



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO SISTEMA *BUS RAPID TRANSIT* (BRT):  
UM ESTUDO DE CASO DA TRANSCARIOCA

Isabelle Duran Martins

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Rogério de Aragão Bastos do Valle  
Ana Carolina Maia Angelo

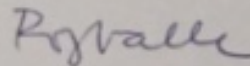
Rio de Janeiro  
Janeiro de 2017

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO SISTEMA *BUS RAPID SYSTEM* (BRT): UM  
ESTUDO DE CASO DA TRANSCARIOCA

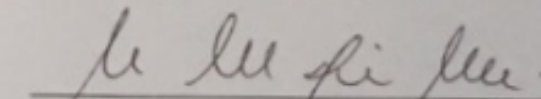
Isabelle Duran Martins

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

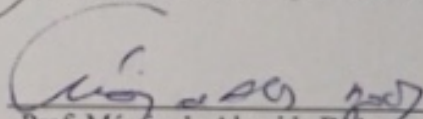


Prof. Rogerio de Aragão Bastos Vale, D.Sc.



---

Ana Carolina Maia Arigelo, M.Sc.



---

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO de 2017

Martins, Isabelle Duran

Avaliação Do Ciclo De Vida Do Sistema Bus Rapid System (BRT): Um Estudo De Caso Da Transcarioca/ Isabelle Duran Martins – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

XII, 63 p.:il.; 29,7 cm

Orientadores: Rogério de Aragão Bastos do Valle e Ana Carolina Maia Angelo

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Ambiental, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 52-60.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Sistemas de Transporte. 3. Bus Rapid Transit. 4. Impactos Ambientais. 5. Rio de Janeiro. I. Valle, Rogério de Aragão Bastos do Valle.; II. Angelo, Ana Carolina Maia III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental; IV. Título.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores Rogério Valle e Ana Carolina Maia por todo apoio, incentivo, paciência e conhecimento passado ao longo do desenvolvimento desse trabalho. A contribuição de vocês foi fundamental.

Agradeço à toda equipe do SAGE, pelas dicas, conselhos e auxílio ao longo desse ano. E também aos meus professores por compartilhar conhecimento e experiências essenciais para a minha formação.

Agradeço à minha família por ser minha base e minha maior torcida. Em especial aos meus pais, Andrea e Paulo, pelo amor, pela confiança e pela força nos momentos de fraqueza e dúvida, essenciais para a realização das minhas conquistas. Ao meu irmão, Vinícius, pelo carinho e parceria diária.

Agradeço as minhas amigas de infância, por sempre estenderem a mão quando preciso e por tornarem a vida mais leve e divertida. E aos amigos do curso, que cresceram junto comigo ao longo dessa caminhada e marcaram a minha história. Agradeço igualmente aos amigos do intercâmbio, por estarem ao meu lado no ano mais incrível de todos e por se tornarem companheiros de vida.

Agradeço a tantas pessoas de bom coração que cruzaram o meu caminho e se dispuseram a compartilhar informações e dados sem os quais não seria possível concluir esse trabalho.

Agradeço ao Professor Márcio D'Agosto por ter aceitado participar da banca de avaliação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO SISTEMA BUS RAPID SYSTEM (BRT):  
UM ESTUDO DE CASO DA TRANSCARIOCA

Isabelle Duran Martins

Janeiro/2017

Orientadores: Rogério de Aragão Bastos do Valle e Ana Carolina Maia Angelo

Curso: Engenharia Ambiental

Visto como uma alternativa de transporte sustentável, o sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) tem sido largamente adotado como uma alternativa de transporte coletivo a baixo custo e reduzido impacto ambiental negativo quando comparado a determinados modos de transporte rodoviário urbano, tais como automóvel particular. Na maior parte dos casos, as avaliações de impacto ambiental de um meio de transporte são baseadas exclusivamente nas emissões causadas pela queima de combustível. Porém, os veículos de passageiro não existem isoladamente e necessitam de um grande e complexo sistema para a sua operação. O presente estudo busca avaliar os impactos ambientais de cada etapa do ciclo de vida do BRT Transcarioca, na cidade do Rio de Janeiro, baseado na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A fronteira do sistema inclui a produção de matéria prima do veículo e da infraestrutura, construção da infraestrutura (via e estações), manufatura do veículo, operação e manutenção do BRT para um horizonte de 20 anos. O método ReCIPE foi usado para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e os resultados mostram que as fases do ciclo de vida com maior participação na geração de impactos ambientais são a construção da infraestrutura e a operação do sistema. Também mostra que a fase de construção da infraestrutura tem maior impacto na ocupação de solo urbano; a operação do BRT tem maior contribuição para mudanças climáticas; a manufatura do veículo é pior para a ecotoxicidade terrestre e a manutenção afeta mais a categoria de depleção hídrica.

*Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Sistemas de Transporte; Bus Rapid Transit; Impactos Ambientais; Rio de Janeiro*

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

**LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BUS RAPID TRANSIT (BRT): A CASE  
STUDY OF TRANSCARIOCA**

Isabelle Duran Martins

January/2017

Advisors: Rogério de Aragão Bastos do Valle e Ana Carolina Maia Angelo

Course: Environmental Engineering

Seen as sustainable transport option, the Bus Rapid Transit (BRT) system has been largely adopted as public transport alternative with low cost and lower negative environmental impact when compared to certain modes of urban road transit modes, as private cars. In most cases, the environmental impact assessments of a transport mode are based exclusively on emissions caused by fuel consumption. However, passenger vehicles also need a large and complex system for operation. This paper focuses on assessing the environmental performance of BRT Transcarioca, in the city of Rio de Janeiro, based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, in order to identify the most significant environmental impacts associated to each life cycle phase and its relative contribution to the overall environmental impact. The system boundary of this study is from raw material extraction to BRT system operation, including the infrastructure and vehicle material production, infrastructure (road and stations) and vehicle manufacture, BRT operation and maintenance for over 20-years lifetime. The ReCiPe method was used for Life Cycle Impact Assessment (LCIA) and results show that the life cycle phases with greater contribution to environmental impacts are infrastructure construction and BRT operation. It also reveals that infrastructure construction phase has higher impact for urban land occupation; operation mostly contribute for climate change; vehicle manufacture is worst for terrestrial ecotoxicity and maintenance mostly affects water depletion.

*Keywords:* Life Cycle Assessment; Transport Systems; Bus Rapid Transit; Environmental Impacts; Rio de Janeiro.

## Sumário

1. Introdução .....	1
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Justificativa .....	3
1.3. Metodologia .....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	6
2.1. Contextualização do setor de transportes do Rio de Janeiro.....	6
2.2. <i>Bus Rapid Transit</i> .....	9
2.2.1. Transporte em megaeventos.....	12
2.2.2. BRT Transcarioca .....	13
2.2.2.1. Combustível .....	17
2.2.2.2. Construção da via.....	18
2.3. Avaliação do Ciclo de Vida .....	19
2.3.1. Fases da ACV.....	21
2.3.2. Fase 1: Definição de objetivo e escopo.....	22
2.3.3. Fase 2: Análise de inventário .....	23
2.3.4. Fase 3: Avaliação de Impacto .....	24
2.3.5. Fase 4: Interpretação .....	25
2.4. ACV de sistemas BRT: estudos realizados.....	26
3. ACV do BRT Transcarioca: estudo de caso .....	29
3.1. Objetivo e escopo .....	29
3.1.1. Função e Unidade Funcional.....	29
3.1.2. Fronteira do Sistema .....	30
3.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	31
3.2.1. Levantamento de Dados .....	31
3.2.1.1. Manufatura do veículo .....	32
3.2.1.2. Produção do combustível .....	33
3.2.1.3. Construção da infraestrutura .....	33
3.2.1.4. Uso .....	34

3.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	35
3.4. Interpretação dos Resultados.....	38
3.4.1. Ocupação de Terra Agrícola .....	45
3.4.2. Mudanças Climáticas .....	45
3.4.3. Depleção de Combustíveis Fósseis .....	46
3.4.4. Ecotoxicidade de Água Doce .....	47
3.4.5. Eutrofização de Água Doce .....	48
3.4.6. Toxicidade Humana .....	48
3.4.7. Radiação Ionizante .....	49
3.4.8. Ecotoxicidade Marinha .....	50
3.4.9. Eutrofização Marinha.....	50
3.4.10. Depleção de Recursos Minerais .....	51
3.4.11. Transformação de Área Natural .....	52
3.4.12. Redução da Camada de Ozônio .....	53
3.4.13. Formação de Material Particulado .....	53
3.4.14. Formação de Oxidantes Fotoquímicos.....	54
3.4.15. Acidificação Terrestre .....	55
3.4.16. Ecotoxicidade Terrestre .....	56
3.4.17. Ocupação de Solo Urbano.....	57
3.4.18. Depleção Hídrica.....	58
4. Conclusões .....	59
4.1. Recomendações para trabalhos futuros.....	60
Referencias Bibliográficas .....	63
Anexo I – Estimativa dos dados da carroceria do ônibus articulado .....	73
Anexo II – Principais dados de entrada de material e energia para o BRT Transcarioca .....	74



## Lista de Figuras

<i>Figura 1: Fluxograma da metodologia aplicada</i>	5
<i>Figura 2: Transporte de passageiros pelo modo rodoviário, ferroviário e aquaviário (2012) no município do Rio de Janeiro.</i>	6
<i>Figura 3: Evolução da frota veicular no município do Rio de Janeiro</i>	8
<i>Figura 4: Percentual de Emissões de GEE devidas ao uso de energia no Rio de Janeiro.</i>	9
<i>Figura 5: Esquema do corredor do BRT Transcarioca</i>	14
<i>Figura 6: Mapa do BRT Transcarioca e Transoeste</i>	14
<i>Figura 7: Histórico de passageiros no BRT Transcarioca</i>	15
<i>Figura 8: Histórico de quilometragem mensal da linha Transcarioca</i>	15
<i>Figura 9: Estação Fundão – BRT Transcarioca – com destaque para via de concreto.</i>	18
<i>Figura 10: Esquema do ciclo de vida de um produto</i>	19
<i>Figura 11: Estrutura da avaliação do ciclo de vida</i>	22
<i>Figura 12: Etapas esquemáticas do inventário aos pontos de extremidade</i>	24
<i>Figura 13: Fronteira do Sistema</i>	30
<i>Figura 14: Contribuição das fases do ciclo de vida do BRT Transcarioca para as categorias de impacto.</i>	39
<i>Figura 15: Contribuição dos processos da fase de construção da infraestrutura para cada uma das categorias de impacto</i>	41
<i>Figura 16: Contribuição dos processos da fase de manufatura do veículo BRT para cada uma das categorias de impacto</i>	42
<i>Figura 17: Contribuição dos processos da fase de operação para cada uma das categorias de impacto</i>	43
<i>Figura 18: Contribuição dos processos da fase de manutenção para cada uma das categorias de impacto</i>	44
<i>Figura 19: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ocupação de terra agrícola (m<sup>2</sup>a/pkm)</i>	45
<i>Figura 20: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de mudanças climáticas (gCO<sub>2</sub> eq/pkm)</i>	46
<i>Figura 21: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de depleção dos combustíveis fósseis (kg óleo eq/pkm)</i>	47
<i>Figura 22: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ecotoxicidade de água doce (g 1,4 DCB eq/pkm)</i>	47
<i>Figura 23: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de eutrofização de água doce (g P eq/pkm)</i>	48
<i>Figura 24: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de toxicidade humana (g DCB eq/pkm)</i>	49
<i>Figura 25: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de radiação ionizante (g U<sub>235</sub> eq/pkm)</i>	50
<i>Figura 26: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ecotoxicidade marinha (g DCB eq/pkm)</i>	50
<i>Figura 27: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de eutrofização marinha (g N eq/pkm)</i>	51
<i>Figura 28: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de depleção de recursos minerais (g Fe eq/pkm)</i>	52
<i>Figura 29: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de transformação de área natural (m<sup>2</sup> x ano/pkm)</i>	52

<i>Figura 30: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de redução da camada de ozônio (g CFC 11 eq/pkm)</i>	<i>53</i>
<i>Figura 31: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de formação de material particulado (g PM<sub>10</sub> eq/pkm)</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de formação de oxidantes fotoquímicos (g NMVOC/pkm)</i>	<i>55</i>
<i>Figura 33: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de acidificação terrestre (g SO<sub>2</sub> eq/pkm)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 34: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ecotoxicidade terrestre (g 1,4DCB eq/pkm)</i>	<i>57</i>
<i>Figura 35: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ocupação do solo urbano (m<sup>2</sup> x ano/pkm)</i>	<i>57</i>
<i>Figura 36: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de depleção hídrica (m<sup>3</sup>/pkm)</i>	<i>58</i>

## **Lista de Tabelas**

<i>Tabela 1: Limites de emissões da fase 7 do PROCONVE para veículos pesados.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 2: Quadro resumo dos estudos selecionados de ACV de sistemas BRT .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 3: Dados para o cálculo de pkm do BRT Transcarioca .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4: Composição de um ônibus a diesel.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 5: Fatores de emissão do ônibus articulado (g/km) .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 6: Dados para o cálculo da média de passageiros/ viagem .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 7: Categorias de impacto do ReCIPE Midpoint (H) w/o LT .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 8: Dados principais materiais Volvo 8500 e chassi B12M.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 9: Estimativa dos dados da carroçaria .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 10: Dados ônibus comum e articulado .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 11: Principais dados de entrada de material e energia para o BRT Transcarioca .....</i>	<i>74</i>

## **Lista de Siglas**

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ASCV	Avaliação Social do Ciclo de Vida
BRT	Bus Rapid System
CCV	Custeio do Ciclo de Vida
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
DCB	Diclorobenzeno
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Eq	Equivalente
GEE	Gases do Efeito Estufa
HAP	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional para Padronização
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar para Veículos Automotores
SICV	Sistema de Informações em Ciclo de Vida
UF	Unidade Funcional
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos

## 1. Introdução

É crescente a preocupação com o planejamento do transporte urbano devido aos efeitos sob a qualidade de vida da população que usufrui dos serviços e aos impactos ambientais associados. O setor de transportes é responsável por uma grande e crescente parte das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) que contribuem para as mudanças climáticas. A qualidade de vida do cidadão está ligada ao tempo de deslocamento para o trabalho, a qualidade do ar, ao nível de poluição sonora entre outros fatores (CUI *et al.*, 2010, HERDY *et al.*, 2012).

O mal planejamento pode causar a migração do usuário para o uso de transporte individual, aumentando a emissão de poluentes. Um carro é de 3 a 10 vezes mais poluente do que o transporte público. No que tange a eficiência energética, é possível percorrer 48 km de metrô, 39 km de ônibus ou 18 km de automóvel com 1 kg de petróleo equivalente de energia. Além da ineficiência energética e do maior nível de emissão causado, o transporte individual demanda uma área maior para sua infraestrutura (HERDY *et al.*, 2012).

O modo rodoviário é o principal meio de transporte utilizado no Rio de Janeiro (PDTU, 2014). A cidade tem recebido grandes investimentos em mobilidade urbana como legado dos megaeventos esportivos que tem sediado desde os Jogos Pan Americano de 2007, destacando-se a realização da Copa do Mundo em 2014 e culminando nos Jogos Olímpicos e Paralímpicos em 2016. Esses eventos colocaram a cidade em evidência no cenário mundial, sendo responsáveis pela atração de investimentos oriundos de diversas esferas governamentais. Entre 2014 e 2016, o estado do Rio de Janeiro recebeu cerca de R\$37,9 bilhões de investimentos em infraestrutura, o que inclui obras em rodovias, revitalização e construção de aeroportos, desenvolvimento urbano, energia e saneamento básico (FIRJAN, 2013).

Os megaeventos esportivos representam um enorme desafio, pois é preciso lidar com a mobilidade de milhões de visitantes e atletas em cidades-sede que normalmente já convivem com constante congestionamento e transporte público saturado (CURRIE e SHALABY, 2011). Além do compromisso assumido de adequar a mobilidade urbana para ser cidade sede dos eventos esportivos, a cidade também precisa lidar com os agravamentos dos gargalos de trânsito e transporte causados pelo aumento da frota de veículos devido ao crescimento econômico (HERDY *et al.*, 2012).

A solução encontrada para o Rio de Janeiro inclui a melhoria das linhas de trem suburbano e linhas de metrô e a construção de linhas de *Bus Rapid Transit* (BRT). As obras já estavam previstas para a cidade, mas foram aceleradas para receber os eventos. Essas obras têm o objetivo de conectar os diferentes modos por meio de um anel de transporte de alta capacidade, fazendo a ligação entre as zonas críticas da cidade e os locais onde ocorrerão os Jogos.

O BRT é um sistema de corredores exclusivos para ônibus de média capacidade. A vantagem desse sistema é o curto período de tempo necessário para a implementação da infraestrutura. Além disso, é cerca de 20 vezes mais barato do que o veículo leve sobre trilhos (VLT), com aproximadamente a mesma capacidade de transporte (BRASIL, 2008).

Sistemas de transporte de massa normalmente causam grandes impactos negativos durante a fase de implementação da nova infraestrutura. Porém, os ganhos para o meio ambiente são percebidos a longo prazo, quando comparados ao uso de automóveis ou sistemas de transporte de menor eficiência, para se deslocar no mesmo trajeto (CHESTER *et al.*, 2013).

Dentre os impactos da fase de instalação de um sistema BRT, destacam-se o aumento de emissão de material particulado, aumento do nível do ruído, geração de resíduos sólidos e desapropriação. Quanto à fase de operação, é significativo o aumento da qualidade de vida da população e redução da emissão de gases do efeito estufa relacionados às emissões veiculares. (CUI *et al.*, 2010; MRS, 2012).

## **1.1. Objetivo**

O objetivo geral da pesquisa consiste em avaliar o desempenho ambiental do BRT Transcarioca sob a perspectiva do ciclo de vida, a fim de quantificar os potenciais impactos ambientais associados desde a extração dos recursos naturais para a construção da infraestrutura e do veículo, até a operação do BRT. Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- mapeamento do ciclo de vida do BRT;
- estudo de Avaliação do Ciclo de Vida;

- identificação das contribuições de cada etapa e processo no desempenho global do ciclo de vida do BRT, para cada uma das categorias de impacto ambiental.

## **1.2. Justificativa**

É amplamente aceito que as emissões veiculares são uma das principais causas da poluição ambiental e a aplicação da abordagem da avaliação do ciclo de vida apresenta uma oportunidade para entender melhor como os investimentos nos sistemas de transporte podem reduzir os impactos ambientais associados. Porém, os veículos de passageiros não existem isoladamente e necessitam de um grande e complexo sistema para sua operação (CHESTER *et al.*, 2013). Para entender os impactos ambientais de um sistema de transporte é necessário incluir a fabricação do veículo, construção da infraestrutura e a produção do combustível (CUI *et al.*, 2010, CHESTER e HORVATH, 2009).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite avaliar os potenciais impactos ambientais associados em maior profundidade. A contribuição do presente estudo está em quantificar as potenciais emissões do sistema BRT Transcarioca, incluindo a construção de sua infraestrutura, produção e uso. O BRT Transcarioca, localizado no Rio de Janeiro, faz a ligação entre a Barra da Tijuca e aeroporto internacional do Galeão com 39 km de extensão. A obra ainda conta com mergulhões, viadutos, pontes, projetos de urbanização de áreas vizinhas e duplicação de pistas já existentes e a linha foi projetada para transportar até cerca de 320 mil passageiros por dia (FIRJAN, 2013; ITDP, 2015).

Assim, através desta análise torna-se possível identificar as etapas do ciclo de vida do sistema que tem maior contribuição para cada categoria de impacto, incentivando novos estudos para melhorar seu desempenho. Além disso, pode auxiliar futuras tomadas de decisão através da comparação de desempenho ambiental entre o BRT e outros sistemas de transporte.

## **1.3. Metodologia**

A avaliação do desempenho ambiental do BRT Transcarioca, do Rio de Janeiro será realizada por meio da aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida

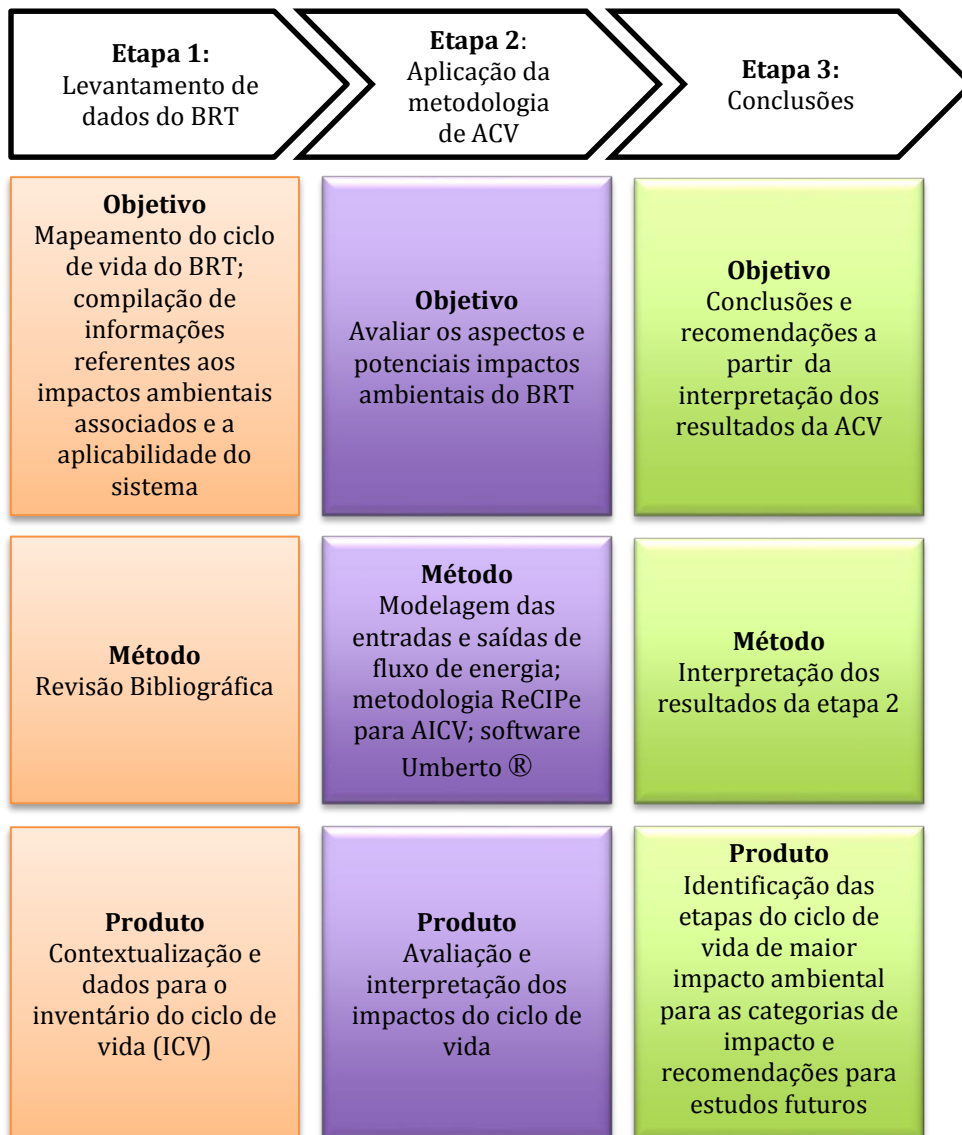
(ACV) de acordo com os padrões estabelecidos pelas normas ABNT ISO 14040 e 14044, as quais estabelecem diretrizes, requisitos e orientações para a ACV. A ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que faz a “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ABNT, 2009b, p.2).

O trabalho será dividido em 3 grandes fases, resumidas na figura 1. A primeira consiste no mapeamento do ciclo de vida do BRT por meio de consultas a documentos públicos, revisão bibliográfica sobre os potenciais impactos ambientais associados a sistemas de BRT e a aplicabilidade do sistema no contexto nacional e mundial. Também é incluída nessa etapa uma revisão de estudos científicos que utilizam a metodologia ACV para sistemas de transporte BRT.

