

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NO CICLO DE VIDA DO BRT

Christiano Lima Machado

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Carlos David Nassi

Rio de Janeiro
Novembro de 2017

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NO CICLO DE VIDA DO
BRT

Christiano Lima Machado

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

Examinada por:

Prof. Carlos David Nassi, Dr.Ing.

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

Prof. David Alves Castelo Branco, D.Sc.

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D.

Prof. Luis Antonio Lindau, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2017

Machado, Christiano Lima

Método de Avaliação das Emissões de CO₂ no Ciclo de Vida do BRT / Christiano Lima Machado. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIX, 190p.: il; 29,7cm.

Orientador: Carlos David Nassi.

Tese (doutorado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia de Transportes, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 135-143.

1. Planejamento de transportes. 2. Inventário de ciclo de vida. 3. Emissões evitadas. I. Nassi, Carlos David. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Ademilde e Hamilton, pela presença firme e constante em todo meu processo de educação, responsáveis por tornar um estudante de escola pública primária em um pesquisador acadêmico pós-graduado.

Também dedico à minha esposa Rosana e às minhas filhas Amanda e Gabriela, motivos formadores da minha perseverança inabalável, em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. CARLOS DAVID NASSI pelos conhecimentos compartilhados, além do importante incentivo e demonstrações de confiança, fundamentais para que a jornada fosse cumprida com o rigor empregado.

Ao CARLOS EDUARDO SANCHES DE ANDRADE que através de sua pesquisa pioneira no Brasil realizada para um sistema metroviário, inspirou a presente pesquisa e participou de forma amigável e atenciosa nos muitos pedidos de ajuda solicitados.

Ao Prof. Dr. MÁRCIO DE ALMEIDA D'AGOSTO pelas sugestões feitas para o enriquecimento da pesquisa.

A todos os funcionários da Secretaria Municipal de Transportes e da Secretaria Municipal de Obras do município do Rio de Janeiro, que forneceram de forma imediata todos os dados solicitados essenciais à realização dessa pesquisa.

Aos representantes das Empresas Volvo e Neobus, pelas informações fornecidas e atenção e tempo dispensados nos longos telefonemas realizados.

À CET Rio, em especial à presidência, à diretoria financeira e minha coordenação direta, pela compreensão do meu tempo dividido entre as tarefas de trabalho e acadêmicas.

Aos funcionários do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE - PET, com destaque para HELENA SANTOS e JANE CORREA pelo carinho e parceria.

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

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ NO CICLO DE VIDA DO BRT

Christiano Lima Machado

Novembro/2017

Orientador: Carlos David Nassi

Programa: Engenharia de Transportes

Muitos setores em centros de pesquisa vêm desenvolvendo trabalhos que têm como meta minimizar os impactos que o homem e seu desenvolvimento e expansão impõem através do consumo de recursos naturais e da crescente emissão de poluentes para a atmosfera.

Esta pesquisa debruçou-se sobre a análise do ciclo de vida de um sistema BRT, tendo como objetivo elaborar ferramenta que pudesse prever os impactos de um sistema de transporte ainda na fase de planejamento. Foi realizado um inventário de ciclo de vida - ICV do corredor Transcarioca, recém implantado na cidade do Rio de Janeiro, visando conhecer as emissões produzidas. Foi também proposto método para calcular as emissões evitadas, permitindo conhecer os elementos que constituem os benefícios e prejuízos ambientais associados ao corredor.

Dentre os resultados, registra-se o volume de menos 490.348 tCO₂ lançados para a atmosfera, a operação dos veículos com a maior parcela de emissão ao longo do ciclo de vida, com 72,97% e que o ponto de recuperação acontece no 16º ano.

O objetivo da pesquisa é alcançado com elaboração de ferramenta de auxílio à tomada de decisão, a qual apresenta metodologia de cálculo inédita, uma vez que processa os dados resultantes de uma análise de ciclo de vida voltada para transportes permitindo portanto, a comparação entre modos e possibilitando melhor decidir sobre a escolha de um novo sistema de transporte pelos aspectos ambientais associados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

METHOD OF EVALUATION OF CO₂ EMISSIONS IN THE BRT LIFE CYCLE

Christiano Lima Machado

November/2017

Advisor: Carlos David Nassi

Department: Transportation Engineering

Many sectors in research centers have been developing works that aim to minimize the impacts that men and their development and expansion impose through the consumption of natural resources and the increasing emission of pollutants into the atmosphere.

This research focused on the analysis of the life cycle of a BRT system, having as objective to develop a tool that could predict the transportation system impacts in the planning stage. We conducted a life cycle inventory - ICV of Transcarioca corridor, newly deployed in the city of Rio de Janeiro, aiming to meet the emissions produced. Also proposed a method for calculating the emissions avoided, allowing knowing the elements that constitute the benefits and environmental damage associated with the corridor.

Among the results, register the volume of less 490,348 tCO₂ released to the atmosphere, the operation of vehicles with the largest portion of issue throughout the life cycle, with 72.97% and that the recovery point happens in the 16th year.

The objective of the research achieved with elaboration of a tool to aid decision-making, which presents a methodology for calculating unprecedented, once that processes the data resulting from a life cycle analysis of facing transport allowing, therefore, the comparison between modes and the best choice of a new transport system taking into account the environmental aspects.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa do tema da tese.....	1
1.2	Objetivo da tese.....	3
1.3	Estrutura da tese	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Os sistemas de transporte e a emissão de CO ₂	5
2.1.1	A matriz energética dos sistemas de transporte por ônibus.....	7
2.1.2	A emissão da energia nos sistemas rodoviários	8
2.1.3	A emissão operacional nos sistemas BRT.....	12
2.1.4	Análise da emissão evitada por um sistema BRT	13
2.1.5	O fator <i>mode shift</i>	15
2.1.6	O fator <i>congestion relief</i>	16
2.1.7	O fator <i>land use</i>	17
2.1.8	Resultados de emissões evitadas em sistemas BRT	17
2.2	Conceito da análise de ciclo de vida	18
2.2.1	Definição do objetivo e escopo	21
2.2.2	Análise do ICV – Inventário de ciclo de vida	22
2.2.3	Avaliação do impacto.....	22
2.2.4	Interpretação.....	24
2.2.5	Ferramentas de <i>software</i> para a ACV.....	25
2.2.6	ACV em sistemas de transporte	25
2.2.7	ACV em Sistemas BRT.....	26
2.2.7.1	Infraestrutura	28
2.2.7.2	Veículos	29
2.2.7.3	Declaração ambiental do produto	30
2.3	Experiências de ACV em sistemas rodoviários	33
2.3.1	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte dos Estados Unidos	33

2.3.2	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte da Europa.....	37
2.3.3	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte da Ásia.....	39
2.3.4	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte no Brasil	40
2.3.4.1	Estudo sobre emissão evitada em corredor BRT no Brasil	41
2.3.5	Análise dos estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte pesquisados....	44
3	METODOLOGIA.....	46
3.1	Procedimento de ICV para um sistema BRT	47
3.1.1	Construção da infraestrutura	50
3.1.2	Fabricação dos ônibus	53
3.1.3	Operação dos ônibus	54
3.1.4	Operação da infraestrutura	55
3.1.5	Manutenção dos ônibus	56
3.1.6	Manutenção da infraestrutura.....	57
3.2	Fatores de emissão e densidade de energia	58
3.3	Análise do ICV.....	61
3.4	Modelo adotado para estimar a emissão evitada pela implantação de um sistema BRT.....	61
3.4.1	Emissões evitadas pela redução da circulação de carros.....	62
3.4.2	Emissões evitadas pela redução da circulação de ônibus.....	63
3.5	Modelo para ferramenta de auxílio à tomada de decisão	64
3.5.1	Cálculo das emissões produzidas	65
3.5.2	Cálculo das emissões evitadas.....	66
3.5.3	Resultados	66
4	ESTUDO DE CASO - CORREDOR TRANSCARIOCA	70
4.1	O Corredor Transcarioca.....	70
4.2	Aplicação do procedimento de ICV no Corredor Transcarioca.....	72
4.2.1	Construção da infraestrutura	72
4.2.1.1	Transporte de fornecedores para construção das pistas	74

