorizadas ou em transporte público) se correlacionam com densidade populacional e à rapidez dos transportes públicos em relação aos automóveis; e são indiretamente proporcionais ao espaço urbano utilizado como via rodoviária. Em suma, o estudo aponta como condições para mais viagens em transporte público não apenas o aumento da oferta, mas também o controle do espraiamento urbano e da demanda por transporte individual (UITP, 2015).

Apesar das tendências de motorização pelo mundo, há uma possível mudança de padrão de consumo na área de mobilidade. As novas gerações demandam transporte integrado, conveniente, sustentável e estão 23% menos interessadas na aquisição de um automóvel que a geração anterior (BERRONE; COSTA; T-FIGUERAS, 2016). Ademais, a digitalização de dados e acessibilidade dos smartphones possibilita a oferta de Mobilidade como Serviço (Maas), em que o transporte não requer a propriedade de veículos e o deslocamento pode ser feito com

a combinação de diversos modais, de forma mais eficiente, conveniente e customizada às necessidades do usuário (GOODALL et al., 2017).

2.1.1. Energia para Mobilidade

De acordo com o balanço energético mundial da Agência Internacional de Energia (IEA, 2014a), representado na Figura 6 a seguir, o setor de transportes é intensivo em energia, consumindo aproximadamente 28% do uso final da energia, ou 2.627 MTep³. Adicionalmente, sua matriz é pouco diversificada e predominantemente não-renovável, sendo 92% de sua energia, 2.426 MTep, advinda de derivados do petróleo. O uso de eletricidade no setor de transportes ainda é incipiente (1% da matriz), bem como a utilização de biocombustíveis (3%). De toda a energia proveniente de derivados de petróleo no mundo (3.744 MTep, incluindo os derivados para uso não energético), 50% é direcionada especificamente aos transportes rodoviários.

Fonte: (IEA, 2014a)

O consumo de energia no setor de transportes acompanha o aumento dos deslocamentos, em especial os deslocamentos em veículo individual. De 1971 a 2006,

³ Mega Toneladas equivalentes de petróleo

o uso de energia nos transportes teve um crescimento anual estável entre 2% e 2,5% (IEA, 2009).

Considerando a utilização da energia no setor de transportes por modal, observa-se, além da concentração no transporte rodoviário, o predomínio do veículo privado (automóveis e motocicletas) no consumo de energia. Conforme a Figura 7 a seguir, o transporte rodoviário individual de passageiros é o maior consumidor de energia no setor de transportes (45% do total), mesmo comparado ao transporte rodoviário de carga (25%), o segundo tipo de transporte energeticamente mais intenso.

Figura 7 - Consumo de energia por meios de transporte no mundo

Adaptado pela autora - Fonte: (IRENA, 2016)

2.2. Mobilidade no Brasil

O Brasil é o quinto país do mundo em extensão territorial e em população, com mais de 200 milhões de habitantes.

O país concentra 85% da população em espaços urbanos (IBGE, 2017) e suas perspectivas de crescimento populacional geral e urbano situam-se entre a média da OECD⁴ (países desenvolvidos) e a média dos demais países em desenvolvimento.

São, ao todo, 5.561 municípios (IBGE, 2017) de tamanhos populacionais e níveis de desenvolvimento diversos, sendo a heterogeneidade um dos maiores desafios para soluções únicas e nacionais de infraestrutura urbana, conforme ilustrado na Figura 8

⁴ A OCDE (*Organisation de coopération et de développement économiques*) tem como membros 35 países de alta renda e melhores índices de desenvolvimento humano.

a seguir. A distribuição irregular da população entre municípios também ocorre internamente nas áreas urbanas (IBGE, 2017).

Figura 8 - Distribuição da população urbana brasileira por perfil de município

Elaborado pela autora - Fonte: (IBGE, 2017)

O WRI Brasil classifica nosso modelo de crescimento urbano como “3D: distante, disperso e desconectado” (WRI BRASIL, 2015). Segundo a entidade isso ocorre pela taxa de crescimento urbano superior à taxa de investimentos em infraestrutura. Com serviços públicos insuficientes e concentrados nos centros urbanos, a população de baixa renda é levada a morar em áreas distantes e precárias em serviços, intensificando a exclusão social.

Esse modelo de urbanização, também observável em outros países emergentes, demanda grandes deslocamentos diários pela concentração de trabalho e serviços nos centros urbanos (WRI BRASIL, 2015). As grandes distâncias médias de deslocamento, além de serem ineficientes do ponto de vista energético e econômico, são fatores de redução da qualidade de vida, com relevantes rebatimentos nos impactos ambientais, intensificando a utilização de automóveis e os congestionamentos (WRI BRASIL, 2015).

Em 2014, o Brasil atingiu 958,3km de linhas de transporte de alta e média capacidade (trilhos e BRT⁵). Esse resultado é quase 2,5 vezes superior à extensão de

⁵ Bus Rapid Transit - BRTs – corredores de ônibus com embarque em nível e cobrança externa.

linhas em 1980, o que demonstra um grande esforço para expandir o transporte coletivo (ITDP, 2016). Entretanto, considerando-se o aumento da urbanização nesse período, esse crescimento não foi suficiente para sanar as necessidades de transporte no país. Apenas nas 15 maiores metrópoles do país, estimou-se em 2015 um déficit de 1.633km de linhas, dentre os quais 799km seriam o déficit de linhas de ônibus BRT (SANTOS et al., 2015).

O Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP) fez o levantamento do Indicador de Transporte por Residente (RTR)⁶ em 2014 em 9 países, incluindo o Brasil, conforme a Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Indicador de Transporte por Residente (RTR)				
	Atual - 2014	Meta 2030		
	Infraestrutura ⁷ (km)	RTR 2014	Expansão ⁸ (km)	RTR 2030
França	1380	69,2	0	62
EUA	2482	14,3	2036	22,6
Brasil	929	10,7	1975	28
Colômbia	233	10	300	18,3
México	552	8,8	1636	28,4
China	3586	8,3	15032	31,8
Indonésia	210	6,2	962	24,2
África do Sul	76	3,6	1055	43,1
Índia	692	3,2	4389	16,1

Adaptado pela autora - Fonte: (ITDP, 2016)

O RTR brasileiro passou de 8,8 km/mi. hab. em 1980 para 10,7 km de transporte de média e alta capacidade para cada um milhão de residentes urbanos, uma significativa melhoria. Entretanto, o crescimento da RTR de 2000 a 2014, de 18%, ainda é considerado baixo diante dos outros países como o México (26%) e a Colômbia (49%) no mesmo período. O instituto calculou que seria necessário um crescimento de 132% do RTR entre 2016 e 2030 para a prestação de um serviço de transporte satisfatório no país (ITDP, 2016).

A Figura 9 a seguir mostra a divisão modal brasileira entre transporte coletivo (ônibus municipal, metropolitano e transporte sobre trilhos), particular (automóvel e motocicleta) e não motorizado (a pé ou bicicleta):

⁶ RTR (km/hab): considera a malha de transportes de alta e média capacidade (em km) por habitante, considerando cidades de mais de 500 mil habitantes.

⁷ Malha existente (2014) de transporte de alta e média capacidade existentes (em km).

⁸ Meta de aumento da malha de transporte de alta e média capacidade até 2030 (em km).

Figura 9 – Matriz de modais de transportes no Brasil

Adaptado pela autora - Fonte: (ANTP, 2014a)

O Brasil ainda possui uma matriz modal relativamente equilibrada entre transportes não motorizados (a pé e bicicleta), motorizados coletivos (trens, ônibus municipais e intermunicipais) e individuais (automóveis e motocicletas). Entretanto, analisando dados históricos, observa-se, entre 2003 e 2014, um aumento de deslocamentos totais (de 29%) e ainda maior da proporção de viagens em modal individual (de 40%), como demonstrado na Figura 10 a seguir.

Figura 10 – Atividade de transportes motorizados no Brasil: 2003 a 2014

Adaptado pela autora - Fonte: (SIMU; ANTP, 2014)

2.2.1. Energia e Transportes no Brasil

A Matriz de produção energética brasileira é marcada pela predominância do petróleo (122,8MTep produzidos em 2014), sendo parte dessa produção exportada,

e, também, pela utilização massiva de biomassa como fonte de energia (principalmente lenha, carvão vegetal e biomassa de cana-de-açúcar), em especial para o suprimento da indústria. Em relação à média mundial, há baixa utilização de carvão, gás natural e energia nuclear. Assim como no balanço mundial, apenas parte da energia é transformada em eletricidade, sendo que, no caso do Brasil, a energia hidrelétrica é abundante do ponto de vista de matriz energética, parte desta eletricidade indo para o sistema interligado nacional - SIN. A figura 11 a seguir ilustra o balanço energético ano base 2014:

Figura 11 - Balanço energético do Brasil (2014)

Fonte: (IEA, 2014a)

No que diz respeito ao uso final de energia por habitante, o Brasil e outros países em desenvolvimento ainda se encontram em patamares muito inferiores aos de países desenvolvidos. A América Latina e grande parte da Ásia ainda figuram abaixo da média mundial de consumo de energia per capita (GEA, 2012). À exceção da alta taxa de dependência dos derivados de petróleo (46,9% no Brasil em relação a 32,9% no Mundo)(BP, 2016), o Brasil apresenta indicadores energéticos vantajosos em relação às médias mundiais, especialmente em relações aos consumos per capita e à oferta de energia renovável, como ilustrado na Tabela 2:

Tabela 2 – Dados Energéticos 2017 – Brasil e Mundo

	Consumo energético (TEP/capita)	Emissões per capita (TCO ₂ /capita)	Emissões por energia (CO ₂ /TEP)	% derivados de petróleo
Brasil	1,41	2,23	1,59	46,0%
Mundo	1,80	4,45	2,48	34,2%

Elaborado pela autora - Fonte: (BP, 2017)

Se, por um lado, o Brasil possui grandes vantagens em relação à geração de energia renovável e a utilização de biocombustíveis, por outro o consumo interno mostra-se em crescimento acentuado, crescimento este que é mais forte para derivados de petróleo, indicado na Figura 12 a seguir:

Figura 12 – Consumo final de energia por fonte

Fonte: (EPE, 2016)

De acordo com levantamentos da EPE, a demanda energética do setor de transportes rodoviário brasileiro registrou um aumento médio de 4,2% ao ano de 2000 a 2015, resultado significativamente superior ao crescimento da demanda dos transportes não-rodoviários (1,8%) e da demanda energética total do país (2,9%) no mesmo período (EPE, 2016). Adicionalmente, o percentual de transportes de passageiros em relação ao transporte de cargas também aumentou de 2000 a 2010, de 55% para 58,4% do consumo de energia com transportes (EPE, 2015). E finalmente, no transporte urbano de passageiros, 71% da energia consumida é destinado ao automóvel, apesar do fato de que apenas 27% dos deslocamentos são realizados com este modal (SIMU; ANTP, 2014). A Figura 13 a seguir ilustra o consumo de energia na mobilidade urbana por modal de transporte:

Figura 13 - Evolução do consumo de energia por modal

Adaptado pela autora - Fonte: (SIMU; ANTP, 2014)

Considerando o consumo de energia especificamente no transporte rodoviário, pode-se notar o predomínio do óleo diesel (veículos médios e pesados) e da gasolina (veículos leves), conforme a Figura 14 ilustra a seguir. Os combustíveis renováveis aparecem em complementariedade, sendo o etanol da cana-de-açúcar o mais significativo entre eles, que foi adotado no Brasil após uma série de estímulos governamentais, como o programa Proálcool, e com o advento do veículo *flex*, que permite que o usuário opte entre gasolina ou etanol no momento do abastecimento. No caso do biodiesel e do álcool anidro, estes são adicionados ao diesel e à gasolina, respectivamente, também mediante a regulamentação de percentuais⁹ e pacotes de estímulos, melhorando assim a matriz energética dos transportes rodoviários, em termos de percentual renovável. Estes pacotes de estímulos aos biocombustíveis buscam incentivar a indústria nacional e reduzir importações de derivados de petróleo. Observa-se ainda que a mobilidade rodoviária elétrica é virtualmente inexistente.

⁹ Percentual adicionado atualmente: 8% de biodiesel ao diesel; 25% ou 27% de adição de álcool anidro à gasolina, a depender do tipo (comum ou premium).

Figura 14 - Consumo de combustíveis no transporte rodoviário em TEP¹⁰

2.3. Externalidades dos transportes

Apesar de seus benefícios e de sua relevância, os transportes geram efeitos colaterais indesejáveis que devem ser minimizados.

Figura 15 - Ciclo de benefícios e impactos dos transportes

Fonte: (WBCSD, 2004)

A Figura 15 pretende ilustrar tanto os benefícios dos transportes para a sociedade quanto seus possíveis custos, caso não se busque um crescimento

¹⁰ Toneladas equivalentes de petróleo

sustentável dos transportes: 1) os serviços de transportes (a mobilidade de bens e serviços e o acesso da população à cidade) possibilitam o crescimento econômico e de renda; 2) o crescimento econômico gera uma demanda por transportes motorizados que, por sua vez, repercute na expansão do transporte individual; 3) Essa intensificação dos transportes produz externalidades negativas, como poluição, congestionamentos, colisões e ruídos; e 4) as externalidades, por sua vez, inibem e prejudicam os próprios transportes de pessoas e cargas, dificultando o desenvolvimento econômico.

2.3.1. Congestionamentos e tempo de deslocamento

Segundo o *Tomtom Traffic Index 2016*, um índice de congestionamentos de diversas cidades no mundo, houve um recorde de congestionamentos no mundo, com um crescimento de 10% no ano e de 23% em relação a 2008. Os efeitos mais notáveis se observaram na América do Sul (7% de aumento) e na África (15% de aumento). As perdas de produtividade e eficiência econômica em decorrência de congestionamentos costumam custar entre 1% e 5% do PIB, sendo essa perda de 3,5% na América Latina, e de 7,8% em São Paulo (TOMTOM, 2017).

Os indicadores da *Tomtom Traffic Index* consideram apenas o incremento de tempo de deslocamento em relação ao trânsito livre. Há que se considerar ainda o tempo de deslocamento total, conforme a Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Congestionamentos e tempo de deslocamento diário em cidades brasileiras			
	Rio de Janeiro	São Paulo	Curitiba
Tempo de deslocamento livre (min)	91	93	110
Índice de congestionamento	47%	30%	20%
Tempo total de deslocamento (min)	134	121	132

Elaborado pela autora - Fonte: TomTom Traffic Index

Tanto as grandes distâncias livres quanto a extensão do tempo de deslocamento por congestionamentos reduzem a qualidade de vida dos cidadãos, aumentam o consumo de combustível e a emissão de gases de efeito estufa pelos veículos.

Um estudo da Firjan estima a perda de produtividade devido aos longos tempos de deslocamento em 37 áreas metropolitanas do Brasil. Os 17 milhões de trabalhadores analisados¹¹ demoram, em média, 114 minutos para seus

¹¹ Foram isolados na análise apenas os deslocamentos de mais de 30 minutos.

deslocamentos pendulares (casa-trabalho), gerando prejuízo superior a R\$ 111 bilhões, impactando em média 4,4% dos PIB's das áreas estudadas. (SISTEMA FIRJAN, 2015).

2.3.2. Poluição do ar

Os motores de combustão interna geram uma série de gases e substâncias potencialmente nocivas tanto a nível local, pelos danos à saúde humana e ao entorno, quanto a nível global, pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Apesar dos veículos a diesel também emitirem poluentes, a intensa atividade de automóveis faz com que o carro seja ainda o veículo com maior participação na emissão de poluentes locais e globais, ambos da ordem de 60% das emissões. A Figura 16 a seguir indica o peso de cada modal nos efeitos de poluição local e global¹².

Figura 16 - Comparativo: Emissões de poluentes locais e globais por modal no Brasil¹³

Elaborado pela autora - Fonte: (ANTP, 2014a)

¹² A categoria "outros" abrange os deslocamentos não motorizados, por motocicleta e por trens.

¹³ No levantamento da ANTP, consideram-se por gases de poluição local: CO, HC, NOx, SOx e MP. A poluição global neste caso leva em conta apenas os gases CO₂.

A Tabela 4 a seguir relaciona os principais poluentes e seus efeitos.

Tabela 4 - Poluentes atmosféricos e seus efeitos

POLUENTE	EFEITOS MEIO AMBIENTE	EFEITOS SAÚDE
Fumaça e Material Particulado Inalável MP10	<ul style="list-style-type: none"> - Danos à vegetação - Deterioração da visibilidade - Contaminação do solo 	<ul style="list-style-type: none"> - Agravam quadros alérgicos de asma e bronquite - Agravam o quadro de doenças do coração - Podem ser cancerígenos - Facilitam a propagação de infecções gripais
Material Particulado total em suspensão PTS	<ul style="list-style-type: none"> - Danos à vegetação - Deterioração da visibilidade - Contaminação do solo 	<ul style="list-style-type: none"> - Agrava quadros alérgicos de asma e bronquite - Agrava o quadro de doenças do coração - Pode ser cancerígeno - Facilita a propagação de infecções gripais
Dióxido de Enxofre SO₂	<ul style="list-style-type: none"> - Provoca chuva ácida afetando plantas, o patrimônio histórico, acidificação do solo e corpos d'água 	<ul style="list-style-type: none"> - Provoca coriza, catarro e danos aos pulmões - Fatal em doses altas, especialmente combinado com Material Particulado
Óxidos de Nitrogênio NOx	<ul style="list-style-type: none"> - Em contato com a água, pode formar ácido nítrico, componente da chuva ácida 	<ul style="list-style-type: none"> - Desconforto respiratório - Diminuição da resistência a infecções - Alterações celulares
Ozônio O₃	<ul style="list-style-type: none"> - Contribui para intensificação do efeito estufa - Afeta plantas e desgasta prematuro de materiais 	<ul style="list-style-type: none"> - Causa envelhecimento precoce da pele - Diminui a resistência a infecções - Provoca irritação nos olhos, nariz e garganta - Provoca desconforto respiratório
Monóxido de Carbono CO	<ul style="list-style-type: none"> - Participa de reações fotoquímicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminui a oxigenação do sangue causando tonturas, vertigens e alterações no sistema nervoso central - Pode ser fatal em concentrações altas - Portadores de doenças cardiorrespiratórias podem ter sintomas agravados
Hidrocarbonetos HC (exceto metano)	<ul style="list-style-type: none"> - Participam do efeito estufa pela formação de CH₄ - Favorecem a formação do ozônio troposférico 	<ul style="list-style-type: none"> - Provocam irritação nos olhos, nariz e garganta
Aldeídos H-CHO	<ul style="list-style-type: none"> - Participam do efeito estufa pela formação de O₃ 	<ul style="list-style-type: none"> - Formaldeído é cancerígeno
Dióxido de Carbono CO₂	<ul style="list-style-type: none"> - Principal responsável pelo efeito estufa 	<ul style="list-style-type: none"> - Causa problemas respiratórios e cardiovasculares
Metano CH₄	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do efeito estufa com intensidade 21 vezes superior à do CO₂ - Aquecimento global 	<ul style="list-style-type: none"> - Asfixia, parada cardíaca, inconsciência, danos ao sistema nervoso central

Fonte: (SISTRAN ENGENHARIA; ANTP, 2014)

Dentre os poluentes locais, os automóveis são responsáveis por 60% das emissões, seguidos das motocicletas. Já para a emissão de gases de efeito estufa (neste estudo, apenas o CO₂ foi considerado), o segundo veículo mais poluente é

ônibus. Nota-se que o ônibus, responsável por 50% da atividade de passageiros (passageiro-km) no Brasil, polui relativamente menos que o automóvel, já que sua alta capacidade de passageiros (passageiros/ veículo) faz com que a atividade veicular (veículos-km) seja menor do que a de automóveis.

2.3.3. Impactos ambientais globais

Os transportes rodoviários totais são responsáveis por 17% do total das emissões antropogênicas globais e por 73,9% das emissões do setor de transportes, como indicado na Figura 17 a seguir:

Figura 17 - Transportes rodoviários e emissões de CO₂ globais

Fonte: (ICCT, 2015)

Em relação ao impacto de emissões de GEE por modal de transporte, nota-se que, de forma similar ao parâmetro de eficiência energética, os modais coletivos de alta capacidade tendem a gerar menos emissões por pkm (passageiro-km), como exemplificado na Figura 18 a seguir.

Figura 18 - Intensidade de emissões de GEE por modal

Fonte: (IEA, 2009)

No Brasil, os automóveis são responsáveis por 31% das emissões de GEE do setor de transportes, e 63% das emissões de transportes de passageiros. Os ônibus são responsáveis por 10% das emissões totais e 20% das emissões de transportes de passageiros, conforme ilustrado na Figura 19 a seguir:

Figura 19 – Emissões veiculares no Brasil, em toneladas equivalentes de CO₂.

Fonte: (FERREIRA et al., 2017)

2.3.4. Mudanças climáticas e compromissos internacionais

Em 4 de novembro de 2016, entrou em vigor o Acordo de Paris, um acordo internacional mediado pela ONU, ratificado atualmente por 190 países, com o objetivo central de manter o aumento da temperatura média global em até 2° C em relação aos

níveis pré-industriais. O Brasil, como signatário deste acordo, apresentou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC¹⁴), documentando suas metas específicas e ações para tal. A proposição do Brasil é, até 2025, reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% em relação aos níveis de 2005 (ARIOLI, 2017). Para tal redução, serão necessárias diversas mudanças no setor de energia, e em especial no subsetor de transportes, o principal subsetor emissor de GEE.

De acordo com a Tabela 5 a seguir, os transportes possuem um impacto relativamente maior nas emissões do Brasil do que a média dos demais países. Isso se deve a diversos fatores, entre estes o foco em transporte rodoviário de baixa capacidade e eficiência.

Tabela 5 - Participação dos transportes nas emissões de CO ₂		
Participação nas emissões totais de CO₂ (2014)		
	Transporte	Transporte rodoviário
Brasil	45%	40%
Mundo	23%	17%

Elaborado pela autora a partir de (IEA, 2016)

O subsetor de transportes é responsável por 45% das emissões do setor de energia no Brasil (ARIOLI, 2017), abrangendo transporte de cargas e passageiros. No segmento de transporte de passageiros, 77% das emissões são referentes ao transporte motorizado individual, apesar de ser utilizado apenas em 30% das viagens (MOBILIZE BRASIL, 2008). O transporte coletivo, por sua vez, que realiza quase a mesma proporção das viagens de passageiros (28%), registra os demais 23% das emissões.

Diante deste cenário, a iNDC brasileira propõe ações no âmbito dos veículos rodoviários (leves e pesados) que buscam a educação do motorista para uma condução mais econômica e sustentável, além de estímulo a novas tecnologias para melhoria da eficiência. Espera-se com isso uma redução de 51% (39,55 MtCO₂e¹⁵) das emissões por veículos leves e de 22% (21,81 MtCO₂e) da emissão de veículos pesados (ARIOLI, 2017) (MME, 2017).

Não obstante, o documento apresentado pelo Brasil destaca a importância do planejamento urbano para a priorização dos modais coletivos, considerando como

¹⁴ A Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC, na sigla em inglês) é o documento do governo brasileiro que registra os principais compromissos e contribuições do país para o Acordo de Paris.

¹⁵ Tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente

estratégias regulatórias de impacto energético e ambiental o Estatuto da Cidade (Lei 10.257/2001) e a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU - Lei 12.587/2012). Tais leis estipulam, entre outras providências, a obrigatoriedade de elaboração do Plano de Mobilidade Urbana para as cidades com mais de 20 mil habitantes. O planejamento das cidades, tanto a nível municipal como estadual, na integração de metrópoles, figura como estratégico para as metas climáticas brasileiras. Essa proposição demonstra que o planejamento urbano já é reconhecido como uma medida de mitigação de impactos ambientais e de redução de consumo de energia.

Apesar de não quantificar o potencial de redução de emissões, a NDC aponta a Mobilidade Urbana como uma das possíveis ações mitigadoras, indicando as seguintes propostas: i. Aumento da eficiência energética do transporte público por ônibus; ii. Melhoria da qualidade e aumento da oferta do transporte público; iii. Implantação de faixas exclusivas de ônibus; iv. mudança modal do transporte individual motorizado para o transporte público e transporte não motorizado (MME, 2017).

3. O conceito da Mobilidade Sustentável

Buscando atenuar as externalidades negativas dos transportes e otimizar sua utilização, estabeleceu-se a busca pela Mobilidade Sustentável, que pode ser definida como “a capacidade de suprir as necessidades da sociedade de se mover livremente, obter acesso, comunicar-se, comercializar e estabelecer relações sem sacrificar outros valores essenciais humanos e ecológicos no presente ou no futuro” (WBCSD, 2014). Nesse conceito, são abarcadas diferentes dimensões dos impactos da mobilidade: (i) Qualidade de vida, referente aos impactos sociais locais e imediatos da mobilidade no ambiente urbano; (ii) Ambiente global, com referente a impactos a médio e longo prazo, e que podem se estender além da escala local; (iii) Sucesso Econômico, referente aos impactos econômicos locais da mobilidade; e (iv) Performance do Sistema de Transportes, como uma dimensão interna à mobilidade urbana, que integra as variáveis externas de recursos utilizados e resultados atingidos, estando interligado às três dimensões anteriores.

Enquanto o planejamento de transportes convencional busca atender às demandas com expansão da capacidade, a mobilidade sustentável segue uma abordagem tripla “*avoid-shift-improve*”¹⁶ (ASI) para atuação tanto na oferta quanto na demanda de transportes, conforme a Figura 20 a seguir.

Fonte: (GIZ, 2012)

¹⁶ Evitar-Mudar-Melhorar

A Tabela 6 a seguir apresenta abordagens da mobilidade sustentável e suas formas de utilização de tecnologia e recursos, em comparação ao estado da mobilidade atual, ou não-eficiente.