A segunda etapa é a aplicação da metodologia de ACV propriamente dita. A ACV é constituída por 4 fases: objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto e interpretação. No objetivo e escopo devem ser definidas a aplicação pretendida, as razões do estudo, a unidade funcional do produto, os processos que devem ser incluídos dentro da fronteira do sistema, as categorias de impacto e a metodologia a ser utilizada para avaliação dos impactos. Na fase de análise de inventário, deve-se apresentar a coleta de dados e sua modelagem, de forma a constituir o inventário do ciclo de vida. Em seguida, na avaliação de impacto, os dados obtidos no inventário são associados aos impactos ambientais potenciais do sistema com o auxílio da metodologia de avaliação de impacto selecionada na primeira fase. Enfim, a fase de interpretação consiste em avaliar conjuntamente a análise de inventário e a avaliação dos impactos, de modo a fornecer resultados que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações. A avaliação será realizada com o auxílio do software Umberto®, ferramenta computacional que permite a modelagem do sistema BRT Transcarioca de forma a analisar os fluxos de materiais e energia, tornando possível uma análise dos aspectos ambientais. Para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), será selecionado o método ReCIPE. Além disso, o software permite acesso a bancos de dados, como o Ecoinvent, de forma a prover dados adicionais.

Por fim, a terceira etapa do trabalho, é a conclusão do trabalho realizada a partir da interpretação dos resultados da ACV. Na conclusão serão identificadas as etapas do ciclo de vida de maior impacto ambiental para as categorias de impacto e serão feitas recomendações para estudos futuros.



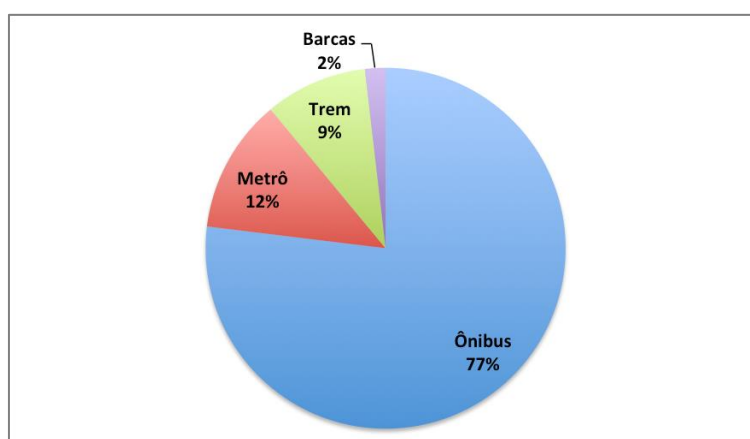


**Figura 1: Fluxograma da metodologia aplicada**

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Contextualização do setor de transportes do Rio de Janeiro

A rede de transportes da região metropolitana do Rio de Janeiro é composta por dois subsistemas ferroviários de alta capacidade (metrô e trem), um subsistema aquaviário de alta capacidade<sup>1</sup> (barca) e um subsistema de média capacidade<sup>2</sup> representado pelo modo rodoviário (PDTU, 2014). O ônibus é o principal meio de transporte público utilizado, responsável por 77% dos deslocamentos em 2012 (Figura 2). Esses dados ainda não contavam com a implementação das linhas de BRT (Transcarioca, Transoeste, Transolímpica e Transbrasil), VLT e a expansão da linha 4 do metrô.



**Figura 2: Transporte de passageiros pelo modo rodoviário, ferroviário e aquaviário (2012) no município do Rio de Janeiro.**  
**Fonte: Elaboração própria a partir de IPP (2016)**

Uma das dificuldades para a conexão do território do Rio de Janeiro são suas características geográficas. O município está localizado entre a baía de Guanabara, o oceano e os maciços da Pedra Branca e da Tijuca. Atualmente, seu vetor de crescimento é em direção à zona oeste. O Planejamento Estratégico do Rio de Janeiro 2017-2020 tem como uma de suas metas ter 57% da população morando a aproximadamente 1km de uma estação de transporte público até 2020. As diretrizes do plano também incluem incentivar o uso de deslocamento não motorizado,

<sup>1</sup> Sistema de alta capacidade é responsável por demanda superior a 20.000 pessoas por hora.

<sup>2</sup> Sistema de média capacidade é responsável por demanda entre 8.000 e 20.000 pessoas por hora.

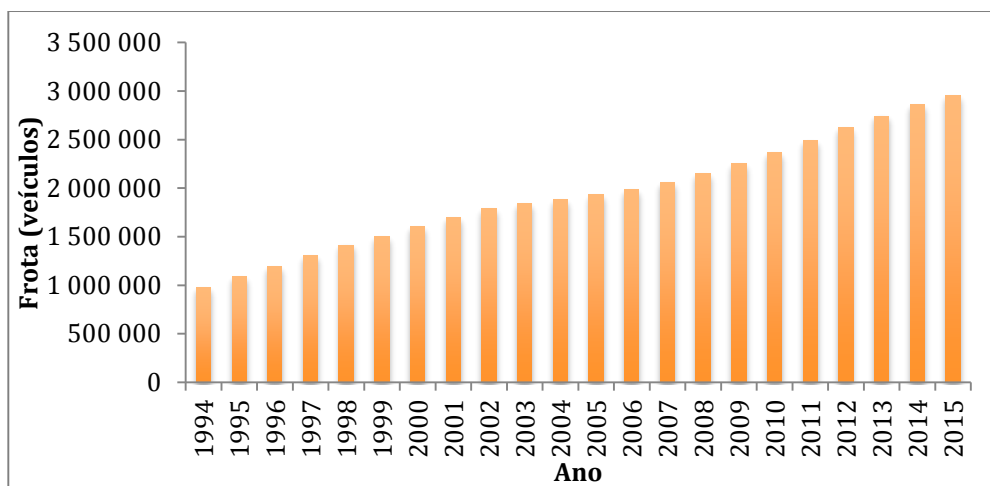
expandir a malha de transporte, adotar modelos de transporte mais eficientes energeticamente e que visem a redução da emissão de CO<sub>2</sub> (RIO PREFEITURA, 2016).

Além disso, a questão da mobilidade também está associada à distribuição de habitações e oferta de empregos pelo território, pois quando mal distribuída acarreta longos deslocamentos e sobrecarga do transporte público. As zonas norte e oeste concentram uma grande parte da população que precisa se deslocar diariamente para seu local de trabalho no centro da cidade, região de baixa densidade demográfica (RIO PREFEITURA, 2016). O zoneamento da cidade deve levar em conta esses desafios, importantes para melhorar a qualidade de vida da população.

Os sistemas de transportes, apesar de ter o benefício do deslocamento da população, acarretam diversas externalidades negativas para a sociedade. Por exemplo, não se leva em consideração os custos sociais das emissões veiculares de um sistema de transporte. Seu planejamento, assim como na maioria das atividades econômicas, não leva em conta a degradação associada apesar de provocar efeitos danosos à sociedade, reduzindo o seu bem estar. Algumas dessas externalidades são destacadas com maior frequência, tais como agravamento do aquecimento global, congestionamentos, poluição e intrusão visual (LIMA, 2013; ABRAMOVITCH, 2014).

Nos últimos anos, observou-se um aumento significativo na taxa de motorização, acompanhando a mudança de perfil socioeconômico da população da região metropolitana do Rio de Janeiro. 28,5% dos deslocamentos feitos por modo de transporte motorizado são por meio de transporte individual (PDTU, 2014), saturando as vias públicas, reduzindo a fluidez do trânsito e, conseqüentemente, aumentando as emissões veiculares.

O tempo gasto em deslocamentos é um impacto negativo na qualidade de vida da população e reforça a necessidade de investimentos em infraestrutura de transporte de média e alta capacidade. A figura 3 mostra a evolução da frota veicular no município de 1994 a 2015, onde se pode observar que a frota foi triplicada nesse período. Em 2015, a frota de veículos no município do Rio de Janeiro era de cerca de 2,9 milhões para uma população de 6,5 milhões de habitantes (IBGE, 2015; IPP, 2016).



**Figura 3: Evolução da frota veicular no município do Rio de Janeiro**  
**Fonte: Elaboração própria a partir de IPP (2016)**

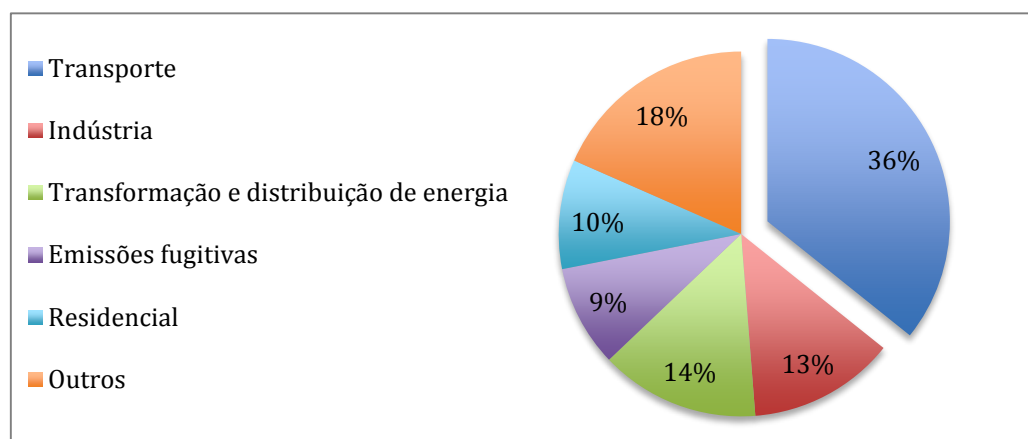
Além disso, as emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE) têm se agravado desde a era pré-industrial mundialmente, alavancado pelo crescimento econômico e populacional, atingindo altas concentrações de gás carbônico, metano e óxido nitroso. As emissões de CO<sub>2</sub> devido a queima de combustíveis fósseis e processos industriais são responsáveis pelo aumento de aproximadamente 78% do GEE entre 1970 e 2000 (IPCC, 2014).

O efeito estufa é um fenômeno natural que mantém a temperatura da Terra adequada para o desenvolvimento das diversas formas de vida. No entanto, o aumento das emissões de GEE causadas pelas ações antrópicas agravam esse efeito e são responsáveis pelo aquecimento global.

Para o caso do município do Rio de Janeiro, em 2011 foi estabelecida a lei 5.248 – Política Municipal de Mudanças Climáticas. Essa lei tem como objetivo introduzir metas de redução de emissões antrópicas de GEE, estabelecendo as medidas mitigadoras e preventivas necessárias e realizando quantificações para acompanhar a evolução. A meta para 2020 é de 20% de redução em relação as emissões de 2005. A meta nacional é a redução de 37% das emissões até 2025 em relação a 2005, incluindo CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, perfluorcarbonos, hidrofluorcarbonos e SF<sub>6</sub> (RIO DE JANEIRO, 2011).

Especificamente para o setor dos transportes, tem-se como algumas das medidas a serem adotadas a adequação da oferta de transporte coletivo e desestímulo ao uso do transporte individual motorizado; substituição gradativa da utilização dos combustíveis fósseis por outros com baixo teor de carbono e incentivo à utilização de

combustíveis renováveis na frota de veículos, como os biocombustíveis. Segundo SMAC (2015), o setor de energia é o principal responsável pelas emissões de GEE no município do Rio de Janeiro e, dentro desse setor, destaca-se o de transportes com 36% das emissões (figura 4).



**Figura 4: Percentual de Emissões de GEE devidas ao uso de energia no Rio de Janeiro.**

**Fonte: Elaboração própria a partir de SMAC (2015)**

## ***2.2. Bus Rapid Transit***

O sistema BRT foi implantado no Rio de Janeiro como uma das ações para redução das emissões estabelecida na Política Municipal de Mudanças Climáticas. O sistema visa incentivar a migração do transporte individual para o coletivo através do aumento da mobilidade urbana devido a maior capacidade do novo sistema de transporte e redução dos tempos de deslocamento (SMAC, 2015).

BRT é definido como:

um sistema de transporte de ônibus que proporciona mobilidade urbana rápida, confortável e com custo eficiente através da provisão de infraestrutura segregada com prioridade de passagem, operação rápida e frequente e excelência em marketing e serviço ao usuário (BRASIL, 2008, p.12).

O sistema foi desenvolvido em Curitiba em torno dos anos 80, com a melhoria da eficiência e qualidade do sistema utilizado na época. Consistiam em vias exclusivas para “Ônibus Expressos” e ainda não era reconhecido pelo termo BRT (NTU, 2009). Posteriormente, foi replicado por outras cidades ao redor do mundo com adaptações para realidades locais.

O sucesso do conceito do BRT com baixo custo, alta performance e impactos ambientais positivos em cidades como Curitiba (1982), Bogotá (2000), Cidade do México (2003), levaram a um rápido crescimento do sistema ao redor do mundo nos últimos anos. Sua rápida implementação, que pode ser feita dentro de um mandato político, torna o sistema ainda mais atrativo para gestores com visão imediatista que não priorizam projetos e investimentos de longo prazo (HIDALGO e GUTIÉRREZ, 2012; HERDY *et al.*, 2012; LIMA, 2013).

O BRT é uma solução adequada ao considerar uma cidade com situação econômica não favorável, já que necessita de baixo investimento e tem rápida implementação. Isso proporciona uma imediata melhoria da qualidade de vida da população, diferentemente da projeção de um sistema robusto e de alto investimento, mas que dificilmente terá as condições adequadas para ser implementado (NTU, 2009).

Para a implementação do transporte público, deve-se levar em conta questões relacionadas ao planejamento urbano e uso do solo. É preciso compreender os benefícios do uso do transporte coletivo e de veículos com menor taxa de emissão em detrimento dos veículos de uso individual, principalmente nas grandes cidades brasileiras que apresentam grande crescimento urbano com pouca rede de transporte de massa. Existem benefícios econômicos atrelados ao uso adequado do espaço urbano, que se refletem em menor tempo de deslocamento e redução do consumo energético (LIMA, 2013).

As experiências anteriores mostraram que o BRT tem impactos positivos mais significativos na qualidade de vida da população em comparação com o sistema de ônibus convencional. O ônibus convencional compartilha o trânsito com os demais veículos rodoviários, sendo impactado pelos congestionamentos, que por sua vez elevam o tempo de viagem, custo e emissões (HERDY *et al.*, 2012). O sistema BRT atende melhor a demanda, aumenta a satisfação do cliente, reduz o tempo de percurso, tem maior confiabilidade, menos acidentes de trânsito e reduz a poluição do ar devido a menor emissão de carbono (HIDALGO e GUTIÉRREZ, 2012).

A NTU (2009) alega que tende-se a acreditar que o metrô é o sistema mais eficiente para resolver os problemas de uma cidade porque não compete com os meios de transporte da superfície e atinge maior velocidade. Porém, as estações costumam ser mais espaçadas, requerendo mais tempo para acessar a plataforma desejada e,

consequentemente, necessita-se de um tempo global maior para um percurso completo. Além disso, os custos atuais para a implementação de sistemas subterrâneos em cidades desenvolvidas é muito maior do que no século passado, quando as extensas redes de metrô de cidades como Nova Iorque e Londres foram implantadas.

A criação de vias exclusivas para a circulação do transporte público é benéfica pois gera um menor custo de operação já que a frota de ônibus necessária para um percurso é inversamente proporcional a velocidade atingida. O usuário tende a buscar o uso do transporte individual quando o serviço do transporte público oferecido se mostra ineficaz. A criação de sistemas BRT bem projetados, com velocidade adequada, devem surtir efeitos positivos no deslocamento da população (NTU, 2009).

Impactos diretamente ligados a como o passageiro se sente em relação ao meio de transporte são de difícil mensuração por se tratarem de características subjetivas. O conforto está relacionado ao ruído do veículo, acessibilidade, temperatura ambiente, qualidade das estações (local de espera), segurança, paisagismo (poluição visual) e qualidade operacional (NTU, 2009).

Outro benefício é a redução da emissão de gases causada pela diminuição das linhas de ônibus que são substituídas pelo sistema troncal do BRT, a modernização da frota e o uso de fontes alternativas de energia. Como exemplo, em Curitiba foi implantada a linha verde, onde parte da frota adotou biodiesel a 100% (NTU, 2009). O biodiesel é um biocombustível que pode ser produzido a partir de óleos vegetais ou gordura animal e tem sido foco de muitos estudos por ser uma fonte de energia renovável, contribuindo para a redução da emissão de alguns poluentes. Sua mistura ao óleo diesel derivado de petróleo pode variar de 1 a 100%. O teor de biodiesel no diesel de origem fóssil é de 7% atualmente no Brasil (ANP, 2016).

No Rio de Janeiro existe o projeto BRT + Verde, onde parte da frota do BRT Transcarioca utilizou, de forma experimental, combustível renovável oriundo da cana de açúcar. Este difere do etanol com estrutura igual ao diesel de forma que possa ser utilizado em veículos de grande porte como ônibus (FETRANSPOR, 2014). Como o diesel de cana tem origem renovável, estima-se que seu uso reduza as emissões de GEE em 80% em relação ao diesel fóssil. Os veículos não precisaram ser alterados para a utilização do combustível alternativo e não apresentaram falhas mecânicas. Os

testes realizados permitiram concluir que não existem grandes alterações quanto ao consumo e desempenho operacional ao se utilizar o diesel de cana, porém a grande barreira para a utilização da tecnologia encontra-se em seu elevado custo (WILSON *et al.*, 2015).

### **2.2.1. Transporte em megaeventos**

Megaeventos implicam em extraordinárias construções de infraestrutura de transporte e extensivo gerenciamento de tráfego urbano que fogem do cotidiano para eventos temporários, como os Jogos Olímpicos e a Copa do Mundo. Os megaeventos esportivos representam um dos maiores desafios em questão de transporte para as cidades-sede, que normalmente já convivem com alto congestionamento do trânsito e infraestrutura saturada. O centro de operações precisa lidar com a mobilidade de atletas e espectadores em um novo sistema de transporte, levando em conta a demanda por transporte da população local (CURRIE e DELBOSC, 2011).

Desde as olimpíadas de Atlanta em 1996, com a construção de 11km de uma nova linha de metrô, tem-se intensificado o investimento em infraestrutura de transporte urbano para aumentar sua capacidade durante os jogos. Esse investimento pode ser um legado ou pode fazer parte do planejamento já existente da cidade, onde os jogos atuam como aceleradores do processo de expansão (CURRIE e DELBOSC, 2011).

Grandes eventos possuem picos de demanda. O sistema BRT tem o benefício de poder deslocar frotas adicionais para atender a essa demanda extra momentânea (NTU, 2009). Embora o BRT não tenha a mesma capacidade que o metrô ou VLT, apresenta grandes benefícios com custo reduzido, tais como via exclusiva e informação em tempo real (CURRIE e DELBOSC, 2011).

Na maior parte dos jogos olímpicos optou-se por intensificar temporariamente o serviço dos ônibus ao invés de investir em sua infraestrutura. Existe pouca evidência de aumento do número ou tamanho das vias como parte do planejamento antes dos jogos olímpicos de Beijing. A cidade de Los Angeles usou o acostamento para aumentar a capacidade do sistema de transporte durante o período dos jogos em 1984. Beijing construiu três novas linhas de BRT para os jogos de 2008 e aumentou seu anel viário de 335 para 804 km (CURRIE e DELBOSC, 2011).



A cidade do Rio de Janeiro tem recebido investimentos em infraestrutura de mobilidade urbana desde os jogos Pan-Americano em 2007. Até os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2016 a meta, de acordo com o Plano Estratégico do Rio de Janeiro 2013 – 2016, era a implementação do sistema VLT, a linha 4 do metrô e quatro linhas de BRT: Transoeste, Transbrasil, Transolímpica e Transcarioca. As obras do BRT Transbrasil sofreram atraso no cronograma e a linha não ficou pronta para os jogos olímpicos (RIO PREFEITURA, 2013).

Outras medidas esperadas para a melhoria do fluxo durante os megaeventos de 2016 incluíram transporte 24 horas, acesso aos jogos somente por meio de transporte público, férias escolares, restrição do uso das vias por caminhão e via exclusiva para a família olímpica.

Historicamente, os Jogos Olímpicos de Inverno de Vancouver (2010), Jogos Olímpicos de Londres (2012) e Copa do Mundo do Brasil (2014) utilizaram a pegada de carbono para quantificar as emissões dos jogos e auxiliar na tomada de decisões em relação a sustentabilidade. Rio 2016 seguirá a mesma linha e estabeleceu como meta reduzir suas emissões em 18,2% segundo o Relatório de Pegada de Carbono do Rio 2016 (2014), incluindo as operações, construção de instalações, infraestrutura da cidade e deslocamento dos espectadores. Pretende-se atingir a meta através de um planejamento energético, incluindo a substituição de combustíveis fósseis por renováveis, e redução do carbono associado aos materiais.

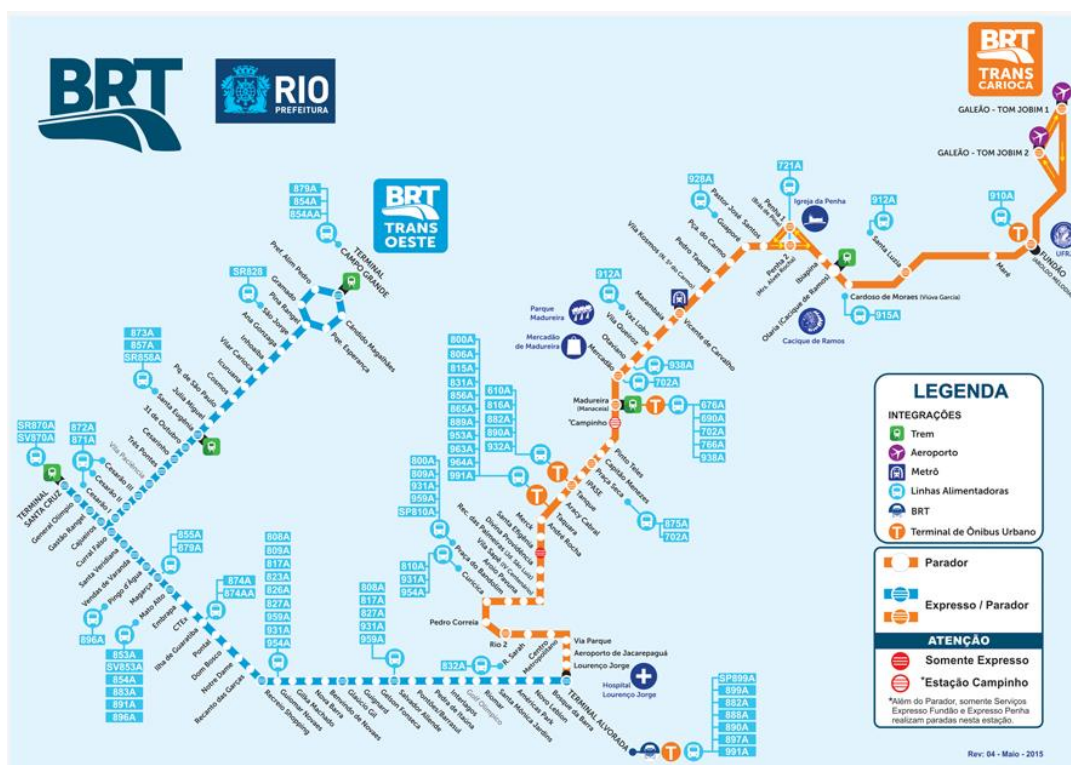
### **2.2.2. BRT Transcarioca**

O corredor BRT Transcarioca faz a ligação entre o terminal Alvorada, na Barra da Tijuca, e o aeroporto internacional Tom Jobim, na Ilha do Governador (Figura 5). O projeto inicial, chamado T5, previa 28 km de extensão e ligava o terminal Alvorada até a Penha. Posteriormente sofreu uma expansão, denominada fase 2, e atualmente possui 39 km e 47 estações. A linha faz integração com o metrô, trens metropolitanos e com o BRT Transoeste, como visto na figura 6. A operação foi iniciada em junho de 2014, ainda em fase de teste, para fazer parte da mobilidade da Copa do Mundo,

atualmente transporta aproximadamente 139 mil passageiros por dia<sup>3</sup> e foi projetado para transportar até 320 mil passageiros/dia (NTU, 2011; ITDP, 2015).