4.2.1.2	Transporte para atividades da obra	76
4.2.1.3	Consumo de combustíveis pelas máquinas pesadas	78
4.2.1.4	Consumo de combustíveis pelos equipamentos	79
4.2.2	Fabricação dos ônibus	80
4.2.2.1	Carbono embutido nos materiais do ônibus.....	82
4.2.2.2	Consumo de combustíveis na fabricação dos ônibus	82
4.2.2.3	Consumo de energia elétrica na fabricação do ônibus.....	83
4.2.2.4	Transporte entre fábricas e para o local de operação.....	84
4.2.2.5	Consolidação das emissões na fabricação dos ônibus	85
4.2.3	Operação dos ônibus	86
4.2.3.1	Consumo indireto de diesel na operação dos ônibus	87
4.2.3.2	Consumo direto de diesel na operação dos ônibus	87
4.2.3.3	Consolidação das emissões para operação dos ônibus	88
4.2.4	Operação da infraestrutura	88
4.2.4.1	Consumo de energia elétrica nas estações	89
4.2.4.2	Consumo de energia elétrica nos terminais	89
4.2.4.3	Consolidação das emissões para a operação da infraestrutura	90
4.2.5	Manutenção dos ônibus	90
4.2.5.1	Carbono embutido em materiais.....	90
4.2.5.2	Transporte para fornecimento de pneus e óleo lubrificante.....	91
4.2.5.3	Consumo de energia elétrica.....	93
4.2.5.4	Consolidação das emissões para manutenção dos ônibus	93
4.2.6	Manutenção da infraestrutura	94
4.2.6.1	Transporte na manutenção da infraestrutura.....	95
4.2.6.2	Uso de máquinas pesadas na manutenção da infraestrutura	97
4.2.6.3	Carbono embutido em materiais na manutenção da infraestrutura.....	97
4.2.6.4	Consolidação dos dados para manutenção da infraestrutura	98
4.2.7	Totalização das emissões para o ciclo de vida	98

4.3	Interpretação dos resultados do ICV	99
4.4	Determinação do pkm do corredor.....	103
4.5	Aplicação de procedimento para emissões evitadas	105
4.5.1	Redução de quilometragem associada aos carros.....	105
4.5.2	Redução de quilometragem associada aos ônibus.....	109
4.5.3	Combustíveis não consumidos e emissões evitadas.....	112
4.6	Emissões produzidas vs. Emissões evitadas	113
4.7	Comparações das emissões no ciclo de vida do corredor Transcarioca com outros estudos de ciclo de vida	116
4.8	Aplicação da ferramenta de auxílio à tomada de decisão	121
4.9	Análise de sensibilidade com uso da ferramenta CEMTRANS.....	125
4.9.1	Sensibilidade pela demanda	126
4.9.2	Sensibilidade pela transferência modal	126
4.9.3	Sensibilidade pela construção de pontes na infraestrutura	127
4.9.4	Sensibilidade pela quilometragem evitada por ônibus a diesel em função da reorganização de linhas	128
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	130
5.1	Conclusões	130
5.2	Recomendações.....	133
	BIBLIOGRAFIA.....	135
	APÊNDICE 1 - CÁLCULOS EMISSÕES PRODUZIDAS E ENERGIAS	144
	APÊNDICE 2 – MATRIZES DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO pkm	184
	APÊNDICE 3 – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES EVITADAS	189
	APÊNDICE 4 – TELA DE CÁLCULO DA FERRAMENTA DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO	190

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipologia dos impactos de um sistema BRT sobre a emissão de CO ₂	14
Figura 2: Representação do ciclo de vida.....	19
Figura 3: Etapas da análise do ciclo de vida.....	21
Figura 4: Fases operacionais e não operacionais do ciclo de vida de sistemas de transporte rodoviário.....	26
Figura 5: ACV de um sistema BRT.....	28
Figura 6: Declaração ambiental de produto – Infraestrutura Rodoviária.....	31
Figura 7: Declaração ambiental de produto – Ônibus.....	32
Figura 8: Traçado do corredor Transoeste.....	42
Figura 9: Procedimento do ICV de um sistema BRT.....	49
Figura 10: Etapas do procedimento para determinar emissões evitadas.....	63
Figura 11: Fases do procedimento para ferramenta de auxílio à tomada de decisão.....	68
Figura 12: Tela de uso da ferramenta de auxílio à tomada de decisão – CEMTRANS.....	69
Figura 13: Traçado do corredor Transcarioca.....	71
Figura 14: Atividades básicas na construção da infraestrutura.....	73
Figura 15: Visão geral do veículo utilizado no corredor Transcarioca.....	81
Figura 16: Atividades básicas para fabricação dos ônibus.....	81
Figura 17: Atividades básicas para operação dos ônibus.....	86
Figura 18: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do Transcarioca.....	99
Figura 19: Emissões de CO ₂ por segmento na construção da infraestrutura do Transcarioca.....	100
Figura 20: Uso do aço na construção da infraestrutura do Transcarioca.....	100
Figura 21: Emissões de CO ₂ no segmento de transporte na construção da infraestrutura do Transcarioca.....	101
Figura 22: Emissões de CO ₂ no segmento de fabricação dos veículos do Transcarioca.....	102
Figura 23: Emissões de CO ₂ no segmento de manutenção dos veículos do Transcarioca.....	102
Figura 24: Emissões de CO ₂ no segmento de operação dos veículos do	

Transcarioca.....	103
Figura 25: Ponto de recuperação das emissões não operacionais do Transcarioca.....	114
Figura 26: Comparação da energia produzida entre o Transcarioca e Linha 4.....	119
Figura 27: Comparação das emissões produzidas entre Transcarioca e Linha 4.....	120
Figura 28: Tela da ferramenta processando os dados do BRT Transcarioca.....	122
Figura 29: Tela da ferramenta processando os dados da Linha 4.....	123
Figura 30: Tela da ferramenta processando os dados do VLT Rio.....	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Emissão de CO ₂ per capita no mundo.....	8
Quadro 2: Expressão para determinar as emissões do transporte do fornecedor.....	50
Quadro 3: Expressão para determinar as emissões pelo uso de combustíveis.....	51
Quadro 4: Expressão para determinar as emissões pelo uso de combustíveis.....	51
Quadro 5: Expressão para determinar as emissões pelo uso de energia elétrica.....	52
Quadro 6: Expressão para determinar as emissões do carbono embutido.....	53
Quadro 7: Expressão para determinar as energias associadas aos combustíveis.....	59
Quadro 8: Total de pkm ao longo do ciclo de vida.....	104
Quadro 9: Total de passageiros transportados ao longo do ciclo de vida.....	106
Quadro 10: Total de passageiros dada a transferência modal no ciclo de vida.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Emissões em gCO ₂ /pkm, de ônibus, automóveis e metrô.....	9
Tabela 2: Emissões médias, em gCO ₂ /pkm, nos Estados Unidos em 2008.....	10
Tabela 3: Fatores de emissão do transporte por ônibus movido a diesel no mundo.....	10
Tabela 4: Redução de emissões de CO ₂ pela implantação de sistemas BRT.....	11
Tabela 5: Consumo operacional de diesel e energia elétrica por ano.....	12
Tabela 6: Emissões evitadas por corredores BRT.....	18
Tabela 7: Categorias de impactos ambientais e indicadores.....	23
Tabela 8: Declarações ambientais de veículos.....	33
Tabela 9: Acréscimo na emissão operacional de meios de transporte de passageiros dos Estados Unidos.....	35
Tabela 10: Emissões, em gCO ₂ e/passageiro-milha, no ciclo de vida do transporte rodoviário e metroviário nos Estados Unidos.....	35
Tabela 11: Emissões de CO ₂ do BRT de Xiamen, China.....	39
Tabela 12: Emissões, em gCO ₂ /pkm, do BRT e Metrô de Délhi.....	40
Tabela 13: Modos de transporte e transferência modal no BRT Transoeste.....	42
Tabela 14: Combustíveis utilizados nos modos de transporte do corredor.....	43
Tabela 15: Emissões evitadas no BRT Transoeste.....	43
Tabela 16: Fator de emissão de CO ₂ e densidade de energia.....	60
Tabela 17: Similaridades admitidas para dados de cálculo de um VLT.....	65
Tabela 18: Dados sobre os 4 corredores do sistema BRT Rio.....	71
Tabela 19: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no fornecimento aço utilizado nas pistas.....	75
Tabela 20: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no fornecimento de cimento, areia e brita para usinagem do concreto para as pistas.....	76
Tabela 21: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte do concreto já usinado para as pistas.....	76
Tabela 22: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte de combustível até os tanques nos canteiros-base.....	77
Tabela 23: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte de combustível dos postos nos canteiros-base até às máquinas e equipamentos no	