Tabela 6 - Transição para a mobilidade sustentável

	Transporte Não-sustentável	Transporte Sustentável
Volume	Requer um alto número de viagens e grandes distâncias, devido ao desenvolvimento urbano espalhado e à rede logística ineficiente	A demanda por viagens é minimizada e as viagens mais curtas, graças ao adensamento urbano, às áreas de uso misto e à cadeia de logística otimizada.
Modais	Dependente do transporte privado motorizado para passageiros, e dos veículos pesados para cargas	Viagens de passageiros feitas majoritariamente por transporte público ou não motorizado, e cargas transportadas por trens e outros modais de baixa emissão de GEE.
Tecnologias	Veículos à base de motores de combustão de combustíveis fósseis, de baixa eficiência. A rede de transportes é gerida de forma ineficiente.	Veículos de baixa emissão de GEE são popularizados, incluindo motores de alta eficiência, híbridos e elétricos. Novas tecnologias como “Sistemas de Transporte Inteligente” e “Logística inteligente” dão suporte à gestão eficiente da rede.
Precificação	Os preços pagos por usuários para os veículos, combustível, estacionamento e uso da via não cobrem a totalidade das externalidades negativas, encorajando o uso do veículo motorizado privado em relação a escolhas mais sustentáveis.	O preço pago pelos usuários internaliza plenamente os custos, o que otimiza a utilização de veículos motorizados e encoraja opções mais ambientalmente positivas.
Resiliência a mudanças climáticas	Sistemas altamente vulneráveis a mudanças climáticas	Os ativos de transporte são selecionados levando em consideração sua vulnerabilidade, e desenvolvidos de forma resiliente.

Adaptado pela autora - Fonte: (WBCSD, 2016)

Avoid: Redução de deslocamentos ineficientes ou desnecessários quando adequado. Exemplos: urbanização integrada e compacta, com bairros de uso misto e melhor distribuição de trabalho pela cidade, comunicações e negócios virtuais, otimização de cadeias de suprimento.

Shift: Transição para os modais (ou combinação de modais) mais eficientes e sustentáveis, bem como o deslocamento de viagens para horários fora de pico. Exemplos: incentivos gerais ao transporte público, incentivos ao compartilhamento de viagens.

Improve: Melhoria da eficiência do transporte através de intervenções tecnológicas, operacionais, regulatórias ou de mercado para a provisão de transporte mais eficientes. Exemplos: regulação de níveis de emissão e eficiência de veículos, alteração de combustível dos transportes públicos, incentivos a veículos elétricos. A Figura 21 a seguir lista alguns dos impactos positivos esperados com a abordagem da Mobilidade Sustentável, dentre os quais estão as reduções de externalidades dos transportes, e a segurança energética:

Figura 21 - Benefícios da Mobilidade Sustentável

Fonte: (GIZ, 2012)

3.1. Intensidade energética de veículos e de viagens

Conforme a Figura 20 do item anterior, a Mobilidade sustentável analisa não apenas a eficiência dos veículos, dada em km/ energia e mais comumente utilizada. Espera-se, com a Mobilidade Sustentável, atingir também a eficiência do sistema e a eficiência das viagens. A eficiência das viagens, cujo objetivo é a transição modal, pode ser detectada em indicadores como energia/passageiro-km¹⁷. A Figura 22 a seguir lista alguns dos indicadores de eficiência energética para o transporte de passageiros, recomendados pela Agência Internacional de Energia:

¹⁷ Outros indicadores são possíveis, não apenas para eficiência energética, mas eficiência de emissão de GEE, por exemplo.

Figura 22 - Indicadores de eficiência energética

Elaborado pela autora – Fonte: (IEA, 2014b)

A eficiência energética das viagens depende, além da eficiência do veículo em si, da capacidade do modal e da taxa de ocupação em passageiros.

A Figura 23 a seguir ilustra como, a uma taxa de ocupação máxima, os veículos de maior capacidade tendem a apresentar maiores eficiências de viagem:

Figura 23 - Quantos quilômetros se viaja com 1 litro de gasolina? Valores em passageiro-km

Fonte: (GIZ, 2012)

Entretanto, na prática, as taxas de ocupação em transportes públicos dependerão do dimensionamento correto do sistema de acordo com o local e a demanda de passageiros, sendo a taxa de ocupação final uma média do dia. Pela Figura 24 a seguir, que indica intensidades energéticas médias para países desenvolvidos e subdesenvolvidos, pode-se notar uma faixa de intensidade energética da viagem. Os países em desenvolvimento apresentam melhores eficiências, devido às maiores taxas de ocupação.

Figura 24 - Intensidade energética por passageiro-km

Fonte: (IEA, 2009)

Em outro levantamento, feito em 84 áreas urbanas de diferentes países, observa-se novamente a grande variação de eficiências entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, conforme a Figura 25 a seguir:

Figura 25 - Eficiência de automóveis e ônibus em 84 cidades de diferentes países

Elaborado pela autora – Fonte: (KENWORTHY, 2008)

Apesar da grande variação em ambos os levantamentos, devido a características locais, os transportes públicos tendem a ser mais opções de viagem mais eficientes, especialmente se comparados às viagens de automóvel de seus respectivos locais.

3.2. Oportunidades do transporte coletivo por ônibus

No Brasil o sistema de ônibus é o mais abundante transporte coletivo, com demanda de 15,7 bilhões de passageiros por ano, um valor 6,3 vezes maior que a demanda de viagens de passageiros sobre trilhos. A frota nacional é de quase 112 mil veículos com rodagem anual média de mais de 74 mil km. Considerando apenas os ônibus municipais, o índice de mobilidade é 0,34 viagens/habitante-dia, sendo o segundo modal de transporte de uso mais frequente dos brasileiros, após o automóvel (SIMU; ANTP, 2016).

Para alguns especialistas, os ônibus são subestimados em seu potencial de prover transporte eficaz e de boa qualidade (GOMEZ-IBANEZ; GLAESER, 2018). Isso porque as comparações entre ônibus e trem não levam em conta a possibilidade de equiparar as condições de operação de ambos os veículos: segregados do trânsito, com embarque em plataformas e com estações de boa qualidade ao invés de pontos de parada.

O sistema BRT (Bus Rapid Transit), que possui as características acima para operação de ônibus, é considerado um grande avanço no setor. Criado em Curitiba e hoje já difundido em diversas cidades do mundo, o sistema aumenta a capacidade e a qualidade do sistema de ônibus (GOMEZ-IBANEZ; GLAESER, 2018). O BRT já foi implantado em 10 cidades brasileiras¹⁸. Estima-se que o BRT Transcarioca, por exemplo, tenha reduzido em 38 minutos o tempo médio de viagem por passageiro, gerando ganhos de produtividade na cidade de R\$ 59,8 milhões/ano, podendo chegar a R\$ 96,2 milhões/ano. Esse benefício se deve à segregação das vias exclusivas para ônibus, que reduz o impacto dos congestionamentos sobre a circulação dos ônibus (ITDP, 2015).

Outro aspecto importante dos ônibus é a flexibilidade. Por serem transportes de média capacidade, a operação se viabiliza mesmo em condições de menor demanda, permitindo capilaridade e utilização em regiões menos densas. Além disso, suas rotas podem ser alteradas com mais facilidade ao longo do tempo (GOMEZ-IBANEZ; GLAESER, 2018). Adicionalmente, os custos de implantação são significativamente menores que transportes ferroviários, como mostra a Figura 26 a seguir, que compara

¹⁸ Se considerarmos também os corredores de ônibus (sem embarque em plataforma, porém com via exclusiva), são 31 cidades e 696km de linhas (UN-HABITAT, 2013).

o custo inicial (em milhões de US\$/km) com a capacidade de transportes (em passageiros/hora/direção) de diferentes modalidades de operação de ônibus e trens. O gráfico indica que o BRT pode transportar de 10 a 40 mil passageiros/hora/direção, podendo ter a mesma capacidade de alguns sistemas de metrô a um custo muito inferior, como mostrado na Figura 26 a seguir.

Fonte: (UN-HABITAT, 2013)

Um aspecto importante dos sistemas BRT é a sua observada capacidade de atrair o usuário de viagens que seriam feitas de automóvel. A Tabela 7 a seguir indica alguns casos de implantação de BRT que geraram transições modais de automóveis para ônibus de 9 a 21%, implicando em reduções do uso de veículos privados e na redução de emissões de CO₂:

Tabela 7- Sistemas BRT e Transição Modal

Cidade	Linhas de BRT (km)	% transição modal	viagens de veículos reduzidas (10 ⁶ VKT)	Redução de emissões de CO ₂ (10 ⁶ t)
Bogotá	84	9%	435	247
Cidade do México	20	6%	23	18
Pereira	30	16%	54,5	27
Chongqing	82	21%	495,3	260

¹⁹ Transportes considerando: ônibus, BRT, VLT/ LRT (Veículo Leve sobre Trilhos), Metrô elevado e metrô subterrâneo.

Adaptado pela autora - Fonte: (IEA, 2009)

No Brasil, os ônibus são largamente utilizados, sendo o modal coletivo mais comum (ANTP, 2014a). De acordo com uma pesquisa do Datafolha (Figura 27), quando questionados por seus meios preferenciais de transporte caso a cidade favoreça todos os modais igualmente, 42% dos entrevistados optaria por ônibus como seu modal mais frequente. Nas regiões metropolitanas, o índice de preferência pelo ônibus sobe para 45%. (GREENPEACE; DATAFOLHA, 2016).

Figura 27 – Pesquisa de preferência dos usuários²⁰

Adaptado pela autora - Fonte: (GREENPEACE; DATAFOLHA, 2016)

A Agência Nacional de Transportes Públicos (ANTP), em parceria com o Fundo Mundial para a Natureza (WWF), disponibiliza em seu site uma ferramenta de simulação de impactos ambientais dos transportes em cidades brasileiras (ANTP, 2016). Nesta ferramenta, é possível acessar a matriz de transportes de todas as cidades brasileiras de mais de 60 mil habitantes e alterar o percentual de viagens em um determinado tipo de modal, recebendo o impacto percentual estimado em tempo de deslocamento, energia consumida, espaço físico necessário e emissões de poluentes locais e gases de efeito estufa. A Figura 28 a seguir exemplifica uma das simulações possíveis e os resultados computados pelo site, sendo as premissas desta simulação escolhidas pela autora para demonstrar a funcionalidade dessa ferramenta.

²⁰ Múltiplas respostas eram possíveis, por isso a soma das respostas é maior que 100%.

Figura 28 - Simulação de transição modal sustentável

Adaptado pela autora - Fonte: (ANTP, 2016)

Segundo os cálculos de sua ferramenta, ilustrado na Figura 28, a ANTP estima que, caso 10% das viagens de São Paulo feitas de automóvel passassem a ser feitas de ônibus²², haveria uma economia de 6% na demanda de energia para transportes rodoviários de passageiros na cidade (ANTP, 2016).

Tais resultados demonstram que a mera transição modal para o transporte coletivo é capaz de evitar de forma significativa o consumo de energia e a emissão de poluentes. Entretanto, para se consolidar como uma transporte de qualidade, os ônibus devem enfrentar dois desafios principais: reverter a tendência de queda de passageiros e reduzir os níveis de poluição.

3.3. Desafios do transporte coletivo por ônibus

O sistema de transportes de ônibus enfrenta dois desafios importantes: (i) a necessidade de melhorar a atratividade de seus serviços frente a outros modais e de (ii) modernizar sua frota a fim de emitir menos poluentes.

Os transportes por ônibus vêm sofrendo quedas no número de passageiros no Brasil e no mundo. No Brasil, os ônibus urbanos tiveram o número de passageiros transportados reduzido em 24,4% de 1994 a 2012. E de 2013 a 2016, a redução foi ainda mais significativa, de 18,1% (NTU, 2017).

²² Cidade e percentual de transição modal escolhidos pela autora para demonstração da ferramenta, que dispõe de diversas outras opções de simulação à escolha do usuário.

Por outro lado, a poluição local emitida pelos ônibus convencionais à diesel tem se mostrado prejudicial à saúde. Um estudo voltado para a região metropolitana de São Paulo (RMSP) estima que, com os padrões atuais de frota de ônibus a diesel, ocorrerão mais de 170 mil mortes precoces até 2050. Estima-se que estas mortes, atribuíveis a poluição do ar, acarretarão uma perda acumulada de produtividade em R\$ 54 bilhões, em valores de 2015. Soma-se a este custo, os gastos com internações públicas e privadas, em torno de R\$ 634,7 milhões para aproximadamente 190 mil internações (GREENPEACE; ISS, 2017).

O mesmo estudo aponta os ônibus elétricos como uma possível solução, já que essa tecnologia não emite poluentes nos locais de circulação. Os gastos com internações seriam reduzidos em R\$46,5 milhões se comparados o cenário de frota 100% elétrica com o cenário de frota a diesel (GREENPEACE; ISS, 2017). Alguns benefícios dos ônibus elétricos podem ser listados a seguir na Figura 29:

Figura 29 - Vantagens da eletrificação de ônibus

Elaborado pela autora - Fontes: (BLOOMBERG, 2018) (SISTRAN ENGENHARIA; ANTP, 2014) (GREENPEACE, 2016) (ICCT, 2017)

3.4. Os ônibus elétricos

A mobilidade elétrica não é uma novidade, sendo empregada no Brasil e no mundo desde o final do século XVIII, com o advento dos bondes elétricos. Mais tarde, com a predominância dos ônibus para o transporte coletivo, os trólebus representaram desde a década de 50 uma alternativa aos motores de combustão interna (ITDP, 2008).

O trólebus é um ônibus puramente elétrico alimentado por uma rede aérea de cabos. Embora os trólebus modernos possuam pequenas baterias para o caso de

necessidade de desconexão à rede, o tamanho reduzido da bateria (quando há) diminui o peso do veículo, aumenta sua capacidade e reduz os custos iniciais em relação aos ônibus elétricos dotados de bateria. Por outro lado, embora esses veículos tenham baixa flexibilidade de rotas, possuem operação ideal quando não compartilham a via com outros veículos, sendo ainda vantajosos para corredores de ônibus de até 7.500 passageiros por direção no horário de pico (SISTRAN ENGENHARIA; ANTP, 2014). Os Trólebus estão mais presentes na Europa e na Ásia, sendo a Rússia o país de maior frota, 12 mil veículos (LOBO, 2014).

Outra opção de tecnologia para ônibus elétricos é a híbrida elétrica (VEH), que utilizam um motor de combustão interna combinado a um motor-gerador elétrico, o que aumenta a eficiência na operação dos veículos.

Figura 30 - Exposição de trólebus antigo e novo ônibus elétrico em São Paulo

Fonte: diariodotransporte.com.br - Publicado em 23 de março de 2018

A partir dos ônibus híbridos, foi desenvolvido o ônibus híbrido plug-in (VEHP), que tem a possibilidade de recarga de baterias, além do abastecimento do tanque de combustível. Finalmente, com o desenvolvimento de baterias mais eficientes, densas e baratas, os ônibus elétricos à bateria (VEB) se tornaram uma tecnologia mais viável. Os VEB apresentam maior flexibilidade em relação ao trólebus, tanto em termos de rota quanto de recarga.

Cada tecnologia de ônibus elétrico possui suas particularidades, vantagens e desvantagens, ilustradas na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Tipos de ônibus elétricos

	Trólebus	VEB	VEH	VEHP
Emissões	Sem emissões locais		Média, menores que o veículo a diesel puro	
Motor	Elétrico		Elétrico + combustão interna	
Alimentação	Cabos aéreos	Recarga elétrica (vários tipos)	Abastecimento de combustível	Abastecimento ou recarga
Flexibilidade e Autonomia	Baixa, necessita de fiação aérea	Média, necessita de pontos de recarga	Alta	Alta
Custo inicial	Médio, mas o custo da fiação é alto	Alto, as baterias são caras	Médio	Médio
Custo de operação	Baixo-médio	Baixo	Alto	Médio

Elaborado pela autora - Fonte: (SISTRAN ENGENHARIA; ANTP, 2014); (BLOOMBERG, 2018)

A despeito da tecnologia empregada, os ônibus elétricos apresentam grandes vantagens energéticas em relação aos ônibus convencionais à diesel e outras tecnologias de combustão interna, conforme indicado na Figura 31 a seguir.

Figura 31 – Faixas de eficiência veicular para ônibus de diferentes tecnologias

Fonte: (ICCT, 2017)

3.5. Presença dos ônibus elétricos no mundo

Diversas cidades do mundo já possuem frotas de ônibus elétricos em operação, sendo a maior parte dos projetos em fase piloto para testes e futura expansão. O mapa a seguir (Figura 32) indica projetos de utilização de ônibus elétrico, já em fase de operação (em laranja) ou ainda em projeto piloto (em azul):

Figura 32 - Ônibus elétricos à bateria – projetos piloto e em operação

Fonte: (COOPER; LEFEVRE; LI, 2016)

O país pioneiro em operação de ônibus elétricos à bateria é a China, que busca não apenas uma solução para os níveis alarmantes de poluição do ar, como também o desenvolvimento da indústria nacional. A Figura 33 a seguir mostra a evolução das vendas de ônibus elétricos no país.

Figura 33 - China: Vendas de ônibus elétricos

Fonte: (BLOOMBERG, 2018)

No período de 2010 a 2020, o país asiático pretende produzir 1,67 milhões de veículos elétricos (incluindo ônibus) e gerar 1,2 milhões de empregos anualmente (ZEEUS, 2016). Cidades como Shanghai e Shenzhen já adquirem exclusivamente ônibus elétricos para a frota municipal.

Nota-se que em 2016 foram vendidos 116 mil ônibus puramente elétricos na China. Em 2017, essas vendas foram menores que o ano anterior devido à redução de subsídios, mas ainda responderam por mais de 22% dos ônibus vendidos no ano. Ônibus puramente elétricos correspondem a 17% da frota atual de ônibus na China.

O caso mais icônico entre as cidades chinesas é o de Shenzhen, que recentemente alcançou 100% de eletrificação da frota municipal. A cidade, de quase 12 milhões de habitantes, possui uma frota de 16.359 ônibus, e pode se comparar à cidade de São Paulo, que tem aproximadamente o mesmo número de habitantes e uma frota de 14.805 ônibus (ANTP, 2014b). Shenzhen é a sede da segunda maior fabricante de ônibus elétricos no mundo, a empresa BYD, uma das três fabricantes de ônibus elétricos presentes no Brasil.

O sucesso de Shenzhen se deve a uma combinação de fatores: Subsídios locais e nacionais no início da implantação; medidas de aluguel de baterias de ônibus ao invés de compra e de garantia vitalícia das baterias por parte do fabricante; otimização de recarga e criação de uma infraestrutura de recarga pública que pode ser utilizada por outros veículos²³ (ZHOU; XUE; LU, 2018).

Já na União Europeia, os ônibus elétricos (Trólebus, à bateria ou híbrido plug-in) estão presentes em 25 cidades, ainda que a frota total seja significativamente menor em comparação com a China. Conforme a Figura 34 a seguir, a frota elétrica corresponde a apenas 1,6% da frota de ônibus municipais da EU.

O tipo de tecnologia predominante nos países europeus (47%) é à bateria e com recarga na garagem nos horários fora de operação (ZEEUS, 2016). A cidade de Londres, por exemplo, possuía em 2015, 76 veículos em operação de 6 modelos diferentes, todos com recarga noturna e distância diária percorrida entre 150 e 250km (ZEEUS, 2016).

²³ Apesar da recarga dos ônibus ocorrer principalmente à noite nas garagens, pontos de recarga pública foram instalados para otimizar a operação da frota. A proporção de estações de recarga para ônibus é de 1 para 3.

Figura 34 - Ônibus elétricos à bateria (azul) e híbridos (roxo) na União Européia

Fonte: (BLOOMBERG, 2018)

Os Estados Unidos também possuem projetos de eletrificação, sendo 350 ônibus elétricos à bateria ou híbridos correspondentes a 0,5% da frota de ônibus municipais do país (BLOOMBERG, 2018).

As tecnologias elétricas mencionadas correspondem atualmente a 17% da frota de ônibus municipais no mundo, mas há perspectivas de crescimento significativo. Um estudo realizado pela empresa Bloomberg estima que a frota elétrica triplicará até 2025, o equivalente a 1,2 milhões de veículos ou 47% da frota total (BLOOMBERG, 2018). Impulsionadas especialmente pelas metas climáticas e de qualidade do ar, várias cidades já possuem planos de eletrificação da frota de ônibus. Em outubro de 2017, 13 cidades assinaram o acordo “C40 Fossil Fuel Free Streets Declaration”, que prevê a compra de apenas ônibus sem emissões locais a partir de 2025. Juntas, essas 13 cidades²⁴ somam 80 milhões de habitantes e uma frota de 60.000 ônibus. Entre os signatários, algumas cidades tem metas mais rígidas que o acordo, a exemplo de Paris, que pretende ter toda sua frota de ônibus já eletrificada até 2025

²⁴ Auckland, Barcelona, Cidade do Cabo, Copenhague, Londres, Los Angeles, Cidade do México, Milão, Paris, Quito, Roma, Seattle e Vancouver.

(BLOOMBERG, 2018). O gráfico a seguir indica as perspectivas de crescimento dos ônibus elétricos no mundo (Figura 35).

Figura 35 - Expectativa de crescimento da frota mundial de ônibus elétricos (em milhares de veículos)

Entre os maiores entraves para o crescimento dos ônibus elétricos no mundo estão os altos custos iniciais devido às baterias, que constituem a parte mais cara do ônibus, além de aumentarem consideravelmente o peso do veículo (BLOOMBERG, 2018). Algumas das soluções para esse problema são o aluguel das baterias, que reduz o investimento inicial, e a maior infra-estrutura de recarga, que torna possível reduzir a autonomia do veículo (BLOOMBERG, 2018). Estudos no Brasil e no exterior já indicam a viabilidade econômica dos ônibus elétricos, pois o investimento alto é compensado por menores custos de manutenção e de energia (BLOOMBERG, 2018; C40 CITIES; IDB, 2013; GREENPEACE, 2016).

3.6. Conexão à rede elétrica

A eletrificação de veículos é uma tendência mundial, e suas vantagens energéticas se dão não apenas pela eficiência dos motores elétricos em si, mas pela matriz elétrica mais limpa e diversificada em relação à matriz de combustíveis.. E no caso do Brasil, pela característica renovável e diversificada da matriz elétrica, como já visto no item 2.2.1, a transição para veículos conectados tende a ser mais sustentável e diversificada. A Figura 36 a seguir compara as matrizes atuais de transporte e elétrica em relação às suas fontes. Enquanto no setor de transportes há três fontes principais e apenas 18% de fontes renováveis, no sistema elétrico há 7 fontes diferentes, com 76% de participação de fontes renováveis:

Figura 36 - Matriz de transportes e Matriz elétrica no Brasil

Adaptado pela autora - Fonte: (IEA, 2016)

É importante ressaltar que, a depender da intensidade de carbono da matriz elétrica, o ônibus elétrico terá uma emissão de GEE diferente. Apesar dos ônibus elétricos não emitirem poluentes locais, considera-se para o cálculo de emissões globais a Análise do Ciclo de Vida, que levará em conta as emissões para a geração e distribuição da energia elétrica que carrega o ônibus. Um estudo do Conselho Internacional de Transportes Limpos (ICCT) compara diferentes cidades do mundo em relação à intensidade de carbono da matriz elétrica, conforme a Figura 37 a seguir:

Figura 37 - Matriz elétrica e intensidade de carbono de diferentes países

Fonte: (ICCT, 2017).

O estudo parte desses dados de matriz elétrica para comparar a emissão de GEE de ônibus elétricos em diferentes cidades e também a de outras alternativas tecnológicas, como os biocombustíveis. Quanto maior a intensidade de carbono da rede elétrica da cidade, dado demonstrado na Figura 37 anterior, maior foi a emissão de GEE dos ônibus elétricos, o que reduz a vantagem ambiental da adoção do ônibus elétrico. Conforme os resultados da Figura 38 a seguir, em quase todas as cidades analisadas os ônibus elétricos ainda apresentaram menor emissão de GEE que ônibus a diesel, porém essa diferença foi menor quanto maior a intensidade de carbono da eletricidade no local. Nota-se que a simulação de ônibus elétrico em São Paulo obteve o quarto resultado mais favorável, de baixas emissões globais, já que sua matriz elétrica estava entre as mais renováveis do estudo. Em outras localidades, a emissão do veículo elétrico foi maior do que o comparativo de outras tecnologias alternativas, como o biodiesel. Em Buenos Aires, por exemplo, um ônibus a biodiesel de gordura animal emitiria menos poluição global que um ônibus elétrico. E o caso

mais extremo foi Joanesburgo²⁵, onde até mesmo um ônibus a diesel (padrão Euro VI) emitiria menos gases de efeito estufa do que um veículo elétrico, devido ao alto nível poluidor das próprias plantas de geração de eletricidade.

Figura 38 – Emissão de GEE de ônibus, em velocidade média na zona urbana.

Fonte: (ICCT, 2017).

²⁵ A África do Sul tem quase a totalidade de sua eletricidade gerada por usinas a carvão. A intensidade de carbono calculada neste estudo foi de quase 1.000 g CO₂e/kWh, quase cinco vezes maior que a intensidade de carbono calculada para o Brasil.

4. Metodologia de Simulação e de Análise de Resultados

Considerando o cenário brasileiro, as externalidades e oportunidades expostas nos capítulos anteriores, propõe-se para o presente estudo a simulação de cenários de estímulo ao transporte por ônibus, aliados à eletrificação da frota. Desta forma, pretende-se aproveitar o potencial de economia de energia de duas ações estratégicas da Mobilidade Sustentável: a transição modal e a eletrificação de veículos. Para a realização das simulações, será adotado o *Global Transportation Roadmap model* (GTRM), criado e disponibilizado pelo Conselho Internacional de Transportes Limpos (ICCT), uma organização independente americana cujo objetivo é prover análise técnica e científica a reguladores ambientais.

Primeiramente, delimita-se o escopo das simulações. Conforme, citado no item 2, o foco do presente estudo são os transportes rodoviários de passageiros no Brasil, mais especificamente o transporte por ônibus elétricos. Entretanto, para critérios de comparações, serão também citados os deslocamentos utilizando ônibus a diesel e os deslocamentos de automóvel, que são os modais mais comuns no Brasil.

O período analisado, que é definido pelo GTRM, abrange os anos 2000 a 2050, em intervalos de 5 anos. A principal saída de interesse do modelo é o consumo de energia total, porém poderão ser feitas considerações a respeito de emissões de poluentes, demanda de eletricidade. Do consumo de energia total, poderão ser estabelecidas importantes medidas de eficiência energética do setor, a saber: a eficiência veicular (energia/veículo-km) e a eficiência do sistema (energia/passageiro-km). As projeções da atividade veicular e de passageiros são providas pelo ICCT.