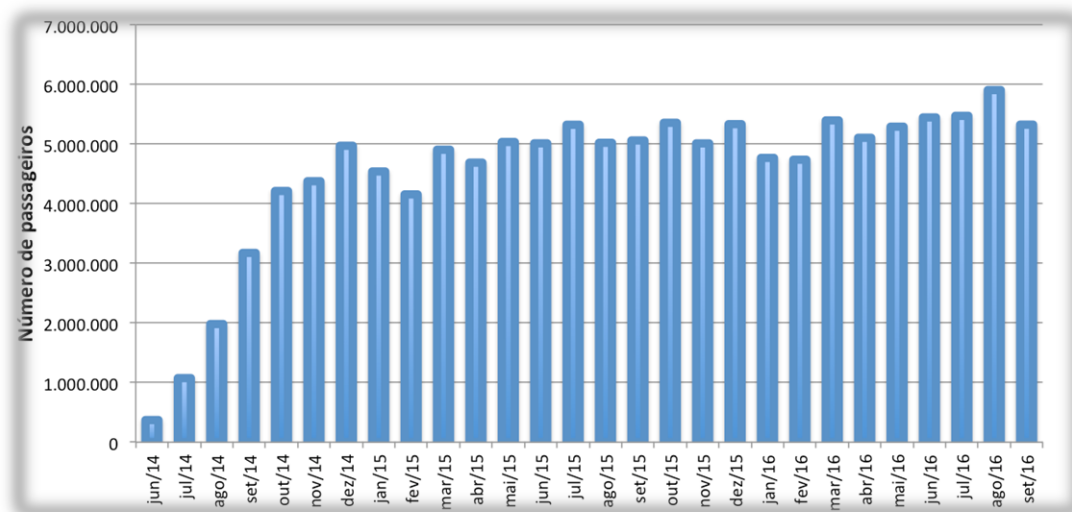
**Figura 5: Esquema do corredor do BRT Transcarioca**  
**Fonte: ITDP (2015)**



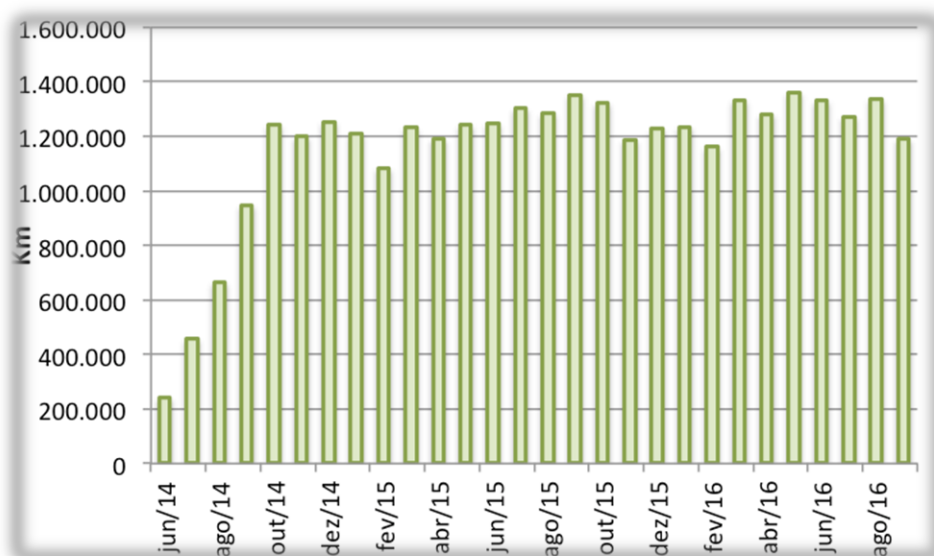
**Figura 6: Mapa do BRT Transcarioca e Transoeste**  
**Fonte: BRTRIO (2016)**

<sup>3</sup> Média dos passageiros transportados por dia no corredor Transcarioca entre setembro/2014 e Janeiro/2015 (RIO PREFEITURA, 2015).

O histórico de volume de passageiros e quilometragem mensal podem ser observados nas figuras 7 e 8.



**Figura 7: Histórico de passageiros no BRT Transcarioca**  
**Fonte: Elaboração própria com base em PRODATA MOBILITY (2016)**



**Figura 8: Histórico de quilometragem mensal da linha Transcarioca**  
**Fonte: elaboração própria com base em PRODATA MOBILITY (2016)**

Devido à introdução do corredor na malha de transportes do Rio de Janeiro, foram feitas algumas alterações nas linhas de ônibus convencionais existentes. 12 linhas foram eliminadas por terem trajeto equivalente com o do BRT, 47 linhas foram seccionadas de forma a se adequar como linha alimentadora e 6 novas linhas foram criadas (ITDP, 2015).

A implementação de novos serviços possibilita a transferência modal. Segundo pesquisa do ITDP (2015), 74,1% dos atuais passageiros utilizavam ônibus convencional ou vans para realizar o percurso e 4% utilizavam carro particular. A introdução do BRT possibilitou uma redução de 57% da frota de ônibus convencional.

De acordo com SMAC (2015), a redução de emissões de GEE estimada para 2016 devido a implementação do BRT Transcarioca é de 67,20 Gg<sup>4</sup> CO<sub>2</sub> eq. Os autores afirmam que a estimativa tem limitações devido a falta de dados específicos disponíveis. A intenção principal é de possibilitar uma percepção de quanto cada ação proporcionada pelas políticas públicas pode contribuir para a redução das emissões relacionadas as mudanças climáticas e energia.

Com o novo sistema, tornou-se mais comum a necessidade de embarcar em uma linha alimentadora e trocar pela linha troncal (BRT). A capacidade elevada do sistema troncal permite atender um maior número de passageiros com uma frota reduzida, otimizando o tempo de deslocamento e reduzindo os impactos ambientais. Porém, tem como ponto negativo um aumento dos trechos motorizados realizados pelo passageiro, tendo impacto sobre o tempo gasto nos trechos complementares (ITDP, 2015).

O BRT Transcarioca obteve pontuação máxima nos critérios necessários para ser caracterizado como um sistema *Bus Rapid Transit* e no planejamento dos serviços, tendo destaque para infraestrutura segregada com prioridade de passagem, alinhamentos das vias de ônibus, cobrança de tarifa fora do ônibus, tratamento das interseções e embarque por plataforma de nível. Tem como pontos negativos a falta de integração com ciclovias e falta de informações disponíveis para os passageiros (ITDP, 2015).

Os ônibus articulados utilizados no sistema BRT tem capacidade variável entre 100 e 240 passageiros. Os modelos mais utilizados são os articulados de 18 m com capacidade de 140 passageiros e de 21 m com capacidade de 180 passageiros. Para fins de comparação, um ônibus convencional tem capacidade de transportar cerca de 80 passageiros sentados e em pé (PRODATA MOBILITY, 2016).

---

<sup>4</sup> 1Gg = 10<sup>6</sup> kg

### 2.2.2.1. Combustível

As emissões de veículos automotores são responsáveis por grande parte da deterioração da qualidade do ar, principalmente nos grandes centros urbanos. Diante desse fato, constatou-se a necessidade da implementação de tecnologias de alimentação de combustíveis e de controle de poluição sem perder a competitividade de mercado, culminando na criação do PROCONVE.

O PROCONVE, Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, foi criado no CONAMA 18/1896. Tem como principais objetivos a redução dos níveis de emissão de poluentes por veículos automotores e promoção da melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos utilizados na frota nacional. O programa passou por diversas fases que estabeleceram novos limites máximos de emissão de poluentes para motores do ciclo Diesel, até chegar aos limites estabelecidos na fase 7 para veículos pesados, como é possível observar na tabela 1.

A fase P-7, que corresponde ao padrão de emissão europeu EURO V, foi estabelecida no CONAMA 403/2008. O CONAMA 403 também limita o teor de enxofre do óleo diesel para 10 mg/kg. Para o PROCONVE, a concepção tecnológica do motor juntamente com a qualidade do combustível são os principais fatores de emissões.

**Tabela 1: Limites de emissões da fase 7 do PROCONVE para veículos pesados.**

Fases do PROCONVE	Início da implantação no Brasil	Limites de emissão (g/kWh)			
		CO	HC	NO <sub>x</sub>	MP
VII	2012	1,5	0,46	2	0,02

**Fonte: CONAMA (2008)**

O combustível utilizado no BRT Transcarioca é o diesel, nacionalmente produzido sob a mistura de óleo diesel com 7% de biodiesel (ANP, 2016) e denominado biodiesel B7. Segundo a lei 11.097/2005, biocombustível é “combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”.

A adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado para o consumidor final passou a ser obrigatória pela lei 13.033/2014. A mistura busca reduzir a dependência de importação de óleo diesel, aumentando a segurança energética nacional, e ampliar o aproveitamento da capacidade das instalações industriais de biodiesel no país. Além

disso, o uso do biodiesel tem como impacto ambiental significativamente positivo a redução das emissões de GEE e materiais particulados.

### **2.2.2.2. Construção da via**

Segundo BRASIL (2008), a escolha da pavimentação é feita com base na análise do desempenho e custos de construção e manutenção da via. A via deve ser construída de forma a suportar o peso do veículo articulado selecionado para a operação, considerando o número de veículos que devem operar ao longo de sua vida útil. Além disso, deve ser observado as características climáticas do país para a tomada de decisão.

O pavimento escolhido para o BRT Transcarioca é o de concreto (Figura 9), com durabilidade prevista de 20 anos sem manutenção (INFRAESTRUTURA URBANA, 2011). O concreto apresenta alguns benefícios em relação ao pavimento flexível. O pavimento rígido possui vida útil mais longa, enquanto que o asfalto requer repavimentação a cada dois anos em climas tropicais para uso pesado. Ademais, o concreto é mais resistente às forças de veículos pesados passando frequentemente pela via. Esses aspectos geralmente compensam o fato do pavimento de concreto ser mais caro.



**Figura 9: Estação Fundão – BRT Transcarioca – com destaque para via de concreto**

**Fonte: a autora**

Como exemplo, a TransJakarta, na capital da Indonésia, foi pavimentada inicialmente apenas com asfalto. A via teve problemas graves de afundamentos e deterioração das

estações. A solução utilizada foi a substituição do leito das estações por concreto, uma opção considerada para corte de custos.

Quanto a mitigação dos impactos ambientais negativos referentes a escolha do pavimento, deve-se levar em consideração que o concreto é uma mistura de cimento, brita e areia. Logo, as emissões do uso do concreto estão diretamente relacionadas com a quantidade de cimento utilizado na mistura (ANDRADE, 2016). De acordo com FEIZ *et al.* (2015 *apud* ANDRADE, 2016), os principais elementos que influenciam a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de cimento e que, portanto, podem ser aperfeiçoados são: a aplicação de produtos de menor emissão em substituição ao clínquer; processo de descarbonatação; a participação de combustíveis renováveis na geração de energia térmica e de fontes renováveis de eletricidade na matriz elétrica.

### 2.3. Avaliação do Ciclo de Vida

A ACV é uma modelagem das entradas e saídas de fluxo e energia de um produto ou serviço, desde a extração da matéria-prima até o descarte final (figura 10). É uma ferramenta de apoio à tomada de decisão e tem como principal objetivo avaliar os aspectos e potenciais impactos ambientais (HERDY *et al.*, 2012).



**Figura 10: Esquema do ciclo de vida de um produto**  
**Fonte: Adaptado de UNEP (2007)**

Questões como a sustentabilidade socioeconômica e ambiental tem cada vez maior peso nas decisões dos gestores públicos, já que os desafios climáticos e ambientais podem comprometer o desempenho dos sistemas de produção. Ademais, a ACV torna transparente os insumos utilizados e os resíduos produzidos no sistema produtivo, melhorando a capacidade do Estado de arbitrar o custo dos impactos ambientais e dividir responsabilidades. Apesar desta ferramenta estar amplamente disseminada no cenário internacional, ainda é pouco utilizado no Brasil (FILHO *et al.*, 2016).

A ACV teve sua primeira aplicação nos Estados Unidos, com um estudo feito pela Coca Cola sobre os custos e os impactos dos diversos estágios do ciclo de vida da garrafa. Sua disseminação na área acadêmica ocorreu em meados de 1970, durante a crise do petróleo. A ACV permitiu que as empresas entendessem o uso dos recursos naturais e se mostrou um instrumento eficiente (FILHO *et al.*, 2016).

A ACV pode ser aplicada para (ABNT NBR ISO 14040:2009):

- Identificar a origem dos problemas apresentados por um dado produto;
- Comparar o desempenho ambiental de dois ou mais produtos;
- Subsidiar a tomada de decisão na indústria, organizações governamentais e não governamentais;
- Marketing.

Segundo FILHO *et al.* (2016), a ACV contribui para a formação de critérios e requisitos de sustentabilidade nas políticas públicas. Além disso, fornece base científica para a implementação de normas e regulações ambientais. Como exemplo, México, Peru e Chile a utilizam como base para a legislação de biocombustíveis e os EUA utilizam a ferramenta para assegurar que a emissão dos biocombustíveis seja 20% menor. O uso da ACV no mercado internacional representa uma pressão externa para o uso no Brasil. A falta de aplicação da ACV para políticas públicas pode gerar desvantagens para o país futuramente, constituindo uma das barreiras para o produto brasileiro no cenário internacional.

Deve-se ressaltar que a ACV tem foco estritamente ambiental e que os aspectos e impactos sociais e econômicos estão fora do seu escopo. A ACV combinada com a avaliação dos impactos econômicos e avaliação das consequências sociais ao longo



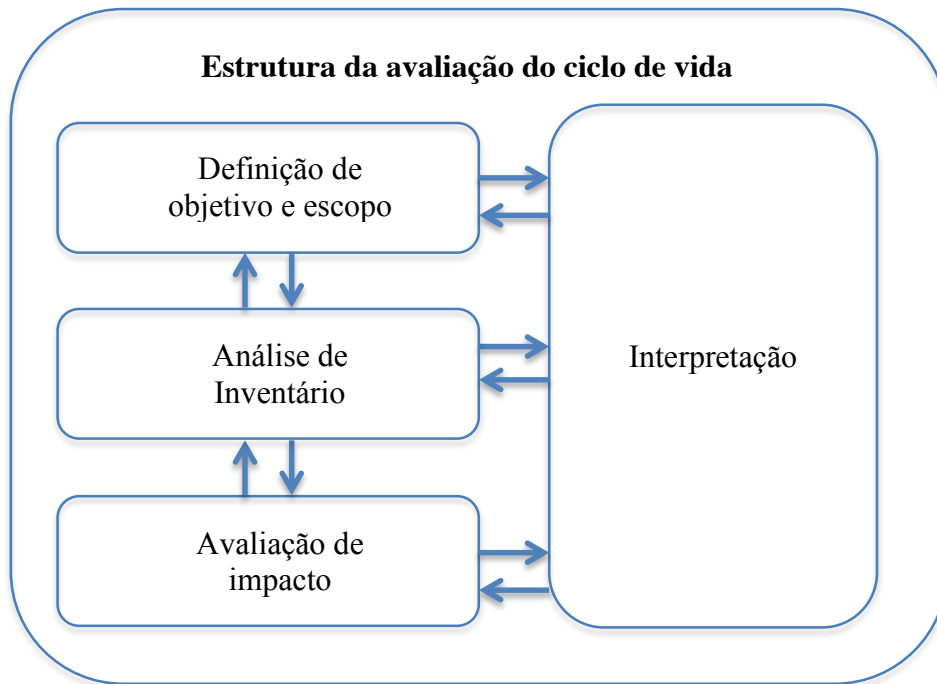
do ciclo de vida do produto compõem a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) que consiste na avaliação conjunta dos impactos ambientais por meio da ACV, dos econômicos por meio do Custeio do Ciclo de Vida (CCV) e dos sociais, pela Avaliação Social do Ciclo de Vida (S-ACV) (FINNVENDEN et al., 2009).

A ACV tem normas de aplicação internacional estabelecidas pela *International Organization for Standardization* (ISO). As normas mais atuais são a ABNT NBR ISO 14040:2009 – que estabelece princípios e estruturas – e a ABNT NBR ISO 14044:2009 – que dispõe sobre requisitos e orientações.

Existem dois tipos de metodologia de ACV atualmente: atribucional e consequential. A atribucional tem foco no produto sem avaliar o seu contexto no mercado. Descreve seus impactos ambientais através do mapeamento das ligações físicas e energéticas do processo. Está consolidada no meio científico e, portanto, é a metodologia mais utilizada. A ACV consequential ainda está em discussão no meio acadêmico e tem foco nos efeitos de uma mudança dentro de um processo. É mais adequada como ferramenta de apoio a tomada de decisão ao considerar diferentes tipos de cenários futuros, porém tem como desvantagem o alto nível de incertezas associados ao uso de dados marginais (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

### **2.3.1. Fases da ACV**

De acordo com a ISO 14040:2009, a ACV é desenvolvida em quatro fases (Figura 11): definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto e interpretação dos resultados.



**Figura 11: Estrutura da avaliação do ciclo de vida**  
**Fonte: ABNT (2009).**

### **2.3.2. Fase 1: Definição de objetivo e escopo**

O objetivo do estudo deve conter a aplicação pretendida, as motivações para o estudo, o público-alvo e esclarecer se existe a intenção de divulgar o resultado publicamente. O escopo tem que ser bem definido para ser compatível ao objetivo apresentado. Deve conter a definição da função do produto ou serviço, unidade funcional, fluxo de referência e fronteira do sistema.

A ISO 14040 define a unidade funcional como “desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência” e o fluxo de referência é a quantidade de produto necessária pra cumprir a unidade funcional. Já a fronteira do sistema delimita quais etapas do ciclo de vida farão parte do estudo, podendo ser do berço ao túmulo, ou seja, o ciclo completo ou partes dele. Deve-se ter cuidado para que as delimitações feitas não afetem o objetivo desejado.

Além disso, é importante definir as fontes de dados, pressupostos adotados e suas limitações de forma que o estudo fique claro para uma adequada interpretação por parte do público-alvo. Esses aspectos estão ligados a transparência do estudo, de suma importância para a sua confiabilidade.

Processos multifuncionais devem ter seu procedimento de alocação definido no escopo. A alocação consiste na divisão dos impactos ambientais de um processo entre seus coprodutos, podendo ser feito por massa, energia ou parâmetros econômicos (FINNVEDEN *et al.*, 2009). A ISO 14044:2009 menciona que a alocação deve ser evitada sempre que possível através da divisão do processo em sub-processos ou expansão do sistema, de forma a evitar as incertezas geradas. Além disso, deve-se definir a metodologia e as categorias de impacto no escopo.

### **2.3.3. Fase 2: Análise de inventário**

A análise de inventário tem como principal objetivo o levantamento de dados do processo e sua modelagem. Convém ressaltar que o somatório de todas as entradas de um processo deve ser igual ao somatório de todas as saídas. O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dará base para a fase seguinte de avaliação do impacto e também atua como ferramenta de ajuste do escopo.

Todos os processos elementares incluídos na fronteira do sistema devem ter seus dados obtidos. Segundo a ISO 14.040:2009, os dados a serem incluídos devem passar pela análise de sensibilidade, ou seja, passar por uma avaliação para identificar os efeitos da escolha feita no resultado final da ACV. Esse processo iterativo pode resultar na redefinição da fronteira do sistema.

Os dados podem ser calculados, mensurados ou estimados e de origem primária ou secundária, contanto que todas as informações fiquem claras para o público alvo. Como já foi dito anteriormente, a transparência é essencial para a confiabilidade do estudo. Os dados coletados de fontes disponíveis ao público devem ser referenciados.

A coleta de dados por fontes primárias é um processo demorado e nem sempre são obtidos todos os dados necessários. Nesse contexto foram criados diversos bancos de dados nas últimas décadas, o que também evita a compilação de dados duplicados (FINNVEDEN *et al.*, 2009). Muitos desses bancos de dados são oferecidos como parte do software de ACV.

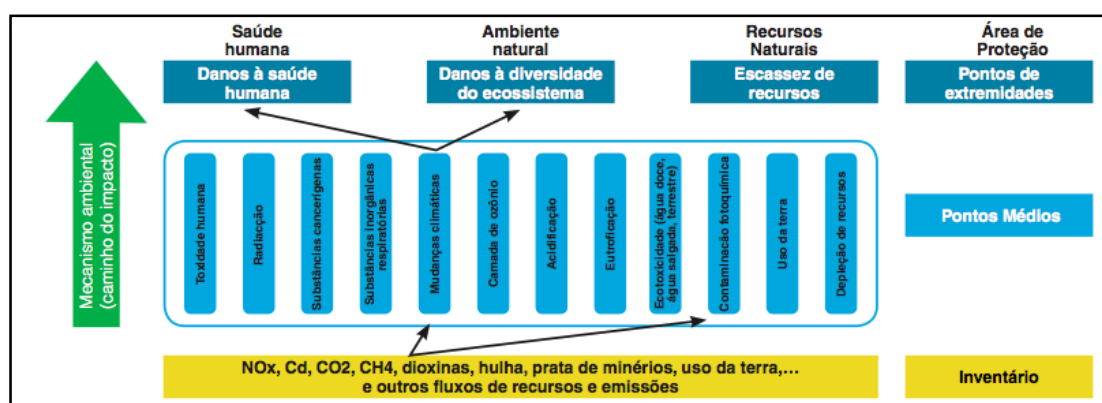
Um dos maiores problemas do uso de banco de dados está associado à regionalidade e temporalidade. Ainda existem poucas iniciativas no Brasil. Recentemente foi criado o SICV Brasil – Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida, desenvolvido pelo Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) (CONMETRO, 2010).

Seu desenvolvimento permite acelerar a implementação da utilização da ACV. A maior parte dos bancos de dados utilizados nos estudos de ACV tem origem europeia e nem sempre representa a realidade brasileira, podendo gerar resultados incoerentes.

A prioridade de uso deve ser sempre para os dados locais. Quando não for possível obtê-los, pode-se utilizar os de outras origens desde que sejam avaliadas as similaridades e diferenças do desempenho ambiental e tecnológico do processo avaliado pela ACV. Algumas ferramentas possibilitam modificações no banco de dados original para criar versões adaptadas para a realidade em estudo (OSSÉS DE EICKER *et al.*, 2010).

### 2.3.4. Fase 3: Avaliação de Impacto

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem o objetivo de interpretar os dados obtidos no inventário e associá-los aos impactos ambientais potenciais do sistema, avaliando sua magnitude e significância. Nessa fase são feitas a classificação e a caracterização, enquanto que a seleção das categorias de impacto já foi feita no escopo. Classificação é a correlação dos resultados da ICV dentro de uma mesma categoria de impacto e caracterização é a conversão desses resultados para unidades comuns através do fator de caracterização (ISO, 2009).



**Figura 12: Etapas esquemáticas do inventário aos pontos de extremidade**  
**Fonte: European Commission (2010).**

As categorias de impacto, chamadas de pontos médios (figura 12), devem ser selecionadas no escopo de forma a garantir que a escolha não induza a obtenção de um resultado relacionado aos próprios interesses de quem realiza a ACV ao invés de ser uma modelagem da realidade. Na classificação é feita a correlação entre os fluxos

resultantes do inventário e as categorias de impacto selecionados de acordo com o potencial de contribuição que cada uma dessas substâncias tem para diferentes problemas ambientais (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Na caracterização o impacto de cada emissão ou uso de recurso é modelado quantitativamente, de acordo com o mecanismo ambiental (figura 12). O indicador de categoria é obtido em uma unidade comum para todas as contribuições dentro de uma mesma categoria de impacto através da aplicação do fator de caracterização (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Opcionalmente podem ser feitos a normalização, agrupamento e ponderação para uma melhor compreensão dos resultados da ACV. Segundo a ISO 14.044, na normalização os resultados da caracterização são relacionados a valores de referência de forma a expressar a magnitude relativa dos indicadores de impacto. Agrupamento é a formação de grupos de categorias de impacto ou a hierarquização de acordo com uma escolha de valores subjetivo as preferências de quem aplica a metodologia da ACV. A ponderação, assim como o agrupamento, é baseada em escolha de valores onde utiliza-se fatores numéricos para converter os resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto de modo a obter a significância relativa de acordo com o objetivo do estudo (ISO, 2009; FINNVEDEN *et al.*, 2009).