campo.....	77
Tabela 24: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte de materiais, peças e equipamentos nos locais de atividade (campo).....	78
Tabela 25: Emissão e Energia pelo transporte de pessoas e equipamentos nos locais de atividade por veículos menores movidos a gasolina.....	78
Tabela 26: Emissão e Energia pelas máquinas pesadas nos locais de atividade (campo).....	79
Tabela 27: Emissão e Energia pelos equipamentos movidos à diesel nos locais de atividade (campo).....	80
Tabela 28: Carbono embutido em materiais para a fabricação de 1 ônibus.....	82
Tabela 29: Emissão e Energia pelo consumo de combustíveis na fabricação de 1 ônibus.....	83
Tabela 30: Emissão e Energia no consumo de eletricidade na fabricação de 1 ônibus.....	83
Tabela 31: Distâncias associadas ao transporte na fabricação dos ônibus.....	85
Tabela 32: Emissões e Energia associadas ao transporte da fabricação dos veículos.....	85
Tabela 33: Consolidação das emissões e energia para a fabricação dos ônibus.....	86
Tabela 34: Emissões e Energia associadas ao consumo indireto de diesel por ano para operação dos ônibus.....	87
Tabela 35: Emissões e Energia associadas ao consumo direto de diesel por ano na operação dos ônibus.....	88
Tabela 36: Consolidação das emissões e energia para a operação dos ônibus.....	88
Tabela 37: Dados do consumo de eletricidade nas estações.....	89
Tabela 38: Dados do consumo de eletricidade nos terminais.....	89
Tabela 39: Consolidação das emissões e energia para a operação da infraestrutura.	90
Tabela 40: Emissões e Energia do carbono embutido na manutenção dos veículos.	91
Tabela 41: Emissões e Energia associadas ao transporte para manutenção dos veículos.....	92
Tabela 42: Emissões e Energia associadas ao consumo de eletricidade para manutenção dos ônibus em 1 ano.....	93
Tabela 43: Consolidação das emissões e energia para a manutenção dos ônibus.....	94
Tabela 44: Atividades e materiais para a reconstrução das pistas.....	95

Tabela 45: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte do concreto e aço utilizados na reconstrução das pistas.....	96
Tabela 46: Emissão e Energia pelo transporte na remoção do entulho.....	96
Tabela 47: Emissão e Energia pelas máquinas pesadas na demolição do pavimento.....	97
Tabela 48: Emissão e Energia pelo carbono embutido no concreto e aço utilizados na reconstrução das pistas.....	98
Tabela 49: Consolidação das emissões e energia para a manutenção da infraestrutura.....	98
Tabela 50: Totalização das emissões para o ciclo de vida.....	98
Tabela 51: Divisão das emissões entre fases operacionais e não operacionais.....	100
Tabela 52: Crescimento da transferência modal.....	106
Tabela 53: Identificação da quilometragem média de viagem / passageiro.....	107
Tabela 54: Identificação da quilometragem total evitada no ciclo de vida.....	108
Tabela 55: Percentual da frota por tipo de combustível na cidade do Rio de Janeiro.....	109
Tabela 56: Quilômetros evitados por tipo de combustível associados aos carros.....	109
Tabela 57: Reordenamento das linhas impactadas pelo corredor Transcarioca.....	111
Tabela 58: Quilômetros evitados associados aos ônibus.....	112
Tabela 59: Combustíveis não consumidos e emissões evitadas no ciclo de vida.....	113
Tabela 60: Emissões evitadas líquidas no ciclo de vida do Transcarioca.....	113
Tabela 61: Acúmulo de emissões produzidas e evitadas no ciclo de vida.....	115
Tabela 62: Comparação de gCO ₂ /pkm no ciclo de vida entre sistemas de transporte.....	118
Tabela 63: Comparação entre pontos de recuperação no ciclo de vida entre o BRT Transcarioca e a Linha 4 do Metrô.....	118
Tabela 64: Comparação percentual das emissões no ciclo de vida entre o BRT Transcarioca e a Linha 4 do Metrô.....	121
Tabela 65: Sensibilidade por alteração da demanda.....	126
Tabela 66: Sensibilidade por alteração da transferência modal.....	127
Tabela 67: Sensibilidade por alteração da extensão das pontes construídas.....	128
Tabela 68: Sensibilidade pela quilometragem evitada por ônibus à diesel.....	128

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV - Análise do ciclo de vida
ADEPORTO - Agência de energia da cidade do Porto
ADP - Abiotic Depletion Potential
AP - Acidification Potential
APTA - American Public Transportation Association
BART - Bay Area Rapid Transit
BRT - Bus Rapid Transit
CALTRAIN - California train
CAHSR - California High Speed Rail
CEMTRANS - Comparador de Emissões para Transportes
CH₄ - Metano
CNT - Confederação Nacional do Transporte
CO₂ - Dióxido de carbono
CO₂e - Dióxido de carbono equivalente
COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
COPPETEC - Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos
EIO-LCA - Economic Input/Output - Life cycle assessment
EPD - Environmental Product Declaration
EP - Eutrophication Potential
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
FDT - Florida Department of Transportation
FGV - Fundação Getúlio Vargas
GEE - Gases de Efeito Estufa
GNV - Gás Natural Veicular
GREET - Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation
GWP - Global Warming Potential
ICV - Inventário do Ciclo de Vida
IEA - International Energy Agency
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISO - International Organization for Standardization

ITDP - Institute for Transportation and Development Policy
LCA - Life cycle assessment
LCI - Life cycle inventory
LISBOA e-NOVA - Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MTA - Metropolitan Transport Authority
N₂O - Óxido nitroso
NREL - National Renewable Energy Laboratory
ODP - Ozone Depletion Potential
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico
PaLATE - Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects
PCR - Product Category Rules
pkm - passageiro por quilômetro
PlaNYC - New York City Plan Reducing Greenhouse Gas Emissions
POCP - Photo-Oxidant Creation Potential
RATP - Régie Autonome des Transports Parisiens
SMO - Secretaria Municipal de Obras do Rio de Janeiro
SMTR - Secretaria Municipal de Trânsito do Rio de Janeiro
SUTP - Sustainable Urban Transport Project
SUV - Sport utility vehicle
TFL - Transport for London
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
VLT - Veículo leve sobre trilhos
WORLDSTEEL - Worldsteel Association
WRI - World Resources Institute

1 INTRODUÇÃO

Muito se estuda sobre os sistemas de transporte urbano de passageiros em seus aspectos operacionais, os quais visam conhecer melhor sobre a eficiência, conforto e adequação do mesmo às necessidades da malha em que se insere. Porém ainda há carência de conhecimento sobre os aspectos que relacionam transporte público e meio ambiente, sobretudo que abordem uma nova implantação de um sistema que demande de construção de infraestrutura, como novas vias, túneis, viadutos, estações etc., necessária à operação dos veículos. Assim como em outros modos de transporte, como o ferroviário e o metroviário, os sistemas de transporte rápido por ônibus, conhecido pela sigla BRT (Bus Rapid Transit), têm pesada atividade de engenharia para a implantação de sua infraestrutura, emitindo considerável volume de dióxido de carbono (CO_2). Além dessas emissões não computadas na construção da infraestrutura, são comumente desconsideradas as parcelas de CO_2 relacionadas com atividades secundárias à movimentação dos veículos, mas vitais para o funcionamento do sistema como um todo, como por exemplo, emissões provocadas pelas atividades de manutenção. A possibilidade de visão ampliada sobre todos os processos ocorridos nas atividades geradoras de emissões que contemplem além das emissões relacionadas diretamente com a atividade fim, é dada pela abordagem da análise do ciclo de vida. Esse método permite o conhecimento e identificação das diversas fontes de emissões, nas diferentes fases do ciclo de vida dos sistemas de transporte (ANDRADE, 2016). Dessa forma, pesquisas com o foco na emissão de CO_2 que tenham abrangência além da contabilização tradicional em sua atividade fim, qual seja, a movimentação dos veículos, cada vez mais se mostram valiosas para o entendimento dos impactos ambientais relacionados aos sistemas de transporte.

1.1 Justificativa do tema da tese

As pesquisas sobre aspectos ambientais com foco em sistemas de transporte comumente contabilizam apenas as emissões de CO_2 produzidas na operação, a qual se constitui na atividade fim do sistema, computando apenas a queima do combustível que movimenta os veículos, não considerando outras emissões que ocorrem durante o tempo de existência, indicando assim uma necessidade de aprofundar o conhecimento em torno do estudo do ciclo de vida desses sistemas. Esse trabalho visa contribuir com a pesquisa

sobre as emissões de CO₂ nos sistemas de transporte. O foco da pesquisa será em ampliar o conhecimento da análise de ciclo de tal forma que seja possível mensurar de maneira antecipada o impacto ambiental de um sistema. O transporte escolhido para a pesquisa foi um corredor BRT, do qual serão extraídos dados através da elaboração de um ICV – Inventário de Ciclo de Vida. Tal procedimento será aplicado no processo de implantação, operação e manutenção do corredor Transcarioca na cidade do Rio de Janeiro.