A presente simulação se dará em quatro partes, cuja metodologia será detalhada e justificada nesse capítulo: 1) Simulação inicial do modelo GTRM com suas premissas padrão já indicadas pelo ICCT para obtenção do cenário base (Cenário EB0.MS0); 1) Definição de premissas de eletrificação da frota de ônibus; 2) Definição de premissas de transição modal sustentável; 3) combinação das premissas acima para gerar 3 cenários alternativos ao cenário base: o cenário de eletrificação de ônibus (EB71.MS0), o cenário de transição modal (EB0.MS35), e o cenário combinado de transição modal com a eletrificação de ônibus (EB71.MS35); e 4) introdução desses novos cenários no modelo GTRM para simulação e comparação com o caso base.

4.1. Premissas de eletrificação da frota de ônibus

Para o embasamento do cenário de eletrificação de ônibus, utiliza-se como parâmetros de comparação as grandes cidades pioneiras em eletrificação, como Shenzhen, bem como as diversas cidades que firmaram compromissos de eletrificação de frota, como já citado no item 3.5. Atualmente, observa-se que: 1) os compromissos de eletrificação são geralmente assumidos em nível municipal e não nacional; 2) as cidades mais ativas nas propostas de eletrificação são grandes metrópoles; e 3) a substituição deve acontecer de forma gradual e progressiva, na ocasião de renovação da frota. Diante dessas observações, adota-se um cronograma de eletrificação por cidade brasileira, em que as cidades maiores iniciam o processo de eletrificação.

Foi adotada a planilha de frota nacional de ônibus disponível no Sistema de Informação de Mobilidade Urbana (ANTP, 2016), que dispõe das frotas de ônibus municipais de cidades de mais de 500.000 habitantes. Essas cidades foram separadas em categorias, de acordo com o tamanho da frota, sendo que as cidades com as maiores frotas iniciam sua eletrificação mais cedo. Na categoria “a”, com quase 2 bilhões de passageiros por ano, está apenas a cidade de São Paulo, que já em 2025 deverá ter 10% de sua frota²⁶ de ônibus eletrificada. Na categoria b estão mais sete cidades brasileiras com mais de 300 milhões de passageiros por ano cada. Estas cidades²⁷ possuem juntas uma frota de 22.960 ônibus, cujo início de eletrificação será em 2030. As demais cidades enumeradas na planilha, que somam 19.429 ônibus, começarão a eletrificação em 2035. De acordo com dados da frota nacional da ANTP, há ainda 55.248 ônibus cujas cidades e características não constam na planilha, que terão um cronograma de eletrificação mais conservador, e começando apenas em 2040. Assim, somando essas diferentes frotas e suas proporções de eletrificação, obtém-se o percentual de ônibus elétricos na frota nacional.

²⁶ Frota de ônibus atual de São Paulo: 14.805.

²⁷ Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Recife, Salvador, Brasília, Fortaleza, Porto Alegre

4.2. Premissas de transição modal sustentável

Em complemento à eletrificação de ônibus, optou-se por incluir nas simulações a transição modal sustentável, pelos seguintes argumentos:

- Conforme visto no item 3, a aplicação das diretrizes de mobilidade sustentável é mais abrangente do que melhorias tecnológicas de veículos, posto que inclui a eficiência do sistema como um todo, com a transição modal sustentável, de modais menos eficientes para modais mais eficientes.
- No cenário base, sem intervenções sobre a participação modal, observa-se uma tendência de redução de viagens de ônibus no Brasil, que deve ser revertida para mitigação de externalidades dos transportes.
- A implantação de ônibus elétricos requer viabilidade financeira, que pode ser obtida através do aumento de passageiros e de arrecadação.
- Os investimentos em infraestrutura, em especial o BRT, têm alto potencial de aumentar a demanda de transportes coletivos.

O critério para as premissas de transição modal foi o levantamento de casos internacionais de transição modal, e a comparação dos índices de viagens em transporte público em diversas cidades e países do mundo, para a determinação de uma faixa aceitável desse índice no Brasil. Após isso, foi feita a simulação do GTRM em seu caso base, e a partir da comparação da participação modal de transportes coletivos de diferentes países na América Latina e do próprio Brasil nos últimos anos, propõe-se uma meta de transição modal para o Brasil até 2050.

A Tabela 9 a seguir indica alguns caso de transição modal para transporte público e bicicletas em diferentes cidades do mundo:

Tabela 9 - Exemplos de transição modal para transporte público e bicicletas

Transição Modal (%)	Copenhagen 1990-2005	Brisbane 1996-2006	Bogotá 1995-2009
Transporte Público	60	17	24
Automóveis	-50	-3	-20
Bicicletas	56		400

Elaborado pela autora - Fonte: (JAIN; TIWARI, 2016)

Além do aumento de 60% nos transportes públicos em Copenhagem e de 17% em Brisbane, destaca-se a cidade de Bogotá, que entre 1995 e 2009 reduziu as viagens de carro em 20% e aumentou as de transporte público em 24%. Bogotá é

uma importante referência pelas características da cidade similares a São Paulo em população e renda, e porque no período indicado acima foi implementado o sistema Transmilênio, um dos sistemas BRT pioneiros no mundo.

Outro exemplo é cidade de Curitiba, que após a implantação do BRT registrou um aumento médio anual de passageiros de 2,36% ao longo de quase duas décadas, enquanto no mesmo período a demanda por transportes públicos caía no Brasil (DALKMANN et al., 2014). Esses paradigmas sugerem que é possível atenuar ou reverter a tendência de redução de viagens de ônibus no Brasil, através de investimentos para a melhoria da qualidade do transporte público.

O levantamento Deloitte Mobility Index (DIXON et al., 2018), que compara métricas de qualidade de mobilidade em 18 cidades do mundo todo fornece algumas referências de percentual de viagens de transporte público (Tabela 10). Entre as cidades estudadas, Nova York, por exemplo, possui 38% de viagens motorizadas em transporte público.

Tabela 10 – Algumas das cidades do levantamento Deloitte Mobility Index

City	Area (km ²)	Population (hab)	Density (hab/km ²)	Individual Transport	Public Transport
Londres	1.569	8.787.892	5.601	56%	44%
Helsinki	791	1.456.619	1.841	57%	43%
Berlim	892	3.520.031	3.948	58%	42%
New York	8.935	18.954.000	2.121	63%	38%
Lisboa	3.015	2.886.662	957	65%	35%
Sydney	2.180	4.321.535	1.983	70%	30%
Toronto	5.906	5.928.040	1.004	75%	25%
Melbourne	2.705	4.485.211	1.658	82%	18%

Elaborado pela autora – Fonte: (DIXON et al., 2018)

Em relação a projeções futura, a OECD estima que os transportes coletivos de passageiros (ônibus e trens) respondem por 34% a 36% da atividade de passageiros no mundo entre 2015 e 2050 (ITF, 2017), como indicado na Figura 39 a seguir.

Figura 39 – Participação modal de transportes coletivos

Elaborado pela autora – Fonte: (ITF, 2017)

Os países OECD, que em 2015 possuem baixa participação de transportes coletivos, terão aumento de 6 pontos percentuais, enquanto os países fora da OECD terão uma redução de 4 pontos percentuais. Desta forma, pode-se dizer que há uma tendência de leve convergência para essa média mundial. O índice de participação modal da figura acima servirá para balizar uma meta de transição modal.

4.3. Global Transportation Roadmap model (GTRM)

Para a simulação dos dados, é utilizado o modelo GTRM, desenvolvido pelo Conselho Internacional em Transportes Limpos (ICCT). A escolha desse modelo justifica-se por diversos aspectos, incluindo:

- boa reputação científica do ICCT, cuja especialidade é estimativas de emissões;
- facilidade de manuseio do modelo, estando todos os cálculos visíveis nas planilhas eletrônicas;
- modelo aberto ao público e gratuito, que pode ser solicitado por e-mail à organização;
- modelo com premissas do caso base fornecidas pela organização, e com espaços para customizações de políticas de mobilidade sustentável

O detalhamento do modelo em sua integralidade não está no escopo do presente estudo, já que se trata de um modelo publicado, cujo manual é de acesso público.

Entretanto, serão resumidos nesse capítulo os cálculos relativos ao consumo energético. Adicionalmente, no Apêndice A encontram-se notas da autora sobre o modelo, incluindo um resumo da modelagem sócio-econômica e das curvas de sucateamento de veículos. Em complemento, o anexo A contém o manual da ferramenta, elaborado pelo ICCT, disponível em inglês. A abordagem mais importante em relação ao GTRM, porém, é o detalhamento de todas as customizações feitas pela autora de forma a obter a análise dos cenários alternativos.

O GTRM é uma ferramenta de suporte aos formuladores de políticas de transportes com vistas a: identificação de tendências; avaliação de impacto de diferentes alternativas; e formulação de planos de mitigação de emissões, tanto de gases de efeito estufa (GEE) quanto de poluentes atmosféricos locais (ICCT, 2012). Projetado em forma de planilhas do Microsoft Excel, o modelo possibilita uma estimativa de emissões transparente e customizável para uma ampla gama de cenários de políticas de transportes. E, apesar de ser um modelo focado em emissões, há diversos parâmetros de saída relacionados à energia, que serão utilizados para o presente estudo.

O GTRM estima mudanças na atividade de transporte por país e região com base em perspectivas de população, Produto Interno Bruto (PIB) e os preços dos combustíveis relativos. Essa atividade estimada por país é então dividida por modo de transporte utilizando premissas dinâmicas de percentual de participação de cada modal na matriz de transportes, sendo esses dados utilizados para calcular energia utilizada, emissões de poluentes locais e de GEE. Os resultados são exibidos numa aba de saída de dados, possibilitando comparações entre países, entre premissas diferentes e entre modais. A Tabela 11 a seguir ilustra o escopo do modelo que será útil neste estudo:

Tabela 11 - Escopo do GTRM e focos do presente estudo

Horizonte de tempo	De 2000 a 2050, em incrementos de 5 anos
Regiões geográficas	Diversos países e aglomerados. O escopo desse estudo se restringe ao Brasil.
Poluentes (Análise global WTW)²⁸	Gases de efeito estufa (GEE): CO ₂ , CH ₄ , e N ₂ O Poluentes locais: NO _x , MP10 e MP2.5, BC, CO, HC, SO ₂ e COVNM ²⁹
Modais de transporte	Veículo rodoviários de passageiros ³⁰ : LDV (veículos leves de passeio, incluindo SUVs), ônibus, Motocicletas, Triciclos ³¹
Combustíveis	Gasolina, Diesel (convencional e de baixo teor de enxofre), etanol, biodiesel, GNL, GNC, hidrogênio, eletricidade
Tecnologias veiculares	Rodoviários: convencional (MCI), híbrido, híbrido plug-in, elétrico a bateria e a célula combustível

Fonte: adaptada pela autora com base em (ICCT, 2012)

O modelo está disponível ao público no site do ICCT, já com as premissas de um cenário base calibrado e comparado com diversos outros modelos nacionais e internacionais (BURTON et al., 2013). Apesar da modelagem ser a mesma para todas as regiões e países, há parâmetros específicos, cujos dados serão buscados em fontes locais. Os referidos parâmetros dizem respeito a: venda anual de veículos, frota veicular em circulação, atividade de transporte (em veículo.km - vkm) e fator de carga (carga ou passageiros por veículo). No caso do Brasil, a fonte utilizada para obtenção destes dados foi o 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (IEMA, 2013).

O GTRM é construído para a comparação de dois cenários: o Caso Base e a trajetória. Segundo a própria documentação do modelo, “O caso base inclui todas as políticas adotadas, mandatórias e finalizadas, mas não assume melhorias além das já estabelecidas em termos de eficiência de veículos, penetração de veículos elétricos e biocombustíveis. Tendências em atividade por veículo e participação modal são mantidas com base em previsões de parâmetros sociodemográficos.” (ICCT, 2012)³².

²⁸ WTW (*Well-to-wheel*, do poço à roda) denota a análise de ciclo de vida completo, que pode ser dividida em duas etapas principais:

- *Upstream* ou *Well-to-tank*: Produção, processamento e distribuição do combustível/energia
- *Downstream* ou *Tank-to-wheel*: conversão em energia motriz pelo motor (combustão interna ou elétrico)

²⁹ (compostos orgânicos voláteis não-metânicos)

³⁰ O modelo apresenta ainda estudos relativos a transporte aéreo, marítimo, ferroviário e rodoviário de carga, que não serão abordados nesse estudo.

³¹ Apesar da existência das categorias triciclos, os cenários do ICCT não consideram esses modais nos cenários brasileiros, sendo a análise de nossos cenários focadas nos automóveis e ônibus.

³² Tradução livre

Costuma-se também chamar esse cenário de *Business as usual* (BAU), já que ele não contempla transições e rupturas significativas de mercado e sociedade.

Já o cenário de trajetória é disponibilizado pelo ICCT com os mesmos parâmetros do Caso Base, mas com o objetivo de permitir ao usuário a customização de cenários alternativos para avaliação comparativa de efeitos de novas políticas nas emissões do setor de transportes. Algumas das opções de customização incluem, entre outros: aumento de veículos elétricos, transição de parte dos passageiros de automóveis para modais mais sustentáveis, imposição de padrões mais rígidos de emissão veicular e aumento dos percentuais de biocombustíveis na gasolina e diesel. No presente trabalho, os cenários alternativos serão concentrados nos dois primeiros parâmetros, mais especificamente o aumento da frota de ônibus elétricos e a transição modal do automóvel para o ônibus.

Nos tópicos a seguir, será descrito o funcionamento do modelo, tendo como base as explicações do manual e da própria planilha, e com foco nos transportes rodoviários de passageiros.

4.3.1. Cálculo do consumo energético

No presente trabalho, o parâmetro mais importante calculado pelo modelo GTRM é o consumo energético (TTW³³), calculado em PJ. Devido à extensão do modelo, a abordagem será limitada ao detalhamento dos cálculos relativos à essa variável de saída. A Figura 40 a seguir fornece uma adaptação da metodologia GTRM para o escopo deste estudo. Nesta versão, apresenta-se como variável de saída o consumo energético, que é calculado para cada tipo de combustível e para cada tipo de veículo. Estão indicados também, além dos parâmetros de entrada do modelo, em azul claro, os parâmetros alterados para as simulações deste estudo, em verde: *Mode_share*, referente ao percentual das viagens realizadas em cada modal; e *vehicle_sales*, referente ao percentual de vendas de novos veículos de cada tecnologia/combustível. Nestes dois parâmetros, será possível simular a transição modal de automóveis para ônibus e a eletrificação de ônibus.

³³ *Tank-to-wheel*, como já mencionado, refere-se à abordagem do consumo de energia do próprio veículo, sem considerar a análise de ciclo de vida do combustível até chegar ao tanque do veículo.

Figura 40 - Metodologia GTRM simplificada

Adaptado pela autora - Fonte: (ICCT, 2012)

O primeiro parâmetro para o cálculo do consumo energético é a atividade de transportes total do país (**TotPassAct**), em passageiro-km. O GTRM possibilita estimar essa atividade de transportes a partir de dados socio-econômicos do país, conforme detalhado no Apêndice A. A atividade de transporte se refere à quantidade de viagens realizadas (passageiros) e suas distâncias percorridas (km). Foram adotadas as premissas sócio-econômicas padrão do modelo, com exceção dos ajustes de renda per capita, que foram atualizados.

A atividade de passageiros por tipo de veículo pode ser determinada pela adoção da premissa de matriz modal (**ModeShare**). A matriz modal adotada, no caso base, será também a padrão do modelo, feita a partir de dados históricos e da modelagem socio econômica para estimar os anos seguintes. Posteriormente, para a simulação do cenário alternativo, serão feitas modificações da matriz modal, aumentando o percentual de viagens de ônibus e reduzindo viagens de automóvel (transição modal).

A atividade de passageiros (**PassAct**) em pass-km, específica para cada modal (**m**) e por ano (**y**) pode ser obtida a partir dos parâmetros anteriores:

$$PassAct_{y,m} = TotPassAct * ModeShare_{y,m}$$

Já a atividade veicular por modal rodoviário de passageiros (**VehiAct**), dada em VKT (veículo-km), pode ser obtida através de premissas de taxa de ocupação média (**LoadFac**) de cada modal, sendo as taxas padrão do modelo³⁴: 20 pass/veículo para ônibus, 1,8 pass/veículo para automóveis; e 1,1 pass/veículo para motocicletas.

$$VehiAct_{y,m} = PassAct_{y,m} / LoadFac_m$$

Os modais rodoviários são divididos em oito tipos de tecnologia/ combustível, dos quais são considerados neste estudo³⁵: Gasolina (MCI), Diesel (MCI), elétrico, Gás Natural Veicular e Gás Liquefeito de Petróleo. A Tabela 12 a seguir indica as premissas padrão de percentual de atividade veicular por tipo (**TechShare**).

Tabela 12 – Premissas de tecnologia e mistura de combustíveis - Techshare

Automóveis	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gasolina	98%	91%	88%	90%	92%	92%	93%	93%	93%	93%	93%
Diesel	0%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
GNV	1%	3%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
GLP	1%	3%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Ônibus	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gasolina	20%	10%	5%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
Diesel	80%	90%	95%	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
Elétrico	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Motocicletas	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gasolina	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Elaborado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

As premissas acima são válidas para o caso base. Nas trajetórias a serem simuladas, os valores os percentuais de **Techshare** para ônibus serão alterados, de forma a inserir progressivamente ônibus elétricos e reduzir o percentual de ônibus a diesel.

³⁴ O cenários não prevêem diferentes taxas de ocupação ao longo dos anos.

³⁵ Outras categorias que não foram consideradas neste estudo: Gasolina (híbrido), Diesel (híbrido), Gasolina híbrido plug-in, Diesel híbrido plug-in, hidrogênio.

No caso dos veículos a “Gasolina” e “Diesel”, são ainda consideradas as misturas de biocombustíveis em cada um. A Tabela 13 a seguir ilustra as premissas de misturas de combustíveis na gasolina e no diesel (**FuelBlend**).

Tabela 13 - Proporções de combustíveis nos veículos tipo gasolina e diesel (FuelBlend)

Gasolina	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gasolina	61%	57%	49%	49%	49%	49%	49%	49%	49%	49%	49%
Etanol	40%	44%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%	52%
Diesel	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Diesel	100%	96%	67%	67%	38%	29%	19%	19%	19%	19%	19%
Diesel DBTE ³⁶	0%	4%	28%	29%	57%	67%	76%	76%	76%	76%	76%
Biodiesel	0%	0%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Elaborado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

Para o cálculo do consumo de energia (**Energy**), é necessário considerar, além dos parâmetros acima, a taxa de consumo médio por tecnologia/combustível (**FuelEco**), cujos valores gerados pelo modelo são indicados na Tabela 14:

Tabela 14 - FuelEco - Taxa de consumo (MJ/km) por tipo tecnologia

FLEET-AVERAGE FUEL ECONOMY											
Unit: MJ/km											
Parameter	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Conventional and hybrid gasoline	2,83	2,70	2,63	2,53	2,36	2,23	2,16	2,12	2,10	2,09	2,08
Plug-in hybrid gasoline	2,38	2,27	2,22	2,15	2,01	1,90	1,85	1,81	1,80	1,79	1,78
Conventional and hybrid diesel	2,32	2,22	2,16	2,07	1,95	1,87	1,86	1,89	1,96	2,01	2,04
Plug-in hybrid diesel	1,93	1,51	1,45	1,35	1,26	1,20	1,18	1,19	1,22	1,25	1,26
CNG	2,70	2,70	2,69	2,62	2,46	2,33	2,26	2,23	2,21	2,19	2,19
LPG	2,70	2,70	2,69	2,62	2,46	2,33	2,26	2,23	2,21	2,19	2,19
Fuel cell	1,50	1,50	1,35	1,11	0,96	0,88	0,84	0,81	0,80	0,80	0,79
Electric	0,80	0,80	0,74	0,63	0,56	0,52	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48

Adaptado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

É importante notar que no caso da variável **FuelEco**, os valores obtidos são válidos para a frota de cada ano, que corresponde à frota dos anos anteriores que não foi tirada de circulação somada à entrada de novos veículos, cuja eficiência é melhor do que a dos veículos antigos, o que explica o fato de que todos os tipos de veículo têm taxas de combustível progressivamente menores. Da mesma forma, a variável **Techshare** é definida por premissas de frota histórica e compra de novos veículos, o que altera o perfil da frota resultante ao longo do tempo. Ambas as variáveis são definidas pela modelagem de rotatividade de frota, conforme o item 0.

O consumo de energia por modal (**m**) e tecnologia (**t**) pode ser definido por:

³⁶ Diesel de Baixo Teor de Enxofre

$$\mathbf{Energy}_{y,m,t} = \mathbf{VehiAct}_{y,m} * \mathbf{TechShare}_{y,m,t} * \mathbf{FuelEco}_{y,t}$$

No caso dos tipos Diesel e Gasolina, deve-se considerar a taxa de combustível como a taxa da mistura desses combustíveis com biocombustíveis³⁷:

$$\mathbf{FuelEco}_{y,t} = \sum_f \mathbf{FuelEco}_{y,t,f} * \mathbf{FuelBlend}_{y,f}$$

³⁷ A taxa de combustível dos tipos Gasolina e Diesel refere à média ponderada das taxas de combustível de cada combustível (f) que compõe a mistura, seguindo as proporções da mistura (**FuelBlend**).

5. Resultados e Discussão

5.1. Premissas de eletrificação da frota de ônibus

Diante da metodologia do item 4.1 propõe-se um cronograma de eletrificação da frota de ônibus do Brasil que leva em consideração iniciativas locais para frota de ônibus públicos municipais, e que prevê diferenças de eletrificação de acordo com o tamanho da cidade. A proposta de eletrificação segue os critérios da Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Cronograma proposto de eletrificação de ônibus

Taxa de eletrificação de ônibus por tamanho das cidades							
Pass/ano	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
a) Mais de 1,5 bi	0%	10%	50%	80%	100%	100%	100%
b) Entre 300mi e 1,5bi	0%	0%	10%	50%	80%	100%	100%
c) Demais cidades	0%	0%	0%	10%	50%	80%	100%
d) Demais ônibus	0%	0%	0%	0%	5%	25%	40%

Fonte: Elaborado pela autora

A frota resultante é obtida através da aplicação da metodologia e utilizando o cronograma de eletrificação da Tabela 15, somandos as frotas das cidades brasileiras em diferentes cronogramas de eletrificação. Dessa forma, têm-se um percentual de ônibus elétricos, não por cidade, mas uma média ponderada para todo o país, conforme a Tabela 16.

% de Eletrificação da Frota de Ônibus Brasileira – Cenário EB71						
2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
0,0%	1,3%	8,6%	22,5%	40,7%	60,1%	71,2%

Elaborado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

De acordo com a modelagem de rotatividade de frota do GTRM, para atingir essa frota⁴⁰ resultante seria necessária a compra de novos ônibus elétricos⁴¹ para renovação da frota. O percentual de compra de ônibus elétricos em relação ao total de novos ônibus adquiridos é ilustrado pela Tabela 17 a seguir. Essa conversão foi necessária porque a entrada do modelo é a compra de veículos novos, e não a frota resultante, mas também se faz útil pois nos dá uma meta política mais palpável para que a frota resultante seja atingida.

⁴⁰ Foi utilizada a função atingir meta para chegar à frota de ônibus novos

⁴¹ A compra de novos veículos substitui apenas os veículos que saíram de uso no mesmo ano e que seriam repostos por ônibus mais a diesel mais novos. Dessa forma, a substituição da frota ocorre gradualmente sem retirar ônibus a diesel ainda em estado de uso.

Tabela 17 – Cronograma de compra de novos ônibus elétricos no Brasil

% de novos ônibus adquiridos por tecnologia – Cenário EB71							
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ônibus elétricos	0%	5%	26%	45%	70%	86%	77%
Outras tecnologias	100%	95%	74%	55%	30%	14%	23%

Elaborado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

5.2. Premissas de transição modal sustentável

Após o levantamento dos percentuais de viagens em transporte público em diferentes cidades e seguindo a metodologia proposta no item 4.2., simula-se o modelo GTRM em suas condições iniciais, abrangendo o Brasil e outros países da América Latina. A

As linhas escuras indicam os percentuais de viagem de ônibus no Brasil, sendo a linha pontilhada o caso base, em que há uma queda do percentual, e a linha escura dupla a trajetória (MS35), que se estabiliza 35% de atividade passageiros por ônibus. Nota-se que essa trajetória MS35 muita próxima à média global do modelo, e abaixo das curvas do México, da América Latina, mostrando-se portanto, uma trajetória plausível.

Figura 41 a seguir indica os percentuais de transporte público de acordo com o modelo GTRM em diferentes países e regiões, que foi utilizado para critérios de comparação.

As linhas escuras indicam os percentuais de viagem de ônibus no Brasil, sendo a linha pontilhada o caso base, em que há uma queda do percentual, e a linha escura dupla a trajetória (MS35), que se estabiliza 35% de atividade passageiros por ônibus. Nota-se que essa trajetória MS35 muita próxima à média global do modelo, e abaixo das curvas do México, da América Latina⁴², mostrando-se portanto, uma trajetória plausível.

⁴² Países da América Latina, exceto México e Brasil, que são analisados individualmente.

Figura 41 – Percentual de viagens de ônibus no Brasil e em outras regiões

A proposta do cenário de transição modal é a estabilização dos percentuais de viagens de ônibus de 2020 até 2050 em 35%. No cenário base, nota-se que o percentual de viagens de ônibus cai de 35% em 2010 para 24% em 2050. Entretanto, pelas comparações realizadas no item 4.2., entende-se que a meta de 35% é factível.

5.3. Cálculo do consumo energético pelo GTRM

Seguindo a metodologia proposta, utilizamos as premissas dos modelos, atualizando apenas algumas variáveis. O crescimento do PIB foi atualizado de forma a tornar o cenário mais conservador, conforme demonstrado na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18 – Projeção de Crescimento anual do PIB

2015-2020	2020-2035	2035-2050
1,50%	3,00%	2,67%

Elaborado pela autora – Fonte: (PWC, 2017)

A partir dessa premissa são atualizados os valores de atividade de transportes no Brasil, como mostrados a seguir (Figura 42):

Figura 42 - Atividade de passageiros no Brasil

Total Passenger Activity (billion pkm)

Elaborado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

No caso base, conforme a Figura 43 a seguir, nota-se o crescimento dos modais individuais, em especial o automóvel, em detrimento das viagens de ônibus, que passam de 48% em 2000 para 21% das viagens em 2050.