### **2.3.5. Fase 4: Interpretação**

A interpretação é a fase em que se analisa em conjunto os dados e resultados obtidos do inventário e da avaliação de impacto de forma a obter conclusões, identificar e explicar limitações do estudo e prover recomendações para o público-alvo. Os resultados devem ser interpretados de acordo com as premissas do objetivo e escopo. Nessa etapa são respondidos os questionamentos realizados na primeira fase da ACV (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Incertezas de diferentes tipos, por variabilidade dos dados ou falta de informação, podem aparecer em todas as fases na ACV. A fase de interpretação é de grande importância para a análise de incerteza, principalmente quando o estudo será usado como ferramenta de tomada de decisão (FINNVEDEN *et al.*, 2009). Nessa etapa é avaliado como as incertezas dos dados, pressupostos e escolhas se propagam nos cálculos e como afetam a confiabilidade dos resultados.

O estudo deve ser avaliado através da verificação de completeza, sensibilidade e consistência visando o entendimento das incertezas do resultado. A verificação de completeza consiste em assegurar que todos os dados necessários para a interpretação e informações relevantes estejam disponíveis e completos. Na ausência de um dado ou informação relevante deve-se revisar as fases de ICV e AICV ou ajustar o objetivo e escopo. Caso seja irrelevante, deve ser justificado na conclusão (ISO, 2009).

A análise de sensibilidade verifica como as incertezas afetam os resultados obtidos considerando as premissas adotadas no objetivo e escopo, a metodologia adotada e os resultados das demais fases do estudo. Já a verificação de consistência visa verificar se os pressupostos, métodos e dados utilizados são consistentes. Podem ser examinadas questões como a regionalidade e temporalidade (ISO, 2009).

## **2.4. ACV de sistemas BRT: estudos realizados**

O objetivo da revisão bibliográfica dos estudos existentes de ACV de sistemas BRT é fazer uma compilação, de forma a identificar as metodologias aplicadas. Foram selecionados artigos com foco no ciclo de vida como um todo, excluindo aqueles que abordam exclusivamente o ciclo do combustível ou outros sistemas rodoviários. O Science Direct e o Google foram utilizados como banco de dados. A tabela 2 apresenta um quadro resumo dos resultados encontrados quanto a emissões de GHG pelos estudos analisados.

CUI *et al.* (2010) realizam um estudo de pegada de carbono do sistema BRT da cidade de Xiamen através da aplicação metodologia de ACV. A fronteira do sistema incluiu infraestrutura, combustível e manufatura do veículo desde a extração da matéria-prima até a disposição final. A pegada de carbono da infraestrutura foi normalizada de acordo com o tempo de vida útil do projeto de 50 anos, já que as emissões referentes a produção de matéria-prima, transporte, construção, descomissionamento e reciclagem ocorrem apenas no início ou no final do ciclo de vida da infraestrutura. Os resultados mostraram que a operação e manutenção do sistema são responsáveis por 55,5% do total das emissões.

TERI (2012) aplicou a metodologia de ACV para obter o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> dos seguintes modos de transporte da Índia: BRT, metrô, trem, autoestrada e rodovia. O projeto do BRT tem um total de 25,4 km, vida útil de 30

anos e está localizado na cidade de Ahmedabad. A fronteira do sistema incluiu a construção e manutenção da via e dos veículos, operação do sistema e não considerou o fim do ciclo de vida. Os principais materiais, em quantidade, utilizados na construção da via foram cimento e asfalto. Como conclusão, a operação dos veículos é o principal responsável pela emissão de CO<sub>2</sub>, seguido da manufatura dos veículos e construção da via.

CHESTER *et al.* (2012) analisou as emissões de um automóvel, do BRT e do VLT de Los Angeles. A fronteira do sistema do BRT incluiu a construção, operação e manutenção da infraestrutura (inclusive as estações); manufatura, operação e manutenção dos veículos e a produção e consumo de energia (combustíveis e eletricidade), excluindo a etapa do fim de vida. A conclusão obtida é que embora o consumo de energia e as emissões sejam causadas principalmente pela operação do veículo, os demais componentes do ciclo de vida como manufatura/ manutenção do veículo e a produção de energia contribuem significativamente para o inventário. O estudo também analisa o tempo necessário para compensar a emissão dos gases de efeito estufa produzidos em relação às emissões de automóvel evitadas. A compensação ocorre ao longo da primeira década de funcionamento.

**Tabela 2: Quadro resumo dos estudos selecionados de ACV de sistemas BRT**

Fonte: Autor/ Ano	Local	Vida Útil do Sistema	Contribuição para emissões totais					Total
			Construção da Infraestrutura (%)	Manufatura do Veículo (%)	Manutenção (%)	Operação (%)	Fim de vida (%)	
CUI <i>et al.</i> (2010)	Xiamen, China	50 anos	38,1	1,4	10,8	54,2	-4,7	55.927 t CO <sub>2</sub> eq por ano
TERI (2012)	Ahmedabad, Índia	30 anos	3,8	5,7	2,6	87,9	-	42 g CO <sub>2</sub> / pkm
CHESTER <i>et al.</i> (2012)	Los Angeles, EUA	Veículo: 15 anos; Concreto: 15 anos; Asfalto: 20 anos	18,5	17,8*	-	63,8	-	66,78 g CO <sub>2</sub> /pkm

\*inclui manutenção do veículo



### 3. ACV do BRT Transcarioca: estudo de caso

#### 3.1. Objetivo e escopo

O objetivo do presente estudo consiste em quantificar os potenciais impactos ambientais do BRT Transcarioca, bem como identificar as fases de seu ciclo de vida e processos com maior contribuição para as principais categorias de impacto. Será aplicada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida com o uso da ferramenta Umberto®. A análise possibilita a identificação das fases e materiais que geram maior impacto ambiental.

Os resultados podem ser usados como base para estudos futuros que identifiquem possíveis melhorias ao longo de todo o ciclo de vida, como o uso de materiais e combustíveis alternativos que permitam um menor consumo de energia.

##### 3.1.1. Função e Unidade Funcional

Os estudos de ACV de sistemas de transporte normalmente utilizam a unidade funcional (UF) passageiro quilômetro viajado (pkm) para transporte de passageiros e a unidade toneladas-quilômetro (tkm) para transporte de carga (SPIELMANN *et al.*, 2007). Como a principal função de um sistema BRT é carregar passageiros, a UF escolhida para o BRT Transcarioca foi de 1 pkm (ANDRADE e D'AGOSTO, 2016). De acordo com REAL e RIBEIRO (2008), TERI (2012) e ANDRADE (2016), o cálculo de pkm é feito pelo produto do número total de passageiros transportados pela real distância por eles viajada. A tabela 3 mostra os dados utilizados para o cálculo de passageiro-quilômetro para a vida útil de 20 anos.

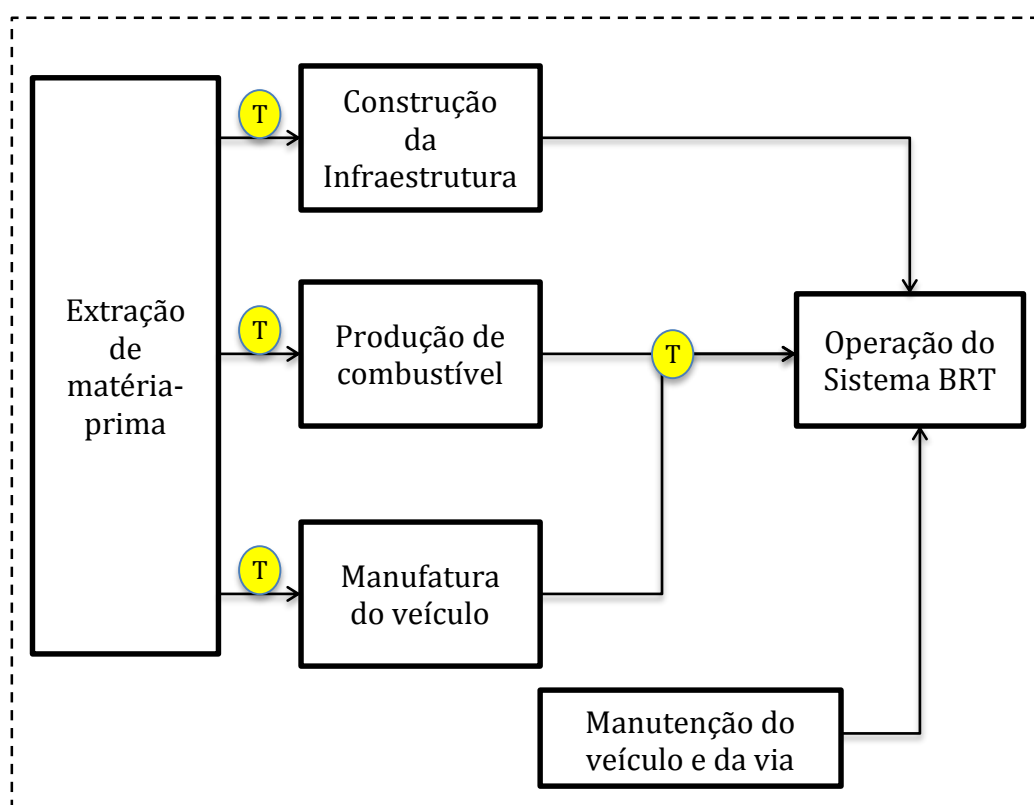
**Tabela 3: Dados para o cálculo de pkm do BRT Transcarioca**

Passageiros de out/ 2015 a set/2016 (1 ano)	63.165.865	passageiros
Distância média viajada por passageiro	11	km
Vida útil	20	anos
pkm (20 anos)	13.896.490.300,00	

**Fonte: elaboração própria a partir de INFRAESTRUTURA URBANA (2011), ITDP (2015), PRODATA MOBILITY (2016)**

### 3.1.2. Fronteira do Sistema

O ciclo de vida do BRT Transcarioca foi avaliado desde a extração dos materiais até a fase de uso, incluindo o transporte dos materiais. O escopo do ICV inclui a construção da infraestrutura do sistema BRT, a produção do combustível, a fabricação do veículo e a operação do sistema. Para a construção da infraestrutura foi considerado o material utilizado para construção da via, das obras de arte<sup>5</sup> e das estações. As etapas do ciclo de vida consideradas para o presente estudo estão ilustradas na figura 13.



\* T é referente ao transporte dos materiais

**Figura 13: Fronteira do Sistema**

A fase do fim de vida não foi incluída devido a complexidade para avaliar as opções de descarte final e reuso do material (CHESTER e HORVARTH, 2009). Durante a revisão bibliográfica foi observado que para os estudos de TERI (2012), CHESTER *et al.* (2012) e ANDRADE (2016), a etapa de fim de vida não foi incluída para a análise do ciclo de vida dos meios de transporte considerados. CHESTER (2008) justificou a exclusão da etapa de descarte do veículo e infraestrutura afirmando que

<sup>5</sup> O termo é referente a construções únicas, tais como pontes, túneis e viadutos.

foram consideradas as etapas que normalmente tem maior contribuição para o inventário de emissões. Ainda acrescentou que os resultados obtidos são conservadores já que é coerente assumir que as contribuições dessa fase são positivas para o inventário. CHESTER *et al.* (2012) e TERI (2012) avaliaram o ciclo de vida do BRT de Los Angeles e New Delhi, respectivamente, e também não consideraram o fim de vida. CUI *et al.* (2010) incluiu o fim de vida em seu estudo sobre o BRT de Xiamen, Índia, mas pode ser observado que a reciclagem e aterro tem representação menor do que 7% do total do inventário.

## **3.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

### **3.2.1. Levantamento de Dados**

Diversas avaliações de impacto são afetadas por problemas com disponibilidade e qualidade dos dados. Segundo MATUTE *et al.* (2014), a imprecisão dos dados não deve ser uma barreira para conduzir uma avaliação do ciclo de vida, mas é preciso ter pensamento crítico para avaliar os possíveis erros que vão impactar a avaliação. Em geral, os dados devem ser precisos o suficiente para que decisões tomadas baseadas na análise não tenham resultado distinto, caso estivessem disponíveis dados primários.

A falta de transparência é um fator limitante para o desenvolvimento da análise do ciclo de vida no Brasil. Para o setor da construção civil é especialmente difícil a obtenção de dados e informações confiáveis. Isso se deve ao receio das empresas em divulgarem seus processos produtivos devido à concorrência, plágio ou transmissão de imagem negativa associada à empresa (FILHO *et al.*, 2016).

A coleta de dados inclui os materiais, energia consumida, resíduos e emissões de cada processo dentro da fronteira do sistema. Dados incompletos, inacessíveis ou que estavam faltando foram completados com dados secundários a partir da base de dados Ecoinvent v. 3.1. A maior parte das informações do banco de dados tem origem europeia, porém diversos processos já foram mapeados para as demais regiões do mundo. Um quadro resumo com os principais dados de entrada de material e energia do BRT Transcarioca pode ser observado no anexo II.

Os impactos indiretos devido ao gasto de energia e emissões resultantes da infraestrutura de um processo ou produto foram incluídas, com base no banco de dados Ecoinvent v.3.1.

As entradas de energia e as emissões de uma fase podem ocorrer continuamente ao longo de toda a vida útil do BRT (por exemplo, as emissões referentes a queima de combustível do uso do ônibus articulado e o consumo de energia elétrica nas estações), ou uma única vez ao longo do processo, antes mesmo do início da operação do sistema. Esses valores foram ajustados adequadamente como será visto nos próximos tópicos.

### 3.2.1.1. Manufatura do veículo

Os dados da fabricação do veículo BRT foram baseados no inventário do chassi B12M da Volvo (DANIELSSON e GUNNARSSON, 2011). Para a carroçaria, identificou-se, pela tabela 4, que os principais materiais da composição de um ônibus a diesel são ferro, aço, alumínio, vidro e plástico. A partir dessa constatação, foi calculada uma estimativa do inventário da carroçaria do veículo BRT através da comparação entre a produção do ônibus comum do Ecoinvent (Volvo 8500) e o chassi do ônibus articulado B12M, em detalhes no anexo I. A manutenção do veículo articulado também foi incluída na modelagem.

**Tabela 4: Composição de um ônibus a diesel.**

Materiais	Ônibus a diesel
Ferro/ Aço	64,16%
Alumínio	15,73%
Cobre	1,06%
Chumbo	0,85%
Termoplásticos	5,22%
Borracha	3,82%
Vidro	4,63%
Madeira	3,74%
Pintura	0,28%
Betume	0,51%

**Fonte: Adaptado de SUNDVOR (2013).**

A vida útil considerada para o articulado é de 10 anos (HIDALGO *et al.*, 2013; CAMARAPOA, 2015) e, para a vida útil da via de 20 anos, será considerada a troca total dos ônibus. Uma premissa semelhante foi adotada para a avaliação do ciclo de vida da linha 4 do metrô do Rio de Janeiro em ANDRADE e D'AGOSTO (2016).

Os chassis da marca Volvo são fabricados em Curitiba e foi considerada a colocação da carroceria da marca Neobus, em Caxias do Sul (RS). Logo, foi estimado que o veículo percorre cerca de 1.050 km até a entrega em seu destino final no Rio de Janeiro. O deslocamento entre a produção do chassi até a etapa de colocação da carroceria não foi considerado devido a falta de dados disponíveis.

### **3.2.1.2. Produção do combustível**

O combustível utilizado nos sistemas de transporte é um componente significante da avaliação do ciclo de vida pois sua distribuição é feita por meio de um complexo sistema que também consome energia e gera emissões. Energia é consumida para extração da matéria-prima bruta, refino e transporte, além das emissões referentes ao próprio uso (MATUTE *et al.*, 2014).

Como dito anteriormente, o óleo diesel utilizado no Brasil é uma mistura de óleo diesel com 7% de biodiesel fornecido, no Rio de Janeiro, pela REDUC e Comperj. O abastecimento de diesel comum é feito na garagem da empresa responsável pelo veículo. A distância média entre os fornecedores e as empresas envolvidas no consórcio Transcarioca (FETRANSPOR, 2015) foi calculada em 41 km.

### **3.2.1.3. Construção da infraestrutura**

Na construção da infraestrutura, os materiais utilizados responsáveis pela maior quantidade de emissões de gases do efeito estufa são concreto, cimento e aço (CHESTER e HORVARTH, 2010; MATUTE *et al.*, 2014). No caso da via da Transcarioca, esses materiais são providos por fornecedores brasileiros.

A via tem extensão de 39 km, composta por 10 viadutos, nove pontes e três mergulhões, passando por 27 bairros. Os dados de entrada referentes a construção foram retirados do RIO PREFEITURA (2014), com valores aproximados de 21.000 toneladas de aço, 270.000 m<sup>3</sup> de concreto e 202.000 toneladas de asfalto. Os dados

foram primeiramente ajustados a unidade 1 metro \* ano, dividindo a quantidade de material pela extensão total da via Transcarioca (39 km) e pela vida útil de 20 anos. A manutenção da via também foi incluída na modelagem.

O transporte desses materiais foi feito por caminhões a diesel para o local de construção. Para o cálculo da média de distância percorrida, foram considerados a Votorantim Siderurgica e Belgo como principais fornecedores de aço, Holcin para concreto e Craft para asfalto (INFRAESTRUTURA URBANA, 2013; BRASIL ENGENHARIA, 2016).

As estações do BRT Transcarioca são edificadas com elementos pré-fabricados em aço e foram incluídas na fase de construção da infraestrutura. Para fins de modelagem, foram considerados 16 toneladas de aço para cada uma das 47 estações, baseado nos dados existentes para a linha Transoeste (CBCA, 2014). De acordo com LIMA (2013), era previsto o uso do mesmo modelo de estação implantado na Transoeste para os outros três corredores.

### 3.2.1.4. Uso

Em relação as estações, cada uma tem um consumo médio mensal de cerca de 155 mil kWh de energia elétrica para iluminação, alimentação de catracas e portas automáticas, câmeras, máquinas de autoatendimento, porta de aço e sistemas da bilheteria (BRTRIO, 2015). Mais de 72% das estações do corredor Transcarioca funcionam 24 horas por dia e as demais funcionam entre 20 e 21 horas por dia. A origem da energia elétrica no Brasil pode significar uma vantagem em relação as emissões. A principal fonte de geração do país é a hidráulica com 64% do total, compondo uma matriz energética predominantemente renovável (EPE, 2015).

Fatores de emissão são a massa de poluentes emitidos por distância percorrida (CETESB, 2015). A tabela 5 apresenta os dados utilizados para a modelagem, que representam valores médios de emissão para o ônibus articulado correspondente a fase 7 do PROCONVE.

**Tabela 5: Fatores de emissão do ônibus articulado (g/km)**

<b>Tipo de ônibus</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>MP</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
Articulado	0,54	0,015	2,69	0,0209	2072

**Fonte: ANTP e VOLVO DO BRASIL, 2015 apud FELLER e UGAYA, 2016.**

O ajuste das emissões para a unidade funcional foi feito da seguinte forma:

$$\text{emissões por pkm} = \frac{\text{fator de emissão } \left(\frac{\text{kg}}{\text{vkm}}\right)}{\text{média de passageiros/viagem}}$$

Onde vkm = quantidade de veículo-quilômetro – quilometragem percorrida pelo veículo em um determinado período.

A média de passageiros por viagem foi feita pelo quociente base na média de passageiros por dia e no número total de viagens por dia (tabela 6).

**Tabela 6: Dados para o cálculo da média de passageiros/ viagem**

Média de passageiros por dia*	119.168
Número total de viagens/ dia	994
<b>Média de passageiros/ viagem</b>	<b>120</b>

\*A média de passageiros por dia, nesse caso, foi calculada com base no primeiro ano de funcionamento do BRT Transcarioca (junho/2014 a maio/2015) para se adequar a realidade temporal da referência bibliográfica utilizada como fonte do número total de viagens por dia.

**Fonte: KLEIMAN e VALE (2016), PRODATA MOBILITY (2016)**

### **3.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)**

O método utilizado na AICV foi o ReCIPE Midpoint (H) w/o LT. Este utiliza como base o método CML que fornece a abordagem orientada ao problema (*midpoint*) e tem a vantagem de utilizar um grande número de categorias de impacto ambiental (PIEKARSKI *et al*, 2012). O objetivo é transformar a longa lista de resultados do inventário do ciclo de vida em um número limitado de indicadores de impactos. Ao todo são considerados 18 indicadores de pontos médios (tabela 7). Esses pontos médios estão relacionados as seguintes questões (GOEDKOOOP *et al.*, 2013; IPCC, 2014):

- **Mudanças climáticas** – Mudanças climáticas se referem a mudanças no clima que persistem por longos períodos devido ao aumento da absorção da radiação. Pode ser resultante de processos naturais, como erupções vulcânicas, ou por mudanças antropogênicas, como o uso da terra. O indicador analisa os efeitos relativos do acrescimento de uma pequena quantidade de CO<sub>2</sub> ou outros GEE na atmosfera.

- **Depleção da Camada de Ozônio** – A camada de ozônio é constantemente formada e destruída pela ação dos raios solares e reações químicas na estratosfera. A depleção

da camada de ozônio ocorre se a taxa de destruição do ozônio é aumentada devido a emissões fugitivas de substâncias antropogênicas que são persistentes na atmosfera. A camada de ozônio é vital para a vida na terra porque absorve radiação solar ultravioleta UV-B, a qual representa um risco para o ecossistema. O potencial de depleção da camada de ozônio é definido como a medida relativa da capacidade de depleção do ozônio de um recalcitrante químico contendo átomos de cloro ou bromo.

- **Acidificação** – A deposição de substâncias inorgânicas na atmosfera, tais como sulfatos, nitratos e fosfatos, modificam a acidez do solo. Para quase todas as espécies de plantas existe um ótimo de acidez e grandes desvios desse valor pode ser nocivo para a espécie. Os principais poluentes acidificantes são  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{SO}_2$ .

- **Eutrofização** – Pode ser definida como um enriquecimento por nutrientes do ambiente aquático devido a disposição de rejeitos, afetando a biodiversidade. A eutrofização como resultado das atividades antropogênicas é um dos principais fatores que determinam a qualidade ecológica do meio. Fosfato e nitrogênio podem ser provenientes de fontes naturais ou fontes antropogênicas, principalmente industriais e da agricultura.

- **Toxicidade** – Toxicidade humana corresponde a persistência, acumulação e efeitos tóxicos de um agente químico na cadeia alimentar, ocasionando potenciais danos à saúde humana.

- **Danos à saúde humana devido ao material particulado e ao ozônio** – Material particulado é uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas que causa problemas de saúde ao ser inalado. As partículas são classificadas de acordo com o seu diâmetro, pois representa diferentes possibilidades de penetração no sistema respiratório. Partículas com diâmetro entre 2.5-10  $\mu\text{m}$  são mais significativas em casos com mortalidade. O material particulado pode ser de origem antropogênica ou natural. Os indicadores focam no material particulado de origem antropogênica, já que é a única fração afetada pelas atividades humanas.

Quanto ao ozônio, este é formado como resultado das reações fotoquímicas do  $\text{NO}_x$  e de compostos orgânicos voláteis, com exceção do metano. Esse processo é intensificado no verão e é danoso a saúde humana pois afeta as vias respiratórias e o pulmão.



- **Radiação Ionizante** – Refere-se aos danos à saúde humana devido a liberação de material radioativo para o meio ambiente.
- **Uso da Terra** – Os indicadores de impactos relacionados ao uso da terra refletem os danos ao ecossistema causados pela ocupação e transformação da terra. Apesar de existirem diversas ligações entre como a terra é usada e a perda de biodiversidade, os indicadores se concentram em dois mecanismos: a ocupação de uma certa área por um tempo definido ( $m^2 \times \text{ano}$ ) e transformação de uma certa área ( $m^2$ ). Muitas vezes a ocupação ocorre em áreas que já haviam sido transformadas.
- **Depleção Hídrica** – Análise do consumo de água e consequente redução do volume disponível.
- **Depleção de Recursos Minerais** – Recurso mineral é uma concentração de minério na crosta terrestre em condições que viabilizem economicamente e tecnicamente uma eventual extração. A presente questão avalia a redução da disponibilidade do recurso no estoque.
- **Depleção de Combustíveis Fósseis** – O fator de caracterização utilizado para essa categoria é baseado em fontes convencionais e não convencionais, dado que fontes convencionais, a medida em que são exploradas, tornam-se mais custosas, necessitam de maior gasto energético e perdem a qualidade, de forma em que se torna necessária a exploração de recursos não convencionais. Esse indicador analisa a diminuição de oferta de combustíveis fósseis devido ao consumo pelos seres humanos frente a oferta do recurso.