ANDRADE (2016) propôs metodologia de ACV para aplicação em sistemas de transportes metroviários, estudando o ciclo de vida da recém implantada Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, pesquisa motivadora para o estudo aqui apresentado. A pesquisa e metodologia aqui propostas, no entanto, estabelecem um avanço do conhecimento sobre o tema, uma vez que possibilitará colocar em comparação os impactos advindos de sistemas de transporte distintos, através de ferramenta que possibilite conhecer as grandezas de efeitos positivos e negativos quando da implantação de novo corredor de transporte, podendo assim ser considerado como um marco inicial em estudos voltados para a mitigação de emissão de CO₂ através do maior detalhamento permitido pela metodologia da análise de ciclo de vida.

Outra motivação resultou da escassez de trabalhos sobre o tema. No estado da arte podem ser encontrados alguns estudos sobre o tema, porém comumente consideram apenas parte dos elementos constituintes do ciclo de vida, visando conhecimento pontual de determinados aspectos relacionados, não tendo a abrangência que possibilite uma análise ampla e estruturada que permita concluir sobre os reais impactos ocasionados pela construção, operação, manutenção e fim de vida de um sistema de transporte rodoviário. A presente pesquisa relaciona vasta lista de dados reais obtidos diretamente nas fontes, tanto referentes à construção da infraestrutura, operação e manutenção, como também relacionados à demanda real registrada no corredor Transcarioca, oportunidade que possibilitou resultados com baixo grau de incertezas, diferentemente do que ocorre com a maior parte dos trabalhos produzidos, onde estimativas de toda ordem são elaboradas para suprir a inexistência de dados, sendo também comumente utilizados modelos computacionais, geralmente com base estrangeiras de dados, fornecendo portanto, resultados com considerável margem de erro quando aplicados em modelagens no Brasil.

1.2 Objetivo da tese

O objetivo desta tese é a elaboração de ferramenta computacional que permita analisar, de forma prévia, a emissão de CO₂ provocada por sistemas de transporte. Para alcançar tal objetivo serão considerados os dados reais da ACV pesquisada por ANDRADE (2016) sobre a Linha 4 do metrô, como também da ACV desenvolvida na presente Tese, a qual debruçou-se sobre o corredor BRT Transcarioca, ambos recentemente construídos e postos em operação na cidade do Rio de Janeiro. Dessa forma, visando o objetivo estabelecido serão propostos três métodos de trabalho, com procedimentos distintos entre si:

- ❖ Elaboração de um procedimento de ICV, o qual será orientado à aplicação no corredor Transcarioca, o qual implicará na contabilização de todas as emissões produzidas durante o seu ciclo de vida.
- ❖ Procedimento para identificar as emissões evitadas pela implantação do corredor Transcarioca, o que irá permitir, através da quantidade de CO₂ evitada ao longo do ciclo de vida, uma análise comparativa em função do débito e crédito dessas emissões.
- ❖ Diante do conhecimento acumulado pelos dados obtidos por essa pesquisa sobre o BRT, bem como os dados resultantes da pesquisa de ANDRADE (2016), foi criada uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão orientada aos gestores públicos na avaliação prévia dos impactos ambientais pela implantação de sistemas de transporte.

1.3 Estrutura da tese

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos:

Capítulo 1: apresenta uma introdução, contemplando o tema da tese, sua justificativa e os aspectos relevantes da pesquisa. São apresentados também os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: apresenta a revisão bibliográfica para o tema proposto. Se divide em duas etapas, sendo a primeira todo o contexto de conhecimento das emissões de CO₂ no setor de transportes e no sistema rodoviário e a outra abordando o estado da arte sobre

estudos de ICV em sistemas de transportes, como base para a proposição da metodologia.

Capítulo 3: apresenta o detalhamento dos três métodos de trabalho propostos. Nele são encontradas as metodologias para a construção de um Inventário de Ciclo de Vida de um sistema BRT, para o cálculo de determinação da emissão evitada, bem como para a elaboração da ferramenta de auxílio à tomada de decisão, que permitirá a escolha entre sistemas de transporte com o foco na eficiência ambiental, objetivo final da pesquisa.

Capítulo 4: detalha as aplicações dos métodos propostos. Inicialmente são apresentados os dados obtidos através da elaboração do ICV realizado para o corredor BRT Transcarioca no Rio de Janeiro. Para tal, são apresentados os resultados da quantificação de todas as fases de emissões, registrando o montante final de toneladas emitidas no horizonte de 40 anos, considerando a construção da infraestrutura, a fabricação dos veículos, o suprimento de combustíveis para a operação do sistema, energia elétrica para a infraestrutura e todo o suprimento necessário para a manutenção dos veículos e da infraestrutura. Ainda no capítulo 4 é apresentada a análise do ICV, a determinação do pkm (passageiro x km) do sistema, o cálculo para conhecimento das emissões das emissões evitadas, o ponto de recuperação das emissões produzidas nas fases não operacionais, bem como as comparações dos resultados obtidos no Transcarioca com outros resultados pesquisados na revisão bibliográfica. O capítulo encerra apresentando a aplicação da ferramenta de auxílio à tomada de decisão, visando através de análises de sensibilidade pelas simulações de entrada de dados no modelo, melhor entender o peso de cada uma das fases componentes de um estudo de ACV.

Capítulo 5: apresenta as conclusões finais sobre a tese e as recomendações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os sistemas de transporte e a emissão de CO₂

O volume de gases de efeito estufa (GEE) enviados à atmosfera vem aumentando ano-a-ano, com acentuação da curva de crescimento nas últimas décadas. Dentre os gases, o causador de maior preocupação é o CO₂, relacionado à atividade humana e ao qual se atribui um aumento anual na temperatura média do planeta de 0,85 graus, no período entre 1880 e 2012. Segundo IPCC (2014a), não havendo ações para a mitigação dos gases de efeito estufa, a temperatura média poderá subir até 4,8 graus Celsius no próximo século.

O efeito estufa, benéfico à manutenção das temperaturas no planeta, vem recebendo gradativo e constante aumento ao longo das últimas décadas. Esse aumento de temperatura global modifica o clima em diversas regiões do planeta, aumentando os desastres naturais, diminuindo a massa das geleiras, aumentando o nível do mar e causando outros efeitos de impactos severos no dia-a-dia das pessoas. Tais prejuízos causados pelo aumento dos GEE motivaram vários países a assumirem compromissos envolvendo ações de mitigação de emissões dos gases poluidores, em vários setores, incluindo o setor de transportes.

Veículos automotores emitem um conjunto de gases em seu funcionamento, sendo o identificados o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e o CO₂, sendo este último presente em maior quantidade medido em kg/km e, conseqüentemente, relacionado a maior parcela de contribuição para o aquecimento global. Dada a sua importância pela contribuição em volume, o CO₂ é referenciado como unidade de potencial de aquecimento, apesar de apresentar impacto poluente de menor intensidade se considerada apenas sua composição química. Analisando os outros gases emitidos pelos veículos, tendo como referência o CO₂, o CH₄ tem valor 25 e o N₂O tem valor 298, considerando um tempo de 100 anos de permanência na atmosfera (IPCC, 2014b). Dessa forma, há convenção estabelecida denominada “Potencial de Aquecimento Global” (em inglês GWP – *Global Warming Potencial*), onde a massa emitida pelos GEE é quantificada em equivalência ao CO₂, ou seja, a quantidade de CO₂ que apresenta o mesmo potencial de aquecimento, medida em CO₂e (CO₂ equivalente).

Mesmo reconhecendo a importância dos demais gases e seus impactos, é o CO₂e, por sua importância nas emissões veiculares, que será considerado no presente estudo.

Segundo OECD (2010), as emissões de CO₂ relacionadas aos sistemas de transportes respondem por 23% do total de emissões no planeta, sendo o transporte rodoviário responsável pela maior parcela dessas emissões. Já IEA (2009) estima que as emissões relacionadas ao transporte cresçam 100% até 2050, tendo como base o ano de 2009. No Brasil, a energia consumida pelo setor de transportes em 2015 representou 32,2% da energia total. Mesmo havendo decréscimo de 2,6% em relação a 2014, a quantidade de GEE emitido pelo setor de transportes do Brasil atinge 200 milhões de toneladas, medidas em CO₂e, correspondendo a 42% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2016).