Figura 43 - Matriz modal - caso base

Passenger mode share (%)

Elaborado pela autora – Fonte:(ICCT, 2012)

A partir das premissas dos itens 5.1 e 5.2, de eletrificação da frota e de transição modal, traçam-se os seguintes cenários:

- MS0.EB0: Caso Base
- MS35.EB0: Trajetória com a transição modal, porém sem a eletrificação de ônibus
- MS0.EB71: Trajetória com a eletrificação de ônibus, porém sem a transição modal
- MS35.EB71: Trajetória com a eletrificação de ônibus e a transição modal.

5.4. Resultados de Consumo Energético

A Figura 44 a seguir ilustra os resultados de energia economizada pelos ônibus em relação ao caso base. Nota-se um aumento pronunciado do consumo de energia no cenário com transição modal e sem eletrificação.

Observam-se duas tendências: 1) a eletrificação de ônibus tende a reduzir o consumo de energia pela maior eficiência da tecnologia; 2) a transição modal tende a aumentar o consumo de energia por ônibus, devido ao aumento de passageiros e, consequentemente, da frota necessária. A princípio, analisando apenas os ônibus, nota-se que apenas o caso de eletrificação da frota sem transição modal (EB71.MS0) traz economia de energia, visto que o cenário combinado (EB71.MS35) fica muito próximo à curva do Caso Base. O cenário de transição modal sem eletrificação resulta num aumento significativo do consumo de energia por ônibus.

Ao se analisar o consumo conjunto de automóveis e ônibus (Figura 45), percebe-se que o aumento das atividades de ônibus é superado pela forte redução do consumo dos carros, produzindo a economia de energia esperada, sendo o cenário de maior economia de energia o de combinação das duas estratégias:

Figura 45 – Economia de energia em relação ao caso base: ônibus e automóveis

É válido notar também que, com as premissas estipuladas, o cenário de transição modal somente (EB0.MS35) acaba por trazer maior economia de energia que o cenário de eletrificação de ônibus somente (EB71.MS0).

5.5. Resultados de Eficiência energética

Conforme visto no item 3.1, a eficiência energética para sistemas de transportes pode ser medida não apenas em termos de energia por km rodado (eficiência dos veículos), como também em termos de energia por atividade de passageiros (eficiência do deslocamento). O gráfico a seguir (Figura 46) ilustra a eficiência dos deslocamentos obtida na simulação. Nota-se que a eficiência dos automóveis sofre uma leve melhora ao longo dos anos, devido à renovação da frota⁴⁴, chegando a 1,2 MJ/pass-km em 2050. Já em relação aos ônibus, a eficiência de viagem sofre uma significativa melhoria nos cenários de eletrificação da frota (EB71), chegando a 0,4 MJ/pass-km. Como a taxa de ocupação dos veículos não foi alterada, as melhorias se devem à evolução tecnológica e ao melhor desempenho dos motores elétricos. Comparando os valores obtidos com as Figura 24 e Figura 25 do item 3.1, nota-se que os resultados estão compatíveis com a literatura.

⁴⁴ O GTRM prevê diferentes níveis de eficiência veicular a depender do ano de compra do veículo.

Figura 46 – Eficiência de viagens por tipo de veículo

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Outra métrica importante, além da eficiência de cada tipo de veículo separadamente, é a eficiência de viagens do sistema como um todo, considerando viagens de ônibus e de automóvel e ponderando suas eficiências individuais com a participação modal (Figura 47).

Figura 47 – Eficiência de viagens do sistema (ônibus e automóveis)

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Com esta métrica, é possível captar, além dos efeitos da eletrificação de ônibus, o aumento da eficiência do sistema devido à transição modal para um veículo de maior eficiência. Novamente, a trajetória combinada é o cenário de melhor eficiência em relação ao caso base.

5.6. Resultados de Demanda de Eletricidade

Conforme a Figura 48 a seguir, a projeção combinada de transição modal e eletrificação de ônibus é o cenário de maior demanda de eletricidade:

Figura 48 – Demanda anual de eletricidade (Ônibus elétricos)

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Essa diferença se deve ao fato de que no cenário combinado a frota de ônibus tende a aumentar, acompanhando o aumento da demanda por ônibus. Com isso, o percentual da frota elétrica representará um número de veículos maior, bem como de quilômetros rodados. A demanda de eletricidade pode chegar a pouco mais de 67TWh (242PJ) em 2050, no caso combinado. No cenário de eletrificação sem transição modal, a demanda de energia elétrica cai para pouco mais de 46TWh (166PJ) em 2050.

5.7. Impactos ambientais observados

Além dos impactos energéticos, relativos ao consumo energético, o aumento da eficiência e a demanda de energia elétrica, é possível observar alguns impactos ambientais significativos, a saber: possível redução de congestionamentos, alterações nas emissões de material particulado e de gases de efeito estufa. Ainda que o foco da pesquisa seja a questão energética, esses impactos serão abordados brevemente nesse capítulo. Ressalta-se que as análises foram feitas sem a intenção de aprofundamento no tema ambiental, e baseando-se inteiramente nas premissas do modelo GTRM, cuja metodologia pode ser consultada no Apêndice A.

O gráfico (Figura 49) a seguir ilustra a redução de veículo-km (VKT) anual observada nos cenários de transição modal. O decremento dos cenários MS35 em relação aos cenários MS0 chega a 14% em 2050, sendo a redução acumulada entre 2020 e 2050 de 8%. Essa redução, além de explicar a economia de energia nos cenários de transição modal, também sugere a redução de congestionamentos, já que há menos veículos em circulação.

Figura 49 - Transição modal e veículo-km (VKT)

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Por outro lado, a transição modal sem eletrificação de ônibus (EB0.MS35) pode vir a aumentar a emissão de material particulado e fuligem⁴⁵. A Figura 50 a seguir indica que a emissão de Material Particulado aumenta no caso EB0.MS35, em que a frota de ônibus aumenta sem a devida atualização tecnológica. Já nos casos de eletrificação de ônibus, há uma significativa redução desse poluente local.

⁴⁵ Os demais poluentes locais analisados pelo modelo apresentaram reduções de emissão em todas as trajetórias simuladas, inclusive no cenário EB0.MS35.

Figura 50 – Redução de emissão (TTW) de PM2,5 em relação ao caso base

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Finalmente, o gráfico a seguir (Figura 51) ilustra a redução de emissões de Monóxido de Carbono para cada cenário.

Figura 51 – Redução de emissão (WTW) de CO2 em relação ao caso base

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Entre as trajetórias não-combinadas (EB0.MS35 e EB71.MS0), observa-se que a eletrificação de ônibus causa reduções mais significativas dos que a transição modal, ao contrário dos resultados de energia, em que na maior parte das simulações a transição modal EB0.MS35 se mostrou mais eficiente que a eletrificação de ônibus EB71.MS0. Finalmente, a trajetória combinada apresenta os melhores resultados de redução de CO2, conforme se esperava.

5.8. Análise de sensibilidade

As premissas de eletrificação de ônibus e de transição modal são especulativas, não havendo garantias de atingimento dessas premissas. Visando analisar os impactos de atingimentos parciais dessas hipóteses, foi realizada uma análise de sensibilidade, para verificar os resultados de economia de energia em caso de atingimento parcial das metas de eletrificação e transição modal. Foram estipulados os percentuais de atingimento das metas de eletrificação EB71 e de transição modal MS35. A análise de sensibilidade compara a economia de energia em relação ao caso base, somando os consumos de ônibus e automóveis dos anos de 2020 a 2050.

Os resultados (Tabela 19) nos permitem afirmar que: 1) a combinação das duas estratégias é benéfica; e 2) em casos de cumprimentos parciais das premissas estipuladas, obtém-se ainda um ganho em termos de eficiência energética.

Tabela 19 – Análise de Sensibilidade – Economia de energia 2020-2050 (ônibus e carros)
cumprimento do cenário MS35

		0%	25%	50%	75%	100%	125%	150%
cumprimento do cenário EB71	0%	0,0%	1,0%	2,0%	3,0%	4,0%	5,0%	6,0%
	25%	0,7%	1,7%	2,8%	3,8%	4,9%	5,9%	7,0%
	50%	1,3%	2,4%	3,6%	4,7%	5,8%	6,9%	8,0%
	75%	2,0%	3,2%	4,4%	5,5%	6,7%	7,9%	9,1%
	100%	2,7%	3,9%	5,1%	6,4%	7,6%	8,9%	10,1%
	125%	3,3%	4,6%	5,9%	7,2%	8,5%	9,8%	11,1%
	150%	4,0%	5,3%	6,7%	8,1%	9,4%	10,8%	12,2%

Elaborado pela autora – Fonte: Modelo GTRM

Observa-se um aumento da economia de energia ao longo de 2020 a 2050 proporcionalmente ao percentual de cumprimento dos cenários de eletrificação de ônibus e de transição modal propostos neste trabalho. Enquanto o cenário combinado (EB71.MS35) gera uma economia de energia de 7,6%, o cumprimento de 50% desse cenário combinado geraria ainda uma economia de 3,6%. E como esperado, a cumprimento de 150% do cenário combinado traria uma economia de energia ainda maior, de 12,2%.

Em relação aos cenários não-combinados, os resultados com apenas a eletrificação ou apenas a transição modal, apresentam alguma economia de energia em si, embora menos expressivos que a economia dos cenários combinados. Enquanto o cenário EB71.MS35 atinge 7,6% de economia de energia, apenas a eletrificação (EB71.MS0) atinge 4% de economia e a transição modal, 2,7%. Observa-

se também que o cenário proposto de transição modal é mais conservador do que o cenário proposto de eletrificação de ônibus, no que se refere à contribuição de cada fator para a economia de energia. Naturalmente, seria possível calibrar as premissas para que as metas de eletrificação e de transição modal contribuíssem igualmente para a economia de energia.

6. Conclusões

Acredita-se que o presente trabalho tenha cumprido seus objetivos geral e específicos. Foi possível, através da aplicação da metodologia proposta, analisar cenários de eletrificação de ônibus e transporte público sob a perspectiva energética.

Um dos resultados que chamou atenção nas simulações, foi a confirmação de que as duas estratégias, quando combinadas, apresentam um economia de energia otimizada. Pode se dizer que são complementares, não apenas do ponto de vista da eficiência energética: a transição modal reverte a queda de passageiros e aumenta a viabilidade de projetos de eletrificação de ônibus; por outro lado, a eletrificação constitui uma saída para mitigar as externalidades dos transportes por ônibus, especialmente a respeito de poluição, dando suporte à transição modal.

Tanto o modelo utilizado quanto as premissas de entrada possuem limitações quanto à análise. A maior delas é o caráter incerto das premissas, em especial quanto às perspectivas de eletrificação de ônibus. Por se tratar de uma tendência relativamente recente, vários países estão em fase de projetos piloto, mas pouco se sabe sobre a consolidação da tecnologia e penetração do mercado para os próximos anos.

Quanto ao modelo GTRM, por ser uma ferramenta de análise ampla do setor de transportes no mundo, muitas são as funcionalidades a serem exploradas em próximos trabalhos, já que há diversas opções de simulações de políticas públicas. No âmbito do conceito evitar-mudar-melhorar não foi abordada, por exemplo, nenhuma medida de eficiência do sistema (evitar), sendo as medidas propostas apenas para eficiências de viagens e de veículos. Adicionalmente, diversas variáveis intermediárias também podem ser estudadas e refinada, a exemplo de misturas de combustíveis e taxas de ocupação. E finalmente, alguns dados podem ter sofridos alterações significativas desde a publicação do modelo e suas premissas, em 2012.

A utilização do modelo GTRM foi melhor detalhada e analisada nas questões energéticas, mas é importante ressaltar que o modelo não se limita a isso, tendo como seus cálculos finais as metodologias de emissões de poluentes locais e globais, que levam em consideração diversas variáveis pouco exploradas, inclusive a intensidade de carbono da rede elétrica, que altera os resultados de emissões globais WTW.

A respeito dos ônibus elétricos, sugerem-se como novas fronteiras de investigação o estudo de impacto na rede elétrica, tanto para fins de planejamento de

expansão do sistema, quanto para a análise local das melhores configurações de sistema de recargas.

Finalmente, uma característica marcante do presente trabalho foi a interdisciplinaridade dos temas. Diversos conceitos de mobilidade e de energia foram absorvidos e relacionados entre si, e espera-se que esta publicação sirva de incentivo à continuidade das pesquisas de mobilidade e energia, não apenas a engenheiros eletricitas, como a engenheiros de tráfego, urbanistas, engenheiros ambientais e demais profissionais envolvidos.

7. Referências bibliográficas

ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Geral 2014**. São Paulo: ANTP, 2014a. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--geral_2014.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2017.

ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana**. Disponível em: <<http://antp.org.br/sistema-de-informacoes-da-mobilidade/apresentacao.html>>. Acesso em: 20 abr. 2017b.

ANTP. **Simulador de Impactos Ambientais**. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/simulador/impactos-ambientais/>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

ARIOLI, M. **A estratégia inicial do Brasil na área de transportes para colocar em prática o Acordo de Paris**. Disponível em: <<http://wricidades.org/noticia/estrategia-inicial-do-brasil-na-area-de-transportes-para-colocar-em-pratica-o-acordo-de>>. Acesso em: 1 mar. 2017.

BERRONE, P.; COSTA, J. E. R.; T-FIGUERAS, I. D. **Cities and Mobility & Transportation**. 1. ed. Barcelona: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.

BLOOMBERG. **Electric Buses in Cities: Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂**. New York: Bloomberg, 2018. Disponível em: <https://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other_uploads/images/1726_BNEF_C40_Electric_buses_in_cities_FINAL_APPROVED_%282%29.original.pdf?1523363881>. Acesso em: 11 abr. 2018.

BP. **Brazil's energy market in 2015 Statistical Review**. Londres: British Petroleum, 2016. Disponível em: <bp.com/statisticalreview>. Acesso em: 7 mar. 2017.

BP. **Energy charting tool**. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-charting-tool-desktop.html>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

BURTON, A. et al. **Global Transportation Roadmap Model Comparative Analysis of Activity and Emissions**. São Francisco: ICCT, 2013. Disponível em: <<http://www.theicct.org/info/assets/RoadmapV1/ComparativeAnalysis2013.pdf>>. Acesso em: 1 jun. 2017.

C40 CITIES; IDB. **Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleet**. Washington: IDB, 2013. Disponível em: <http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/researches/images/12_HEBTP_20Report_20April_2020_13_portuguese.original.pdf?1388095778>. Acesso em: 31 mar. 2017.

COOPER, E. M.; LEFEVRE, B.; LI, X. **Can Transport deliver GHG reductions at scale? An Analysis of Global Transport Initiatives**. Washington: WRI, 2016. Disponível em: <http://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/Can_Transport_Deliver_GHG_Reductions_at_Scale.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2018.

DALKMANN, H. et al. **Urban Transport and Climate Change: Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities**. Eschborn: GIZ, 2014. Disponível em:

<http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB5_Environment_and_Health/GIZ_SUTP_SB5e_Transport-and-Climate-Change_EN.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2018.

DIXON, S. et al. **The Deloitte City Mobility Index**. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/future-of-mobility/deloitte-urban-mobility-index-for-cities.html>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

EPE. **NOTA TÉCNICA DEA 13/15 - Estudos de Demanda de Energia 2050**: 2015. Brasília: EPE, 2015. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA_13-15_Demanda_de_Energia_2050.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2017.

EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2016**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2017.

EURIST. **Achieving sustainability in urban transport in developing and transition countries**. Disponível em: <<http://www.uba.de/uba-info-medien-e/4239.html>> along>. Acesso em: 6 fev. 2017.

FERREIRA, A. L. et al. **Emissões dos Setores de Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos**. São Paulo: IEMA, 2017. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2017/09/Relatorios-Seeg-2017-Energia-final.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2017.

GEA. **Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future** (T. B. Johansson et al., Eds.). Laxenburg: Cambridge University Press, 2012.

GIZ. **Urban Transport and Energy Efficiency**. Bonn: GIZ, 2012. Disponível em: <http://www2.giz.de/wbf/4tDx9kw63gma/SUT_module5h.pdf>. Acesso em: 3 maio. 2017.

GOMEZ-IBANEZ, J.; GLAESER, E. **Trains vs. Buses: The Rise of Bus Rapid Transit** HarvardX: Urban101x, , 2018. Disponível em: <<https://courses.edx.org/courses/course-v1:HarvardX+Urban101x+1T2018>>. Acesso em: 29 mar. 2018

GOODALL, W. et al. **The rise of mobility as a service - Reshaping how urbanites get around**. London: Deloitte, out. 2017. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/consumer-business/deloitte-nl-cb-ths-rise-of-mobility-as-a-service.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

GREENPEACE. **DOSSIÊ ÔNIBUS LIMPO - Benefícios de uma transição para combustíveis renováveis na frota de São Paulo**. São Paulo: Greenpeace, 2016. Disponível em: <<http://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/dossie-onibus-limpo-do-greenpeace.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2016.

GREENPEACE; DATAFOLHA. **Pesquisa Mobilidade Urbana**. São Paulo: Datafolha, 2016. Disponível em: <<http://www.mobilize.org.br>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

GREENPEACE; ISS. **Avaliação e Valoração dos Impactos da Poluição do Ar na Saúde da População Decorrente da Substituição da Matriz Energética do Transporte Público na Cidade de São Paulo**. São Paulo: ISS, 2017. Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/hubfs/Campanhas/mobilidade/documentos/GP_ISS_Relatorio_ImpactosOnibusSP.pdf>. Acesso em: 3 out. 2017.

IBGE. **Séries Estatísticas**. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

ICCT. **Global Transportation Roadmap Model**. Disponível em: <[http://www.theicct.org/info/assets/RoadmapV1/ICCT Roadmap Model Version 1-0 Documentation.pdf](http://www.theicct.org/info/assets/RoadmapV1/ICCT_Roadmap_Model_Version_1-0_Documentation.pdf)>. Acesso em: 8 maio. 2017.

ICCT. **Policies to reduce fuel consumption, air pollution, and carbon emissions from vehicles in G20 nations**. Washington: ICCT, 2015.

ICCT. **Low-carbon technology pathways for soot-free urban bus fleets in 20 megacities**: 2017. Washington: ICCT, 2017. Disponível em: <https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Low-carbon-tech-pathways-soot-free-buses-megacities_ICCT-working-paper_31082017_vF.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2018.

IEA. **Transport, Energy and CO2 - Moving Toward Sustainability**. Paris: IEA, 2009. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2016.

IEA. **Energy Balance**. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em: 11 fev. 2017a.

IEA. **Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics**. Paris: OECD/IEA, 2014b. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_EnergyEfficiencyIndicatorsFundamentalsonStatistics.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2018.

IEA. **Energy Statistics**. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

IEMA. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013**. Brasília: IEMA, 2013. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/Emissoes-Atmosfericas-1Inventariodeemissoes.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

IRENA. **THE RENEWABLE ROUTE TO SUSTAINABLE TRANSPORT**. Abu Dhabi: IRENA, 2016. Disponível em: <<http://www.irena.org>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

ITDP. **Os trólebus na Cidade de São Paulo: Uma Análise Preliminar**. São Paulo: ITDP, 2008. Disponível em: <<http://www.itdp.org/documents/trolebus-saopaulo.pdf>>.

Acesso em: 25 abr. 2017.

ITDP. **ANÁLISE DE IMPACTO DO BRT transcarioca NA MOBILIDADE URBANA DO RIO DE JANEIRO**. Rio de Janeiro: ITDP, 2015. Disponível em: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2015/04/ITDP-Brasil_Análise-Impacto-BRT-TransCarioca_em-PT_versão-WEB-para-site.pdf>. Acesso em: 3 maio. 2017.

ITDP. **Desafios e oportunidades para a expansão do transporte de média e alta capacidade no Brasil**. Rio de Janeiro: ITDP, 2016. Disponível em: <<http://itdpbrasil.org.br/transportenobrasil/>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

ITF. **Transport Outlook 2017**. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2017_9789282108000-en>. Acesso em: 7 fev. 2017.

JAIN, D.; TIWARI, G. How the present would have looked like? Impact of non-motorized transport and public transport infrastructure on travel behavior, energy consumption and CO₂ emissions – Delhi, Pune and Patna. **Sustainable Cities and Society**, v. 22, p. 1–10, 2016.

KENWORTHY, J. R. Energy Use and CO₂ Production in the Urban Passenger Transport Systems of 84 International Cities: Findings and Policy Implications. **Urban Energy Transition**, p. 211–236, 1 jan. 2008.

LOBO, R. **As 10 maiores redes de trólebus do mundo – Via Trolebus**. Disponível em: <<http://viatrolebus.com.br/2014/08/as-10-maiores-redes-de-trolebus-do-mundo/>>. Acesso em: 6 nov. 2017.

MME. **Documento-base da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil ao Acordo de Paris**. Brasília: MME, 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/ndc/NDCDocBase.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2017.

MOBILIZE BRASIL. **Portal de Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.mobilize.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

NTU. **Pesquisa Mobilidade da População Urbana**. Brasília: NTU, 2017. Disponível em: <<http://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub636397002002520031.pdf>>. Acesso em: 3 out. 2017.

PWC. **The Long View - How will the global economic order change by 2050?** Londres: PWC, 2017. Disponível em: <www.pwc.com>. Acesso em: 3 jul. 2018.

SANTOS, R. et al. **Demanda por investimentos em mobilidade urbana no Brasil BNDES Setorial: Mobilidade Urbana**. Brasília: BNDES, 2015.

SIMU; ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana - Relatório Comparativo 2003-2014**. São Paulo: ANTP, 2014. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--comparativo-2003_2014.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2017.

SIMU; ANTP. **Relatório Geral 2014**. São Paulo: ANTP, 2016. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--geral_2014.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2017.

SISTEMA FIRJAN. **O custo dos deslocamentos nas principais áreas urbanas do Brasil**. Brasília: Firjan, 2015.

SISTRAN ENGENHARIA; ANTP. **Estudo Comparativo de Tecnologias Veiculares de Tração Aplicáveis a Ônibus Urbanos**. São Paulo: EMTU, 2014. Disponível em: <[http://www.emtu.sp.gov.br/ftp/Caderno Tecnico - Vol 15.pdf](http://www.emtu.sp.gov.br/ftp/Caderno_Tecnico_-_Vol_15.pdf)>. Acesso em: 3 maio. 2017.

TOMTOM. **TomTom Traffic Index**. Disponível em: <http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/>. Acesso em: 1 maio. 2017.

UITP. **MOBILITY IN CITIES DATABASE**. Bruxelas: UITP, 2015. Disponível em: <http://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/MCD_2015_synthesis_web_0.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2017.

UN-HABITAT. **Planning and Design for Sustainable Urban MobilityGlobal Report on Human Settlements 2013**. New York: United Nations, 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84930881850&partnerID=tZOtx3y1>>.

UNEP. **Sustainable, Resource Efficient Cities – Making it Happen!** New York: UNEP, 2012.

UNITED NATIONS. **2014 World Urbanization Prospects**. New York: United Nations, 2014. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

WBCSD. **Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability**. Geneva: WBCSD, 2004.

WBCSD. **Methodology and indicator calculation method for Sustainable Urban Mobility**. London: WBCSD, 2014.

WBCSD. **Integrated sustainable mobility in cities - a practical guide**. Geneva: WBCSD, 2016.

WRI BRASIL. **Manual de desenvolvimento urbano orientado ao transporte sustentável**. Porto Alegre: WRI, 2015. Disponível em: <<http://embarqbrasil.org/nosso-trabalho/publicacoes>>.

ZEEUS. **eBus Report: An overview of electric buses in Europe**. Brussels: ZeEUS, 2016. Disponível em: <<http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-internet.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2017.

ZHOU, W.; XUE, L.; LU, L. **How Did Shenzhen, China Build World's Largest Electric Bus Fleet?** Disponível em: <<http://www.wri.org/blog/2018/04/how-did-shenzhen-china-build-world-s-largest-electric-bus-fleet>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

APÊNDICE A – Detalhamento do Modelo GTRM

Cálculos relativos ao transporte rodoviário

Figura 52 - Metodologia GTRM

Fonte: Documentação do modelo e guia de usuário (ICCT, 2012)

A Figura 52 anterior ilustra a metodologia de cálculo das emissões do transporte rodoviário. São coletados pelo ICCT e inseridos no cenário séries históricas (anos 2000 a 2010) de atividade de transportes (em pass-km no caso de transporte de passageiros) assim como séries históricas de participação modal (percentual de cada modal no total de atividade de transportes). Projeções de atividade de transporte e participação modal são então estimadas com base em indicadores socio-econômicos: população, PIB e preços de combustíveis, através do modelo socio-econômico, que será melhor explicado a seguir.

A partir do cálculo de atividade de transportes (pkm) de cada modal e de premissas de taxa de ocupação dos modais (pass/veículo), chega-se à atividade veicular (VKT: veículo-km). E dada a média de quilometragem anual percorrida por veículo (km/veículo), chega-se ao inventário de veículos em circulação. Dessa frota final, calculam-se as vendas anuais, a partir de frota anterior e de um cálculo de rotatividade de frota que considera idades médias de duração de veículos por país/região e por modal. O modelo de rotatividade da frota também será melhor explicado a seguir e é importante pois, no caso de alterações regulatórias para vendas de novos veículos, a frota total de veículos será alterada aos poucos, à medida que esses novos veículos entram e veículos antigos são retirados.

Nesse ponto da simulação, já se sabe a atividade veicular de cada modal, e a idade da frota. São combinados a esses dados os levantamentos de tipos de combustível utilizado, proporção de cada tecnologia veicular e eficiências energéticas para cada tipo, dados esses processados por um algoritmo de renovação da frota. A partir daí, é possível calcular os consumos energéticos por veículo e combustível. Essas medidas energéticas, além de serem uma saída do modelo em si, são também utilizadas para o cálculo das emissões de poluentes locais e globais. No caso de poluentes que não o CO₂, o cálculo das emissões também leva em conta os padrões de emissão veicular estabelecidos no país e os anos de início da vigência, que contém os limites de emissão de cada poluente (em g/km).