**Tabela 7: Categorias de impacto do ReCIPe Midpoint (H) w/o LT**

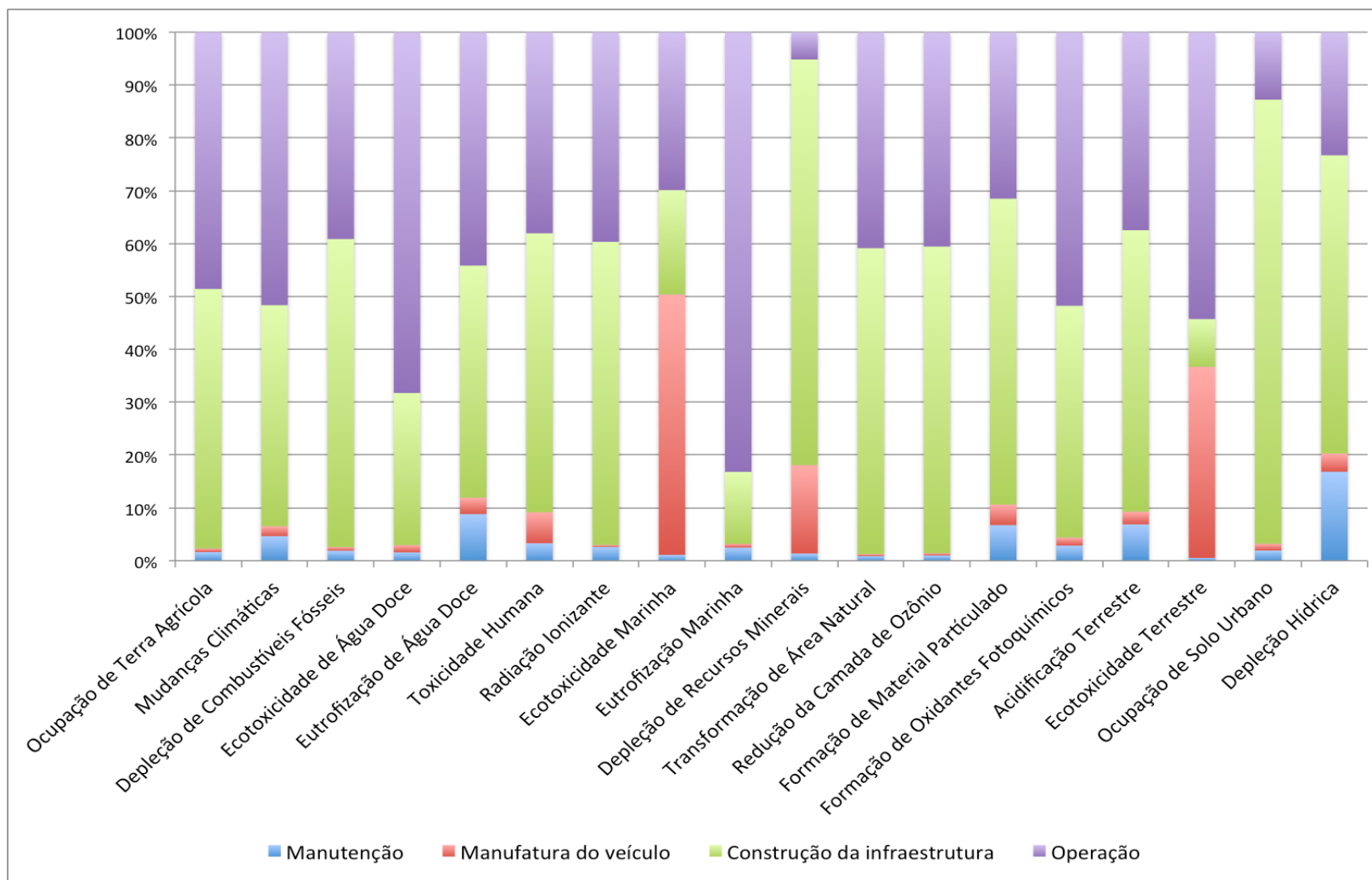
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>
Ocupação de Terra Agrícola	m <sup>2</sup> x ano
Mudanças Climáticas	kg CO <sub>2</sub> eq
Depleção de Combustíveis fósseis	kg óleo eq
Ecotoxicidade de Água Doce	kg 1,4DCB eq
Eutrofização de Água Doce	kg P eq
Toxicidade Humana	kg 1,4DCB eq
Radiação Ionizante	kg U <sub>235</sub> eq
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4DCB eq
Eutrofização Marinha	kg N eq
Depleção de Recursos Minerais	kg Fe eq
Transformação de Área Natural	m <sup>2</sup>
Redução da Camada de Ozônio	kg CFC 11 eq
Formação de Material Particulado	kg PM10 eq
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC
Acidificação Terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4DCB eq
Ocupação de Solo Urbano	m <sup>2</sup> x ano
Depleção Hídrica	m <sup>3</sup>

**Fonte: adaptado de GOEDKOOPE *et al.*, 2013**

### **3.4. Interpretação dos Resultados**

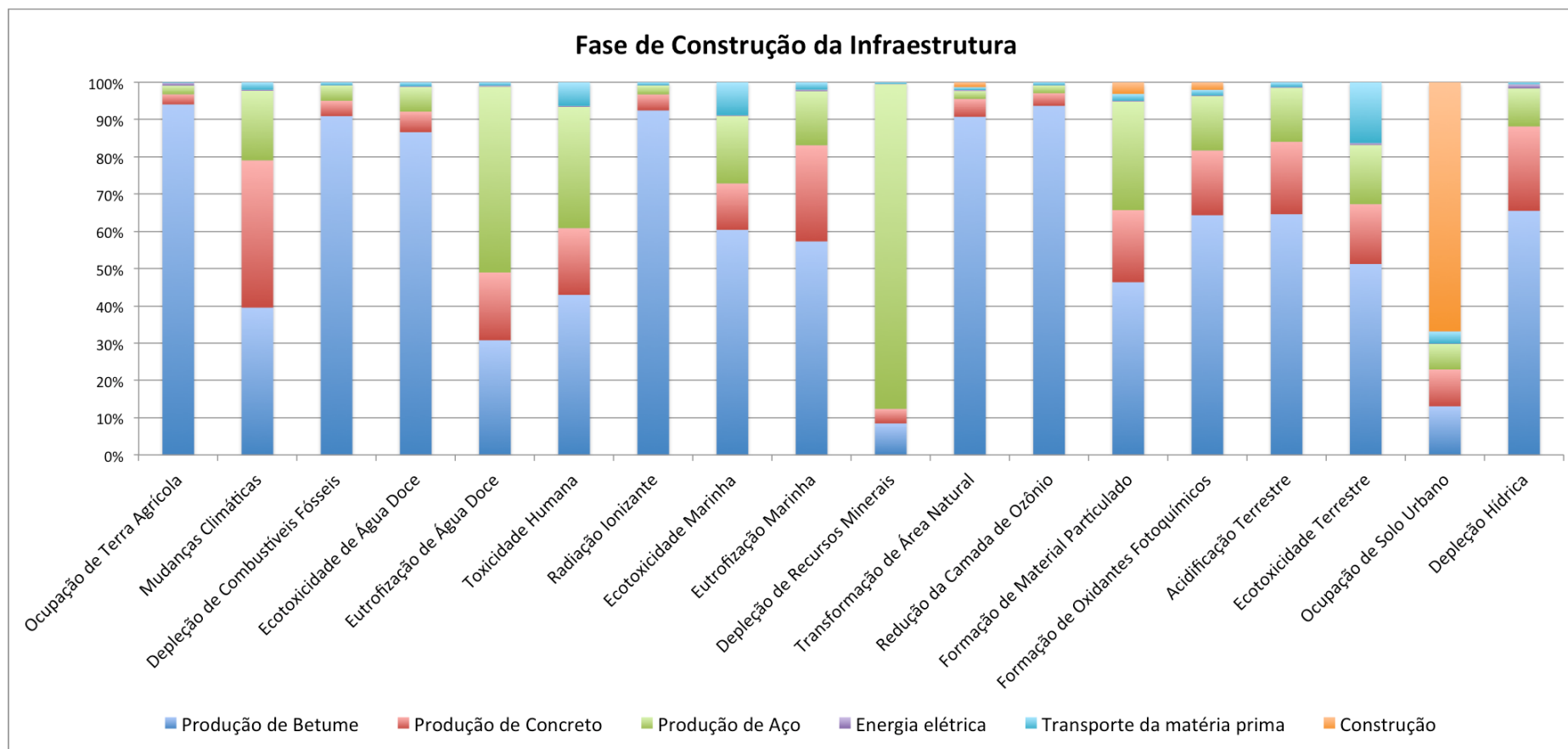
Os resultados apresentados aqui são referentes à ACV do BRT Transcarioca para as categorias de impacto mostradas na tabela 6. É importante ressaltar que os impactos são estimativas dos impactos potenciais e que a modelagem apresenta certo grau de incerteza, principalmente pela utilização de dados secundários.

A partir da figura 14 pode-se identificar que as fases do ciclo de vida mais impactantes são a construção da infraestrutura e operação do sistema, para a maior parte das categorias de impacto. As demais fases tem pouca participação. Nos tópicos a seguir, serão descritos os impactos das etapas do ciclo de vida do BRT para cada categoria de indicadores.

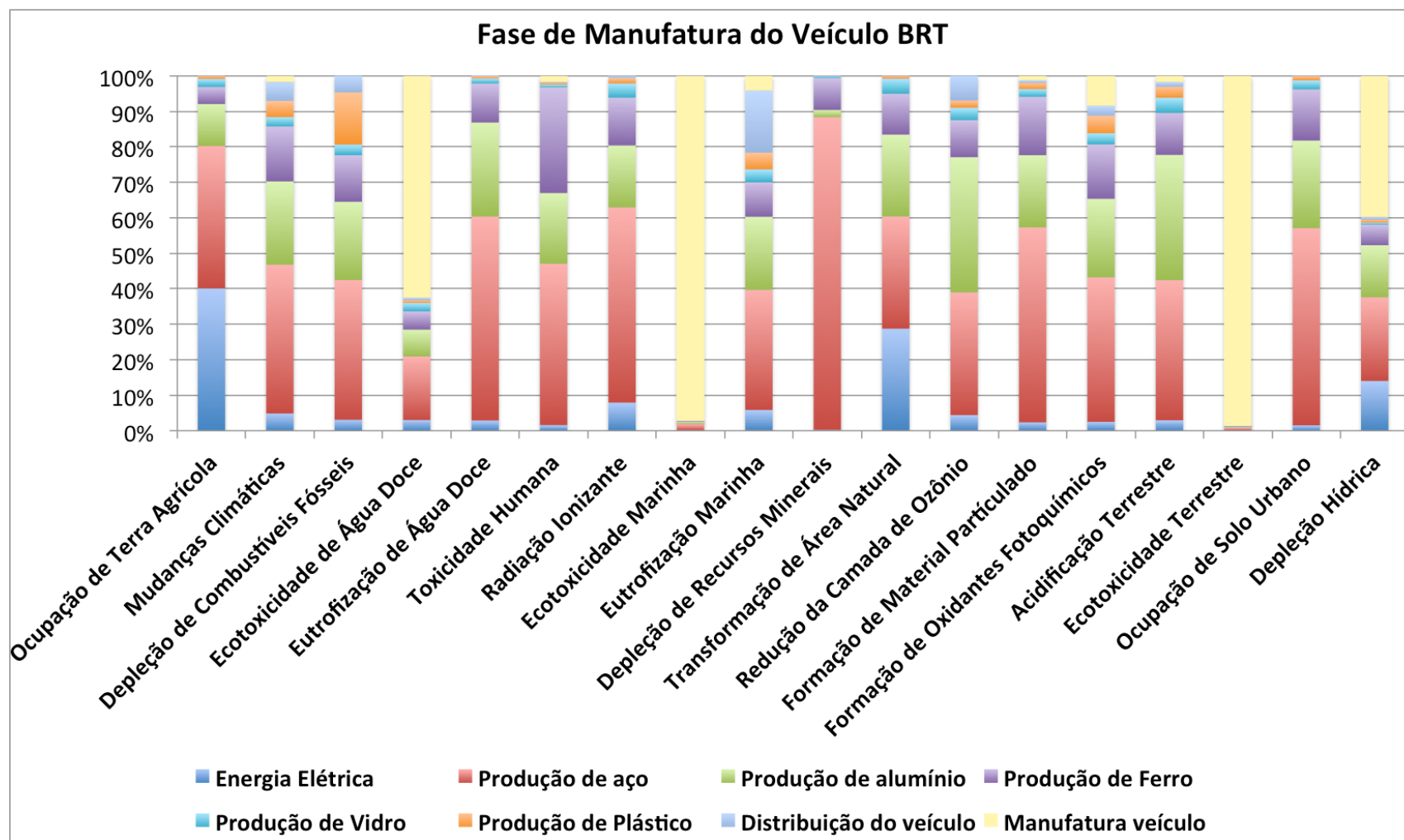


**Figura 14: Contribuição das fases do ciclo de vida do BRT Transcarioca para as categorias de impacto.**

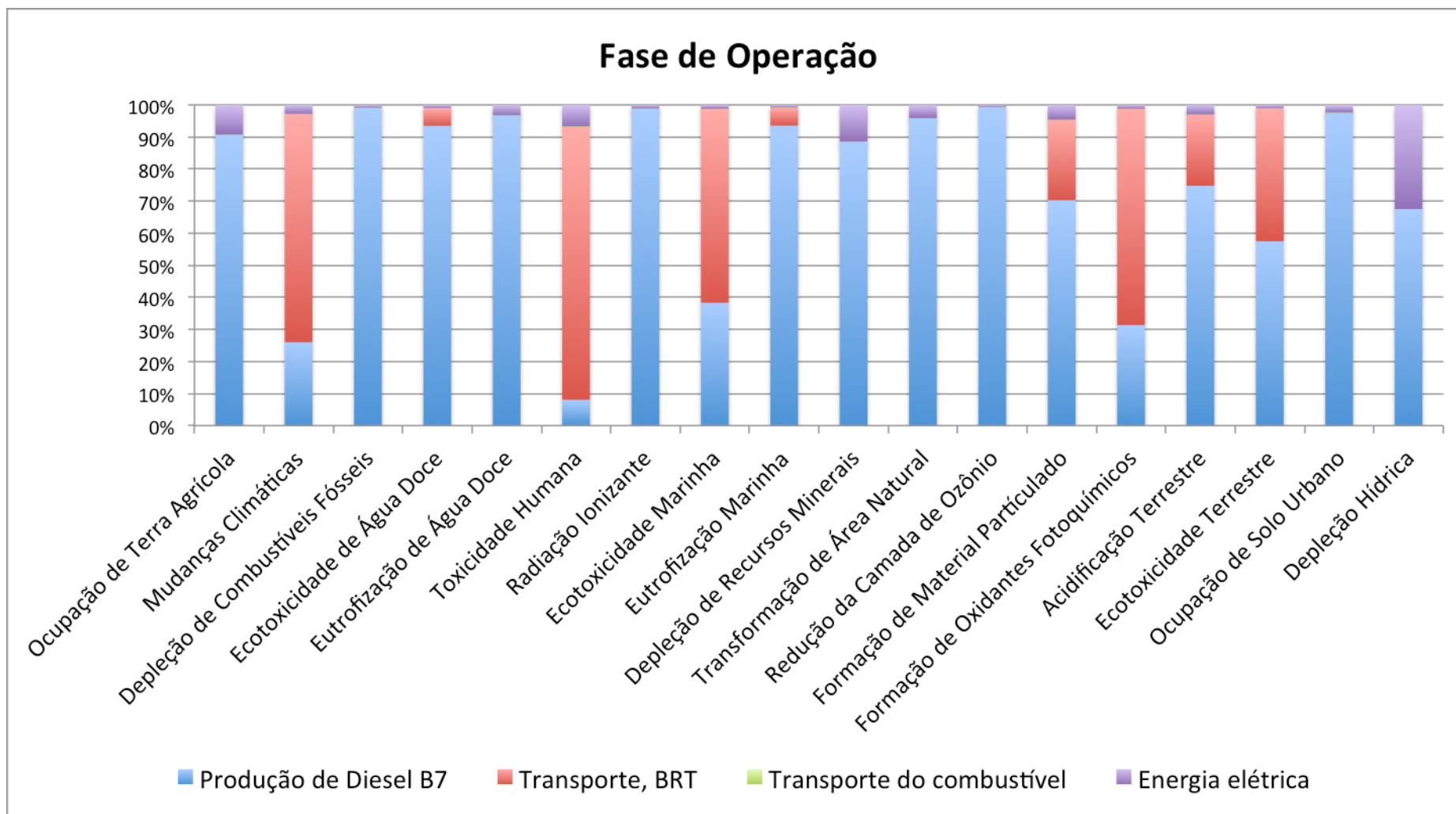
As figuras 15, 16, 17 e 18 mostram a contribuição dos processos para cada fase do ciclo de vida, permitindo identificar quais são mais significativos para cada categoria de impacto. Para a fase de construção da infraestrutura, a produção de betume é o principal processo responsável pela maior parte dos impactos ambientais negativos. Já na fase da manufatura do veículo BRT, a produção de aço tem maior contribuição para as categorias de impacto. Durante a fase de operação, o processo mais significativo é a produção do combustível diesel. Por fim, a manutenção do veículo é mais impactante do que a manutenção da via.



**Figura 15: Contribuição dos processos da fase de construção da infraestrutura para cada uma das categorias de impacto**



**Figura 16: Contribuição dos processos da fase de manufatura do veículo BRT para cada uma das categorias de impacto**



**Figura 17: Contribuição dos processos da fase de operação para cada uma das categorias de impacto**

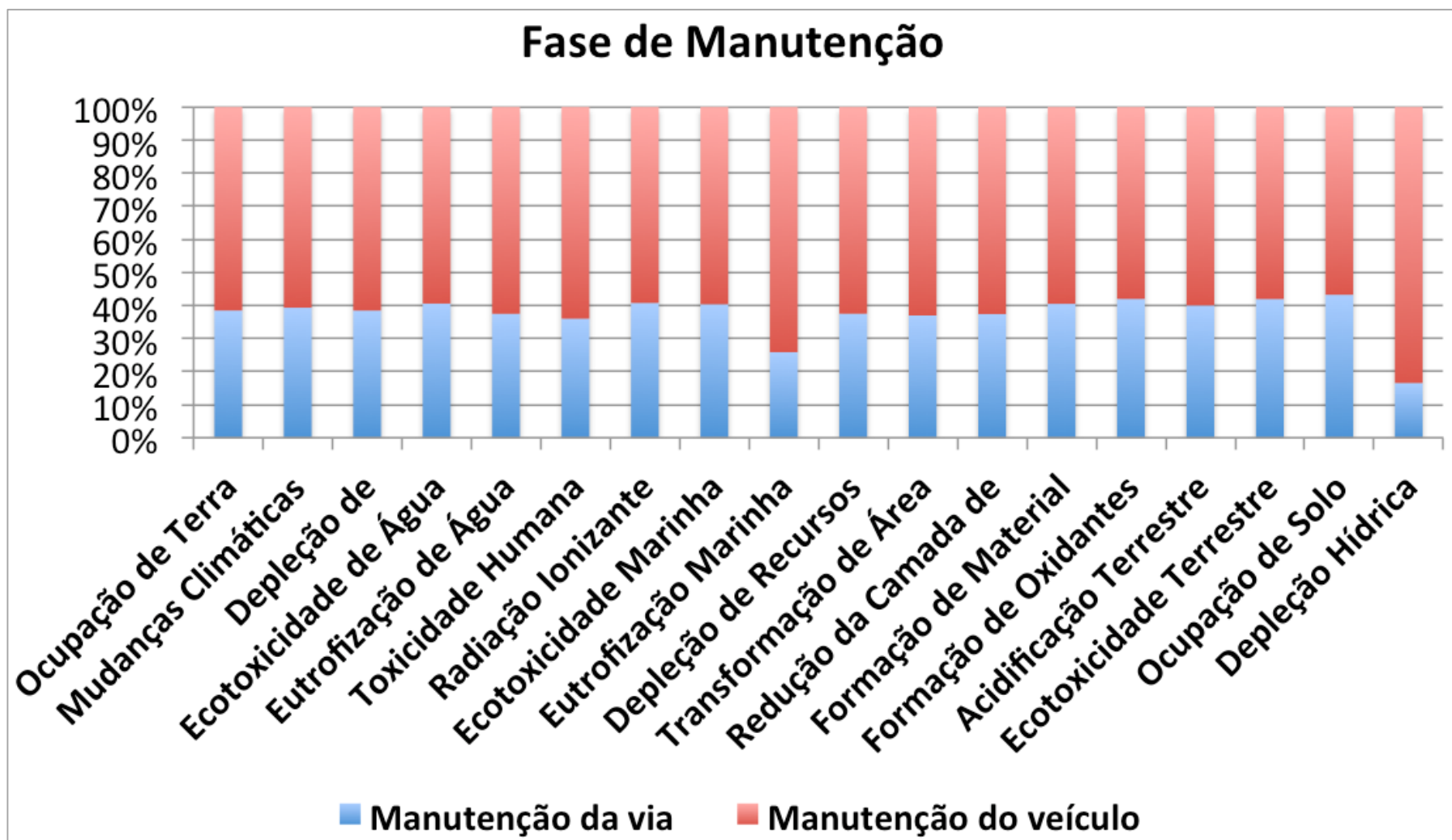


Figura 18: Contribuição dos processos da fase de manutenção para cada uma das categorias de impacto



### 3.4.1. Ocupação de Terra Agrícola

A categoria de ocupação de terra agrícola mede a perda de biodiversidade causada pelo uso do solo. Um total de 0,01 m<sup>2</sup> por ano de terra agrícola é ocupada por pkm. De acordo com a figura 19, a construção da infraestrutura é a etapa mais significativa (49,01%).

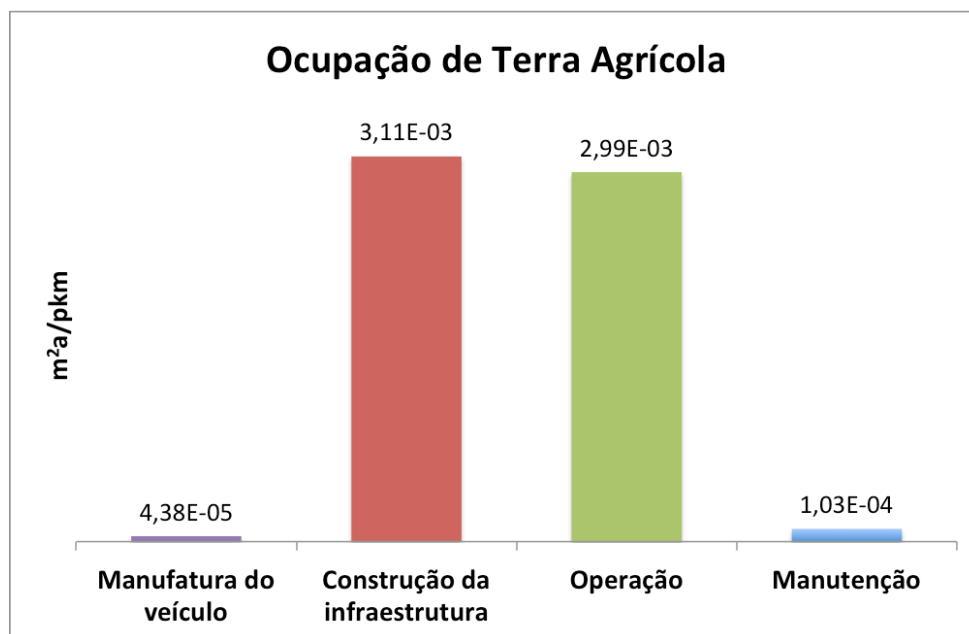


Figura 19: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ocupação de terra agrícola (m<sup>2</sup>a/pkm)

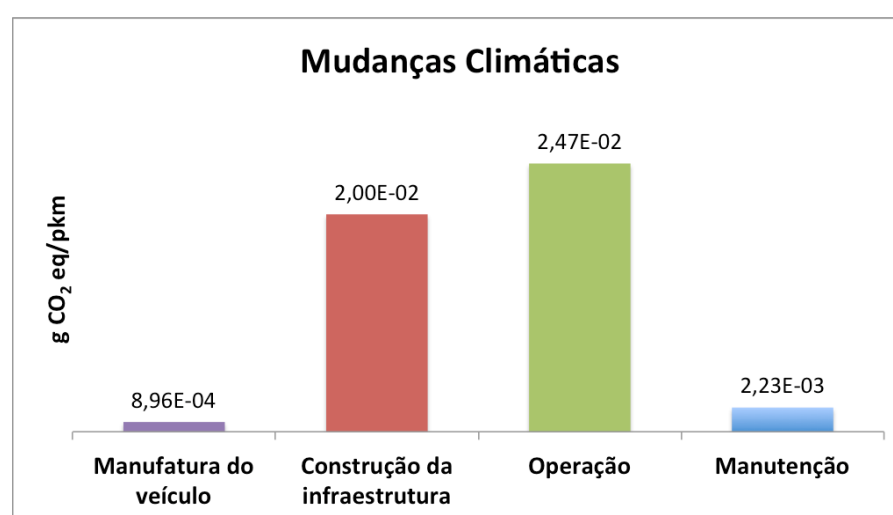
### 3.4.2. Mudanças Climáticas

A figura 20 mostra que a operação dos veículos (51,63%) e a construção da infraestrutura (41,84%) são as etapas do ciclo de vida que mais contribuem para a categoria de mudanças climáticas. As emissões totais de CO<sub>2</sub>eq são de 50 g/pkm. Como visto na figura 15, os processos de maior contribuição dentro da fase de construção da infraestrutura são a produção de betume e concreto – ambos com aproximadamente 40% de participação.