Em virtude das constatações estabelecidas como também das incertezas geradas pela exploração do tema, a consciência ambiental vem avançando no mundo inteiro e os governos apresentam sinais de preocupação em suas políticas públicas para a redução da emissão de gases do efeito estufa. Governos locais vêm assumindo objetivos de redução, dentre os exemplos pode-se destacar a cidade de Londres, que assumiu compromisso de reduzir em 60% as emissões no setor de transportes, usando como referência o ano de 2009. Ainda na Europa, a cidade do Porto estabeleceu meta de redução de 45% até 2020, tendo como base o ano de 2004 (ADEPORTO, 2009). Já a cidade de Lisboa se comprometeu com a redução de 20% entre 2013 e 2020, tendo o ano de 2012 como referência (LISBOA e-NOVA, 2014). Na França, a *Régie Autonome des Transports Parisiens* - RATP que é a quinta maior empresa de transporte público do mundo, está transformando com o programa *Bus2025* o transporte de passageiros na região de Ile de France com a adoção híbridos, ação prévia à utilização de ônibus 100% elétricos até 2020, plano que pretende reduzir as emissões de gases de efeito de estufa, o consumo de energia de passageiro x km em 20%. Sob análise de um cenário continental, o Parlamento Europeu estabeleceu que a partir de 2020, um regulamento fixará as emissões médias de CO₂ dos automóveis novos em 95g de CO₂/km (RATP, 2017).

De abrangência global, as convenções do clima estabelecem metas para minimizar, dentre outros impactos antrópicos, a emissão de gases poluentes para atmosfera. No ano

de 2016, o acordo de Paris obteve 195 nações signatárias que concordaram com o maior rigor do texto aprovado, tendo como destaque a concordância dos países com o compromisso de trabalhar para que aquecimento global fique muito abaixo de 2°C, buscando limitá-lo a 1,5°C, tendo como viabilidade o financiamento de US\$ 100 bilhões por ano a ser viabilizado pelos países mais ricos.

No Brasil, a cidade do Rio de Janeiro fixou pelo decreto nº 43.216 de 30/09/2011, objetivo de redução de 30% das emissões entre 2010 e 2030, em relação ao ano de 2010, enquanto que o estado de São Paulo aprovou o decreto nº 58.107 de 05/06/2012, que estabeleceu objetivos de redução de 20% das emissões até 2020, tendo por base o ano de 2005. Na cidade de Nova Iorque foi planejada uma redução de 30% das emissões até 2030, comparado a 2005 (PlaNYC, 2007).

Comumente, a abordagem empregada na medição das emissões de CO₂ em sistemas de transporte considera apenas as emissões decorrentes da queima do combustível fóssil, como nos automóveis, ônibus, caminhões, navios, aviões, etc. Para sistemas impulsionados pela energia elétrica, como ferrovias e metrô, considera-se a emissão indireta associada à queima de combustíveis fósseis ocorrida nas usinas térmicas que compõem a matriz de geração de eletricidade na maior parte dos países desenvolvidos. A composição da matriz de energia é um fator determinante na emissão relacionada aos sistemas de transporte.

2.1.1 A matriz energética dos sistemas de transporte por ônibus

A demanda mundial de petróleo deve continuar crescendo até 2040, principalmente pelo lento desenvolvimento de alternativas ao seu uso. Tal pressão na demanda advém da necessidade e dependência do petróleo no transporte rodoviário, não só o de passageiros, mas como também de mercadorias (IEA, 2016). Segundo a mesma Agência Internacional de Energia, a demanda por petróleo para movimentar carros de passeio deve diminuir, mesmo com a tendência de dobrar o número de veículos nos próximos 25 anos. Isto se deve principalmente aos avanços tecnológicos e na introdução maior dos biocombustíveis e ao desenvolvimento em escala de carros elétricos.

No Brasil, mesmo estando em posição de destaque pela crescente utilização de fontes renováveis – como a hidráulica, o etanol e a eólica – um terço de sua produção de petróleo (32,2%) é consumida pelo setor de transportes (EPE, 2016). Outro dado importante dá conta de que a produção interna de petróleo deve triplicar pela exploração do pré-sal, confirmando a vocação do país para esta fonte de energia, se tornando inclusive alvo para parcerias estratégicas pelas maiores economias mundiais. Ainda assim, a relação de emissão de CO₂ per capita no Brasil é uma das menores como pode ser observado no quadro 1.

Quadro 1: Emissão de CO₂ per capita no mundo.

Emissão de CO₂ (toneladas per capita)	
Quantidade	Países
Entre 16 e 36	Estados Unidos e Austrália
Entre 7 e 16	Japão, Canadá, Rússia, Ucrânia, Polônia e África do Sul
Entre 2,5 e 7	União Europeia, China, México, Chile, Argentina e Venezuela
Entre 0,8 e 2,5	Brasil, Índia, Indonésia, países da América Central e Caribe

Fonte: IEA (2014).

Outro aspecto relevante sobre a matriz energética no país é o que se refere à produção de energia elétrica. O fator mais relevante nos problemas ambientais decorrentes do uso da energia é o emprego de combustíveis fósseis na produção de eletricidade, no setor de transporte e na indústria. No Brasil há menor utilização de fontes térmicas na geração de eletricidade, sendo que em seu ano de maior utilização (2013), quando houve diminuição expressiva das chuvas e aumento do número de usinas térmicas em funcionamento, chegou a 19,8% (ONS, 2016). A matriz predominante vem da fonte hidrelétrica que em 2014, passada a estiagem, foi responsável por 79,2% do total da produção de energia elétrica do país, sendo outras fontes renováveis (biomassa e energia eólica) responsáveis por 8,7% (EPE, 2016). A emissão de carbono das hidrelétricas é considerada desprezível, porém o emprego da energia elétrica gerada com baixa emissão para movimentação dos veículos de passeio e de transporte público sobre pneus ainda apresenta tecnologias não aplicáveis em larga escala, o que dificulta a obtenção de benefícios ambientais com impacto global.

2.1.2 A emissão da energia nos sistemas rodoviários

Dada a demanda de energia, o transporte rodoviário pode ser dividido em 3 dimensões:

- ❖ Infraestrutura, composta de rodovias, terminais, sistemas de controle e instalações de apoio;
- ❖ Veículos;
- ❖ Energia necessária à sua tração.

Neste modo de transporte, esta última dimensão é usualmente ocupada pelos combustíveis derivados do petróleo (CNT, 2016). A emissão da energia de tração nos sistemas de transporte por ônibus é relacionada à queima predominantemente do combustível diesel, necessário ao funcionamento do motor à combustão. Algumas experiências já utilizam o Gás Natural Veicular (GNV), o diesel conjugado com GNV e também com motores elétricos – veículos híbridos, como também a utilização do etanol, mas tendo estes usos ainda baixo peso na escala de consumo para serem consideradas.

Como todo combustível derivado de petróleo, o diesel emite CO₂ no processo de conversão da energia química contida em energia mecânica (D’AGOSTO, 2004) e está presente em todos os meios de transporte. A medida “gramas de CO₂ por passageiro-km (gCO₂/pkm)” resulta na unidade utilizada para indicar a eficácia do sistema de transporte em termos de emissão deste gás, associando a quantidade de passageiros transportados com a distância por eles percorrida, valor obtido pelo produto dos totais correspondentes de passageiros transportados anualmente pela extensão média das viagens, denotando assim a eficiência ambiental dos sistemas.

Numa abordagem comparativa inicial, a tabela 1 apresenta emissões em CO₂ para ônibus, automóveis e metrô, em localidades distintas.

Tabela 1: Emissões em gCO₂/pkm, de ônibus, automóveis e metrô.

Local	Ônibus	Automóveis	Metrô	Fontes (metrô)	Fontes (automóveis e ônibus)
Londres	80	170	58	LU (2009)	TFL (2010)
Lisboa	85	180	33	METRÔ LISBOA (2011)	AGENEAL (2005)
São Paulo	16	127	6,3	METRÔ SÃO PAULO (2014b)	IPEA (2011)
Rio de Janeiro			5,5	METRÔ RIO (2014b)	

Nota: A emissão dos ônibus no Brasil considera uma carga de lotação (80 passageiros por viagem).

Fonte: ANDRADE (2016).

Observa-se variação nas emissões de CO₂, a qual resulta da quilometragem dos sistemas, das diferentes matrizes energéticas, bem como do tipo de motorização e adições de biocombustíveis.

Nos Estados Unidos a FTA (2010) divulgou a média nacional de emissões relacionadas aos transportes. Os valores são observados na tabela 2.

Tabela 2: Emissões médias, em gCO₂/pkm, nos Estados Unidos em 2008.

Automóveis	Ônibus	VLT	Ferrovias	Metrô
272 gCO ₂ /pkm	180 gCO ₂ /pkm	101 gCO ₂ /pkm	93 gCO ₂ /pkm	62 gCO ₂ /pkm

Fonte: FTA (2010) e ANDRADE (2016).

No Brasil, a emissão de CO₂ em função da utilização do diesel nos transportes por ônibus contém componente diferencial no consumo. A Resolução CONAMA N° 403 de 11 de novembro de 2008 e na Lei nº 11.097/2005 estabelece um percentual mínimo de mistura de biodiesel no diesel fóssil comercializado no país, promovendo a queima de combustível de origem renovável no volume total utilizado no país.