Modelagem sócio-econômica

O objetivo do modelo sócio-econômico é estimar atividades de transporte e participações modais, dados que raramente estão disponíveis com a facilidade e acurácia necessárias, através de parâmetros sócio-econômicos, que são mais disponíveis e atualizados para incorporação ao modelo.

As previsões começam com a incorporação da atividade de transportes histórica de 2000, 2005 e 2010, pois a previsão é na realidade um ajuste dos anos subsequentes a partir de taxas de mudança inferidas do modelo. As elasticidades (alteração da atividade de transportes relacionada a alterações dos parâmetros sócio-econômicos), são calculadas a partir de análise estatística de um banco de dados. Trata-se de um banco de dados global com séries históricas nacionais de parâmetros de transportes (ex.: frotas de veículos), dados sócios-econômicos (ex.: população,

PIB) e geográficos (ex.: extensão de território) que foi desenvolvidos a partir de dados do governo americano, do Fundo Monetário Internacional (IMF) e do Federação Internacional Rodoviária (IRF). Vários desses parâmetros foram submetidos a regressões estatísticas e testados. Optou-se por três parâmetros sócio-econômicos (PIB com base em paridade de poder de compra, população e preço de combustível) e um modelo de regressão não-linear (Função de Gompertz, que apresenta curva em S). As figuras 53 e 54 a seguir indicam as funções resultantes do modelo:

Figura 53 - Modelo Sócio-econômico: Função da atividade de transportes

Fonte: (ICCT, 2012)

Figura 54 - Modelo Sócio-econômico: Função de participação modal

Fonte: (ICCT, 2012)

Modelagem de rotatividade da frota

O modelo de rotatividade estima a renovação da frota, calculando as vendas de veículos e a atividade veicular por faixa de idade do veículo, o que é importante para determinar a mudança da frota total a partir de mudanças nas vendas de veículos (ex.: mudanças nos padrões de emissão veicular, entrada de veículos elétricos). O modelo se caracteriza por uma curva de distribuição ajustada pelos parâmetros g , b e T , onde g é a idade em que veículos começam a ser retirados da frota, b é a inclinação da curva de distribuição e T é tempo de serviço característico do veículo. Os parâmetros de vida útil da frota de automóveis e ônibus no Brasil são indicados na Tabela 20 e na Figura 55 a seguir.

Tabela 20 – Parâmetros da curva de sobrevivência de veículos no Brasil

	b	T	G	Idade média
Automóveis	3,0	20,0	0,0	18,4 anos
Ônibus	3,5	23,4	3,0	24,4 anos

Elaborado pela autora - Fonte: (ICCT, 2012)

Figura 55 - Curva de sobrevida de veículos no Brasil

Fonte: (ICCT, 2012)

ANEXO A – Documentação do Modelo e Guia de Usuário do GTRM

Global Transportation Roadmap

Model Documentation and User Guide

ICCT Roadmap Model Version 1-0

December 2012

The International Council on Clean Transportation is an independent nonprofit organization founded to provide high-quality research and analysis to governments in the world's largest vehicle markets. Our mission is to improve the environmental performance and energy efficiency of road, marine, and air transportation in order to benefit public health and mitigate climate change. For more information on our Global Roadmap, please visit www.theicct.org/transportation-roadmap.

SUMMARY

The ICCT's Global Transportation Roadmap model is a tool to help policymakers worldwide to identify and understand trends in the transportation sector, assess emission impacts of different policy options, and frame plans to effectively reduce emissions of both greenhouse gases (GHGs) and local air pollutants. It is designed to allow transparent, customizable estimation of transportation emissions for a broad range of policy cases.

The Roadmap model estimates changes in actual transportation activity by country and region based on changes in forecasts of population, Gross Domestic Product (GDP), and relative fuel prices. Country estimates of future transportation activity are then split by mode using dynamic mode share assumptions to calculate GHG and local air pollutant emissions. Results are summarized on an output tab, which enables comparisons between cases, modes, and countries, and a country dashboard tab, which tabulates numerous estimates for any selected country/region.

This document describes the scope, structure, and functionality of the Roadmap model, which is a spreadsheet tool developed in Microsoft Excel. The report begins with an introduction to the model scope and structure, which is designed to equip the user to modify policy parameters, customize model outputs, and interpret results appropriately. The report continues with a documentation of the seven major modules that make up the spreadsheet tool. This second section is designed to allow interested users to better understand the model inputs, calculations, assumptions, and data sources.

Throughout the documentation, the following symbols are used to denote warnings, tips, and calculations.

Warning.

Tip.

Calculation.

TABLE OF CONTENTS

1. MODEL SCOPE AND STRUCTURE	3
2. OUTPUT TABS	6
2.a. OUTPUTS	6
2.b. COUNTRY DATA	8
3. POLICY INPUTS	9
3.a. ON-ROAD VEHICLE FUEL ECONOMY (PASSENGER VEHICLE/FREIGHT TRUCK)	9
3.b. RAIL, AVIATION AND MARINE EFFICIENCY	9
3.c. LOW CARBON FUELS	9
3.d. LOW SULFUR FUELS	10
3.e. ELECTRIC DRIVE VEHICLES	10
3.f. GRID DECARBONIZATION	11
3.g. MODE SHIFT	11
3.h. TRAVEL DEMAND MANAGEMENT	11
3.i. AVIATION MARKET-BASED MEASURES	12
3.j. LOAD FACTORS	12
3.k. IN-USE FUEL EFFICIENCY	12
4. INPUTS AND CALCULATIONS	14
4.a. CALCULATIONS OVERVIEW	14
4.b. FUEL	16
4.c. ON-ROAD	17
4.d. PASSENGER AND FREIGHT RAIL	20
4.e. AVIATION	22
4.f. MARINE	24
4.g. CONFIG	26
4.h. SOCIO-ECONOMIC	27
4.i. SURVIVAL	37
5. REFERENCES	40
APPENDIX A. LIST OF ACRONYMS	42
APPENDIX B. ON-ROAD EMISSION FACTORS	43
APPENDIX C. POWER SECTOR EMISSION FACTORS	45
Model Description	45
Data Sources	46
Sources of Uncertainty	46

1. MODEL SCOPE AND STRUCTURE

The Roadmap model estimates total transportation activity, mode shares and emissions from 2000 to 2050 in five-year increments, including Well-to-Wheel (WTW) emissions of GHGs and local air pollutants from on-road vehicles, locomotives, aircraft, and marine vessels. The following table describes the specific modes, geographic regions, forecast years, pollutants, vehicle technologies, fuel types, and cases covered by the Roadmap model.

TABLE 1. MODEL SCOPE

Category	Items
Transportation modes	Light Duty Vehicles (LDVs, including SUVs), buses , 2-wheelers (2Ws) , 3-wheelers (3Ws) , Light Heavy Duty Trucks (LHDTs) (typically 8,500 – 14,000 lbs GVWR), Medium HDTs (MHDTs) (14,001 – 33,000 lbs GVWR), Heavy HDTs (HHDTs) (>33,000 lbs GVWR), passenger rail , freight rail , aviation (passenger only), and marine (freight only).
Geographic regions	The geographical focus is on the 11 countries/regions with greatest annual new vehicle sales: United States, EU-27 (27 member states included in the European Union), China, India, Japan, Brazil, South Korea, Mexico, Canada, Australia, and Russia. The model also considers five broader regions : Latin America-31, non-EU Europe, Asia-Pacific-40, Africa, and the Middle East.
Time horizon	2000 to 2050 in 5-year increments.
Pollutants	GHG emissions (CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O) and local air pollutants (NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, BC, and SO ₂). The Roadmap's calculations of emissions of GHGs and local air pollutants incorporate the fuel lifecycle, including the refining, processing, distribution and combustion of fuels. The Roadmap does not assess lifecycle emissions from vehicle manufacturing, distribution or end-of-life, or the transportation infrastructure lifecycle.
Vehicle technologies	On-road vehicles : conventional (internal combustion engine), hybrid, plug-in hybrid, fuel cell, and battery electric vehicles. Locomotives : diesel-electric, and electric. Aircraft and marine vessels : conventional engines only.
Fuel types	Gasoline, diesel (conventional, low-sulfur), ethanol (grain, sugarcane, cellulosic), biodiesel (oil-based, lingo-cellulosic), CNG, LPG, hydrogen, electricity, jet fuel, and residual fuel.
Cases	The model can handle two cases at a time: Base case : considers the effects of adopted policies, but does not consider additional technological improvements or policy changes; Trajectory case : accounts for changes in policies and technologies to achieve emission reductions.

The Roadmap model is built around two cases. The **base case** includes all adopted, enforceable, and finalized policies but assumes no further improvement beyond what is mandated in terms of vehicle fuel efficiency, penetration of electric drive vehicles, or biofuels. Trends in vehicle activity and mode share are maintained based on forecasted socio-demographic parameters. Users may adjust assumptions in the base case as better data become available, or update this case as new policies are finalized. The **trajectory case** is intended to be customized by the user and

compared against the base case to evaluate the effects of additional policies on transportation emissions.

In the public version of the model, the assumptions in the trajectory case are equal to those in the base case. In the future, the ICCT will issue data inputs associated with different policy cases.

FIGURE 1 presents an overview of the tabs included in the Roadmap model. Tabs are categorized by general inputs, mode-specific inputs and calculations, and outputs.

FIGURE 1. MODEL ORGANIZATION

The Roadmap model can be used to generate policy-relevant results to varying degrees of breadth and detail. Thus, the relative ease or complexity of deriving usable outputs depends on the nature of the policy question. The following table provides an overview of the customizable inputs present in each model tab shown in the previous figure.

- Tabs with “Low” complexity allow the user to adjust data-validated cells and typically involve pre-defined tabulations and charts.
- Tabs with “Medium” complexity allow the user to adjust input assumptions by editing input tables—however some of these cells contain formulas that may be lost when modified.
- Tabs with “High” complexity allow advanced users to edit the equation parameters on which transportation activity and emissions estimates are based—users should be very careful when editing these tabs, since the calculations of other modules hinge on these values and equations.

TABLE 2. MODEL STRUCTURE

Tab	Description	User inputs	Complexity
Intro	Summarizes the scope of the model and provides a general overview of the model structure and calculation methods. It also provides a colored legend that defines the purpose of cell and text colors.	None.	—
Outputs	<u>Model Outputs</u> : enables comparisons of model outputs between cases, modes, and regions.	Select whether to include each of eight policy levers. View output charts by region, case, pollutant, and mode.	Low
Inputs	<u>Policy Levers</u> : includes customizable assumptions about how fuel economy, transport activity, market penetration of electric vehicles, fuel carbon content, etc. vary from the base case.	Primary tab for adjusting trajectory case assumptions. These are activated by setting the relevant levers in the “Outputs” tab to “TRUE”.	Low
Output Viewer	Enables flexible comparisons of input and output parameters.	View outputs by region, case, and mode for a wide variety of parameters.	Low
Country Data	Summarizes total and mode-specific activity, energy, and emission projections for a specified country/region.	Outputs only. View tabulated results for a selected region by pollutant, mode, and units.	—
Baseline VKT Input	<u>Baseline Transportation Activity Custom Input</u> : offers alternative method of forecasting transportation activity	Input mode-specific annualized activity growth rates to replace projections based on socio-economic indicators.	Medium
Socio	<u>Socio-economic Indicators and Mode Shares</u> : estimates future transportation activity and mode shares based on Gross Domestic Product (GDP), population, and relative fuel prices.	Edit forecasts of population, Purchasing Power Parity (PPP) GDP growth rates, and relative fuel prices, by region. Intermediate outputs : predicted vehicles/capita, passenger and freight activity and mode share projections (base and trajectory).	High
Fuel	<u>Fuel Inputs</u> : includes fuel-related assumptions and inputs on fuel blends, sulfur content, and emission factors are outlined in this tab.	Adjust base case assumptions by region and forecast year. Gasoline and diesel blends, plug-in hybrid electricity share, fuel sulfur content, fuel-based WWT and TTW emission factors, user factors.	Medium
Mode-specific tabs	Input and calculation tabs for each mode (LDV, Bus, 2W, 3W, LHDT, MHDT, HHDT, Passenger Rail, Freight Rail, Aviation, Marine).	<u>Inputs</u> : edit historic vehicle stock (2000-2010), historic vehicle sales (2000-2010), load factors, annual distance/vehicle, share of VKT in urban areas, share of annual sales by fuel/engine technology, fuel consumption by engine technology, emission factors, introduction of emissions standards by year and region, share of vehicle activity by fuel/engine technology in 2000, in-use fuel consumption adjustment by specific fuel efficiency.	Medium
Config	<u>System Configuration</u> : contains the various lists used in the model, unit conversions, and Global Warming Potential (GWP) assumptions.	Adjust GWP or Particulate Matter Conversion.	—
Survival	<u>Survival and VKT Age Distribution</u> : accounts for gradual retirement in vehicle populations. The resulting survival rates are factored into the Mode Specific tabs	Modify shape of “survival” curves to adjust rates of vehicle fleet turnover.	High

	to calculate fleet average emissions factors and fuel economies.		
--	--	--	--

2. OUTPUT TABS

The model is designed to allow the general user to activate and adjust policy levers, and view the impacts on emissions using only the “Inputs,” “Outputs,” and “Country Data” tabs; however the model is open to additional modification. In general, **trajectory** case parameters can be easily modified using the “Inputs” tab, whereas **base case** parameters and underlying data and assumptions should be modified in the appropriate **Input** tab (e.g., Socio, Fuel, LDV Inputs, etc.).

2.A. OUTPUTS

Select Region

Users can customize results shown on the “Outputs” tab to focus on any of the eleven largest vehicle markets or one of five regional aggregations. The default section, “Global,” shows outputs for all countries and regions in the model scope.

Policy Lever Control Panel

An important element of the “Outputs” tab is the “Policy Lever Control Panel.” Here users can **include or exclude policy levers from the trajectory case** and compare the resulting forecast to the base case. Several levers apply to all modes, including Low Carbon Fuels, Grid Decarbonization, Mode Shift, Activity Reduction, and Fuel Sulfur Effects. The remaining three levers can be activated for specific modes: these include Vehicle Fuel Economy, Electric Drive Vehicles, and Emission Standards. For a given mode, marking a lever “TRUE” will activate the corresponding trajectory case values in the “Inputs” tab.

To include the impacts of specific policies, users need to input policies in the “Inputs” tab and set the corresponding lever to “TRUE” in the “Outputs” tab. Marking a policy lever “FALSE” deactivates that policy for all regions and ignores any user values in the corresponding trajectory case inputs. For example, if the “Vehicle fuel economy” lever is deactivated for LDVs, the model will still apply the fuel economy improvements to LDVs specified in the **base case** (reflecting the standards already in effect) but ignore any additional improvements specified in the **trajectory case**.

FIGURE 2. POLICY LEVER CONTROL PANEL

LEVER	All	LDV	HDT	Other on-road	Rail	Aviation	Marine
Vehicle Fuel Economy		TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
Low Carbon Fuels	TRUE						
Electric Drive Vehicles		TRUE	TRUE	TRUE	TRUE		
Grid Decarbonization	TRUE						
Mode Shift	TRUE						
Activity Reduction / MBM	TRUE					TRUE	TRUE
Emission Standards		TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
Low Sulfur Fuels	TRUE						

The Policy Lever Control Panel can be especially useful for conducting sensitivity analyses of policy levers. For example, a user might specify a region and compare the base and trajectory emissions of a particular pollutant in the chart immediately below the control panel. Then, the user could deactivate “Emission Standards” to see the marginal effect—in this case, what trajectory emissions would be if emissions standards did not change from the base case but other policy levers improved relative to the base case.

Use the Policy Lever Control Panel to conduct sensitivity analyses of policies for a specified region and pollutant.

FIGURE 3. SAMPLE COMPARISON OF EMISSIONS FORECASTS – EMISSIONS STANDARDS MARKED “TRUE” VS. “FALSE”

“Outputs” charts

1. Trajectory and base case emissions
2. Country emissions by mode
3. Passenger activity by mode
4. Freight activity by mode
5. Vehicle stock and sales
6. Share of vehicle sales by engine technology
7. New fleet fuel efficiency
8. Fuel consumption and savings
9. Fuel consumption by mode in 2010
10. Fuel consumption by mode
11. Emissions standards timeline
12. Performance metrics
13. Emissions relative to the year 2000

Output Charts

Charts of key parameters are included in the “Outputs” tab. Users should be aware that some charts are not applicable to every mode and pollutant. Thus, some mode and pollutant selections will expectedly cause certain charts and support tables to be blank.

Example: “Vehicle stock and sales” and “New fleet fuel efficiency” apply only to on-road modes. Therefore, these charts should be blank if the user selects passenger or freight rail,

aviation, or marine modes.

Support Tables

The last section in the “Outputs” tab contains support tables, which compile values for calculated TTW vehicle efficiencies from the rest of the model and convert these into the units specified the “Outputs” charts. Other tables in this section perform similar functions, compiling calculations of average fuel carbon content, transport carbon intensity, and passenger and freight activity.

Grayed-out tables should not be deleted, since calculations depend on the values in these tables to produce model results.

2.B. COUNTRY DATA

“Country data” tabulations

1. Socio-economic indicators and mode share
2. On-road activity and fuel efficiency
3. Rail activity and energy intensity
4. Fuel inputs
5. Vehicle emission standards
6. TTW energy consumption
7. TTW emissions by mode

The “Country data” tab provides a comprehensive, tabulated summary of model inputs and outputs for a specified region/country. It excludes marine emissions and activity, since these are estimated only at the global level. This sheet tabulates numerous parameters to allow side-by-side comparisons between

the trajectory and base case. As such, it is a good place to review input and output assumptions for a specific country, though these assumptions should only be edited using the corresponding input tabs. The parameters are organized in seven broad categories. As in the “Outputs” tab, users may need to adjust the specified mode or pollutant in order to show certain support tables.

3. POLICY INPUTS

The underlying input assumptions behind the levers in the “Outputs” tab can be edited in the “Inputs” tab. The grayed out tables to the right of the policy inputs are activated by the selections made in the policy lever control panel and directly linked to the rest of the calculations in the model. Once active, each grayed out table draws upon the related trajectory or base assumptions (for the calculations). The following section describes how to edit the assumptions of each policy lever.

3.A. ON-ROAD VEHICLE FUEL ECONOMY (PASSENGER VEHICLE/FREIGHT TRUCK)

For inputs corresponding to the “Passenger Vehicle/Freight Truck Fuel Economy” policy lever, the input tables for the trajectory and base case for each mode are editable and displayed side-by-side. For each case, the user may enter fuel economy standards for new vehicles by region and year. These values should reflect the average **test cycle efficiency** for new ICE and non-plug-in hybrid vehicles. For LDV, the fuel economy values represent average fuel consumption for new ICE vehicles, including gasoline, diesel, non-plug-in hybrids, CNG and LPG. Inputs for other modes should be entered separately for gasoline and diesel vehicles. Assumptions about the difference between test cycle and in-use efficiency can be edited in the mode-specific tabs. The test cycle efficiency for new electric drive vehicles is assumed to improve at roughly half the rate of ICEs—the rationale for this assumption is that electric drive vehicles are already substantially more efficient than ICEs, which indicates that there is less potential for further efficiency improvements. Users may specify one of six different units for the fuel economy standards of a given region: MJ/km, L/100km, km/L, mpg, gCO₂/km, or gCO₂/mi. The support tables to the right of these input columns convert all fuel economy inputs to MJ/km and display the equivalent annual percent improvement.

Fuel economy/consumption for new on-road vehicles should be entered in absolute units according to the chosen input unit.

For the purposes of annual improvements, each 5-year time period is denoted by the last year in that period. That is, annual improvements in “2050” apply to the period 2046-2050.

3.b. RAIL, AVIATION AND MARINE EFFICIENCY

Similar to on-road vehicle fuel economy, the input tables for “Rail, Aviation & Marine Efficiency” policy levers are editable and displayed by trajectory and base case. For rail and aviation, annual efficiency improvements can be adjusted by region and projected year. The improvements represent the annualized rate of reduction in fuel consumption for each mode. For rail, improvements apply to the diesel share of energy only. At present, marine improvements can be entered only at the global level.

Efficiency improvements to rail, aviation, and marine modes should be entered in the form of annual percentage rates.

3.c. LOW CARBON FUELS

This section allows adjustments in both regulatory treatments and also fuel blend shifts. For biofuels, WTT CO₂ emission factors differ substantially by regulatory agency. Four sets of

regulatory estimates are pre-loaded in the Roadmap, which are RFS2, CARB, EU (no iLUC) and EU (with iLUC). By default, the Roadmap assumes no emission benefits from biofuels; however, users can choose which set of regulatory estimates to use in the model. Additionally, for a given biofuel, users can decide whether to include TTW biofuel offset. Default values set all TTW CO₂ emissions of biofuels equal to zero by setting the option to “Yes”.

For conventional fossil fuels, WTT CO₂ emission factors are calculated as a weighted average depending on the global share of conventional and various unconventional fossil fuel sources. By default, EIA forecasts are used. Users can adjust these values in both base and trajectory cases.

Fuel blend increase

1. Gasoline to ethanol (starch)
2. Gasoline to ethanol (sugar)
3. Gasoline to ethanol (cellulosic)
4. Diesel to biodiesel (oil-based)
5. Diesel to biodiesel (cellulosic/waste-oil)

The share of the corresponding biofuel in the fuel blend is shown to the right of each input table. The dropdown menu can be used to toggle between the base and the trajectory case. As in the other “Inputs” tab sections, fuel carbon content input parameters only change the trajectory case relative to the base case. Users

who wish to edit the base case fuel blend assumptions may do so from the “Fuel” tab.

Example: if the base case blend for a given region and time period is 95% gasoline and 5% sugarcane ethanol, entering “10%” in the corresponding input field would shift 10% from gasoline to sugarcane ethanol, and result in a blend of 85% gasoline and 15% sugarcane ethanol in the trajectory case.

3.d. LOW SULFUR FUELS

The Roadmap models the effects of diesel fuel sulfur content on emissions of PM and SO₂ from all types of modes. In general, high levels of sulfur in fuel inhibit the function of emission control devices and result in higher emissions for each level of emissions control. Policies that reduce the sulfur content of diesel can be entered in the trajectory case.

3.e. ELECTRIC DRIVE VEHICLES

This section allows users to adjust the electric drive vehicle share of annual light-duty vehicle sales in the trajectory case, in terms of percentage-point increase from the base case. Increases in the share of electric drive vehicles for other on-road modes can be entered in the mode-specific input tabs.

Electric vehicle sales

1. Gasoline plug-in hybrid
2. Diesel plug-in hybrid
3. Fuel cell
4. Electric

To the right of each input table, users can toggle the dropdown menu to view the annual share of new vehicle sales of the corresponding electric drive vehicle type for the base or trajectory case. Percentage-point increases over the base case need to be entered for each period of interest: specifying an improvement for a single time period will not affect sales in future time periods.

Example: if fuel cell vehicles were to make up 5% of all new vehicle sales in 2045 and 10% in 2050 in the base case, entering “5%” in the input cell for 2045 and “5%” in 2050 would result in fuel cells making up 10% of new vehicle sales in 2045 and 15% in 2050 in the trajectory case.

3.f. GRID DECARBONIZATION

In this section, users can input reductions in the overall carbon intensity of electricity, in terms from percent reduction from the base case. The table to the right of the input parameters shows the resulting country-specific WTT emission factors for electricity in gCO₂/MJ. As with other tables in the “Inputs” tab, users may toggle between the base and trajectory case. A simplifying assumption applies the same percent reductions in carbon intensity across all pollutants and regions—this assumption models the general effect of increasing the mix of renewable electricity in the grid and thus reducing local air pollutants along with GHGs. Country- and pollutant-specific WTT emission factors for electricity can be entered in the “Fuels” tab, though doing so will override the percent reductions specified in this policy lever.

Reductions in electricity carbon intensity should be entered as positive values between zero and 100 percent. Cells exceeding these limits will display red fill.

3.g. MODE SHIFT

Mode shifts

1. LDV to bus
2. LDV to rail
3. LDV to 2-wheelers
4. LDV to 3-wheelers
5. LDV to walk/bike
6. HHDT to rail

Users can specify percentage transportation activity shifts from high-carbon modes (light duty vehicles and heavy HDTs) to lower-carbon alternative modes (public transit, freight rail, and non-motorized transportation (NMT)) in the trajectory case. Six possible mode shifts can be adjusted using the “Inputs” tab. In general, the emissions reductions from mode shifts are a function of the difference in emissions per unit of activity (gCO₂/pkm or gCO₂/tkm) times the volume of activity shifted. Corresponding levels of activity shifted (billion PKM/TKM) are shown in the tables on the right according to

the input percentages. These values provide an indication of the level of transit, freight rail, or NMT investment that would be required to offset the reduction in LDV or HHDT activity. For users who want to model constant absolute shifts in activity after a certain model year, table tools are available on the right to help calculate the corresponding percentage over time. These tables estimate the input mode shifts that would need to be entered to model a constant shift in activity despite changes in overall activity.

Example: entering “3%” in 2015 for Mexico in the “LDV to Bus” table would reduce LDV passenger activity by 3%, convert it to PKM, and add that same number of PKM to bus activity in 2015. If the same PKM values are expected to be shifted after 2015 constantly, select the year as 2015 from the dropdown menu in the table on the right (column AF), then copy the calculated percentages shift for future years into the corresponding mode shift input fields.

Only positive values between zero and 100% may be entered (reverse mode shifts from low-impact modes to LDVs, etc. cannot be input). The box above the upper righthand corner of each parameter table will read “Error” if user inputs result in any mode having a share greater than 100% or less than zero. Reductions in one year do not carry over for future years.

3.h. TRAVEL DEMAND MANAGEMENT

The Roadmap provides users flexibility to decrease or slow the growth of transportation activity by reducing activity or trip length in trajectory case. By entering the activity reduction percentages for LDV and trucks, users can decrease the PKM/TKM needs by specific region and model year. In

addition, average trip length in urban areas can be adjusted for LDV, 2W and 3W. Higher percentages reflect increases in density of urban areas and thus shorter trip lengths. This factor is in addition to reductions in total passenger activity.

Trajectory case activity starts out as equal to baseline activity. Then, it is adjusted by reductions in activity and mode shifts (implemented simultaneously), followed by reductions in urban trip length where available.

Only positive values between zero and 100% can be entered. Reductions in one year do not affect future years.