Betume é formado por uma mistura complexa de compostos alifáticos, alcanos, hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e compostos heterocíclicos contendo metais e átomos de nitrogênio, oxigênio e enxofre. Este é produzido durante o refino do petróleo e faz parte da composição do asfalto. As emissões do betume são definidas como uma mistura complexa de

aerossóis, vapores e gases, os quais contribuem com a categoria de impacto de mudanças climáticas. (IARC, 2013)

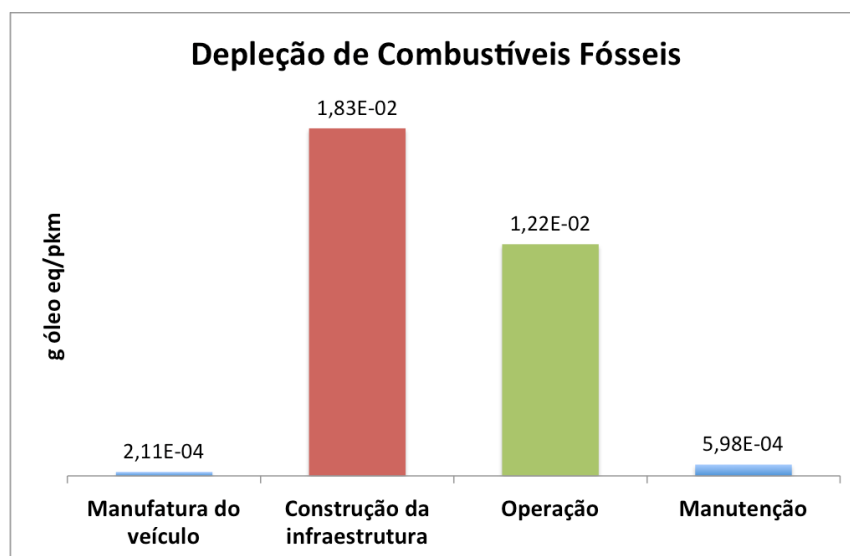
Além disso, como mencionado anteriormente, a quantidade de cimento utilizada na produção de concreto é uma das principais causas pela emissão de GEE, principalmente devido a fase de clínquerização, processo no qual carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é calcinado e convertido a óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), o principal componente do cimento. A produção de cimento é responsável por aproximadamente 2,4% da emissão global de  $\text{CO}_2$  das fontes industriais e energéticas (GIBBS *et al.*, 2001).



**Figura 20: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de mudanças climáticas (gCO<sub>2</sub> eq/pkm)**

### 3.4.3. Depleção de Combustíveis Fósseis

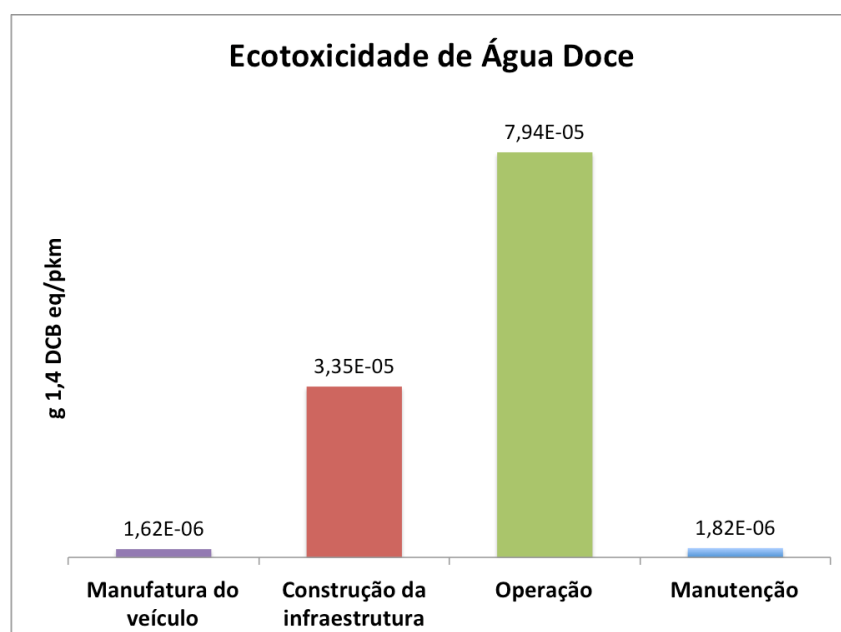
Para a categoria de impacto de depleção de combustíveis fósseis, um total de 0,03 kg de óleo eq são consumidos por pkm. A fase de maior contribuição é a de construção da infraestrutura, como visto na figura 21. Isso se deve principalmente a produção de betume (91%), já que seu componente fundamental são hidrocarbonetos.



**Figura 21: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de depleção dos combustíveis fósseis (kg óleo eq/pkm)**

### 3.4.4. Ecotoxicidade de Água Doce

Essa categoria de impacto se refere aos impactos ao ecossistema de água doce, devido as emissões de substâncias tóxicas. A fase do ciclo de vida de maior contribuição é a da operação (68,25%), como visto na figura 22, e a contribuição total é de 0,12 g 1,4 DCB eq por pkm.

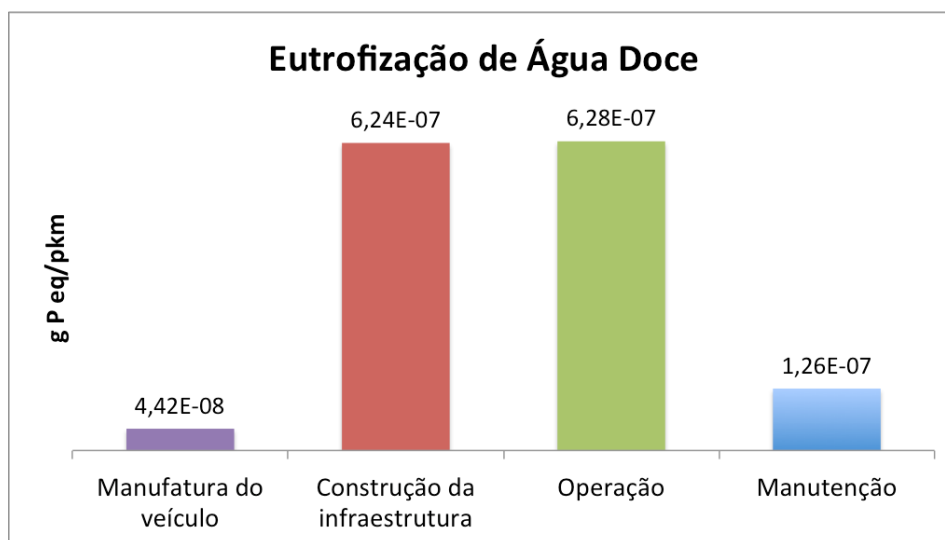


**Figura 22: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ecotoxicidade de água doce (g 1,4 DCB eq/pkm)**

### 3.4.5. Eutrofização de Água Doce

A eutrofização é causada por um enriquecimento do ambiente aquático por meio de nutrientes que levam ao crescimento de plantas aquáticas. Isso acarreta na depleção de oxigênio nas camadas mais profundas, reduzindo a qualidade da água. A maior parte do fósforo despejado nas águas doces é proveniente de descargas de pontos pontuais, tais como esgoto e efluente industrial (STRANDDORF *et al.*, 2005).

A contribuição do BRT Transcarioca para essa categoria é de  $1,4 \times 10^{-3}$  g P eq por pkm. A fase do ciclo de vida de maior contribuição é a de operação (44,14%) seguido da fase de construção da infraestrutura (43,91%), conforme figura 23, principalmente devido a produção de aço (49,9%). As principais matérias-primas da produção de aço são minério de ferro e carvão (CAVALCANTI, 2012), geradores de rejeitos com alta taxa de minério, os quais acabam carreando elementos ricos em nitrogênio e fósforo, que por sua vez contribuem para a eutrofização.

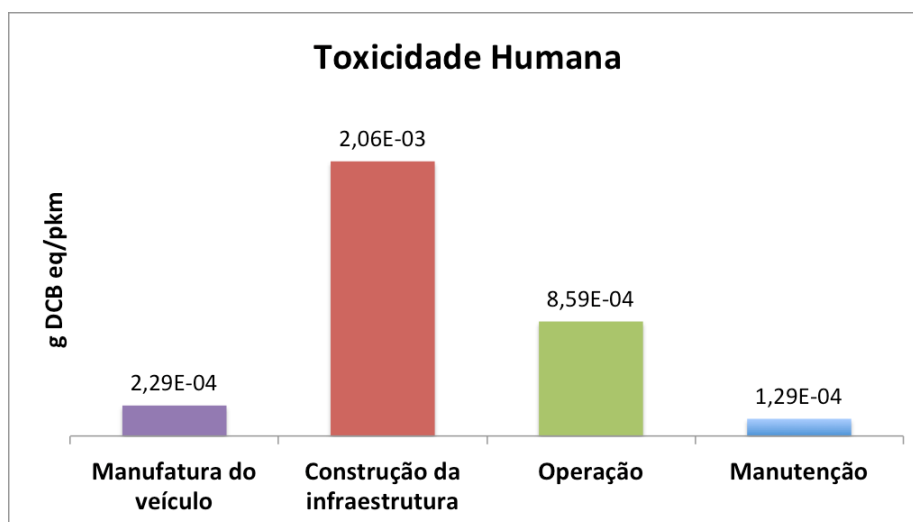


**Figura 23: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de eutrofização de água doce (g P eq/pkm)**

### 3.4.6. Toxicidade Humana

Toxicidade humana é um impacto local e está relacionado aos efeitos de substância tóxicas com potencial de causar danos à saúde humana (STRANDDORF *et al.*, 2005). A contribuição total de acordo com o presente estudo é de 3,9 g DCB eq por pkm. De acordo com a figura 24, a fase de construção da infraestrutura (52,8%) é a de maior contribuição para o impacto, principalmente pela produção de betume e aço.

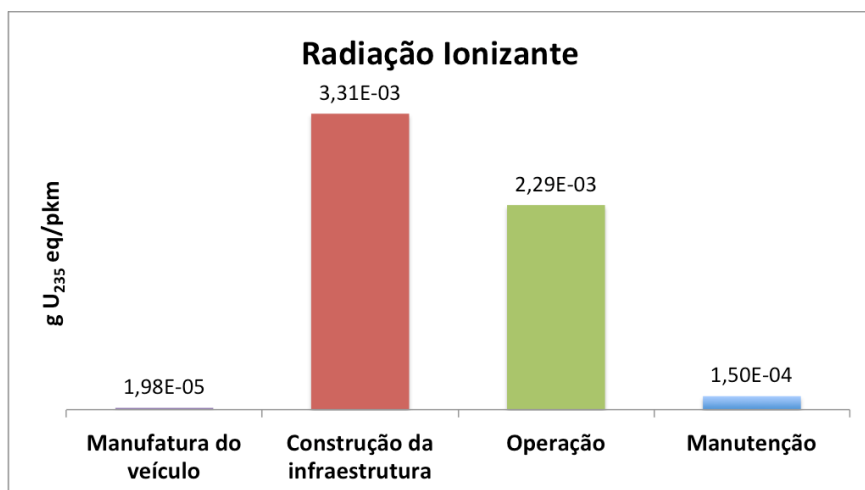
Segundo IARC (2013), a produção de betume tem potencial dano à saúde humana do trabalhador, embora as evidências sejam baixas da relação entre as emissões do betume e efeitos cancerígenos. Além disso, a fase de sintetização do processo produtivo do aço é responsável pela emissão de gases, incluindo dioxinas, furanos e outros aromáticos, substâncias altamente tóxicas, formadas em altas temperaturas e que podem permanecer durante anos na atmosfera (CAVALCANTI, 2012).



**Figura 24: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de toxicidade humana (g DCB eq/pkm)**

### **3.4.7. Radiação Ionizante**

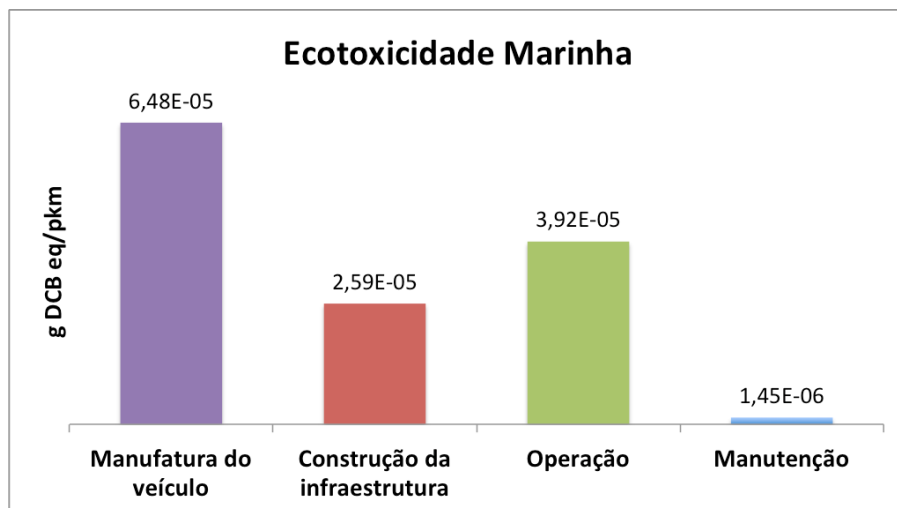
O homem e o meio ambiente estão sujeitos a radiação ionizante de fontes naturais, porém as atividades antropogênicas contribui para a elevação dos níveis que podem causar danos à saúde. Uma das fontes antropogênicas são os materiais de construção civil (IPEN, 2011). A contribuição do BRT Transcarioca para a categoria de impacto de radiação ionizante é de 0,01 kg U<sub>235</sub> eq por pkm. De acordo com a figura 25, a fase do ciclo de vida mais significativa é a construção da infraestrutura (57,37%).



**Figura 25: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de radiação ionizante (g U<sub>235</sub> eq/pkm)**

### 3.4.8. Ecotoxicidade Marinha

Ecotoxicidade marinha refere-se ao impacto de substâncias tóxicas no ecossistema marinho. A contribuição total por passageiro quilometro é de 0,13 g DCB eq. A fase do ciclo de vida de maior impacto é a manufatura do veículo (49,3%), como visto na figura 26.



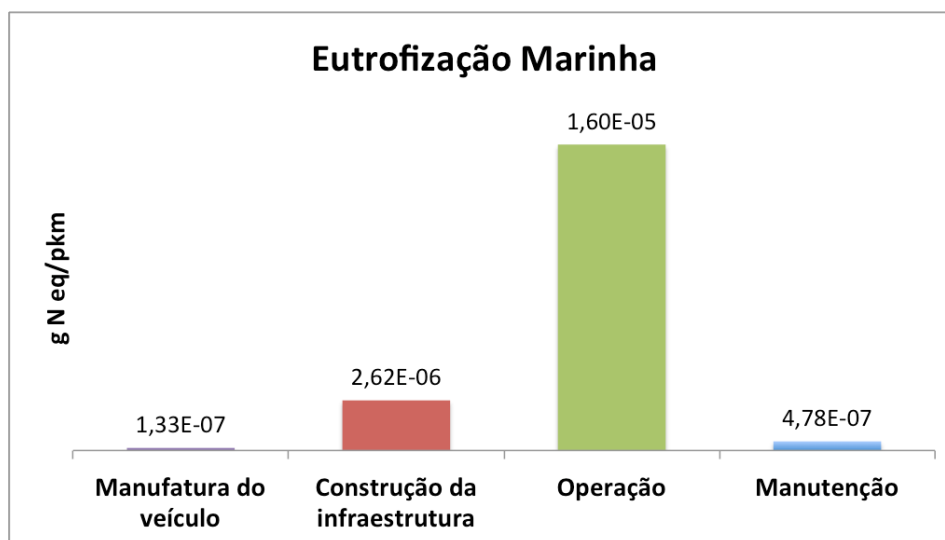
**Figura 26: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ecotoxicidade marinha (g DCB eq/pkm)**

### 3.4.9. Eutrofização Marinha

O impacto de eutrofização, assim como visto na sessão 3.4.5, se deve aos altos níveis de recebimento de nutrientes pelos corpos d'água, estimulando o crescimento excessivo da vegetação local e conseqüentemente reduzindo a quantidade de oxigênio

dissolvido na água. Porém, o impacto de eutrofização neste tópico está aplicado ao caso marinho.

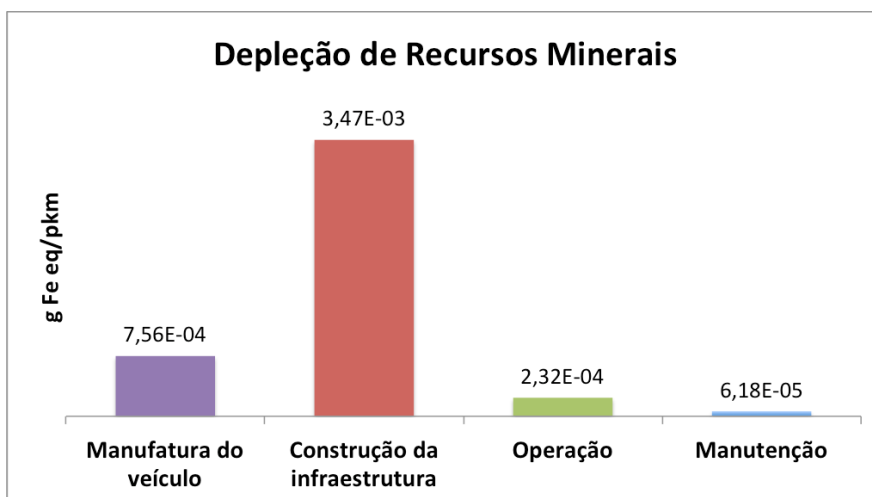
O impacto se deve principalmente a fase de operação (83,19%), como observado na figura 27, e tem uma contribuição total de  $1,9 \times 10^{-2}$  g N eq por pkm. Para a operação, os processo mais significativo é a produção de diesel B7 (42%). A emissão de  $\text{NH}_3$  e  $\text{NO}_x$  da produção do biodiesel está ligado a fase agrícola e ao uso de fertilizantes (ALTAMIRANO, 2013).



**Figura 27: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de eutrofização marinha (g N eq/pkm)**

### **3.4.10. Depleção de Recursos Minerais**

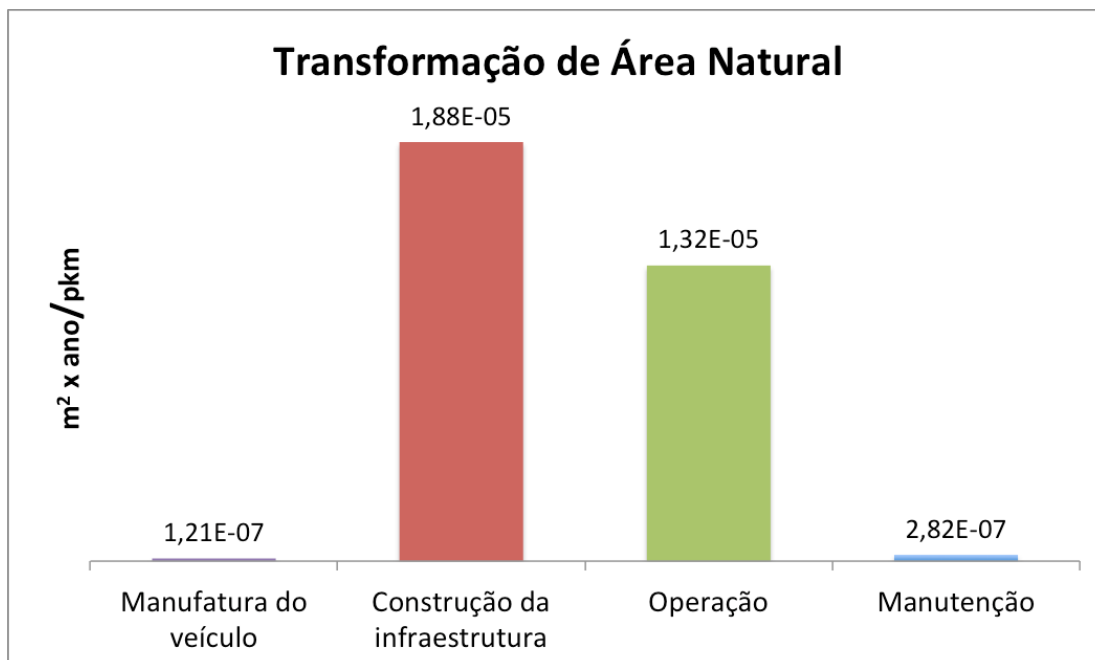
A depleção de recursos minerais tem uma contribuição total de 4,52 g Fe eq por pkm. A fase do ciclo de vida mais significativa é a construção da infraestrutura (figura 28), principalmente devido a produção de aço (87,2%). A indústria siderúrgica é grande consumidora de recursos naturais e de energia e tem como principais matérias-primas o minério de ferro e o carvão (CAVALCANTI, 2012), ambos recursos minerais não renováveis. Uma forma de reduzir o uso de recursos minerais é empregar agregados da indústria siderúrgica na produção do cimento, de forma a reduzir a demanda por calcário e silicatos e reduzir a emissão de GEE (IBS, 2007).



**Figura 28: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de depleção de recursos minerais (g Fe eq/pkm)**

### 3.4.11. Transformação de Área Natural

As fase do ciclo de vida do BRT Transcarioca de maior influência para o impacto de transformação da área natural são a construção da infraestrutura (57,9%) e a operação (40,84%), como visto na figura 29, e a contribuição total é de  $3,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times \text{ano}$  por pkm.



**Figura 29: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de transformação de área natural (m² x ano/pkm)**



### 3.4.12. Redução da Camada de Ozônio

A redução da camada de ozônio permite que a radiação ultravioleta (UV) atinja a superfície terrestre, tendo efeitos danosos para a saúde humana, fauna e flora, além de danos a diversos tipos de materiais. Esse impacto é causado pelo aumento da concentração de determinados gases provenientes de emissões atmosféricas geradas por ações humanas, tais como compostos clorados e bromados, metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O) e vapor d'água (STRANDDORF *et al.*, 2005).

A fase do ciclo de vida mais significativa é a construção da infraestrutura (figura 30), com 58,05% da contribuição total de  $9,92 \times 10^{-6}$  g CFC11 eq por pkm. Isso se deve principalmente a produção de betume, a qual emite compostos orgânicos voláteis (COVs) que acarretam na depleção da camada de ozônio (BOCZKAJ, 2014).