A tabela 3 registra os fatores de emissão do diesel utilizados em pesquisas nacionais e internacionais, mostrando as variações desse índice nos sistemas rodoviários.

Tabela 3: Fatores de emissão do diesel no mundo.

País	Fator Emissão	Fonte
Europa	2,65 kg CO ₂ /l	DEFRA (2015)
Estados Unidos	2,67 kg CO ₂ /l	NREL (2006)
Brasil	2,60 kg CO ₂ /l	IPCC (2006) / ANP (2014)

Com o conhecimento da medida “passageiro x quilômetro” (pkm) e as emissões provenientes do tipo de combustível e motorização dos veículos, podemos aferir o gCO₂/pkm dos sistemas de BRT. Com a utilização de veículos de maior capacidade, caso dos veículos ônibus articulados utilizados nestes sistemas, somada a sua operação com velocidades médias mais altas e menor consumo de energia, estes sistemas registram maior eficiência operacional e, por consequência, benefícios ambientais

significativos. A tabela 4 registra alguns dados de corredores BRT pelo mundo, com a redução das emissões alcançadas.

Tabela 4: Redução de emissões de CO₂ pela implantação de sistemas BRT.

Ano Avaliação	País	Cidade	Sistema	Redução CO ₂ (t/ano)	Demanda pass/ano (milhões)
2009	China	Chonqing	-	95.098 ¹	266
2010	China	Chonqing	Lines 1-4	218.067 ²	266
2012	China	Lanzhou	Lanzhou BRT	12.621 ²	42
2011	China	Zhengzhou	Zhengzhou BRT	204.715 ²	195
2011	Colômbia	Barranquilla	Transmetro	55.828 ²	36,3
2006	Colômbia	Bogotá	-	83.520 ¹	594
2006	Colômbia	Bogotá	TransMilenio Phase II – IV	246.563 ²	594
2008	Colômbia	Bogotá	TransMilenio Phase II – IV	62.813 ³	594
2010	Colômbia	Cali	Metro Cali	113.428 ⁴	160
2012	Colômbia	Medellin	Metroplus	123.479 ²	18
2009	Colômbia	Pereira	-	10.464 ¹	31,5
2009	Indonésia	Jakarta	TransJakarta	60.000 ³	120
2012	Guatemala	Guatemala City	TransMetro	536.148 ²	73,5
2012	México	Guadalajara	Macrobus	54.325 ²	38,1
2008	México	Mexico City	-	4.416 ¹	270
2009	México	Mexico City	Metrobus Insurgentes	26.816 ³	270
2011	México	Mexico City	Metrobus Insurgentes	46.544 ²	270
2011	México	Mexico City	Lines 1-5 EDOMEX	145.863 ²	270
2012	México	Mexico City	Metrobus 2-13	134.601 ²	270
2012	Turquia	Istambul	Metrobus	60.955 ⁵	220

Emissões: dados em: 1. IEA (2009); 2. CDM (2014); 3. Hook *et al.* (2010); 4. Turner *et al.* (2012); 5. Alpkokin e Ergun (Alpkokin & Ergun, 2012)
 Demanda: dados em brtdata.com (ALC-BRT & Embarq, 2014), chinabrt.org (ITDP China, 2014) e CDM (2014)

Fonte: OLIVEIRA et al. (2012)

Observa-se na tabela 4 que as quantidades de emissão calculadas apresentam elevada variação, inclusive para análises sobre um mesmo sistema, revelando a importância do detalhamento e manutenção da metodologia escolhida para que os resultados possam ser comparados e revistos no decorrer dos anos de operação do projeto.

2.1.3 A emissão operacional nos sistemas BRT

A emissão operacional em sistemas BRT é dada pelo uso da energia necessária à movimentação dos veículos, bem como pelo funcionamento das estações e terminais, o que implica no consumo de energia elétrica para essa demanda. Diferentemente dos sistemas metroviários que são grandes consumidores de energia elétrica que, apesar de sofrer variação das emissões em função da matriz energética utilizada apresentam menores emissões associadas, os sistemas BRT consomem grande parte de combustíveis de origem fóssil para a tração dos veículos. Esse consumo de combustível é predominantemente maior se considerado o consumo de energia elétrica utilizada nas estações. Cabe ressaltar que não é comum a iluminação das vias de um sistema BRT serem dedicadas exclusivamente a ele, sendo desprezada essa parcela de consumo de energia elétrica pela condição de iluminação compartilhada existente na via antes da segregação de pistas. A tabela 5 registra dados dessas duas parcelas de consumo de energia para alguns corredores BRT.

Tabela 5: Consumo operacional de diesel e energia elétrica por ano.

Corredor	Combustível	Eleticidade	Fonte
Los Angeles	2.600.000 m ³ (GNV)	550.000 (MJ)	CHESTER (2012)
Pequim	17.000.000 litros (Diesel)	6.950.000 (MJ)	CHINABRT.ORG (2016)
Zurique	3.850.000 litros (Diesel)	850.600 (MJ)	COST, 2014 / BRT DATA.ORG

A variação existente entre o consumo de combustível e energia elétrica é estabelecida conforme a quantidade e características dos serviços nos corredores. Devem ser considerados o impacto das emissões específicas da energia de tração dos veículos, que podem variar entre o diesel tradicional, o diesel com adição de biodiesel e GNV. Atuam também no volume das emissões itens como número de veículos, extensão do corredor, quantidade de estações, existência de terminais de integração com outros modos, frequência e velocidade média do serviço e itens de conforto como ar condicionado e calefação interferem diretamente no consumo destas formas de energia. Considerando apenas a emissão de CO₂ dada pelo consumo do diesel nos veículos, temos que um corredor BRT pode chegar a minimizar estas emissões em até 107.000 tCO₂ por ano, estimativa para o corredor Transoeste, na cidade do Rio de Janeiro (ITDP, 2012).

2.1.4 Análise da emissão evitada por um sistema BRT

Na abordagem para investigar as emissões evitadas o sistema BRT é considerado como ausente num sistema de transporte existente numa região. Imagina-se que a implantação desse sistema tenha promovido mudanças no trânsito da região e que, ao ser retirado da rede, deva apresentar maior quantidade de carros e ônibus convencionais em circulação acarretando, portanto, uma maior emissão dióxido de carbono.

Visando conhecer a real parcela das emissões produzidas ao longo do tempo por um sistema, considerando a parcela da produção de CO₂ e a parcela correspondente ao que deixou de ser produzido deste gás, forma o conceito das emissões evitadas. Dessa forma é calculado o débito (emissões produzidas) e o crédito (emissões evitadas). O balanço entre débito e crédito pode ser admitido como emissões líquidas do sistema.

Essa metodologia foi proposta pela APTA - *American Public Transportation Association*, visando estudos na área dos sistemas de transporte público nos Estados Unidos. Por sua natureza análoga, tal modelo pode ser adaptado a um corredor BRT, o qual é estruturado e mostrado na figura 1. O conceito assumido é que a implantação do corredor altera de forma significativa as características do tráfego nas regiões atendidas, propiciando menos tráfego de carros particulares e ônibus convencionais, o que vem a resultar em menor quantidade de CO₂ emitido, tanto pela ausência desses veículos como também pelo melhor desempenho dos veículos que trafegam, devido ao menor congestionamento do trânsito.

Noutro aspecto relacionado na publicação APTA (2009) é sugerido que a implantação de um determinado sistema promova o aumento da densidade demográfica nas regiões atendidas, vindo a promover mudanças de comportamento nos usuários, que poderão passar a considerar para pequenos deslocamentos complementares, o uso da bicicleta e também caminhadas. Pelo inverso dessa premissa, a falta do sistema pode promover o aumento geográfico da região, acarretando em maiores distâncias e incentivando um maior uso do automóvel para as viagens mais longas. APTA (2009) complementa concluindo que o zoneamento de áreas das cidades pode ser alterado, com impactos sociais e econômicos resultantes do aparecimento de um novo corredor de transporte. A aplicação desse modelo consiste na quantificação de cada um de seus elementos,

gerando o questionamento: na ausência do sistema o usuário escolheria o transporte privado? Que trajetos seriam percorridos? Como seria o novo trânsito na região?