3.I. AVIATION MARKET-BASED MEASURES

This section models the effects of Market-Based Measures (MBMs) on demand for aviation. Users can adjust the percentage reduction in activity for both cases.

Values applied in the baseline case should also be entered for the trajectory case. Only positive values between zero and 100% can be entered. Reductions in one year do not affect future years. By default, the estimated in-sector reductions in aviation activity are included for the EU ETS.

3.J. LOAD FACTORS

This section provides users to option to adjust load factors in units of percent increase from the base case for LDV, buses, or heavy-duty trucks. Load factors are used to estimate vehicle activity from transportation activity, which represent the average number of passengers per vehicle, or payload for freight vehicles. Corresponding values are shown to the right of each input table. These can be customized via dropdown menus to show either the initial value for base case or the user-adjusted value for trajectory case. Increases in load factors could be driven by either improved congestion management policies or logistics. For trucks, resulting load factors apply to all light, medium and heavy heavy-duty trucks.

3.K. IN-USE FUEL EFFICIENCY

Reductions/increases in in-use fuel consumption can be adjusted for on-road vehicle activity in urban areas. Users can either improve efficiency in the trajectory case or worsen the efficiency in the base case. This section is applies adjustments consistently across all on-road modes, including heavy-duty trucks, and to all ICE vehicles (excluding fuel cell and electric vehicles). Improvements in in-use fuel efficiency in urban areas could be driven by congestion relief strategies, such as congestion pricing, cordon pricing, VKT fees, carpooling incentives, and parking pricing. Here users can specify trajectory case improvements to the average efficiency of on-road vehicles in units of percent improvement over the base case. Similarly, users can worsen efficiency in the base case, which could result from increasing congestion due to VKT growth in the absence of adequate congestion relief strategies.

The following table compares the effects of a sample change in “improvement in in-use fuel efficiency” in the trajectory case versus “degradation of in-use fuel efficiency” in the base case. Total fuel consumption for a given mode as a result of these policies is approximated by the equation:

$$(\text{Adjusted ICE fuel consumption}) = (\text{Unadjusted ICE fuel consumption}) * [1 - \% \Delta(\text{Vehicle efficiency in urban areas}) * (\text{Share of VKT in urban areas})]$$

TABLE 3. COMPARISON OF IN-USE FUEL EFFICIENCY LEVERS — EXAMPLE

	Improvement in in-use fuel efficiency	Degradation of in-use fuel efficiency
Case	Trajectory	Base
Example scenario	Congestion pricing improves (trajectory case) urban fuel economy in 2030 by 10%.	Unmitigated congestion degrades (base case) urban fuel economy in 2030 by 10%.
Urban fuel economy	Improves from 50 mpg to 55 mpg.	Degrades from 50 mpg to 45 mpg.
Input value	"10%" in 2030	"10%" in 2030

Note using this section assumes that improvements in in-use fuel efficiency are made only in trajectory case, while degradation in efficiency as a result of congestion occurs only in the base case. Using this section with some degree of precision would likely require more-refined assumptions on the share of HDT VKT in urban areas (by default assumed to be 50%).

4. INPUTS AND CALCULATIONS

The following sections explain the tabs that make up the spreadsheet tool, including relevant equations and calculation processes. The first part of each section focuses on the inputs, which can be edited to customize model results, and the second part of each section is designed to provide interested users with a better understanding of the model calculations, assumptions, and data sources. Similar to the organization within each section, the modules are ordered from “Low” to “High” complexity.

4.A. CALCULATIONS OVERVIEW

Generally, emissions are the product of transportation activity and emission factors.

In general, for each pollutant, country, and year, WTW emissions are equal to the sum of WTT emissions and TTW emissions:

$$WTW \text{ Emissions} = TTW \text{ Emissions} + WTT \text{ Emissions}$$

Where,

$$TTW \text{ Emissions} = \text{Transportation Activity} * \text{Emission Factors}$$

$$WTT \text{ Emissions} = \text{Energy Consumption} * \text{Emission Factors}$$

The following figure illustrates the simplified emissions calculation methods in the Roadmap model.

FIGURE 4. SIMPLIFIED EMISSION CALCULATION METHODS

Changes in land-based passenger and freight transportation activity are determined from changes in population, Gross Domestic Product (GDP), and relative fuel price forecasts. Aviation and marine activity are based on International Civil Aviation Organization (ICAO) and International Maritime Organization (IMO) projections. Vehicle activity (for on-road modes) is then determined from transportation activity and load factors. The breakdown of vehicle activity by

technology type is determined from vehicle sales and a turnover algorithm. Vehicle population and sales are calculated as model outputs, and can be used to validate and calibrate the model. Fuel consumption is the product of vehicle activity and average fleet energy efficiency (which is estimated from the new fleet efficiency and a turnover algorithm). The breakdown of fuel consumption by fuel type is determined from fuel blends.

TTW emissions of CO₂ are calculated as the product of fuel consumption (by fuel type) and carbon content of fuels, while TTW emissions of other pollutants are calculated as the product of TTW emission factors and either vehicle activity (for on-road modes) or transportation activity (for rail and aviation). Average TTW emission factors are based on vehicle emission standards and a turnover algorithm. WTT emissions of all pollutants are calculated as the product of fuel consumption (by fuel type) and emission factors. Emissions from marine vessels are estimated directly from IMO projections.

The specific methods to calculate transportation activity, energy consumption, and emission factors for different modes and pollutants are summarized in TABLE 4. More-detailed calculations are presented in subsequent sections.

TABLE 4. EMISSIONS CALCULATIONS

Mode	Pollutant	Transportation activity	Emission factor*
On-road	TTW - CO ₂	VKT is estimated from socio-economic indicators and used to calculate energy consumption, which is multiplied by emission factors to estimate emissions. <i>Energy consumption (MJ) = Vehicle efficiency (MJ/km) x VKT</i>	g/MJ Based on carbon content of fuels included in the mix.
On-road	TTW - All but CO ₂	VKT is estimated from socio-economic indicators and used directly in the calculations of emissions.	g/km Based on vehicle emission standards.
Rail	TTW - All	Passenger-km and ton-km are estimated from socio-economic indicators and used to calculate energy consumption, which is multiplied by emission factors to estimate emissions. <i>Energy_{passenger rail} (MJ) = Locomotive efficiency ($\frac{MJ}{pass.km}$) x pass. km</i> <i>Energy_{freight rail} (MJ) = Locomotive efficiency ($\frac{MJ}{ton km}$) x ton km.</i>	g/MJ
Aviation	TTW - All	Revenue passenger-km is estimated from ICAO projections and used to calculate energy consumption, which is multiplied by emission factors to estimate emissions. <i>Energy consumption (MJ) =</i>	g/MJ

		<i>Aircraft efficiency (RPK/MJ) x RPK.</i>	
Marine	TTW - All	N/A. Emissions are estimated directly from IMO emissions projections.	
All modes	WTT - All	Energy consumption (MJ) is used directly in the calculation of emissions.	g/MJ

TTW: Tank to wheels; WTT: Well to tank.

* The same emission factors were used for all regions. The model has a factor to differentiate emission factors by region, but currently this factor is set to 1.

4.B. FUEL

The “Fuel” tab contains fuel-related assumptions and input parameters, including fuel blends for gasoline and diesel, sulfur content, fuel-based CO₂ emission factors, and WTT emission factors for both trajectory and base cases. The following table shows the base case assumptions, which can be edited in the “Fuel” tab.

TABLE 5. FUEL INPUT PARAMETERS

Table	Description
Fuel blends (%)	Biofuel percentages blended into fuel for gasoline and diesel vehicles, including plug-in hybrids.
Sulfur content (ppm)	Gasoline, conventional diesel, ultra-low sulfur diesel, CNG, LPG.
Fuel-based emission factors	Based on energy content, fuel density, carbon content.
WTT emission factors (g/MJ)	For each pollutant and fuel. Trajectory case is set equal to base case.
User factors	For each fuel, by region and year. User factors adjust any discrepancies in WTT emission factors relative to U.S. 2010 values, which are set to 1.
WTT emission factors for electricity (g/MJ)	By region, pollutant, and year.

Changes to “Fuel Blends”, “Sulfur content (weighted average for diesel)” and “WTT Emission Factors for Electricity” in the trajectory case relative to the base case are intended to be edited using the “Inputs” tab. In addition, users may select “No benefits” from biofuels or one of several regulatory treatments; for conventional fuels, WTT emissions are based on the assumed share of unconventional fossil fuels.

Users should only edit input cells, which are denoted by blue text. Other cells contain intermediate calculations and outputs.

WTT emission factors for electricity were developed on a separate model, summarized in Appendix C.

4.C. ON-ROAD

On-road modes include LDV, Bus, 2W, 3W, LHDT, MHDT, and HHDT. Each on-road mode has its own input and calculation tabs. This section describes how to edit input assumptions for these modes, followed by a more detailed discussion of the method for estimating emissions from on-road vehicles.

“Calc” tabs should not be edited, since they contain only intermediate calculations. Users may edit mode-specific inputs in the relevant “Input” tab.

On-Road Inputs

Table 6 shows the assumptions that can be edited in the on-road mode-specific “Input” tabs.

TABLE 6. ON-ROAD MODE-SPECIFIC INPUT PARAMETERS

Table	Description
Stock and Sales	Historic vehicle stock and sales. Base case can be edited here, and by default, trajectory case is set equal to base case.
Load factor (passengers per vehicle) / Payload (metric tons per vehicle)	Fleetwide average. Base case can be edited here, though trajectory case inputs should be expressed in terms of percent change from the base case using the “Inputs” tab.
Average annual distance traveled per vehicle (km)	Used to calculate vehicle inventory from vehicle activity (VKT). Trajectory case is set equal to base case.
Share of VKT in urban areas (%)	Used to isolate the effects of congestion relief strategies and land-use policies to urban areas. For LDV, 2W, and 3W, reductions can be modeled in units of percentage in “Inputs” tab.
Share of new vehicle sales by fuel/engine technology (%)	Includes conventional, plug-in hybrid, CNG, LPG, fuel cell, electric. Base case can be edited here, while trajectory case inputs should be entered in terms of percentage-point change from the base case in the “Inputs” tab.
Share of vehicle activity by fuel/engine technology in 2000	Includes conventional, plug-in hybrid, CNG, LPG, fuel cell, electric. Only year 2000 valued can be adjusted by users. Shares for subsequent years are calculated based on sales data. Gasoline ICE/hybrid shares are assumed to be 1 minus the other shares. Trajectory case is set equal to base case.
Fuel consumption by fuel/engine technology (MJ/km) – fleet average vs. new fleet in 2000	Includes fuel cell and electric vehicles. Year 2000 values can be adjusted by users. Values should represent the difference between fleet average fuel consumption and new vehicles sold in the year 2000. Fleet average fuel consumption by fuel/engine technology for subsequent years is calculated using sales, new vehicle efficiency, and turnover algorithms.
Annual VKT per vehicle by fuel/engine technology	Used to differentiate distance per vehicle relative to gasoline ICE, e.g. battery electric vehicles are driven

	less on average than conventional vehicles
Average fuel consumption (MJ) – new fleet	Includes in-use fuel consumption adjustment and average fuel consumption value for all engine technologies. The adjustments are set equal in base case and trajectory, which can be adjusted by users here. For average fuel consumption, adjustments are recommended to made in the “Inputs” tab.
Miscellaneous inputs	Includes fuel consumption differentials from diesel to gasoline and from LPG/CNG to gasoline, and the energy share of electric drive for plug-in hybrids.
Emission factors (g/km)	Average fleet TTW emission factors by standard and pollutant, for gasoline, diesel, CNG, and LPG vehicles. Includes “country adjustment factors” which allow for differentiation of emission factors by country.
Introduction of emission standards	For gasoline and diesel vehicles, by introduction year and country. Allows for standards that phase in over several years.
Fuel consumption differentials	Ratio of fuel consumption of diesel (or CNG/LPG) vehicles relative to gasoline vehicles; used to convert composite efficiency for ICE vehicles into separate gasoline, diesel, CNG/LPG values. Only CNG/LPG differentials are explicit inputs for other on-road modes.

The input years for emission standards are different from the 5-year time periods in the rest of the model, in that users can enter the specific year in which the standards are introduced.

On-Road Methods

On-Road Tabs (INPUT & CALC)

1. LDV
2. BUS
3. 2-WHEELERS
4. 3-WHEELERS
5. LHDT
6. MHDT
7. HHDT

The following figure illustrates the methodology used by the Roadmap model for on-road emissions calculations, which are the most complex calculations in the model. Historical land-based transportation activity (passenger-km and ton-km) and mode shares are taken from multiple data sources, and the projections of land-based transportation activity and mode share are estimated from socio-economic indicators (population, GDP and relative fuel prices). The main formula used for predictions of transportation activity and mode share is a Gompertz S-curve growth function that relates socio-economic indicators to activity and mode share. More

detailed information can be found in the sub-section “Socio-Economic”.

A load factor (passenger/vehicle or ton/vehicle) is used to convert transportation activity into vehicle activity (VKT). Vehicle inventory is calculated by considering an average annual distance traveled per vehicle. To derive annual vehicle sales, survival curves are developed using a Weibull distribution reliability function to estimate average vehicle retirement age for a given region and mode. Please refer to the next sub-section for further details on the survival curves and the turnover model.

Total energy consumption by fuel type is calculated as the product between vehicle activity, average VKT share by fuel/engine technology (e.g., gasoline conventional engines), and average vehicle fuel economy by fuel/engine technology. The model uses a turnover algorithm to estimate the average VKT share by fuel/engine technology (from new vehicle sales by fuel/engine technology) and the average vehicle fuel economy (from new vehicle fuel economy). Total energy consumption by fuel type is used to calculate TTW CO₂ emissions and Well-to-Tank (WTT) emissions for all pollutants. In both of these cases, emission factors are expressed in terms of gCO₂/MJ.

TTW emissions of all pollutants except CO₂ are calculated based on emission factors (g/km) and VKT. A turnover model is used to determine the share of travel activity by vehicles in each emission standard category. These shares are used to estimate composite emission factors, which reflect average non-CO₂ emissions per km.

FIGURE 5. ON-ROAD EMISSION CALCULATION METHODOLOGY

The following section gives an overview of the calculations for emissions from Light Duty Vehicles. The calculations for the Bus, 2-wheeler, and 3-wheeler modes are identical. Calculations for LHDT, MHDT, and HHDT are computed in the same manner as well, except transportation activity is converted to VKT using load factors of tons/vehicle instead of passengers/vehicle.

For each pollutant, country, and year, WTW emissions from on-road vehicles are equal to the sum of WTT emissions and TTW emissions:

$$WTW \text{ Emissions} = TTW \text{ Emissions} + WTT \text{ Emissions}$$

For CO₂ and SO₂, TTW emissions are calculated as follows:

$$TTW \text{ Emission (g)} = \sum Emission \text{ Factor}_{Fuel} \left(\frac{g}{MJ} \right) * Share \text{ of } Energy_{Fuel}(\%) * LDV \text{ Energy (MJ)}$$

Emission factors for CO₂ and SO₂ are based on the carbon and sulfur content of fuel, respectively. Emission factors for other pollutants are based on a weighted average of emission rates from vehicles in each emission standard category.

For local air pollutants, TTW emissions are calculated as follows:

$$TTW \text{ Emissions (g)} = \sum Emission \text{ Factor}_{vehicle \text{ fuel type}} \left(\frac{g}{km} \right) * Share \text{ of } VKT_{vehicle \text{ fuel type}}(\%) * LDV \text{ Activity (km)}$$

Note that electricity used by on-road vehicles generates zero TTW emissions; however it does generate WTT emissions, as specified in the “Fuel” tab. WTT emissions of each pollutant are equal to the sum of WTT emissions from each fuel:

$$WTT \text{ Emissions (g)} = \sum WTT \text{ Emission Factor}_{Fuel} \left(\frac{g}{MJ} \right) * Share \text{ of } Energy_{Fuel}(\%) * LDV \text{ Energy (MJ)}$$

Where LDV energy is defined as the product of energy intensity and activity:

$$LDV \text{ Energy (MJ)} = Energy \text{ Intensity} \left(\frac{MJ}{VKT} \right) * LDV \text{ Activity (VKT)}$$

LDV activity is derived from mode share and total passenger activity:

$$LDV \text{ Activity (VKT)} = Mode \text{ Share}_{LDV}(\%) * [Baseline \text{ Total Passenger Activity} + f(Population, GDP, Fuel \text{ Prices})]$$

4.D. PASSENGER AND FREIGHT RAIL

Emissions from passenger and freight rail are estimated using a simplified version of the on-road method. The main difference is that the rail module does not use a turnover model to calculate average locomotive efficiency; rather, average locomotive efficiency, expressed in MJ/passenger-km and MJ/ton-km, is an input parameter to the model. The rail module does, however, use the turnover model to estimate the share of locomotives in each emissions category for local air pollutants. Both TTW and WTT emissions are calculated from energy consumption. Emission factors for all pollutants are expressed in g/MJ.

Rail Inputs

Inputs and calculations for non-road modes are included in a single tab per mode type, as opposed to in separate sheets. Rail inputs are similar to the on-road inputs, albeit simpler. Freight rail inputs are the same as passenger rail, except passenger-km are replaced with ton-km. The following table shows the assumptions which can be edited in the “Passenger Rail” and “Freight Rail” tabs.

TABLE 7. RAIL INPUT PARAMETERS

Table	Description
Energy Intensity (MJ/passenger-km or MJ/ton-km)	Both load factors and locomotive efficiency influence this single input. Improvements, only applied on diesel share of energy, can be adjusted by users for both base and trajectory case in "Inputs" tab.
Diesel Share (%)	Diesel share of total energy consumed. The remaining share is assumed to be electricity.
TTW Emission Factors for Average Fleet (g/MJ)	Contains assumptions about average (TTW) local air pollutant emission factors for locomotives that meet certain tier standards.
Country Adjustment Factor	Allows coefficients that adjust emissions factors for local air pollutants to be specified by country. Set to 1 by default.
Emission Standards	By introduction year and country. Allows for standards that phase in over several years.

Rail Methods

The following section explains the calculations for emissions from passenger rail. Freight rail is calculated in the same way, except transportation activity is measured by ton-km instead of passenger-km.

For each pollutant, country, and year, WTW emissions are equal to the sum of WTT emissions and TTW emissions:

$$WTW \text{ Emissions} = TTW \text{ Emissions} + WTT \text{ Emissions}$$

TTW CO₂ and SO₂ emissions are calculated according to carbon and sulfur content of fuels (entered in the "Fuel" tab) as follows:

$$TTW \text{ Emissions (g)} = \text{Emission Factor}_{\text{Diesel}} \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) * \text{Share of Energy}_{\text{Diesel}}(\%) * \text{Passenger Rail Energy (MJ)}$$

TTW emissions of other pollutants are calculated according to the fleet average emission factors for each emissions standard tier (shown near the top of the corresponding rail tab) as follows:

$$TTW \text{ Emissions (g)} = \sum_{\text{Uncontrolled}}^{\text{Tier 4}} TTW \text{ Diesel Emission Factor}_{\text{Tier}} \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) * \text{Diesel Share of Energy}_{\text{Tier}}(\%) * \text{Passenger Rail Energy (MJ)}$$

$$\text{Where: Diesel Share of Energy}_{\text{Tier}}(\%) = \text{VKT Fraction}_{\text{Tier}}(\%) * \text{Overall Diesel Share}(\%)$$

Note that electricity used for passenger rail generates zero TTW emissions. WTT emissions are calculated as follows:

$$WTT \text{ Emissions (g)} = [\text{WTT Emission Factor}_{\text{Diesel}} \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) * \text{Share of Energy}_{\text{Diesel}}(\%) + \text{WTT Emission Factor}_{\text{Elec}} \left(\frac{\text{g}}{\text{MJ}} \right) * (1 - \text{Share of Energy}_{\text{Diesel}}(\%))] * \text{Passenger Rail Energy (MJ)}$$

Where passenger rail energy is defined as the product of energy intensity and rail activity:

$$\text{Passenger Rail Energy (MJ)} = \text{Energy Intensity} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{pass km}} \right) * \text{Passenger Rail Activity (pass km)}$$

Passenger rail activity is derived from mode share and total passenger activity:

$$\begin{aligned} \text{Passenger Rail Activity (pass km)} \\ = \text{Mode Share}_{\text{Passenger Rail}} (\%) * [\text{Baseline Total Passenger Activity (pass km)} \\ + f(\text{Population, GDP, Fuel Prices})] \end{aligned}$$

4.E. AVIATION

Emissions from aviation are estimated similarly to on-road vehicles. As in the on-road module, TTW emission factors for local air pollutants are inputs in the aviation tab and are expressed in g/MJ. WTT emissions utilize emissions factors and country-specific user factors contained in the “Fuel” tab. This section describes how to edit input assumptions for aviation, followed by a more detailed discussion of the Roadmap’s method for estimating aviation emissions.

Aviation Inputs

The following table shows the inputs that can be edited in the “Aviation” tab.

TABLE 8. AVIATION INPUT PARAMETERS

Table	Description
Energy efficiency for new aircraft (RPK/kg jet fuel)	Both base and trajectory case should be edited using “Inputs” tab.
Biofuel blend (%)	Oil-based and advanced, by country and year. CO ₂ emissions from burning biofuels (TTW) are set to zero.
TTW emission factors (g/MJ)	All pollutants, by country and year. CO ₂ factors based on jet fuel in “Fuel” tab.

Aviation Methods

Aviation activity, expressed in revenue passenger-km, is determined from SAGE/AEDT projections assuming an unconstrained growth scenario (i.e., infrastructure growth parallels industry and demand growth).¹ Historical data are available for all regions considered in the Roadmap, but projections are only available at the global scale. Activity growth is allocated to regions based on GDP projections, assuming an elasticity of activity growth to GDP growth ratio of 1. The model uses a turnover algorithm to convert new aircraft efficiency to average aircraft efficiency, which is multiplied by passenger activity to determine energy consumption. Emissions of all pollutants, for both WTT and tank-to-“wing,” are calculated from energy consumption (all emission factors are expressed in g/MJ).

Looking at published bottom-up historical and projected inventories, SAGE/AEDT is used in a significant number of projects. SAGE/AEDT is a computer model used to predict aircraft fuel burn and emissions with capabilities to include all civilian commercial flights for a given year with

¹ System for Assessing Aviation’s Global Emission (SAGE) is now incorporated into the Aviation Environmental Design Tool (AEDT).

output for a single flight, airport, country, regional, or at global level. It is currently under development for public release by the U.S. Federal Aviation Administration (FAA), and is projected to be available in 2012. Although not yet publically accessible, processed inventories have already been published for multiple years.

SAGE/AEDT uses various emission, aircraft fleet, and operations data to model global flights and, in turn, emissions. This produces a database of raw fuel burn and emissions data for jet and turboprop aircraft in a relational format. The database can then be queried to produce processed fuel burn data and emissions. In addition to fuel burn, the specific data available are CO₂, NO_x, HC, CO, H₂O and SO_x emissions. Particulate matter is excluded due to the lack of a comprehensive scientific understanding regarding aircraft emissions. Further research and data are warranted prior to inclusion.

The nature of aircraft transportation creates a different set of pollution effects due to higher altitudes. In high altitudes, NO_x becomes a greenhouse gas. It also has a stronger impact on the ozone layer in the upper atmosphere. The Roadmap model considers NO_x as a criteria pollutant only, however, because of the current disagreement about the GWP values of high-altitude NO_x.

The following section explains the Roadmap calculations for emissions from aviation.

For each pollutant, country, and year, WTW emissions from aviation are equal to the sum of WTT emissions and TTW emissions:

$$WTW \text{ Emissions} = TTW \text{ Emissions} + WTT \text{ Emissions}$$

TTW CO₂ emissions are calculated as follows:

$$TTW \text{ Emissions (g)} = \text{Emission Factor}_{jet \text{ fuel}} \left(\frac{g}{MJ} \right) * \text{Share of Energy}_{jet \text{ fuel}}(\%) * \text{Aviation Energy (MJ)}$$

Note that biofuels used for aviation are assumed to yield net zero CO₂ emissions. TTW local air pollutant emissions are based on composite emissions factors that include emissions from biofuels.

WTT emissions for each pollutant are equal to the sum of emissions from each fuel type:

$$WTT \text{ Emissions (g)} = \sum WTT \text{ Emission Factor}_{Fuel \text{ type}} \left(\frac{g}{MJ} \right) * \text{Share of Energy}_{Fuel \text{ type}}(\%) * \text{Aviation Energy (MJ)}$$

Where aviation energy is defined as the product of energy intensity and activity:

$$\text{Aviation Energy (MJ)} = \text{Energy Intensity} \left(\frac{MJ}{RPK} \right) * \text{Aviation Activity (RPK)}$$

Aviation activity starts with SAGE and ICAO data and adjusts these estimates for later time periods using mode share and total passenger activity estimates from the “Socio” tab:

$$\text{Aviation Activity (RPK)} = \text{Baseline Activity (SAGE, ICAO) (RPK)} + [\text{Mode Share}_{Aviation}(\%) * \Delta \text{Passenger Activity}]$$

The change in total passenger activity is a function of population, GDP, and fuel prices.

4.F. MARINE

The process for estimating marine emissions is quite different than for other modes. Base case TTW marine emissions are adjusted from International Maritime Organization (IMO) projections, which are separated into “Lowerbound” and “Upperbound” estimates

Marine Inputs

There is no direct input available in this tab. However, users can adjust TTW emissions using emission reduction strategies in the “Inputs” tab. By default, the base case assumes that new ships in 2015, 2020 and 2025 will be 5%, 15% and 25% more efficient than 2010 as a result of the IMO’s Energy Efficiency Design Index (EEDI). In addition, users can enter assumptions for TTW emission reductions achieved through Market-Based Measures (MBMs).

Changing “Method” from the default “average” changes marine emissions estimates from the base case as well as the trajectory case.

Marine Methods

The Roadmap model relies on projections of emissions from the International Maritime Organization’s (IMO) 2009 GHG Study, whose data are considered as the best estimates for future marine emissions.² The report was compiled by experts in the industry and published by the Marine Environmental Protection Committee (MEPC) under the IMO. The report includes projections of CO₂, NO_x, SO_x, and PM emissions. The emission projections of other GHGs such as CH₄, N₂O, and black carbon are not assessed here because they are greatly outweighed (by a factor of 10,000 for CH₄ in 2020) by CO₂ emissions.