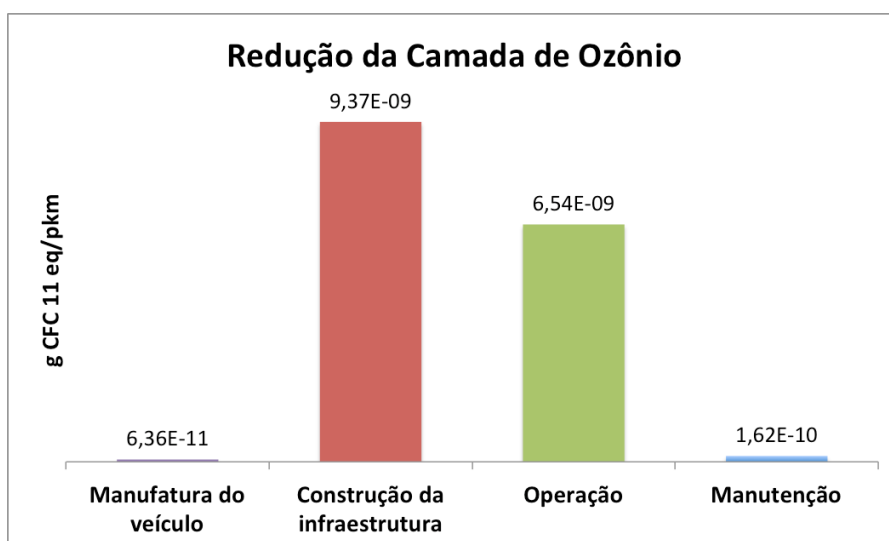


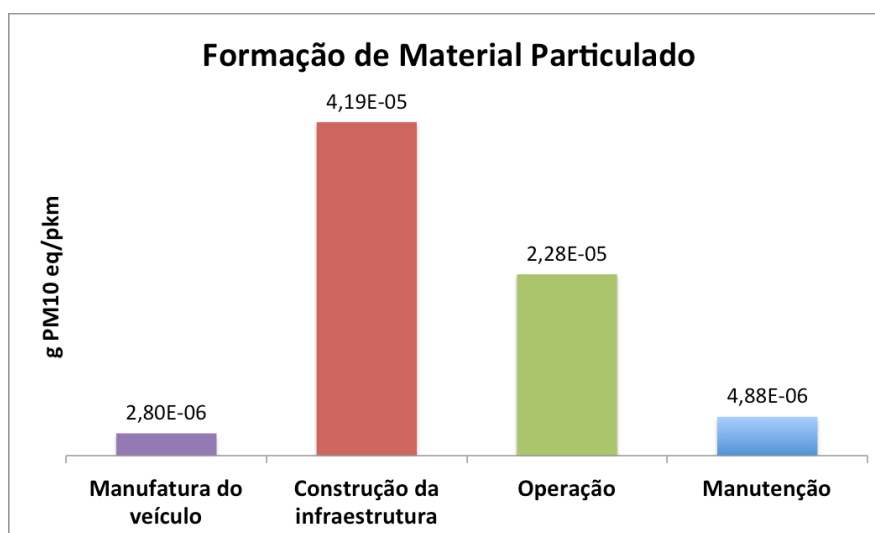
Figura 30: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de redução da camada de ozônio (g CFC 11 eq/pkm)

### 3.4.13. Formação de Material Particulado

Material particulado (MP) é um conjunto de poluentes compostos por poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera. Essas partículas causam perda de visibilidade na atmosfera e danos à saúde humana. Quanto menor o tamanho do material particulado, maior é o potencial de causar problemas à saúde. As principais fontes emissoras são combustão de motor veicular, processos industriais, queima de biomassa e ressuspensão de poeira do solo. MP também pode ser formado a partir de reações na atmosfera com gases como

dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COVs) (CETESB, 2016). A emissão total é de 0,07 g PM<sub>10</sub> eq por pkm e a fase do ciclo de vida de maior contribuição é a construção da infraestrutura, com 57,9% (figura 31), principalmente devido a produção de betume.

Durante as operações de produção de matéria-prima para o betume e no processo de oxidação com ar quente, ocorre a formação de compostos insaturados e aromáticos, bem como sulfato de hidrogênio, vapor de água, sulfeto de carbonila, dissulfeto de carbono e outros. Estes compostos sofrem transformações produzindo uma variedade de compostos voláteis, os quais são um dos responsáveis pela produção de material particulado, como visto anteriormente. Os COVs que permanecem na massa do betume são emitidos durante o armazenamento, transporte e pavimentação da rodovia (BOCZKAJ, 2014).



**Figura 31: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de formação de material particulado (g PM<sub>10</sub> eq/pkm)**

#### **3.4.14. Formação de Oxidantes Fotoquímicos**

A formação de oxidantes fotoquímicos é a formação de substâncias reativas (principalmente ozônio), que causam dano a saúde humana e ao ecossistema, a partir de reações entre os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e COVs, na presença de luz solar. COVs são liberados a partir da queima incompleta e evaporação de combustíveis e solventes (CETESB, 2016).

De acordo com a figura 32, as fases do ciclo de vida mais significativas para essa categoria de impacto são a de operação (51,75%), principalmente devido à produção

de betume, e à construção da infraestrutura (43,87%), que tem o próprio funcionamento do sistema como principal contribuição. A emissão total é de 0,24 g NMVOC por pkm.

Na fase de operação, a presença de oxigênio na composição do biodiesel faz com que a combustão seja altamente exotérmica com grande liberação de calor, aumentando a temperatura da câmara de combustão e promovendo a liberação de NOx (ALTAMIRANO, 2013). Uma maneira de reduzir a emissão de NOx durante a combustão é reduzir os picos de temperatura (DRUMM *et al.*, 2014).

Quanto a construção da infraestrutura, a produção de betume tem alta emissão de COVs, os quais tem impacto global na poluição atmosférica, principalmente por causar depleção da camada de ozônio e a formação de aerossóis secundários (BOCZKAJ, 2014). A queima de combustível durante a operação acarreta na emissão de gases, dentre os quais está o NOx, que tem importante função na formação de oxidantes fotoquímicos.

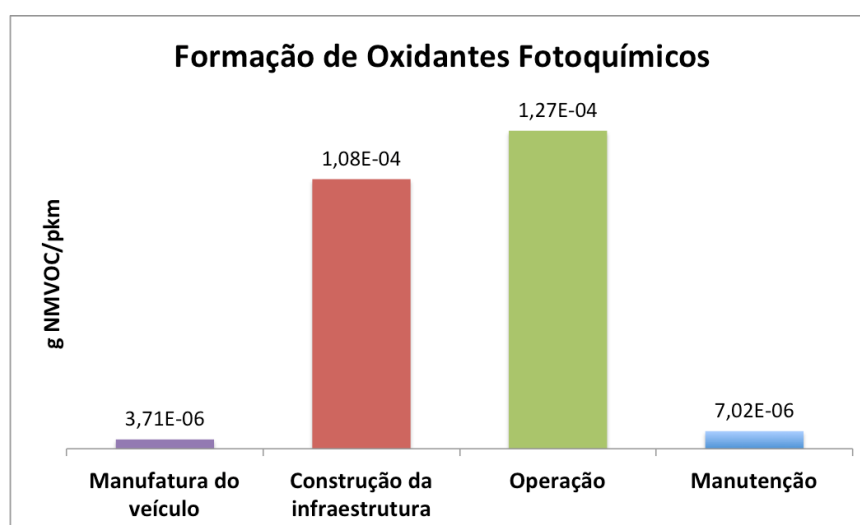


Figura 32: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de formação de oxidantes fotoquímicos (g NMVOC/pkm)

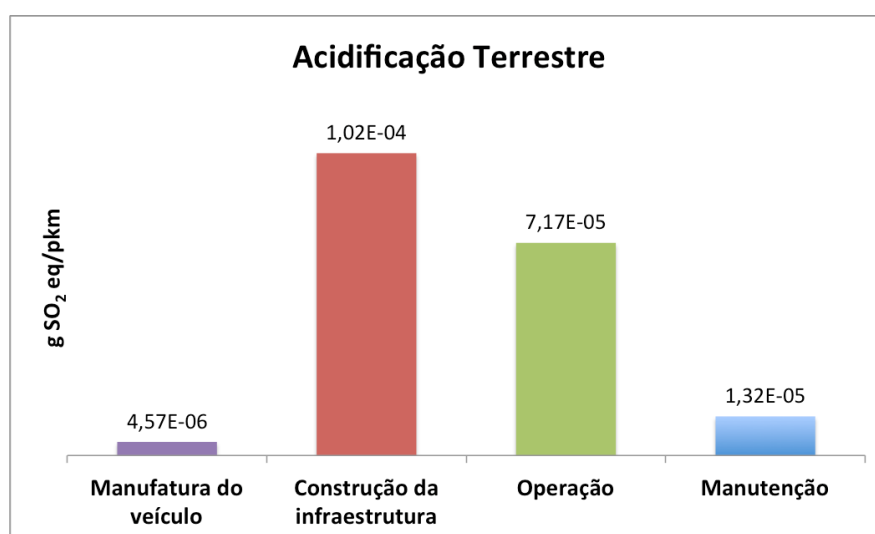
### 3.4.15. Acidificação Terrestre

A acidificação terrestre tem efeito regional e é causada pela emissão de prótons no ecossistema. Esse impacto pode causar a redução da fertilidade do solo e até mesmo o desaparecimento da vegetação. Outra possível consequência são as chuvas ácidas, que danificam construções, esculturas e outros objetos. As substâncias que contribuem para essa categoria são aquelas que fornecem ou emitem íons de

hidrogênio para o meio ambiente e as que resultam em lixiviação dos ânions do sistema em questão, tais como dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e ácido clorídrico (HCl) (STRANDDORF *et al.*, 2005).

A fase do ciclo de vida de maior contribuição para a acidificação é a construção da infraestrutura (53,26%), como visto na figura 33, principalmente devido a produção de betume (64,6%), produção de concreto (19,4%) e de aço (14,5%). A contribuição total é de 0,19 g SO<sub>2</sub> eq por pkm.

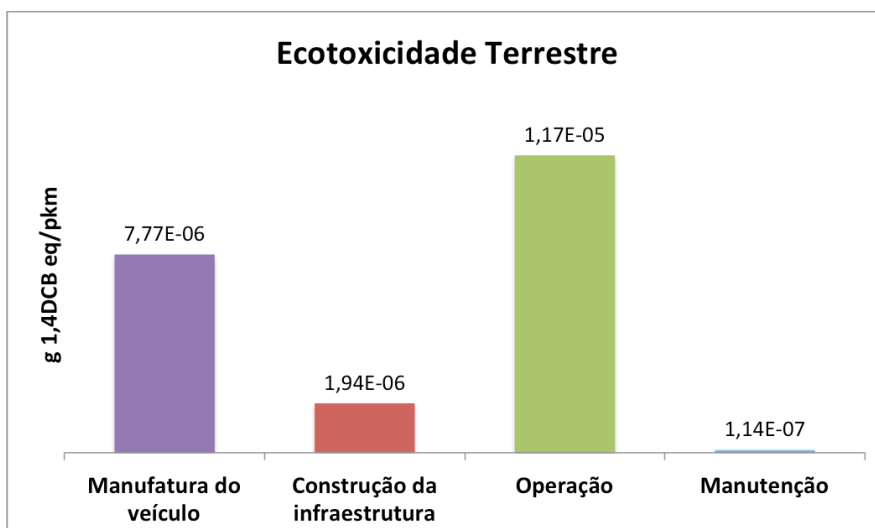
Como visto anteriormente, o cimento faz parte da produção de concreto. Uma das formas de reduzir a emissão de SO<sub>x</sub> é a utilização de combustíveis com baixo teor de enxofre e optar por fontes de aditivos da farinha ou das matérias-primas com baixa quantidade de enxofre na composição química (BELATO, 2013). Quanto a produção de aço, a emissão de SO<sub>2</sub> se deve aos processos que empregam carvão mineral como matéria-prima e nos processos de combustão que utilizam combustível que contém enxofre, os quais também emitem NO<sub>x</sub> (CAVALCANTI, 2012).



**Figura 33: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de acidificação terrestre (g SO<sub>2</sub> eq/pkm)**

### **3.4.16. Ecotoxicidade Terrestre**

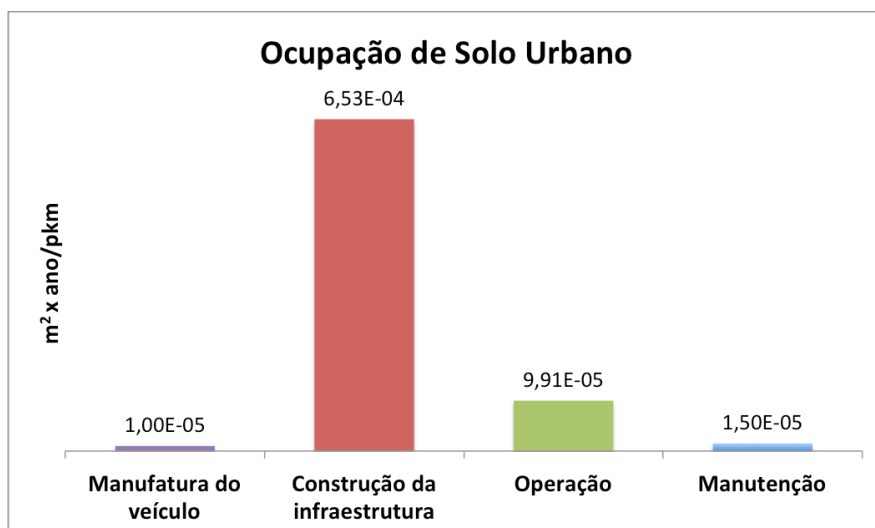
Ecotoxicidade terrestre se refere ao impacto de substâncias tóxicas ao ecossistema terrestre. As fases do ciclo de vida de maior contribuição são a operação (54,27%) e a manufatura do veículo (36,2%), como visto na figura 34, com um valor total de 0,02 g 1,4 DCB eq por pkm.



**Figura 34: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ecotoxicidade terrestre (g 1,4DCB eq/pkm)**

### 3.4.17. Ocupação de Solo Urbano

De acordo com a figura 35, a principal fase do ciclo de vida que contribui com a ocupação do solo urbano é a construção da infraestrutura (84,02%), já que a via do BRT Transcarioca passa por locais previamente urbanizados, necessitando inclusive de reassentamentos populacionais (EQUIPE DE PESQUISA OGI, 2014). A contribuição total é de 0,77 m<sup>2</sup> x ano/pkm.



**Figura 35: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de ocupação do solo urbano (m<sup>2</sup> x ano/pkm)**

### 3.4.18. Depleção Hídrica

De acordo com a figura 36, a fase do ciclo de vida com maior contribuição para a depleção hídrica é a construção da infraestrutura (56,45%), seguido da operação (23,27%). A contribuição total é de 0,12 m<sup>3</sup> por pkm. Para a construção da infraestrutura, as principais causas são produção de betume (65,5%) e de concreto (22,7%).

A produção do cimento para a produção de concreto pode ser por via úmida, semi-úmida, seca ou semi-seca. No processo de via semi-seca, é adicionada a matéria-prima cerca de 10 a 15% de água e nos processos de via úmida e semi-úmida, há uma adição de 30 a 40% e de 20% de água em peso, respectivamente (BELATO, 2013). Para a fase de operação, o uso de energia elétrica tem maior contribuição no impacto de depleção hídrica já que a matriz energética brasileira é baseada principalmente em hidrelétricas.

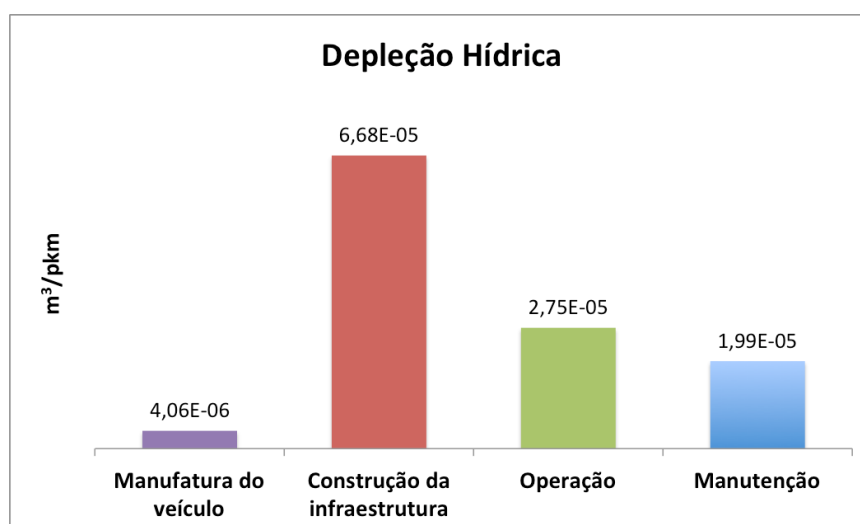


Figura 36: Contribuição das fases do ciclo de vida para o impacto de depleção hídrica (m<sup>3</sup>/pkm)

## 4. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental do BRT Transcarioca, situado na cidade do Rio de Janeiro, através da aplicação da metodologia de ACV a fim de identificar as fases do ciclo de vida do sistema do BRT e os processos de maior potencial impacto ambiental, possibilitando, dessa forma, verificar onde é possível reduzir o impacto gerado. A fronteira do sistema incluiu a construção da infraestrutura, manufatura do veículo, operação do sistema e manutenção. A maior parte dos estudos existentes sobre avaliação do ciclo de vida de sistemas de transporte incluem apenas o ciclo do combustível, deixando de lado as demais fases do ciclo de vida que possuem contribuições significativas para os impactos ao meio ambiente.

Foram analisadas 18 categorias de impacto: ocupação de terra agrícola; mudanças climáticas; depleção de combustíveis fósseis; ecotoxicidade de água doce; eutrofização de água doce; toxicidade humana; radiação ionizante; ecotoxicidade marinha; eutrofização marinha; depleção dos recursos minerais; transformação de área natural; redução da camada de ozônio; formação de material particulado; formação de oxidantes fotoquímicos; acidificação terrestre; ecotoxicidade terrestre; ocupação de solo urbano e depleção hídrica. As fases do ciclo de vida mais impactantes são a construção da infraestrutura e operação do sistema. Quanto aos processos, a produção de betume foi o principal responsável pelos impactos ambientais negativos na fase de construção da infraestrutura; a produção de aço teve a maior contribuição para a fase de manufatura dos veículos; a produção de combustível teve maior impacto para a operação do sistema e a manutenção do veículo é mais impactante do que a manutenção da via.

A revisão bibliográfica de avaliações do ciclo de vida de sistemas de transporte mostrou que na maior parte dos casos do sistema BRT, a fase de operação tem maior participação nas emissões de CO<sub>2</sub>, como no caso dos BRTs das cidades de Xiamen, Ahmedabad e Los Angeles. O presente estudo mostrou que para o BRT Transcarioca, a operação contribui com 51,63%. Como a fase operacional tem emissões crescentes enquanto que a construção da infraestrutura tem uma única contribuição ao longo do processo, quanto maior a vida útil considerada para o sistema, maior será a contribuição pela unidade funcional (pkm) referente a fase operacional.

Além disso, o uso do diesel B7 auxilia a redução das emissões na fase operacional.. Por outro lado, apesar dos benefícios causados pelo uso do biocombustível, este também acarreta um aumento do impacto de eutrofização devido aos fertilizantes empregados na agricultura.

Também é importante ressaltar que o fato da principal fonte de geração de energia elétrica do país ser a hidráulica com 64% do total (EPE, 2015), compondo uma matriz energética predominantemente renovável, é bastante favorável para a redução dos impactos ambientais negativos associados. A matriz elétrica brasileira favorece uma quantidade menor de emissões e redução da depleção de recursos não renováveis, já que evita a queima de recursos não renováveis. O consumo de energia elétrica corresponde a menos de 3% do impacto de mudanças climáticas e menos de 1% da depleção de combustíveis fósseis na fase de operação.

Por fim, pode-se concluir que a identificação das fases e processos mais impactantes possibilita a assimilação de medidas a serem tomadas para redução dos impactos em novos sistemas de transportes empregados futuramente. Como visto anteriormente, os materiais mais utilizados para a construção da infraestrutura foram concreto, aço e betume.

Para a redução dos impactos do concreto, deve-se optar por uma produção de cimento com menor consumo de água e pela utilização de combustíveis e matérias-primas com baixo teor de enxofre, além de reduzir a quantidade de cimento empregada na produção de concreto (GIBBS *et al.*, 2001; BELATO, 2013). Quanto ao aço, as indústrias siderúrgicas já tem feito investimentos para reduzir suas emissões, como aumento da eficiência energética; melhoria das taxas de reciclagem e utilização de produtos de aço e aumento da reciclagem de subprodutos. É importante ressaltar que o aço já é o material mais reciclado do mundo. Outras formas de reduzir as emissões é a utilização de carvão vegetal ao invés do mineral (CAVALCANTI, 2012; ANDRADE, 2016).

#### **4.1. Recomendações para trabalhos futuros**

Um dos grandes desafios para o presente trabalho foi a complexidade do levantamento de dados. A coleta de dados incluiu revisão bibliográfica, dados primários, dados secundários e estimativas. O uso do banco de dados devido a falta



de dados primários pode acarretar em fuga da realidade brasileira, porém o software Umberto® utilizado para a modelagem possibilita modificações no banco de dados original para criar versões adaptadas para a realidade em estudo, reduzindo as incertezas temporais e espaciais. Uma recomendação seria a realização dos estudos de ICV de forma a compor e enriquecer o Banco de Dados Nacional, minimizando as incertezas de estudos futuros.

Além disso, é recomendado uma Avaliação Social do Ciclo de Vida (S-ACV) do BRT para uma melhor compreensão do efeito do sistema sobre o bem-estar da população. Por exemplo, muitos reassentamentos foram feitos para a construção da infraestrutura do legado olímpico no Rio de Janeiro. Segundo Relatório dos Impactos e Legados dos Jogos Olímpicos Rio 2016™ (SAGE/COPPE/UFRJ, 2014), cerca de 700 residências foram desapropriadas para a construção da Transcarioca e da Transoeste, o que constitui um impacto social relevante que poderia ser avaliado pela S-ACV.

Os impactos ambientais não são os únicos fatores que devem ser considerados no ciclo de vida de um produto ou serviço. Também é preciso analisar os potenciais impactos positivos e negativos nas esferas sociais e socioeconômicas para os trabalhadores, comunidade local, consumidores, sociedade e todos os atores envolvidos na cadeia de valor (UNEP, 2009). A S-ACV é uma ferramenta complementar a ACV, auxiliando em construir uma visão mais abrangente dos impactos do ciclo de vida e provendo mais informações para uma tomada de decisão segundo a perspectiva sustentável. A realização de um estudo de Custeio do Ciclo de Vida (CCV) também é recomendável, de forma a avaliar os impactos econômicos associados ao BRT.

Características subjetivas não são facilmente quantificáveis. Sistemas de transporte produzem diversas externalidades para o usuário em relação a tempo de percurso, confiabilidade e conforto. Uma avaliação mais profunda nesse sentido é relevante. Como exemplo, a poluição sonora é um dos problemas ambientais que atinge o maior número de pessoas, afetando a saúde e o bem-estar físico, mental e social. A intrusão visual é igualmente um aspecto relevante para a S-ACV, devido a própria infraestrutura física do BRT (ABRAMOVITCH, 2014).

Também é recomendado um estudo comparativo com as linhas que foram seccionadas devido a inserção do BRT Transcarioca no sistema de transportes do Rio de Janeiro. Como dito anteriormente, 12 linhas foram eliminadas por terem trajeto equivalente com o do BRT, 47 linhas foram seccionadas de forma a se adequar como linha alimentadora e 6 novas linhas foram criadas (ITDP, 2015). Essa análise permitiria uma avaliação dos impactos que deixaram de existir devido a introdução do corredor Transcarioca, tais como emissões evitadas e aumento da fluidez do trânsito.

## Referencias Bibliográficas

ABNT, 2009a, NBR ISO 14044: *Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações*. 1ª ed., Rio de Janeiro.

ABNT, 2009b, NBR ISO 14040: *Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura*. 2ª ed, Rio de Janeiro.

ABRAMOVITCH, F., 2014, *Avaliação Dos Impactos Ambientais Da Operação Do Sistema Bus Rapid Transit (BRT) No Município Do Rio De Janeiro, O Caso Da Transoeste*. Projeto de Graduação, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ALTAMIRANO, C.A.A., 2013, *Análise de Ciclo de Vida do Biodiesel de Soja: Uma Comparação entre as Rotas Metilica e Etílica*. Tese de Mestrado, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <<http://www.h2cin.org.br/download/analise-de-ciclo-de-vida-de-biodiesel-de-soja.pdf>>. Acesso em: 25 dez. 2016, 16:40:00.