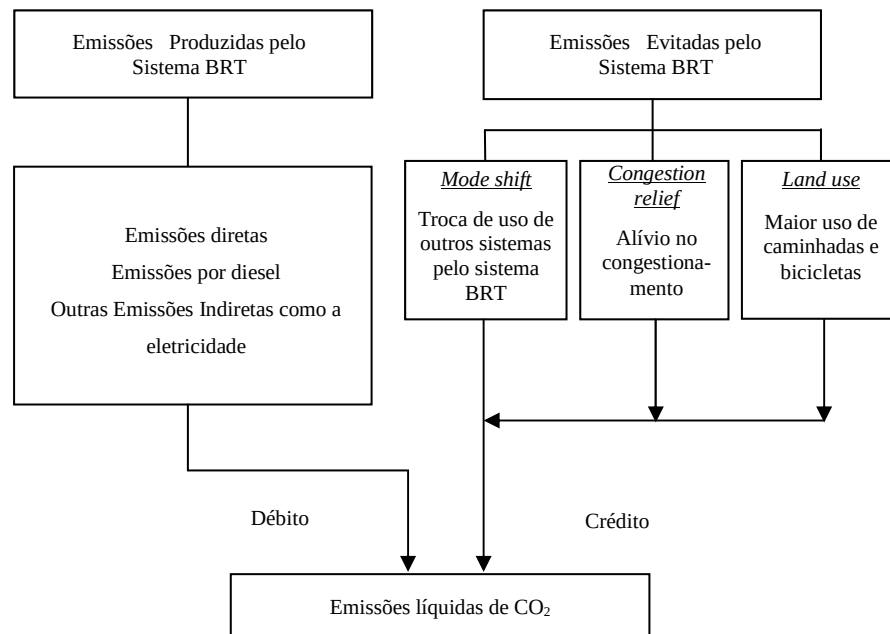


Figura 1: Tipologia dos impactos de um sistema BRT sobre a emissão de CO₂.
Fonte: Adaptado de APTA (2009).

Adaptando o modelo para um sistema BRT, os seguintes elementos devem ser dimensionados:

a) Débito: a emissão produzida pelo sistema BRT, conhecida através de um inventário de emissões de GEE, o qual deve contabilizar emissões diretas, as emissões por eletricidade, e outras emissões indiretas, ou apenas parte desses elementos.

b) Crédito: a emissão evitada pelo sistema, podendo seguir os seguintes métodos:

❖ *mode shift*, que representa a diminuição das emissões advindas do fato de usuários de carro particular e outros meios de transporte de maior emissão migrarem para outros meios com maior capacidade de transporte e, portanto, de menor emissão, resultando numa menor quantidade de viagens desses veículos de maior emissão.

❖ *congestion relief*, que representa a diminuição das emissões advindas da diminuição dos congestionamentos no trânsito causada pelo menor número de veículos

circulando com melhor desempenho e melhor queima de combustível, dadas as velocidades médias mais altas.

❖ *land use factor*, que representa a diminuição das emissões advindas da maior densidade demográfica, resultando em viagens mais curtas com possibilidade do uso de bicicleta e favorecendo a caminhadas.

2.1.5 O fator *mode shift*

No estudo da APTA (2009), a seguinte questão é proposta para a determinação do fator: Na inexistência do transporte público qual seria a escolha dos seus usuários? As opções relacionadas são:

- ❖ *usar automóveis*
- ❖ *desistir da viagem*
- ❖ *fazê-la a pé ou de bicicleta*

Segundo outro estudo do tema, FDT (2008), são quatro as maneiras convencionais de se fazer a estimativa do fator *mode shift*:

a) Simular a ausência do sistema de transporte público em modelos de demanda de viagens. Tal método tem a desvantagem por requerer uma extensa lista de dados e cálculos complexos para considerar vários fatores como motivo das escolhas dos modos de transporte, condições socioeconômicas dos usuários, etc.

b) Analisar as formas alternativas adotadas para os deslocamentos quando o sistema de transporte se encontrar em greve, observando os aspectos migratório para os meios de transporte disponíveis.

c) Realizar pesquisa visando conhecer a preferência de viagens dos usuários. O questionamento feito tem como foco conhecer a opção de escolha do usuário do sistema caso esse deixasse de existir, oferecendo como opções: dirigir sozinho, usar um carro com motorista, usar transporte solidário em carros compartilhados, usar taxi, caminhar, usar bicicleta e não realizar a viagem.

d) Utilizar projeção de demanda baseada no tamanho da população, visando conhecer a relação entre o tamanho da população e usuários de automóveis. Esta última alternativa é utilizada quando as demais não são viáveis.

2.1.6 O fator *congestion relief*

O conceito desse fator sugere que o resultado da inexistência do transporte público é o aumento no congestionamento das vias, o que acarreta velocidades médias mais baixas e, por consequência, maior queima de combustíveis e maior índice de emissões. O foco é determinação do ponto limite para o registro do congestionamento, definido pela relação volume/capacidade. Os trechos de vias que superarem esse valor são considerados congestionados. O objetivo passa a ser a determinação da quantidade adicional de combustível queimada, em consequência do tráfego retido. A pesquisa requer grande base de dados das principais vias das regiões impactadas, com registros de velocidades por faixa horária, cobrindo as 24 horas.

Segundo APTA (2009), os métodos recomendados para a determinação do fator *congestion relief* são:

a) Aplicação de modelagem computacional, a qual deve ser estruturada com os dados estimados para as demandas regionais. Após deve se retirar o sistema do modelo e observar o tempo de atraso dos veículos em congestionamentos, calculando o acréscimo do consumo de combustível associado.

b) Extrapolação dos dados obtidos através de pesquisa de congestionamentos, dividido nas seguintes etapas:

Etapa 1: Estabelecer uma correlação entre densidade de tráfego e consumo de combustível.

Para determinação desta correlação deve-se observar a sobrecarga de fluxo de uma via, identificando o momento em que a capacidade de se trafegar em fluxo livre deixa de ocorrer. Havendo o congestionamento, deve ser associado o tempo de queima de

combustível com o veículo em regime de deslocamento diferenciado, o qual resulta, em teoria, num crescimento exponencial das emissões.

Etapa 2: Usar o fator *mode shift* para calcular a quantidade de veículo x quilômetro acrescida ao tráfego.

Etapa 3: Estimar o consumo adicional de combustível imposto pelo congestionamento, usando a curva densidade de tráfego x consumo adicional de combustível.

Etapa 4: Calcular a emissão de CO₂ produzida por esse consumo adicional, orientado o uso de índices e valores regionais, sempre que possível.

2.1.7 O fator *land use*

É admitido que em regiões com elevada densidade demográfica e atendida por eficientes sistemas de transporte público são registrados menor número de viagens de automóveis. Ao contrário dessas premissas, regiões espalhadas e não atendidas ou parcialmente atendidas por serviço de transporte público registram maior quantidade de viagens de automóveis pela maior necessidade de longos deslocamentos.

O modelo sugerido por MTA (2009) para dimensionar os impactos através do fator *land use* apresenta duas alternativas:

- a) Através de metodologia baseada na análise geoespacial observando o atendimento do transporte público existente.
- b) Através da metodologia que aplica uma série de comparações entre o uso do solo e a quantidade de veículo X km (quantidade de veículos multiplicada pela média de quilômetros percorridos por cada veículo) em regiões com diferentes usos do solo.

2.1.8 Resultados de emissões evitadas em sistemas BRT

A tabela 6 registra resultados de emissões evitadas por corredores BRT. As diferenças nos dados resultam das especificidades de abordagem de cada pesquisa, que consideraram elementos diferentes na abrangência do estudo. Enquanto em Los Angeles

foi considerada a soma das emissões da operação de veículos e infraestrutura, nos demais apenas a emissão dada pelo consumo de combustível foi considerada para estimativa da operação do corredor.

Tabela 6: Emissões evitadas por corredores BRT.

Corredores	Orange Los Angeles	Fordham Road Nova Iorque	Transcarioca Rio de Janeiro
Ano base das emissões	2010	2012	2015
Emissões produzidas (em tCO ₂ e)	Operação dos veículos + Infraestrutura	Operação dos Veículos	Operação dos Veículos
	100.000	18.500	26.800
Emissões evitadas (em tCO ₂ e)	<i>mode shift + congestion relief</i>	<i>mode shift + congestion relief + land use</i>	<i>mode shift</i>
	158.600	47.000	52.060
Resultado = Emissões líquidas evitadas (em tCO ₂ e)	- 58.600	- 28.500	- 25.260
Toneladas evitadas / tonelada produzida	1,60	2,55	1,95
Fonte	CHESTER (2012)	MTA (2013)	MACHADO (2016)

Mesmo havendo diferença entre os elementos pesquisados, nota-se a regularidade entre o índice extraído da razão entre toneladas evitadas x toneladas produzidas, indicando benefícios ambientais na emissão de CO₂e.

2.2 Conceito da análise de ciclo de vida

A abordagem do ciclo de vida impõe a necessidade de serem consideradas todas as fases constituintes do processo, desde a sua construção, sua operação e uso, indo até o fim de vida desse sistema. O método mais comumente utilizado é denominado ACV - Análise do Ciclo de Vida (em inglês LCA - *Life cycle assessment*). Dessa forma, podemos estabelecer que a ACV tem por objetivo avaliar o impacto ambiental produzido por um produto ou serviço ao longo de toda sua existência.