The IMO forecasts future fuel consumption and emissions in six different scenarios corresponding to those used by the IPCC. As our base case, we created a range of emissions, where the scenarios with the highest and lowest emissions represent the upper-bound (A1B) and lower-bound (B2) estimates. We assume no explicit regulatory policies or mandates to reduce CO₂ emissions from shipping, nor any fuel efficiency improvements. In the case of NO_x, SO_x, and PM, the revised MARPOL Annex VI standard is assumed to apply.

Marine emissions are reported on a global basis because the underlying data did not lend itself to a country disaggregation of emissions. We are in the process of developing such a disaggregation.

For NO_x, SO_x, and PM, other factors are considered besides just fuel consumption. Based on International Convention for the Prevention of Pollution From Ships (MARPOL 73/78), ships engines built after 2000 need to comply with Tier I standards. Tiers II and III, which will be introduced in 2011 and 2016, respectively, will reduce NO_x emission levels. All of these approved regulations are included in the base case.

MARPOL 73/78 designated two sulfur emission control areas (SECA). One is the Baltic Sea SECA, which has been enforced as a SECA since May 19, 2006 and the other is the North Sea SECA, designated as such since November 22, 2007. Two additional areas, North America ECA

² IMO (2009): Prevention of Air Pollution from Ships. Second IMO GHG Study 2009. Final Report Covering Phase 1 and Phase 2. MEPC 59/INF. 10. April 9, 2009.

and Caribbean ECA, will come into full effect to reduce SO_x, NO_x, and PM starting in 2016, corresponding to the Tier III rule. North America ECA covers 200 nautical miles from the coastlines of US and Canada, and the Caribbean ECA covers US territories in Caribbean. Currently the following caps in fuel sulfur content are:

In SECAs: 1% beginning in July 2010, and 0.1% in January 2015;

Globally: from January 2012, the global sulfur cap will be reduced from 4.5% to 3.5%. From January 2020, the global cap will be decreased to 0.5%.

IMO uses an activity-based approach to first estimate fuel consumption and then total emissions. With this approach, the fuel consumption is estimated for individual ship categories, including both the main engine(s) and auxiliary engine(s) in the estimate. The main engine (ME) fuel consumption of a ship category is estimated by multiplying the number of ships in each category with the average ME power to find the installed power (kW) by category. The annual power outtake (kW·h) is then estimated by multiplying the installed power with a category-specific estimate of the operating hours of the main engine and the average engine load factor. Finally, the fuel consumption is estimated by multiplying the power outtake with the specific value of fuel oil consumption that is applicable to the engines of the given category (g/kW·h).

This approach is different from the approach used in previous IMO work, which was based on the use of fuel statistics. Fuel statistics have their limitations with respect to coverage, consistency of reporting and accuracy in various parts of the world, presenting a risk of errors and under-reporting in fuel statistics. The difference between the fuel statistics and the activity-based estimate is about 30%.

The following table explains the calculation of emissions from marine vessels. The marine module uses its own simplified turnover module to model improvements in fuel efficiency over three time periods: 2015-19, 2020-24, and 2025-2050.

TABLE 9. MARINE TAB STRUCTURE

Table	Description
TTW Emissions – From IMO	Contains lowerbound and upperbound emissions estimates from IMO, in million metric tons. Values in these tables reflect IMO estimates which have been stripped of projected efficiency gains. We then incorporate our own assumptions about efficiency gains.
“Turnover” Module (Lowerbound and Upperbound)	<p>Computes share of vessels of each age, assuming no growth in fleet stock and constant turnover rates to maintain an average fleet age of 30 years. Each year, the oldest 1/30th of ships retire and are replaced one-for-one with ships of that model year. For each time period:</p> $\text{Share of vessels in each model year} = 1/30$ <p>If vessel age is between 0 and 30, and zero otherwise. The second part of the table sums fleet shares in each model year into four time periods, each with its own assumed average fleet efficiency.</p>
Growth in Fleet Stock (Lowerbound and Upperbound)	<p>Growth in the fleet stock is assumed to be proportional to growth in emissions. For each time period after 2010:</p> $\text{Additional stock to fulfill new demand (\%)} = \%\Delta(\text{Emissions})$ <p>Adjusts share of vessels made in each time period, assuming that 100% of</p>

	additional stock consists of new vessels.
Improvements	Contains input assumptions about overall efficiency improvements for vessels manufactured in each time period: 2015-2019, 2020-24, and 2025-2050. Units are in terms of percent improvement from Pre-2015 average.
TTW Emissions – Adjusted from IMO, Base case (Lowerbound and Upperbound)	<p>Adjusts IMO emissions estimates downward based on fleet age composition and efficiency improvements specified in previous table. These estimates are equivalent to the original IMO estimates if “improvements” are set to zero. Adjusted emissions are equal to the sum of adjusted emissions from each the four vessel time periods:</p> $Adjusted\ Emissions = IMO\ Emissions * \sum_{t=Pre-2015}^{2025-2050} (\% \text{ of fleet manufactured}_t) * (1 - \% \text{ improvement}_t)$ <p>Where t denotes the time period in which vessels were manufactured.</p>
TTW Emissions, Trajectory case (Lowerbound and Upperbound)	<p>Adjusts base case TTW emissions downward based on “Total Average” efficiency improvements in “CO₂ Emission Savings” tables. For each time period:</p> $TTW\ Emissions_{Tra.} = TTW\ Emissions_{Ref.} * (1 - \% \text{ avg. savings})$ <p>Local air pollutants are multiplied by a conversion factor.</p>
Emissions (Final)	Equal to “Lowerbound”, “Upperbound”, or “Average” emissions as specified in “Method”.

4.G. CONFIG

Many of the formulas and data validation selections in the model refer to a list of names or data contained in this sheet. These lists include the regions, modes, pollutants, fuel technologies, and fuel types covered by the model.

Users should not change the “Config” tab lists, since many formulas in the model would also need to be changed to make any improvement.

Other data contained in the config tab include unit conversions between English and S.I. units, Global Warming Potentials (GWP) of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and black carbon (all relative to CO₂), and a conversion factor between PM10 and PM2.5. Users may be interested in adding a GWP value for black carbon (BC), since it is set to zero by default.

4.H. SOCIO-ECONOMIC

The Roadmap model is designed to provide a consistent basis for forecasting transportation activity across time and geography. Globally-consistent country-specific socioeconomic forecasts are generally more readily available than corresponding transportation activity forecasts. While forecasts for a limited number of transportation parameters, such as new vehicle sales, are available *for some countries*, such forecasts are generally not sufficient to accurately define overall levels of activity in the absence of corresponding data on vehicle survival rates, per-vehicle VKT, etc., especially with regard to the influence that socioeconomic development may have on such parameters over time. For these reasons, it is preferable to utilize socioeconomic forecasts as the basis for estimating future changes in transportation activity.

The Roadmap model starts with historical data on transportation activity and adjusts activity levels over time according to predicted relationships between forecasted socioeconomic data (population, GDP, and fuel prices) and transportation activity. These relationships are developed through statistical analysis of historic socioeconomic and transportation activity data. The overall methodology can be summarized in four distinct steps:

1. Develop a historic time series database of socioeconomic and transportation activity data;
2. Derive socioeconomic and transportation activity relationships from this database using statistical analysis;
3. Develop forecasts for socioeconomic parameters which can be used to predict transportation activity;
4. Use socioeconomic forecasts to derive corresponding estimates of transportation activity.

The approach employed in the Roadmap model imposes important limits in the use of developed statistical relations. Such relations are essentially restricted to a nominal role, in which they are used only to forecast *changes* in transportation activity as opposed to *absolute* activity levels. In effect, the statistical relations are used to adjust country-specific data across time, rather than predict country-specific data directly. This process preserves important country-specific and regional distinctions that are not captured in the global statistical analyses used to derive the socioeconomic relationships. This does, however, impose an additional step in the development of transportation activity estimates, namely:

5. Develop baseline transportation activity estimates for each of the countries or regions included in the Roadmap model (*i.e.*, develop transportation activity measures for historic data years 2000-2010, upon which subsequent year estimates will be based).

It is important to note that marine vessel and aircraft activity is not part of this approach. Activity estimates for these transportation modes are developed independently, as documented earlier in this report. Ultimately, the projections of transportation activity are independent of the case utilized by the Roadmap model.

Socioeconomic forecasts of population, GDP, and fuel prices are the same for the base and trajectory case, and changes in transportation activity are estimated using these common socioeconomic forecasts. By utilizing this method to forecast transport activity,

we allow users to assess the impacts of policies which reduce the growth in transport activity that would be expected according to economic and population growth. Such policies can be entered using the “Activity reduction” section in the “Inputs” tab.

To develop relationships between forecasted socioeconomic data and transportation activity, a global database containing historic national-level estimates of transportation parameters (*e.g.*, VKT, fleet populations), socioeconomic data (*e.g.*, population, GDP), and geographic data (*e.g.*, land area, waterway extent) was developed using data obtained from the International Road Federation (IRF), the International Monetary Fund (IMF), and the U.S. government. Various parameters from this database were subjected to statistical regression analysis in an effort to develop predictive relationships between socioeconomic activity and transportation activity. While many of these analyses were ultimately discarded as not useful, a series of relationships was developed to estimate transportation activity for all transportation modes (except aircraft and ocean-going marine vessels).

Three socioeconomic parameters are used as the basis for all transportation activity forecasts: population, purchasing power parity gross domestic product (PPPGDP), and fuel price (expressed as a ratio to current year U.S. fuel prices). To maximize flexibility and force predictive maxima, all regression-based relationships were developed as best fit Gompertz functions (illustrated in FIGURE 6), taking the form of:³

$$\text{transportation parameter} = \text{UBL} \times e^{\left[\text{IP} \times e^{(\text{GRP} \times \text{socioeconomic parameter})} \right]}$$

where: UBL is the upper bound regression limit,
IP is the regression parameter that determines the y-axis intercept, and
GRP is the regression parameter that determines the function rate of change.

FIGURE 6. GOMPERTZ CURVE FOR PASSENGER ACTIVITY

³ A Gompertz function can generally be thought of as an “S” curve that starts at an asymptotic minimum value and rises up through an intermediate inflection point to an asymptotic maximum value. The flexibility of such a function derives from its ability to approximate not only S-shaped relationships, but also linear and exponential relationships (that are reflected as constrained portions of the larger S-shaped curve). Given this flexibility and the extensive data management required to undertake the documented statistical investigation, Gompertz functions were used without exception as the basic curve fitting criteria.

Passenger Activity

For passenger activity, vehicle ownership rates (total vehicles per capita) are estimated on the basis of per capita PPPGDP using: UBL = 1, IP = -3.20579, and GRP = -5.4×10^{-5} ($r^2 = 0.59$, $t_{IP} = -62$, $t_{GRP} = -52$, observations = 1,886). These vehicle ownership rates are used to estimate a secondary socioeconomic parameter, denoted as fuel price adjusted PPPGDP (FPA-PPPGDP), which is calculated as:

$$\text{FPA - PPPGDP} = [\text{PPPGDP} \times \text{maximum}(1 - \text{VPC}, 0)] + \left[\frac{\text{PPPGDP}}{\text{Fuel Price Ratio}} \times \text{minimum}(\text{VPC}, 1) \right]$$

where: VPC is the estimated number of vehicles per capita (used as an estimate of the fraction of the population with transportation activity expenses affected by fuel prices, and Fuel Price Ratio is the local fuel price relative to the current year U.S. fuel price.

Total per capita transportation passenger activity is then estimated on the basis of FPA-PPPGDP using: UBL = 30,000 (km/year), IP = -4.55045, and GRP = -7.5×10^{-5} ($r^2 = 0.71$, $t_{IP} = -39$, $t_{GRP} = -32$, observations = 403).

It is important to note several issues related to the development and use of these socioeconomic-based activity predictions. First, the underlying dataset includes time series data for as many as 201 country-level jurisdictions beginning in 1980 and running nominally through 2007. The IRF transportation dataset goes back further, to 1963, but the WEO economic dataset starts in 1980. There are a few data points for 2008, but these are not common. Second, most of the data are missing for any given analysis, so that the number of countries reflected in a regression analysis will be far fewer than 201 and will not include data for all years of the time series for those countries that are included. Third, the data are analyzed in the aggregate. This is generally necessary since the range of the independent socioeconomic regression parameter is not sufficient for individual countries or even individual geographic regions to allow transportation activity forecasts to be reliably developed for expected future socioeconomic conditions (in effect, significant extrapolation would be required if the dataset were not analyzed in the aggregate). In all cases, visual examination of the data on a regionally-specific basis was undertaken to ensure that no obvious geographic distinctions were overlooked.

To reiterate, regression-based transportation activity forecasts are used only to predict changes in country-specific activity. Country-specific activity estimates were developed independently of the regression analysis and are used for the 2000 and 2005 time periods (and other periods where available, including data for future years if the user wishes to “override” the socioeconomic-based forecasts). Activity forecasts for all years for which local activity data are not available are estimated by adjusting the local activity data for the last available data year by the change in predicted transportation activity over those same years. Doing so ensures that local deviations from global socioeconomic-transportation relations are maintained throughout the forecast period, greatly reducing regression correlation issues that might otherwise introduce significant local uncertainty into the activity estimation process.

Passenger activity estimates are disaggregated into road and rail shares. The road share of activity is estimated on the basis of FPA-PPPGDP using: UBL = 1, IP = -0.10112, and GRP = -1.8×10^{-5} ($r^2 = 0.01$, $t_{IP} = -14$, $t_{GRP} = -1.8$, observations = 403). The passenger rail share of activity is simply one minus the road share. As indicated by the near-zero correlation coefficient of

the road share regression, there is a large degree of variation about this nominal relation across countries, but the regression coefficients are significant at the 93 percent confidence level. Given the near linear rate of change of the regression equation and the fact that associated regression predictions are used only to estimate relative changes in actual country-specific data, the nominal relationship appears reasonable for a first-cut approach.

The road share of passenger activity is further disaggregated into light-duty vehicles (passenger cars and light passenger trucks), motorcycles (and three wheelers), and bus shares using the following procedure. First, VKT for each of the three modes is estimated on the basis of FPA-PPPGDP. Second, assumed load factors are applied to the VKT estimates for each mode to convert VKT to total passenger activity estimates. Third, the passenger activity shares for each mode are estimated by dividing the mode-specific passenger activity estimate by the total passenger activity estimate for all three modes.

Two specific issues complicated the regression analysis performed to estimate VKT for the three road transportation modes. First, outlier data exerted undue influence in the analysis. That is not to say that outliers were not also present in the previously discussed data, but simply that the influence of such outliers was unacceptably high in the mode-specific VKT regressions due to the magnitude of associated deviation. Thus it was necessary to treat the outliers directly. Second, the VKT data appear to be bimodal for both motorcycles and buses. This is consistent with intuition given that both public (bus) and inexpensive (motorcycle) transport modes would be expected to be accessed first in developing societies with lower ranges of personal income. Following this trend, it is also expected that increases in VKT would occur in line with increases in GDP. However, as personal income continues to increase, less-public and more-expensive modes (such as cars and light trucks) become more popular. As VKT for light duty vehicles increases, public, cheaper alternatives (again, motorcycles and buses) begin to exhibit a dampened VKT trend. Regression analysis was performed over two distinct FPA-PPPGDP ranges to capture this effect.

A relatively simple and conservative procedure was utilized to identify and remove outliers from the VKT analysis datasets. First, the 20th and 80th percentile FPA-PPPGDP and per capita VKT data were calculated. A linear rate of change (slope) and implied zero FPA-PPPGDP VKT estimate (y-axis intercept) were calculated from these data. Minimum and maximum allowable deviations at the y-axis (zero FPA-PPPGDP) were established at the calculated y-axis intercept plus and minus two times the per-capita VKT range observed between the 20th and 80th percentiles. The minimum and maximum allowable deviations were expanded across the FPA-PPPGDP (x-axis) range using the slope calculated from the 20th and 80th percentile data, but increased by 50 percent to define the maximum data limit and decreased by 50 percent to define the minimum data limit (in effect creating an ever-increasing cone of “data acceptability” across the FPA-PPPGDP range. This process allows for substantial data variability and most certainly misses a substantial number of outliers. It does, however, remove those outliers that exert undue influence on nominal relations due to their inordinate deviation. In total, 9 outliers were removed from 757 passenger car data observations, 26 outliers were removed from 371 motorcycle (and three wheeler) observations, and 50 outliers were removed from 726 bus observations.

The following table shows the regression results for predicting changes in passenger activity based on measures of GDP, with the identified outliers removed. The parameter estimates are reported according to the following function, as described earlier:

$$\text{transportation parameter} = \text{UBL} \times e^{\left[\text{IP} \times e^{(\text{GRP} \times \text{socioeconomic parameter})} \right]}$$

TABLE 10. PASSENGER ACTIVITY REGRESSION RESULTS

Transportation parameter	Measure of GDP	Parameter estimates	Model fit and number of observations
Light-duty vehicle VKT	FPA-PPPGDP	$t.p. = 11,000 * e^{-4.28775 * e^{(-8 \times 10^{-5}) * \text{GDP}}}$	$r^2 = 0.38$ $t_{IP} = -16$ $t_{GRP} = -12$ $n = 621$
Motorcycle VKT	FPA-PPPGDP	For per-capita FPA-PPPGDP up to 22,705 (2005 \$US) $t.p. = 2,000 * e^{-4.5927 * e^{(-2.5 \times 10^{-5}) * \text{GDP}}}$ For per-capita FPA-PPPGDP > 22,705 (2005 \$US) $t.p. = 4,000 * e^{-1.92273 * e^{(2.36 \times 10^{-5}) * \text{GDP}}}$	First equation: $r^2 = 0.21$ $t_{IP} = -38$; $t_{GRP} = -9.1$ $n = 311$ Second equation: $r^2 = 0.18$ $t_{IP} = -2.3$; $t_{GRP} = -2.6$ $n = 34$
Bus VKT ⁴	FPA-PPPGDP	For per-capita FPA-PPPGDP up to 15,925 (2005 \$US) $t.p. = 1,000 * e^{-3.83617 * e^{(-2.2 \times 10^{-5}) * \text{GDP}}}$ For per-capita FPA-PPPGDP > 15,925 (2005 \$US) $t.p. = 1,000 * e^{-2.59032 * e^{(2.22 \times 10^{-6}) * \text{GDP}}}$	First equation: $r^2 = 0.18$ $t_{IP} = -56$; $t_{GRP} = -11$ $n = 551$ Second equation: $r^2 = 0.00$ $t_{IP} = -21$; $t_{GRP} = 1.1$ $n = 324$

Load factors that convert VKT to passenger kilometers of travel are assumed to be 1.5 for passenger cars and motorcycles and 20 for buses. These assumptions are based on limited analysis of available data. While considered reasonable as global averages, these load factors can be expected to vary locally. Moreover, while these factors influence passenger kilometer mode shares, the shares themselves are not utilized directly—only the relative relationships between mode-specific shares are used to determine changes in mode share over time. In effect, the absolute predictions are of little consequence so long as they are consistent across time.

Finally, mode-specific shares of overall transportation passenger activity are calculated by dividing predicted mode-specific activity by the sum of the predicted activity for passenger cars, motorcycles, and buses. The resulting mode split functions are depicted in FIGURE 7. To

⁴ As one might expect, per-capita bus activity varies tremendously throughout the world in accordance with many factors beyond the analysis scope of this first-cut effort. This variation is especially true in the higher GDP ranges. As a result of this variation, the ability of any nominal relation to fit the behavior observed in any given country is limited at best -- as exhibited by the essentially non-existent correlation and insignificant rate of change parameter as per capita GDP rises above about 16,000 (2005 US\$). Nevertheless, since the resulting regression equation holds per capita bus demand essentially flat across the higher GDP range, it was deemed reasonable for this first-cut effort -- especially given that the relation is not used in an absolute sense (i.e., only the ratio of predictions are utilized to forecast changes in, as opposed to absolute levels of, activity). It should also be noted that although 874 observations are implied in the presented bus regression statistics, there are actually a total of 726 observations. To ensure a smooth transition between the lower and upper range GDP functions, 148 “boundary area” observations were included in the regression analysis for both GDP ranges.

reiterate, the forecasted mode shares are used *only* to predict expected changes in country-specific mode shares. Country-specific activity estimates by mode (developed independent of the regression analysis) are always used for at least the 2000 and 2005 calendar years (and other years where available). Activity forecasts for all years for which local activity data are not available are estimated by adjusting the local activity data for the last available data year by the change in predicted transportation activity over those same years, ensuring that local deviations from nominal socioeconomic-transportation relations are maintained throughout the forecast period.

FIGURE 7. PASSENGER ACTIVITY MODE SHARES FUNCTION

Freight Activity

Freight activity forecasts are based on the same data sources and general methodologies as passenger activity forecasts – specifically, a global-scale regression analysis is performed to develop a nominal relationship between socioeconomic and transportation activity, and that relationship is used to forecast changes in (as opposed to absolute values of) transportation activity over time. Activity forecasts are developed separately for road freight, rail freight, and inland waterway freight. Because there is no ability to resolve the road data into specific vehicle types, the statistical relationship for road activity as a whole is used without change to forecast *changes* in light-heavy, medium-heavy, and heavy-heavy duty truck activity (i.e., the rate of change, as opposed to the level of activity, is the same across all vehicle types).

An outlier analysis identical to that described above for passenger vehicle mode share data was performed for the road, rail, and inland waterway freight data. A total of 6 outliers were removed from 627 road freight observations, 84 outliers were removed from 1,239 rail freight observations, and 39 outliers were removed from 719 inland waterway freight observations.

The following table shows the regression results for predicting changes in freight activity based on measures of GDP. The parameter estimates are reported according to the following function, as described earlier in this section:

$$\text{transportation parameter} = \text{UBL} \times e^{\left[\text{IP} \times e^{(\text{GRP} \times \text{socioeconomic parameter})} \right]}$$

TABLE 11. FREIGHT ACTIVITY REGRESSION RESULTS

Transportation parameter	Measure of GDP	Parameter estimates	Model fit and number of observations
On-road freight activity (ton-km/year) per capita	FPA-PPPGDP	$t.p. = 8,000 * e^{-4.36364 * e^{(6.9 * 10^{-5}) * \text{GDP}}}$	$r^2 = 0.18$ $t_{IP} = -16$ $t_{GRP} = -12$ $n = 621$
Rail freight activity (ton-km/year) per capita	PPPGDP	$t.p. = 8,000 * e^{-4.23512 * e^{(-2.5 * 10^{-5}) * \text{GDP}}}$	$r^2 = 0.14$ $t_{IP} = -44$ $t_{GRP} = -14$ $n = 1,155$
Inland waterway freight activity (ton-km/year) per capita	PPPGDP	$t.p. = 4,000 * e^{-5.96753 * e^{(-4.2 * 10^{-5}) * \text{GDP}}}$	$r^2 = 0.33$ $t_{IP} = -39$ $t_{GRP} = -18$ $n = 680$

Mode-specific shares of overall transportation freight activity are calculated by dividing predicted mode-specific activity by the sum of the predicted activity for road, rail, and inland waterway freight. The resulting mode share functions are depicted in FIGURE 8. As stated above, the forecasted mode shares are used only to predict expected changes in country-specific mode shares. Country-specific activity estimates by mode (developed independent of the regression analysis) are always used for at least the 2000 and 2005 calendar years (and other years where available). Activity forecasts for all years for which local activity data are not available are estimated by adjusting the local activity data for the last available data year by the change in predicted transportation activity over those same years, ensuring that local deviations from nominal socioeconomic-transportation relations are maintained throughout the forecast period.

FIGURE 8. FREIGHT ACTIVITY MODE SHARE FUNCTIONS

Socioeconomic Baseline and Forecast Data

As described above, transportation activity estimates are based on historic activity estimates that have been adjusted to account for changes expected to result from changing socioeconomic conditions. Therefore, calculating activity changes naturally requires forecasts of socioeconomic data, specifically data for population, PPPGDP, and relative fuel prices.

The WEO database used to develop the historic socioeconomic/transportation activity relations also contains data on population and PPPGDP for 2000 through 2014 (with forecasts generally beginning either in 2007 or 2008, varying by country). Generally, data were available for 180 country-level jurisdictions throughout this period, with minor exceptions. The exceptions were both population and PPPGDP data for 2000 and 2001 for Afghanistan and population and PPPGDP data for 2000-2003 for Iraq. In all cases, these missing data were estimated through simple extrapolation of the 2001-2002 data for Afghanistan and 2004-2005 data for Iraq. Data for 2015 were estimated for all 180 jurisdictions by applying the calculated annual 2010-2014 growth rate to forecasted 2014 data. This resulted in baseline population and PPPGDP estimates for 2000, 2005, and 2010, as well as corresponding forecast data for 2015, required as input for the Transportation Roadmap model.

Population forecast data through 2050 were obtained from the U.S. Census Bureau's International Data Base (IDB). The 228 country-level jurisdictions included in the IDB were consistent with the 180 country-level jurisdictions included in the WEO database once appropriate aggregations were undertaken (the IDB database reports data for many island protectorates separately, while the WEO aggregates populations under protecting country for its data). Since the IDB data may be inconsistent with the base data and forecasts developed by the WEO, the IDB data were converted to annual population growth rates for the five year periods 2015-2020, 2020-2025, 2025-2030, 2030-2035, 2035-2040, 2040-2045, and 2045-2050. The resulting growth rates were then applied to the estimated WEO 2015 data to develop WEO-consistent data for 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, and 2050 as required for the Transportation Roadmap model.

GDP forecast data for 22 countries were obtained from a report produced by Goldman Sachs Economic Research (GSER) in 2007. Nine of these countries matched, on a one-to-one basis, one of the 16 regions included in the Transportation Roadmap model. Four of the EU27 countries were included in the 2007 report, as were five Asian, three Middle Eastern, and one African country, all of which are modeled in the Transportation Roadmap as components of aggregate regions. Thus, in total, the GSER report included data for 13 of the 16 regions included in the Transportation Roadmap model (data for the "rest of Europe," "rest of Latin America," and Australia were not included). The GDP forecasts included in the GSER report were based on population forecasts that differed somewhat from those used to derive the Transportation Roadmap population forecasts (as described above). To equilibrate the data, the GSER forecasts were converted to per-capita GDP using GSER population data and overall GDP estimates were then revised to reflect the population estimates used for the Transportation Roadmap. Since the resulting data may still be inconsistent with the base data and forecasts developed by the WEO, the adjusted GSER data were converted to annual GDP growth rates for the five-year periods 2015-2020, 2020-2025, 2025-2030, 2030-2035, 2035-2040, 2040-2045, and 2045-2050. The resulting growth rates were then applied to the estimated WEO 2015 data to develop WEO-consistent data for 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, and 2050 as required by the

Transportation Roadmap model. This approach was used without exception for each of the 13 Transportation Roadmap regions covered by the GSER data.