ANDRADE, C.E.S., 2016, *Avaliação Da Emissão De Dióxido De Carbono E Do Uso De Energia No Ciclo De Vida De Sistemas Metroferroviários De Passageiros: Aplicação Na Linha 4 Do Metrô Do Rio De Janeiro*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ANDRADE, C. E. S., D'AGOSTO, M. A., 2016, "Energy Use And Carbon Dioxide Emissions Assessment In The Lifecycle Of Passenger Rail Systems: The Case Of The Rio De Janeiro Metro". *Journal of Cleaner Production*, n.126 (Abr), pp. 526-536.

ANP, 2016, *Biodiesel*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 4 jan. 2016, 20:16:00.

BELATO, M. N., 2013, *Análise Da Geração De Poluentes Na Produção De Cimento Portland Com O Coprocessamento De Resíduos Industriais*. Dissertação de mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0043750.PDF>. Acesso em: 26 dez. 2016, 10:50:00.

BOCZKAJ, G.; ANDRZEJ, P.; KAMIŃSKI, M., 2014, "Characteristics Of Volatile Organic Compounds Emission Profiles From Hot Road Bitumens". *Chemosphere*,

v.107, pp. 23-30. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653514003397>>. Acesso em: 23 dez. 2016, 20:48:00.

BRASIL, 2008, *Manual de BRT (Bus Rapid Transit): guia de planejamento*. Autores colaboradores: César Arias [et al]. Tradução de Arthur Szasz. New York: Institute for Transportation & Development Policy; Brasília: Ministério das Cidades.

BRASIL, 1986. RESOLUÇÃO CONAMA no 18, de 6 de maio de 1986. *Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE*. Brasil.

BRASIL, 2008. RESOLUÇÃO CONAMA no 403, de 11 de novembro de 2008. *Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores- PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências*. Brasil.

BRASIL, 2005. Lei Nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. *Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências*. Brasil.

BRASIL, 2016. Lei Nº 13.263, de 23 de março de 2016. *Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional*. Brasil.

BRASIL ENGENHARIA, 2016, *A Craft Engenharia desenvolve asfalto colorido*. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/1526-a-craft-engenharia-desenvolve-asfalto-colorido>>. Acesso em: 31 out. 2016, 15:12:00.

BRTRIO, 2015, *BRT Rio realiza testes com energia solar na estação Bosque da Barra*. Disponível em: <http://www.brtrio.com/noticia/brt-rio-realiza-testes-com-energia-solar-na-estacao-bosque-da-barra>. Acesso em: 09 out. 2016, 18:29:00.

BRTRIO, 2016, *Conheça o BRT*. Disponível em: <http://www.brtrio.com/conheca>. Acesso em: 02 jul. 2016, 21:02:00.

CAMARAPOA, 2015, *Projeto do Executivo atualiza normas para frota de ônibus*. Disponível em:

[http://www2.camarapoa.rs.gov.br/impressao.php?reg=25507&p\\_secao=56&di=2015-10-23](http://www2.camarapoa.rs.gov.br/impressao.php?reg=25507&p_secao=56&di=2015-10-23). Acesso em: 04 out. 2016, 21:04:00.

CAVALCANTI, P.P.S., 2012, *Gestão Ambiental na Indústria Siderúrgica – Aspectos Relacionados às Emissões Atmosféricas*. Projeto de Graduação, Engenharia Metalúrgica, UFRJ. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004547.pdf>. Acesso em: 25 dez. 2016, 17:51:00.

CBCA, 2014, “Rápido e eficiente – no Rio de Janeiro e em Belo Horizonte, sistemas de transporte BRT (*Bus Rapid Transit*) traz soluções em aço em suas estações e promete reduzir o tempo de deslocamento da população nas cidades”. *Arquitetura & Aço*, n. 38 (Jun), pp. 14-17. Disponível em: < <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-revistas.php?codDestaque=101187&q=Arquitetura+%26+A%E7o+n%BA+38>>.

Acesso em: 03 out. 2016, 15:51:00.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental, 2015, *Emissões veiculares no estado de São Paulo 2015*. Disponível em: <http://veicular.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/35/2013/12/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2015-subst-011116.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2017, 22:18:00.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental, 2016, *Poluentes*. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/poluentes/>>. Acesso em: 23 dez. 2016, 18:33:00.

CHESTER, M., 2008, *Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States*. Tese de doutorado, Institute of Transportation Studies, University of California-Berkeley, Estados Unidos. Disponível em: <http://escholarship.org/uc/item/7n29n303>. Acesso em: 21 out. 2016, 19:29:00.

CHESTER, M.; EISENSTEIN, W.; PINCETL, S. *et al.*, 2012, “Environmental Life-cycle Assessment of Los Angeles Metro’s Orange Bus Rapid Transit and Gold Light Rail Transit Lines”. *CESEM – Center for Earth Systems Engineering and Management*, 2012.

CHESTER, M., HORVATH, A., 2009, “Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains”. *Environmental Research Letters*, v. 4, n. 2 (Jun), 8pp.

CHESTER, M., HORVATH, A., 2010, “Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California”. *Environmental Research Letters*, v.5 (Jan), 8pp.

CHESTER, M., PINCETL, S., ELIZABETH, Z. *et al.*, 2013, "Infrastructure And Automobile Shifts: Positioning Transit To Reduce Life-Cycle Environmental Impacts For Urban Sustainability Goals". *Environmental Research Letters*. v.8, n.1 (Mar), 10 pp.

CONMETRO, 2010. Resolução nº 03, de 22 de abril de 2010. *Dispõe sobre a Aprovação do Termo de Referência do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências.*

CUI, S., NIU, H., WANG, W. *et al.*, 2010, “Carbon footprint analysis of the *Bus Rapid Transit* (BRT) system: a case study of Xiamen City”. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. V.17, n.4 (Jul), 8pp.

CURRIE, G., DELBOSC, A., 2011, “Assessing Travel Demand Management for the Summer Olympic Games”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2245, pp. 36–48.

CURRIE, G., SHALABY, A., 2011, “Synthesis of Transport Planning Approaches for the World's Largest Events”, *Transport Reviews*, v.32, n.1 (Nov), pp. 113-136.

Disponível em: <  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01441647.2011.601352>>. Acesso em: 05 mai. 2016, 22:32:20.

DANIELSSON, P., GUNNARSSON, C., 2001, “Design for Environment – What, why and how at Volvo?”, *Ravel Conference*, Stockholm, Nov. Disponível em: <  
<http://www.medicalhealthcarefmea.com/presentations/volvoenvironmentalfmea.pdf>  
>. Acesso em: 04 nov. 2016, 19:53:00.

DNIT, 2012, *Quadro de Fabricantes de Veículos*. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias, Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Disponível em: <  
<http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/qfv-2012-abril.pdf>  
>. Acesso em: 15 out. 2016, 11:01:00.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D. *et al.*, 2014, “Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em

veículos automotores”. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, V. 18, n. 1 (Abr), pp. 66-78.

ECOINVENT, 2013, *Bus Production – Data Set (UPR)*. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org>. Acesso em: 15 out. 2016, 10:44:00.

EPE, 2015, *Balanco Energético Nacional 2016*. Disponível em: < [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2016.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2016, 13:57:00.

EUROPEAN COMISSION, 2010, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. First edition March 2010. Traduzido por Luiz Marcos Vasconcelos. Luxembourg. Publications Office of the European Union, 317 pp.

FELLER, M. A., UGAYA, C. M. L., 2016, “Determinação do consumo de combustível e emissões de ônibus: estudo para o sistema BRT de Curitiba como input para ACV”, *V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida*, Fortaleza, CE, Brasil.

FETRANSPOR, 2014, *BRT + verde – movido a combustível ecológico*. Disponível em: <http://www.fetranspor.com.br/especiais/brtmaisverde>. Acesso em: 29 mai. 2016, 20:43:00.

FETRANSPOR, 2015, *Relação das Empresas de Transporte do Rio De Janeiro 2014/2015*. Disponível em: < <http://www.fetranspordocs.com.br/downloads/Relacaodeempresas2014.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2016, 15:58:00.

FILHO, O. C., JUNIOR, N.L.S., LUEDEMANN, G., 2016, *A Avaliação de Ciclo de Vida como Ferramenta para Formulação de Políticas Públicas no Brasil*, Texto para Discussão do IPEA, Nº 2205.

FINNVEDEN, G., HAUSHCHILD, M.Z., EKVALL, T. *et al.*, 2009, "Recent Developments In Life Cycle Assessment". *Journal of Environmental Management*, v.91, n.1 (Ago) , pp. 1-21.

FIRJAN, 2013, *Decisão Rio – Investimentos 2014-2016*. Disponível em: <http://www.decisaorio.com.br/data/files/9D/12/7A/6E/853CC4104F922CC4B808820>

[4/Book%20FIRJAN%20-%20Decisao%20Rio%202014-2016\\_POR.pdf](#). Acesso em: 4 jan. 2017, 12:14:00.

GOEDKOOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., *et al.*, 2013, *ReCIPE 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*.

GOVERNO DO RIO DE JANEIRO, 2014, *Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro – PDTU 2013*. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=626280>> . Acesso em: 30 mai. 2016, 19:50:00.

GIBBS, M. J., SOYKA, P., CONNEELY, D., 2001, “CO2 emissions from cement production”. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Disponível em: < [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3\\_1\\_Cement\\_Production.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_1_Cement_Production.pdf)>. Acesso em: 22 de dez. 2016, 08:46:00.

GLOBAL BRT DATA, 2015, *Consumo de Combustível – Ônibus Articulado*. Disponível em: <[http://brtdata.org/indicators/systems/fuel\\_economy\\_articulated\\_buses/?lang=pt](http://brtdata.org/indicators/systems/fuel_economy_articulated_buses/?lang=pt)>. Acesso em: 01 set. 2016, 10:32:00.

HERDY, R. R., MALBURG, C. H. R.; SANTOS, R. T, 2012, “Transporte urbano: O papel do BNDES no apoio à solução dos principais gargalos de mobilidade.” *BNDES 60 anos: perspectivas setoriais*. Rio de Janeiro : Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 310-346.

HIDALGO, D., GUTIÉRREZ, L., 2013, "BRT And BHLS Around The World: Explosive Growth, Large Positive Impacts And Many Issues Outstanding". *Research in Transportation Economics*, v.39, n.1 (Mar), pp. 8-13.

HIDALGO, D., PEREIRA, L., ESTUPIÑÁN, N. *et al.*, 2013, "Transmilenio BRT System In Bogota, High Performance And Positive Impact – Main Results Of An Ex-Post Evaluation". *Research in Transportation Economics*, v.39, n.1 (Mar), pp. 133-138.

IARC – INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 2013, “Bitumen and Bitumens Emissions”. IARC Monographs on the evaluation of



carcinogenic risks to humans, v. 103. Disponível em: <<https://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol103/mono103-001.pdf>>. Acesso em: 25 dez. 2016, 10:40:00.

IBGE, 2015, *Estimativas Da População Residente Nos Municípios Brasileiros Com Data De Referência Em 1º De Julho De 2015*. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2015/estimativa\\_2015\\_TCU\\_20160211.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_2015_TCU_20160211.pdf)>. Acesso em: 06 jul. 2016, 20:54:00.

INFRAESTRUTURA URBANA, 2011, *BRT Transcarioca*. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/artigo254421-1.aspx>>. Acesso em: 29 set. 2016, 21:30:00.

INFRAESTRUTURA URBANA, 2013, *Ponte da Transcarioca*. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/33/artigo301409-4.aspx>>. Acesso em: 30 out. 2016, 15:18:00.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS), 2007, *Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade*. Disponível em: [http://www.acobrasil.org.br/site%5Cportugues%5Cbiblioteca%5CRelatorio\\_Sustentabilidade\\_IBS.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site%5Cportugues%5Cbiblioteca%5CRelatorio_Sustentabilidade_IBS.pdf). Acesso em: 26 dez. 2016, 10:50:00.

IPCC, 2014, “*Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]”. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Instituto Pereira Passos (IPP), 2016, *Armazém de dados*. Disponível em: <<http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 22 jun. 2016, 09:28:00.

Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP), 2015, *Análise de Impacto do BRT Transcarioca na Mobilidade Urbana do Rio de Janeiro*. 64p.

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2011, *Radioatividade no Meio Ambiente e Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental – Roteiro de Estudos*. Disponível em: [https://www.ipen.br/portal\\_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/201103311026310-Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf](https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/201103311026310-Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf). Acesso em: 25 dez. 2016, 13:40:00.

KLEIMAN, M., VALE, C. C., 2016, “Apontamentos sobre o início da Linha BRT Transcarioca em operação”, *M. Chão Urbano* (online), v. XVI, p. 3-38. Disponível em: < <http://www.chaourbano.com.br/adm/revistas/arquivosArtigos/artigo112.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2016, 16:51:00.

LIMA, G. S., 2013, *Metodologia de Avaliação Econômico-Ambiental das Emissões Veiculares na Implantação de um Sistema BRT*. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

MATUTE, J. M., CHESTER, M., EISENSTEIN, W. *et al*, 2014, “Life-Cycle Assessment for Transportation Decision Making”, *Transportation Research Board Annual Meeting*, v.14, n. 1287, 16 p.

MRS Estudos Ambientais Ltda, 2012, *Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental: Corredor Viário Transolímpica - Transolímpica – Volume I*.

NEOBUS, 2016, *Mega BRT* (online). Disponível em: < <http://www.neobus.net.br/br/produtos/aplicacao/2/brt>>. Acesso em: 10 nov. 2016, 10:31:00.

NTU, 2011, *Estudos de BRT no Brasil – Relatório Técnico*. Brasília, Brasil. Disponível em: < [http://www.brtbrasil.org.br/index.php/referencias/publicacoes/121-estudo-de-brt-no-brasil-caderno-tecnico-2-edicao#.V\\_qneT4rI\\_U](http://www.brtbrasil.org.br/index.php/referencias/publicacoes/121-estudo-de-brt-no-brasil-caderno-tecnico-2-edicao#.V_qneT4rI_U)>. Acesso em: 09 out. 2016, 17:36:00.

NTU, 2009, *Avaliação comparativa das modalidades de transporte público urbano*, 92p. Curitiba, PR: Jaime Lerner Arquitetos Associados.

OSSÉS DE EICKER, M., HISCHIER, R., KULAY, L.A. *et al*, 2010, "The Applicability Of Non-Local LCI Data For LCA", *Environmental Impact Assessment Review*, v.30, n.3 (Set), pp. 192-199.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; *et al.*, 2012, “Métodos de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida: Uma Discussão para Adoção de Métodos nas Especificidades Brasileiras.”. *Revista Gestão Industrial*, v.08, n.03, p. 222-240.

PRODATA MOBILITY, 2016, *Coleta de Informações sobre a operação do BRT Transcarioca a partir de reunião informal*.

REAL, M. V., RIBEIRO, S. K., 2008, “Avaliação Das Emissões De Gases De Efeito

Estufa No Transporte Rodoviário Urbano De Passageiros No Rio De Janeiro”, XXII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Fortaleza, Ceará, Brasil.

RIO 2016, 2014, *Relatório de Gestão da Pegada de Carbono dos Jogos Rio 2016*.

Disponível em: <[https://www.rio2016.com/transparencia/sites/default/files/rgpc-rio2016\\_out2014.pdf](https://www.rio2016.com/transparencia/sites/default/files/rgpc-rio2016_out2014.pdf)>. Acesso em 18 jun. 2016, 11:42:00.

RIO DE JANEIRO (RJ), 2011. Lei Nº 5.248, de 27 de janeiro de 2011. *Institui a Política Municipal sobre Mudança do Clima e Desenvolvimento Sustentável, dispõe sobre o estabelecimento de metas de redução de emissões antrópicas de gases de efeito estufa para o Município do Rio de Janeiro e dá outras providências.*

RIO PREFEITURA, 2013, *Plano Estratégico do Rio de Janeiro 2013 – 2016*.

Disponível em: <[http://www.conselhodacidade.com/v3/pdf/planejamento\\_estrategico\\_13-16.pdf](http://www.conselhodacidade.com/v3/pdf/planejamento_estrategico_13-16.pdf)>.

Acesso em 03 out. 2016, 14:30:00.

RIO PREFEITURA, 2014, *Prefeitura apresenta plano de implantação do BRT Transcarioca*. Disponível em:

<<http://www.rio.rj.gov.br/web/guest/exibeconteudo?id=4751991>>. Acesso em 03 out. 2016, 15:56:00.

RIO PREFEITURA, 2015, *Quantidades de Entradas nas Estações do BRT por dia – BRT Transcarioca*. Disponível em: <

<<http://www.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em 09 out. 2016, 17:52:00.

RIO PREFEITURA, 2016, *O Rio do Amanhã – Visão Rio 500 e Planejamento Estratégico 2017-2020*. Disponível em: <

<<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/4108948/4171016/VisaoRio500.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2016, 22:25:00.

SAGE/COPPE/UFRJ, 2014, *Relatório dos impactos e legados dos Jogos Olímpicos e Rio2016<sup>TM</sup>*.

Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAC), 2015, *Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa da Cidade do Rio de Janeiro e Atualização do Plano de Ação Municipal para Redução das Emissões: Relatório Completo do Inventário de Emissões e Plano de Ação*. 233p.

SPIELMANN, M.; BAUER, C., DONES, R., *et al.*, 2007, “Transport Services – Ecoinvent report No.14”, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dubendorf.

STRANDDORF, H. K.; HOFFMANN, L.; SCHMIDT, A., 2005, “Impact categories, normalisation and weighting in LCA”, *Environmental News*, n.78. Disponível em: <<http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/pdf/87-7614-575-1.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2016, 14:21:00.

SUNDEVOR, C. F., 2013, *Life Cycle Assessment of Road Vehicles for Private and Public Transport*. Tese de mestrado, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:654865/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2016, 19:01:00.

TERI, 2012, *Life cycle analysis of transport modes New Delhi (Volume 1)*. The Energy and Resources Institute, New Delhi. Disponível em: <<http://www.teriin.org/upfiles/projects/ES/ES2011UD02.pdf>>. Acesso em: 21 out 2016, 19:53:00.

VOLVO, 2016, *B12M Articulado*. Disponível em: <[http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Brasil%20-%20ILF/Downloads/1%C3%A2mina%20B12M\\_art\\_esp\\_FINAL1.pdf](http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Brasil%20-%20ILF/Downloads/1%C3%A2mina%20B12M_art_esp_FINAL1.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2016, 10:49:00.

WILSON, G.; RIBEIRO, G.; CHAFIN, C., *et al.*, 2015, *BRT mais verde: uso de diesel renovável de cana em sistemas de transporte rápido por ônibus*. Disponível em: <[http://files-server.antp.org.br/\\_5dotSystem/download/dcmDocument/2015/06/12/86560935-16A2-4809-9B67-84E800A0F31E.pdf](http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2015/06/12/86560935-16A2-4809-9B67-84E800A0F31E.pdf)>. Acesso em: 04 jan. 2017, 20:31:00.

UNEP, 2009, *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. Disponível em: <[http://www.unep.org/pdf/DTIE\\_PDFS/DTIx1164xPA-guidelines\\_sLCA.pdf](http://www.unep.org/pdf/DTIE_PDFS/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf)>. Acesso em 09 out. 2016, 16:04:00.

UNEP/SETAC, 2007, *Life Cycle Management - a Business Guide to Sustainability*. Disponível em: <<http://www.unep.org/pdf/dtie/DTI0889PA.pdf>>. Acesso em 17 jan. 2017.

## Anexo I – Estimativa dos dados da carroceria do ônibus articulado

Para a estimativa dos dados da carroceria do ônibus articulado, foram considerados os cinco principais materiais da composição de um ônibus, identificados na tabela 3. A tabela 8 compara esses materiais para o ônibus comum completo Volvo 8500 e o chassi do modelo articulado B12M. Com base na diferença entre esses dados, foi estimado a quantidade de material somente da carroceria do ônibus comum (tabela 9). A partir dos dados da tabela 10, foi feita uma proporção de massa entre o ônibus articulado e o comum, encontrando o valor de:

$$\frac{18.235 \text{ kg}}{11.000 \text{ kg}} \simeq 1,66$$

Essa proporção foi utilizada para a estimativa dos dados da carroceria do ônibus articulado (tabela 8), aplicados na modelagem da ACV.

**Tabela 8: Dados principais materiais Volvo 8500 e chassi B12M**

Material	Volvo 8500 (Ecoinvent)	Chassi B12M
Alumínio (kg)	1669,76	211
Vidro (kg)	979,86	0
Plástico (kg)	578,92	98
Ferro (kg)	1531,78	1687
Aço (kg)	6321,89	3234

Fonte: elaboração própria com base em Ecoinvent (2013) e DANIELSSON e GUNNARSSON (2011).

**Tabela 9: Estimativa dos dados da carroceria**

Material	Ônibus comum 'carroceria'	Ônibus Articulado Carroceria (4)
Alumínio (kg)	1458,76	2418,23
Vidro (kg)	979,86	1624,34
Plástico (kg)	480,92	797,23
Aço (kg)	3087,89	5118,88

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 10: Dados ônibus comum e articulado**

Tipo	Peso carroceria + chassi (kg)	Peso chassi (kg)
Ônibus comum	11000 <sup>1)</sup>	-
Ônibus Articulado	18235 <sup>6 2)</sup>	8855 <sup>2)</sup>

1: Baseado no modelo Volvo 8500. Ecoinvent (2013)

2: Baseado no modelo Volvo B12M articulado. Volvo (2016)

<sup>6</sup> Calculado a partir do peso bruto total (PBT), que inclui tara + lotação (DNIT, 2012). Lotação de 180 passageiros + 1 motorista, considerando peso de 65 kg para cada pessoa.

## Anexo II – Principais dados de entrada de material e energia para o BRT Transcarioca

Tabela 11: Principais dados de entrada de material e energia para o BRT Transcarioca

Fase do ciclo de vida	Dados	Quantidade	Unidade	Detalhes	Localização	Fonte
Manufatura do veículo	Aço	8.352	kg	Estimado para Volvo B12M articulado. Vide anexo I	GLO	Estimado com base em Volvo (2016) e Ecoinvent (2013)
	Alumínio	2.629	kg	Estimado para Volvo B12M articulado. Vide anexo I	GLO	Estimado com base em Volvo (2016) e Ecoinvent (2013)
	Ferro	1.687	kg	Estimado para Volvo B12M articulado. Vide anexo I	GLO	Estimado com base em Volvo (2016) e Ecoinvent (2013)
	Vidro	1.624	kg	Estimado para Volvo B12M articulado. Vide anexo I	GLO	Estimado com base em Volvo (2016) e Ecoinvent (2013)
	Plástico	895	kg	Estimado para Volvo B12M articulado. Vide anexo I	GLO	Estimado com base em Volvo (2016) e Ecoinvent (2013)
	Transporte veículo	1050	km	Distância média entre a fábrica do ônibus articulado em Curitiba até o BRT Transcarioca	BR	Estimado com base em NEOBUS (2016)
Construção da infraestrutura	Aço	21.752	t	Dados da construção das estações incluídos. 39 km de via	BR	Infraestrutura Urbana (2011)
	Transporte Aço	218	km	Distância média entre o distribuidor de aço e o local de construção	BR	Infraestrutura Urbana (2013)
	Concreto	270.000	m <sup>3</sup>	39 km de via	BR	Infraestrutura Urbana (2011)
	Transporte Concreto	38	km	Distância média entre o distribuidor de concreto e o local de construção	BR	Infraestrutura Urbana (2013)
	Asfalto	200.000	t	39 km de via	BR	Infraestrutura Urbana (2011)
	Transporte Asfalto	39	km	Distância média entre o distribuidor de asfalto e o local de construção	BR	Brasil Engenharia (2016)
Uso	Energia elétrica	155.100	kWh/mês	Consumo da operação das estações	BR	BRTRIO (2015)
	Consumo combustível	1,8	km/l	Diesel B7	BR	Global BRT data (2015)
	Transporte Combustível	41	km	Distância média entre as garagens das empresas do consórcio Transcarioca e as refinarias de óleo diesel	BR	Estimado com base em FETRANSPOR (2015)

---

Manutenção	da via	1	unidade	-	GLO	Ecoinvent
	do veículo	1	unidade	-	GLO	Ecoinvent

---

**Fonte: Elaboração Própria**