For those regions not covered directly by the GSER data, an alternative approach was employed. Under this approach, the GSER growth rate data were used to create a two-element database with each record consisting of a country-specific growth rate for one five year period and the corresponding country-specific growth rate for the next five-year period. This resulted in a database containing 154 matched pairs of growth rates (22 countries multiplied by 7 growth rate pairs per country -- including the 2010-2015 period that was not used for the countries covered directly since forecast data for 2015 was available in the primary WEO dataset). These data were then regressed to determine if the GDP growth rate for one period could reasonably be estimated from the GDP growth rate for a preceding period. The resulting regression equation indicates that such an assumption is reasonable, with the growth rate for period “x” being equal to the growth rate for period “x-1” times 0.975784292 plus 0.000848845 (with a correlation coefficient of 0.97 and t statistics for the coefficient and intercept of 69 and 1 respectively). Although the regression could have been reformulated with the intercept dropped, it was implemented as described given the essentially minor variation from a one-to-one relationship. With this relationship, the GDP growth rates for the regions not covered directly by the GSER data were developed for the five-year periods 2015-2020, 2020-2025, 2025-2030, 2030-2035, 2035-2040, 2040-2045, and 2045-2050 from the calculated WEO growth rates for 2010-2015. The resulting growth rates were then applied to the estimated WEO 2015 data to develop WEO-consistent data for 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, and 2050 as required by the Transportation Roadmap model

Relative fuel prices were developed on the basis of gasoline price ratios calculated from the IRF database. Price ratios were calculated at the WEO country level for the latest year in which data were available and then weighted by population to determine an aggregate ratio for each of the regions included in the Transportation Roadmap model. Fuel price data for 2008 were used for 161 of the 180 country-level jurisdictions, while data for the other jurisdictions were based on 2006 data (4 jurisdictions), 2004 data (2 jurisdictions), 2002 data (1 jurisdiction), and 1994 data (1 jurisdiction). Fuel price data were not available for 11 minor jurisdictions, and thus these jurisdictions were not included in the population-weighted averages for the affected regions. The resulting ratios were applied without change across the Transportation Roadmap forecast period.

All transportation activity forecasts were then derived using the resulting socioeconomic forecast dataset. Both the socioeconomic forecasts and the dependent transportation activity forecasts are available for review as part of the “Socio” module of the Transportation Roadmap model.

Baseline Transportation Activity Data

As described above, nominal transportation activity estimates are based on forecasted socioeconomic activity. However, the resulting transportation activity estimates are used solely to derive expected *changes* in transportation activity, as opposed to absolute activity levels. Thus, it is necessary to develop baseline transportation activity estimates for each of the regions included in the Transportation Roadmap model -- to which the forecasted changes in transportation activity can be applied.

Generally, the baseline data estimates were developed by analyzing data from the IRF transportation activity database. However, as described above, there are considerable “missing”

data in this database and it is necessary to account for this to ensure that derived estimates are accurate. For this reason, absolute transportation activity estimates (e.g., passenger kilometers, freight tonne-kilometers) are initially calculated on a per-capita basis. They are then expanded using the U.S. Census Bureau's population estimates from the IDB (International Data Base) described in the previous section to derive equivalent activity estimates for the complete regions covered by the Transportation Roadmap.

Additionally, there can be considerable variability in the IRF data across time. Therefore, while baseline data for calendar years 2000 and 2005 were developed, the data for these years was generally not used directly as inputs. To ensure consistency in the developed data, average per capita activity estimates were developed for the 1997 through 2007 data period and the resulting average estimates were applied to 2000 and 2005 population estimates to derive absolute activity estimates for 2000 and 2005, respectively. To further ensure consistency, data was only included in the 1997 through 2007 averaging process if the fraction of total regional population reflected in the data was not dramatically different from that of other years in the 1997 through 2007 period. For example, if 40 percent of the population was reflected in the 2003 data, while 90 percent of the population was reflected in the data for other years, the 2003 data were omitted from the averaging procedure.

Finally, there were some instances where no data were available for the 1997 through 2007 time period. In such cases, data from earlier years was used as available -- again, on a per capita basis so that the data are "time corrected" when applied to 2000 and 2005 population estimates. In cases where data from earlier years were not available, per capita activity estimates from nearby and similar geographic areas were substituted.

Using this methodology, freight activity data were developed for road, rail, and inland waterway tonne-kilometers individually. However, the IRF road data is not differentiated by the light-heavy (LH), medium-heavy (MH), and heavy-heavy (HH) vehicle categories used in the Transportation Roadmap model. As a result, a supplemental analysis was employed to disaggregate these data. Available data for the U.S. was employed to estimate the LH, MH, and HH fractions as follows. Truck population and average annual kilometer per truck data, by class (1-8), were obtained from Table 5-4 of the 2009 Transportation Energy Data Book published by Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy. These data were disaggregated into gasoline/diesel and commercial/non-commercial shares using vehicle class-specific data from the U.S. Environmental Protection Agency's MOBILE6.2 and MOVES2010 emission factor models. Using an assumption that each class of trucks carries, on average, one-half of its allowable gross vehicle weight, total class-specific tonne-kilometer estimates were calculated. Finally, assigning truck class 2a (<3856 kg GVW) to the LH truck category, truck classes 2b-6 (3856-11794 kg GVW) to the MH truck category, and truck classes 7 and 8 (>11794 kg GVW) to the HH truck category, yielded tonne-kilometer fractions of 6.3, 13.2, and 80.5 percent for LH, MH, and HH trucks respectively. In the absence of alternative data, these same fractions were applied across geographic regions for both the 2000 and 2005 calendar years to disaggregate total road freight data into corresponding LH, MH, and HH components.

Baseline total passenger kilometer activity (road plus rail) was determined from the IRF data using the average 1997-2007 per capita approach described above. The road share of total passenger activity was similarly determined from the IRF data using the same average 1997-2007 approach, but not on a per capita basis. *Vehicle* kilometer (as opposed to passenger

kilometer) activity was also estimated separately for passenger cars, motorcycles, and buses using the average 1997-2007 per capita approach. These data were converted to passenger kilometer equivalents using global average passenger-per-vehicle estimates of 1.5 for passenger cars, 1.0 for motorcycles, and 10.0 for buses. These load factors were selected such that *total* global activity using the converted vehicle kilometer data was within one percent of total road passenger activity using the aggregate passenger kilometer data. Greater variation is observed within specific regions, however. Passenger kilometer mode shares were developed by dividing the mode-specific passenger kilometer estimates by the sum of the individual mode estimates.

Since the Roadmap model treats motorcycles and three-wheelers separately, it is necessary to further disaggregate the motorcycle mode share into its two and three wheeler components. The IRF database provides no data at this level of resolution, so data from the WBCSD-IEA/SMP Transport Model were used to disaggregate the motorcycle mode share data. Since three-wheeled vehicles are generally limited to India, China, and the “Other Asia” regions of the Transportation Roadmap model, the three-wheeler share of activity for all other regions was set to zero. Based on WBCSD-IEA/SMP data, the Asian region three-wheeler shares were set to 20.6, 23.1, and 17.5 percent of motorcycle passenger activity for the India, China, and “Other Asia” regions.

All of the developed baseline data are available for review as part of the “Socio” tab in the Roadmap model. Ultimately, all such data are subject to continuing review and ideally should be replaced by locally-provided data to ensure that the most robust dataset available is utilized.

4.1. SURVIVAL

Survival Inputs

The “Survival” tab contains vehicle fleet turnover information, sales growth and VKT by age distributions. The purpose of the survival tab is to calculate the share of VKT by vehicles in each age category, since emissions and fuel efficiency vary by model year and vehicle age. The vehicle fleet turnover model is characterized by a Weibull distribution reliability function with three parameters (b , g and T) as follows:

$$x(k) = \exp \left\{ - \left[\left(\frac{k - g}{T} \right)^b \right] \right\}$$

where $x(k)$ is the probability that lifetime is greater than or equal to k ; k is the vehicle age in years; g is the age at which vehicles are removed from the fleet ($g \geq 0$); b is the failure steepness; and T is the characteristic service life.

FIGURE 9 shows the effects of changing b , g , and T for a sample survival curve, where the horizontal axis denotes vehicle age and the vertical axis denotes the percent of vehicles that survive until the next year. As shown, increasing the parameter b increases the steepness of the slope, increasing g shifts the curve to the right, and increasing T stretches the curve along the horizontal axis.

FIGURE 9. SAMPLE SURVIVAL CURVE

TABLE 12 shows sample survival curve coefficients for different modes.

TABLE 12. SAMPLE SURVIVAL CURVE PARAMETERS

Mode	b	T	g
LDV	1.9	16.0	4.0
HDT	1.8	20.0	2.0
Rail	2.5	29.0	0.0
Aviation	4.1	26.0	7.0
MCs	6.0	8.5	0.0

The Weibull Distribution coefficients in the model are fitted against actual survival curve data points (see model for references). Due to data considerations, unique survival curves have not been estimated for each region and mode covered by the model; rather, a set of representative curves have been estimated and applied to groups of similar regions. The model allows for three user-defined curves to be entered and applied to specific modes or countries.

Users interested in using custom survival curves estimated from country-specific data should keep in mind that the probability of survival for each vehicle of age $k \leq g$ should be equal to one. The share of vehicles surviving past age $k = g$ should be calculated using the Weibull distribution function.

Survival Methods

As in other tabs, the trajectory and base case are displayed side by side in the “Survival” tab.

The following table describes the “Survival” tab calculation process which is identical for both the base and trajectory cases.

TABLE 13. SURVIVAL TAB STRUCTURE

Table	Description
Survival rate - Weibull distribution coefficients	Contains survival curve coefficients for representative regions and each mode category. Estimated coefficients were fitted against actual survival curve data points. Includes three user-defined curves.
Survival rates at age x	Computes share of vehicles surviving at each age (0 thru 40 years). Based on Weibull Distribution Coefficients in the previous table according to the following equation: $x(k) = \exp \left\{ - \left[\left(\frac{k - g}{T} \right)^b \right] \right\}$
Share of vehicles retiring at age x	Computes the share of vehicles retiring each year for each general distribution function. For each vehicle at age x: $\text{Share of vehicles retiring}_x = \% \text{ surviving}_{x-1} - \% \text{ surviving}_x$
Annual distance accumulation	Input. Normalized or absolute annual distance traveled by vehicle age.
Absolute VKT* for vehicles x years old given an annual % increase in sales (VKT)	Annual distance traveled by vehicles of age x, corrected for annual sales growth: $\text{Absolute VKT}_x = \text{Survival rate}_x * \left(\frac{\text{distance}}{\text{vehicle}_x} \right) * (1 + \% \text{ annual sales growth})^{40-x}$
VKT share by age (%)	Share of VKT by vehicles of age x: $\text{Share of VKT}_x = \text{Absolute VKT}_x / \sum_{x=0}^{40} \text{Absolute VKT}_x$
Share of VKT by vehicles older than x years (%)	Share of VKT traveled by vehicles age x or older: $\text{Share of VKT}_{age \geq x} = \text{Share of VKT}_x + \text{Share of VKT}_{age \geq (x+1)}$
Share of VKT by vehicles older than x years (%) – LDV, MC, HDT**, Rail, Aviation	Share of VKT by vehicles age x or older given by previous table. Users can specify which general distribution function is applied to each region and mode.

*Aviation calculations use RPKT instead of VKT.

**Buses use the same survival curve distributions as Heavy Duty Trucks.

The survival tab’s primary outputs are the share of VKT for vehicles at each age. These are used to determine the **share of vehicle activity**, **fleet average fuel economy**, and the **share of VKT by emission standards** in the mode-specific “Calc” tabs. For on-road modes and rail, the share of VKT by age calculated in the “Survival” tab is used to compute **VKT fractions by emission level bins** for gasoline and diesel vehicles. In these tables, vehicles are sorted into emissions standard categories based on vehicle age and region.

5. REFERENCES

Data references are included in the “Reference” tab of the model. This section documents some of the key data sources used and discusses needs for additional data.

Data Sources & Needs

International Road Federation (IRF), World Road Statistics Compilation, 1963-1999. This IRF database provides historic fleet characterization and activity data for road vehicles. These data were used to develop statistical relationships between economic and transportation activity, allowing standardized economic forecasts to serve as the primary driver of Transportation Roadmap activity. Both availability and quality of the IRF data vary widely across countries and over time. As a result, it is difficult, in most cases, to develop precise relationships on a country-specific basis. Nevertheless, analysis of data in the aggregate allow for general globally-based *relative* trends to be developed.

International Monetary Fund, World Economic Outlook (WEO) Database, October 2009 edition. This WEO database provides historic economic data by country (e.g., purchasing power parity gross domestic product). Linking these data to the transportation data extracted from the IRF database forms the basis for a statistical analysis dataset, allowing for the derivation of historic relationships between economic and transportation activity.

Central Intelligence Agency, The World Factbook 2009. The World Factbook contains a wide range of information collected by various U.S. government agencies, including data on the geography and transportation systems of all global countries. Data such as roadway, inland waterway, and rail system lengths, as well as geographic land area, were used to develop various national-level unit metrics (e.g., activity per roadway kilometer) for evaluation as potential economically-dependent parameters.

U.S. Census Bureau, International Data Base (IDB), accessed as of June 15, 2010 at: <http://www.census.gov/ipc/www/idb/index.php>. The IDB contains a wealth of demographic data for countries and country-level areas of the world, including population forecasts through 2050. Population forecasts from the database were used to develop population growth rates for each of the regions included in the Transportation Roadmap.

Goldman Sachs Economic Research, “The N-11: More Than an Acronym,” Global Economics Paper No: 153, March 28, 2007. This Goldman Sachs paper includes GDP forecasts through 2050 for 22 countries. These forecasts were used in conjunction with WEO GDP forecast data through 2015 to develop GDP growth rates through 2050 for each of the regions included in the Transportation Roadmap.

U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, “Transportation Energy Data Book,” ORNL-6984, Edition 28, 2009. The Transportation Energy Data Book contains a wealth of information on fleet characteristics and transportation activity. Since these data are predominantly applicable to the U.S., the Data Book is not considered to be a primary data source, but the data are valuable (and were used for limited purposes as described in the sections below) in the absence of alternative globally-scoped data sources.

U.S. Environmental Protection Agency, MOBILE6 Vehicle Emission Modeling Software, accessed as of June 15, 2010 at: <http://www.epa.gov/otaq/m6.htm>. The MOBILE6.2 emission factor model includes substantial data related to fleet characteristics and transportation activity. Since these data are predominantly applicable to the U.S., MOBILE6.2 is not considered to be a primary data source, but the included data are valuable (and were used for limited purposes as described in the sections below) in the absence of alternative globally-scoped data sources

U.S. Environmental Protection Agency, MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), accessed as of June 15, 2010 at: <http://www.epa.gov/otaq/models/moves/index.htm>. The MOVES2010 emission factor model includes substantial data related to fleet characteristics and transportation activity. Since these data are predominantly applicable to the U.S., MOVES2010 is not considered to be a primary data source, but the included data are valuable (and were used for limited purposes as described in the sections below) in the absence of alternative globally-scoped data sources

World Business Council for Sustainable Development, IEA/SMP Transport Model, accessed as of June 15, 2010 at: <http://www.wbcsd.org/plugins/DocSearch/details.asp?type=DocDet&ObjectId=MTE0Njc>. The IEA/SMP Transport Model is conceptually similar to the Transportation Roadmap model. As a result, it can serve as a secondary source of transportation activity indicators in instances where primary data are lacking. While reliance on the IEA/SMP Transport Model is intentionally limited due to uncertainty over data sources, etc., it is nevertheless an important reference when alternatives are non-existent.

Additional data needs. Given the first-cut nature of the socioeconomic analyses and baseline data development work performed to date, ongoing development work will proceed as the Roadmap project continues. To support this work and the extensive time series requirements needed to relate transportation and socioeconomic activity, more refined data sources are desirable. While it is recognized that such sources are unlikely to surface on a globally-consistent scale, every effort will be undertaken to ensure the highest quality data possible given existing resources.

APPENDIX A. LIST OF ACRONYMS

Acronym	Term
BC	Black carbon
CH ₄	Methane
CNG	Compressed natural gas
CO	Carbon monoxide
CO ₂	Carbon dioxide
CO ₂ e	Carbon dioxide-equivalent
FPA	Fuel price-adjusted
GDP	Gross domestic product
GHG	Greenhouse gas
GVWR	Gross vehicle weight rating
HHDT	Heavy heavy-duty trucks
LDV	Light-duty vehicles
LHDT	Light heavy-duty trucks
LPG	Liquified petroleum gas
MHDT	Medium heavy-duty trucks
N ₂ O	Nitrous oxide
NO _x	Oxides of nitrogen
PM	Particulate matter
ppm	Parts per million
PPP	Purchasing power parity
RPKT	Revenue passenger kilometer traveled
SECA	Sulfur emission control area
SO ₂	Sulfur dioxide
TTW	Tank-to-wheels
VKT	Vehicle kilometer traveled
WTT	Well-to-tank
WTW	Well-to-wheels

APPENDIX B. ON-ROAD EMISSION FACTOR STUDY

To better understand vehicle emissions modeling, the ICCT undertook a project to review some of the software tools that are employed by various government agencies and research organizations to estimate the emission impacts of on-road transportation. The primary objectives of the study were to: 1) understand the different methodologies for generating vehicle emission estimates employed by each model, and 2) use data from each of the models to develop a set of *average lifetime* emission factors that could be used in the Roadmap model. The models selected have been highly vetted in the vehicle emission modeling community and have been used to serve a variety of regulatory and research purposes. Though these particular models were designed to estimate vehicle emissions in each of their respective regions (California, the United States and the European Union), they have also been employed by policy-makers and analysts in developing countries. The models analyzed were:

1. EMISSION FACTOR (EMFAC) model, version 2007 – the California Air Resources Board
2. MOTOR Vehicle Emissions Simulator (MOVES), version 2010a – the U.S. Environmental Protection Agency
3. The Handbook on Emission Factors for Road Transport (HBEFA), version 3.1 – Developed by a consortium of research organizations in Europe and lead by Graz University of Technology
4. COPERT, version 4 – the European Environment Agency and the Joint Research Centre
5. The Speciated Pollutant Emissions Wizard (SPEW) – Prof. Tami Bond of the University of Illinois

The average lifetime emission factors considered for the Roadmap model are given in grams of pollutant per kilometer and designed to take into account the deterioration that typically occurs in an emission control system over the life of the vehicle. To account for deterioration, the emissions were totaled for the entire vehicle lifetime and then divided by that vehicle's total lifetime kilometers traveled.

The five models analyzed during this project all use different methodologies for estimating vehicle emissions, which typically involves accounting for various parameters such as driving patterns, meteorology, vehicle age, etc. In order to compare the results across the five models and develop a set of emission factors for the specific vehicle groups in the Roadmap, it was necessary to make a number of assumptions. The main assumptions were related to: 1) choosing representative vehicle types in each of the five models that correspond to the Roadmap vehicle groups, and 2) selecting vehicle model years for EMFAC and MOVES that correspond to the European progression in emission standards (i.e. Euro 1/I, 2/II, 3/III,..., 6/VI).

After developing the average lifetime emission factors for each of the five models and selecting the representative vehicle types, the final task involved analyzing the data and determining the emission factors that might be used in the Roadmap. In reviewing the data, there was generally a large degree of variance in the emission factors of the five models. Simply averaging the five data points for each pollutant and vehicle type did not seem like an ideal solution given this high degree of variance. To avoid the straight average approach, a simplified methodology was developed to identify *outliers*. Certainly, it is difficult to designate an outlier with any statistical significance with the limited number of data points (there was a maximum of five data points per pollutant and emission level). Nevertheless, the steps of the method were as follows:

1. Determine the mean and the standard deviation for each pollutant and emission level.

2. An *outlier* is defined as any data point greater than the mean plus one standard deviation or less than the mean minus one standard deviation.
3. Average the non-outlier data points to derive potential Roadmap emission factors.

While the results of this analysis were considered for use as TTW on-road emission factors in the mode-specific input tabs of the Roadmap tool, we determined due to the large degree of variance in emission factors across models that it was better at this stage to use a single data source for consistent lifetime average emission factors across modes and regions. As a result, the Roadmap model version 1-0 uses average lifetime emission factors extracted from the U.S. EPA's MOBILE6, available at <http://www.epa.gov/oms/m6.htm>.

In recognition that there is potential for improving the accuracy and global applicability of the emission factors used in the Roadmap, the ICCT is in the process of developing a new set of emission factors; upon completion, this set will be released in an updated version of the Roadmap.

APPENDIX C. POWER SECTOR EMISSION FACTORS

The purpose of the Power Sector Roadmap is to calculate current and forecast future electricity grid emission factors (gCO₂e/KW-hr, gSO_x/MW-hr, gNO_x/MW-hr, gPM₁₀/MW-hr) for all Roadmap regions. The model provides a total of 340 emission rate outputs.

MODEL DESCRIPTION

- In the first step, IEA data from 2010-2030 is collected to determine the electric generation fuel type (coal, natural gas, oil, nuclear, renewables) for each of the 17 Roadmap Regions. In a few cases, geographic adjustments are necessary due to difference in geographic boundaries between the Roadmap Regions and IEA data.
- The second step allocates fossil fuel power plants into sub-categories.
 - Gas power production is broken down into legacy boilers, simple cycle gas turbines, and more efficient combined cycle plants.
 - Each power plant basic design is further categorized by efficiency and emission rates characteristic of new builds in a particular year (all pre-2000 legacy coal plants are assigned “1980”, the oldest category in the model)
 - Fossil plants are also assigned a nominal vintage, which may or may not represent the actual date of construction
 - For instance, “gascombined2000” represents natural gas power plants with uncontrolled emissions of 700 g/kw-hr CO₂ and 175 g/NO_x regardless of the date of construction or operational year. (Sox and fine particulate emissions are small)
 - Power plant stock representing 2010 is added to the model. Assignment of 2010 power plants by sub-category is based on nominal vintage taking into account several factors.
 - First is the age of electric utility infrastructure. For instance, the US legacy fleet of coal power plants is quite old.
 - Secondly, the physical age is adjusted based on emissions characteristics.
 - For instance, the existing stock of Chinese coal plants has characteristics more in line with older coal plants despite the newer physical age (though policy is reducing these emission rates).
 - California emission control laws push more advanced combined cycle power plant technologies into the market.
 - Population of future year power plants sub-categories are based on several factors:
 - IEA data through 2030 determines basic fuel type
 - Total rates of new builds populated in each time period after 2010 is based on 1) IEA electricity consumption growth rates and 2) a probability-based turn-over algorithm for power plants that within the range of potential retirement ages. For instance, US coal plants are assigned an assumed lifespan of 50 years with half retired within +/- 5 years of the assume lifespan.
 - Future power plant vintages are assigned based on year of construction adjusted by 1) past track record on emission rates for the Region , 2) and engineering judgment.

- The third step is determining emission rates for all fossil power plants, by Region for each time period.
 - Determining CO₂ emission rates is fairly straightforward using uncontrolled emission factors based on mass balance and plant efficiency.
 - The model has the potential to incorporate integrated combined cycle power plants with carbon capture and sequestration, but this technology is assigned zero penetration rates in current analysis due to uncertainties about potential utilization.
- Determining final post-control SO_x, NO_x, and fine PM emissions requires several additional layers of analysis.
 - Uncontrolled emission rates are defined for each fossil power plant sub-category, and for coal plants are adjusted up or down by a coal quality factor.
 - Second, emission control factors are applied based on a phase-in schedule.
 - A “Tier 1” emission control phase-in is based on emission control technology leaders. All Regions are assigned Tier 1, 2, or 3 with Tiers 2 and 3 lagging Tier 1 phase-in rates.
- The forth step is determining the average electric generation power emission rates for each pollutant in each region. Emission rates for each plant type are weighted by plant type distribution and summed
 - a transmission and distribution loss factor is applied to provide final emission values for CO₂, SO_x, NO_x, and PM in g/MW (CO₂) and g/KW (others) and g/MJ (all).
 - Steps three and four are integrated into a single table for each region and pollutant.

DATA SOURCES

- Basic resource type (coal, natural gas, oil, renewables) and overall rate of consumption increase through 2030 is primarily from the World Energy Outlook 2009.
- Efficiency levels for future new builds are based on current best-in-class permits, manufacturer literature, and engineering judgment. Projections past 2030 are preliminary. Power plant uncontrolled pollutant emission rates are determined primarily from mass-balance (CO₂, SO_x and fine particulate) and assigned control rates (NO_x).
- Coal quality SO_x, NO_x, and fine particulate emissions adjustments are based on USGS coal quality data.
- Transmission & distribution losses are set based on country-specific data where available, or at a US default level of 8%.
- The projected schedule for emission factors in "Tier 1" countries is based on ICCT's judgment. The rate of emissions control improvement is lagged in non-"Tier 1" countries, and the tiering of countries can be customized by the user.

SOURCES OF UNCERTAINTY

- The model contains several types of uncertainty.
- All predictions of future resource utilization and technology advancement are inherently uncertain
- Estimates of fine PM, SO_x and NO_x emission controls are contingent on policy decisions and implementation.
 - Fine PM emissions are extremely sensitive to emission control effectiveness. For instance, a 1% variation in emission removal rates from a 95% effective emissions control can affect emissions by about +/- 20%.
- Coal quality adjustment factors are based on available USGS samples, and were not analyzed for representative distribution.

- CCS was assigned a zero deployment rate due to lack of certainty about future policy actions and availability of storage sites. Given strong policy drivers and adequate storage, significant CCS deployment rates are technically viable.
- Results past 2030 are based on projections of trends through 2030. Results for 2040 and 2050 are subject to significant uncertainty, as generally can be expected for long-term projections.