A figura 2 mostra, de forma resumida, a estrutura de uma ACV, registrando as entradas como sendo as matérias primas e as saídas sendo as emissões atmosféricas, e outros resíduos resultantes do processo.

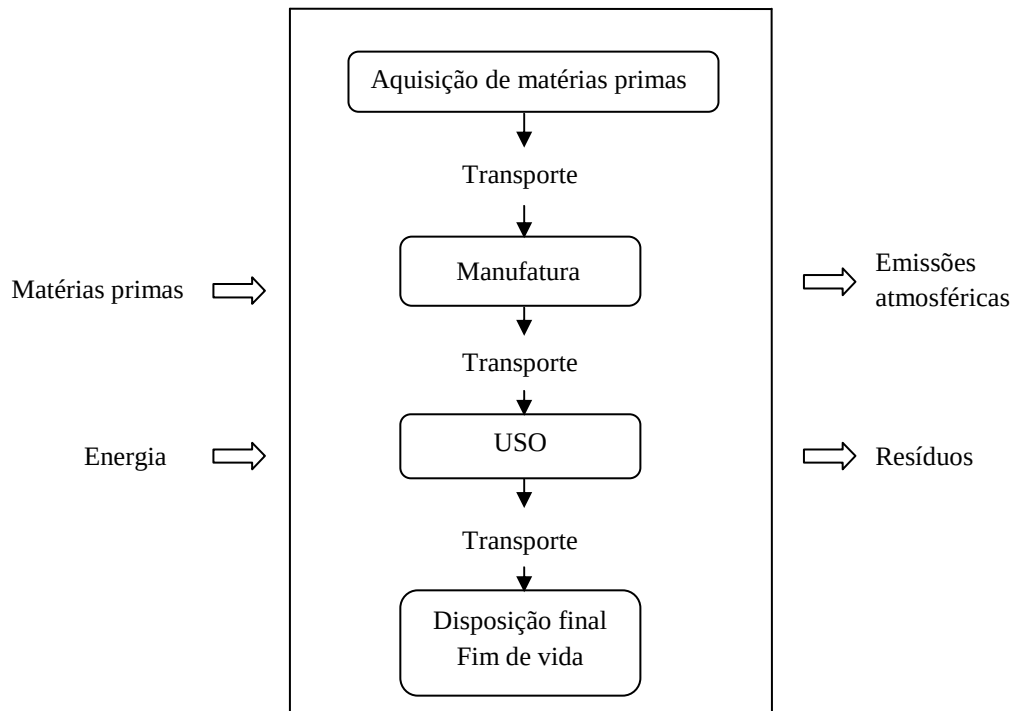


Figura 2: Representação do ciclo de vida.
Fonte: ANDRADE (2016).

Conforme o objetivo da ACV seu escopo pode ser total e abranger desde a extração da matéria prima até a disposição final ou pode ser parcial e abordar da fase da extração à fase de produção. Escopos específicos podem considerar etapas de uma cadeia de produção, com o objetivo de investigar elementos que adicionam valor agregado ao produto.

Há sempre tolerância e expectativa de certo grau de incerteza nos resultados de um estudo de ACV, considerando ser comum haver grandes quantidades e qualidades distintas de dados, ocasionando certa variação nos resultados, os quais comumente são lançados após estimativas. Por isso, é comum serem apresentadas análises de sensibilidade visando agregar a percepção de como os processos podem interferir com maior ou menor grau de impacto na análise final.

Um produto ou serviço estudado sobre abordagem da análise do ciclo de vida pode também apresentar variações diante de especificidades geográficas, as quais podem compreender aspectos sociais, econômicos, tecnológicos, etc. As variações também podem ocorrer em função da qualidade dos dados e da temporalidade dos mesmos. Portanto, um mesmo produto ou serviço podem apresentar resultados diversos de ACV quando realizadas em regiões diferentes, como também duas ACV aplicadas numa mesma região podem apresentar dados diferente em função das limitações do escopo adotado. Dessa forma, pode se estabelecer que estudos de ACV são únicos, dificultando o agrupamento de dados ou mesmo de processos que possam expressar situações assemelhadas.

Tendo a necessidade de roteirizar os procedimentos e a análise como um todo, recorre-se a norma ISO 14040, a qual está contida na família ISO 14000, tendo como foco o gerenciamento ambiental. A norma ISO 14040 estabelece regras que auxiliam no processo de redução do uso de matérias primas, consumo de energia e desperdícios, por meio do aperfeiçoamento e da eficiência das atividades, incentivando o uso de recursos renováveis. Ela aborda a ACV, relacionando essa avaliação com os aspectos ambientais e potenciais impactos ocorridos ao longo da vida do produto/serviço, contemplando desde a extração das matérias primas utilizadas até a disposição final. Por definição, a ISO 14040 registra que o ciclo de vida são os “estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria prima ou geração de recursos naturais à disposição final” e define a ACV como sendo a “compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ISO, 2009). Esse método se estabelece em quatro estágios principais e são mostrados na figura 3 e resumidos a seguir:

- 1) Definição do objetivo e escopo da pesquisa. Nesta etapa também são definidos os limites e o nível de detalhe pretendido.
- 2) Análise dos dados elencados no inventário das atividades, envolvendo a coleta de dados, os cálculos aplicados separadamente em cada conjunto de impacto ambiental existente.
- 3) Avaliação dos impactos sob uma visão do conjunto.

4) Interpretação dos resultados, permitindo conclusões finais dos resultados obtidos nas fases de análise de inventário e avaliação dos impactos (ISO, 2009).

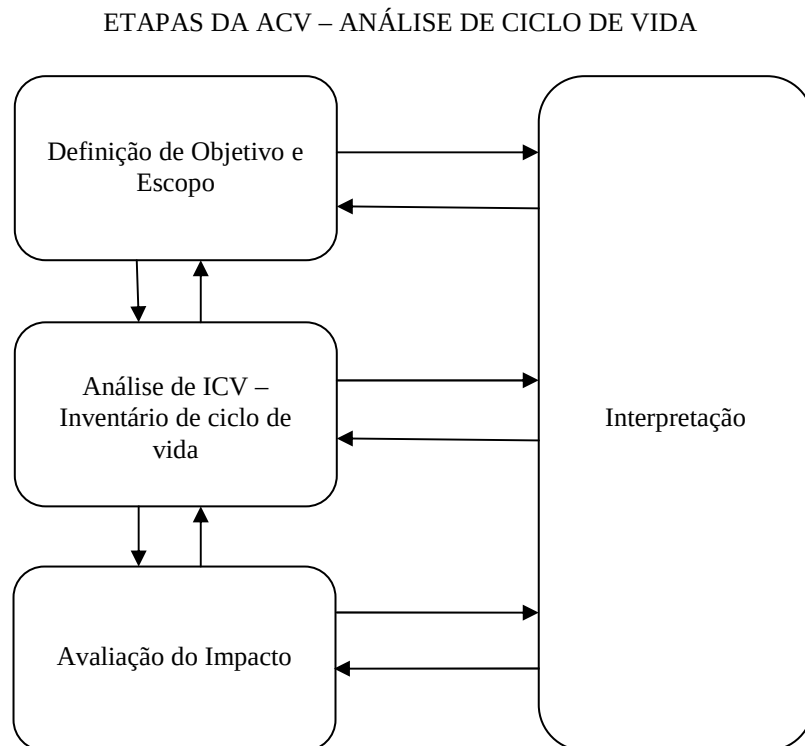


Figura 3: Etapas da análise do ciclo de vida.
Fonte: ISO (2009).

2.2.1 Definição do objetivo e escopo

Uma ACV é proposta com um determinado objetivo que deve trazer consigo as fronteiras para limitação do estudo. No escopo está, portanto, o contexto em que se o estudo será delimitado, registrando os elementos e a estrutura as quais deverão ser analisadas e, por consequência, deixando estabelecido o que será excluído do estudo. Nessa fase são estabelecidos também o modelo de abordagem, os processos que serão considerados e a metodologia da análise, definindo as unidades funcionais adotadas para dimensionar os fluxos de entradas e saídas e tornar os resultados comparáveis. As etapas de resultados pouco significativos são normalmente excluídas do estudo (ANDRADE, 2016).

2.2.2 Análise do ICV – Inventário de ciclo de vida

Nesta etapa é elaborado o inventário de ciclo de vida (ICV), produzido através do cálculo das quantidades e fluxos de materiais e energia que ocorrem ao longo do ciclo de vida. É a fase mais extensa e complexa, a qual resulta numa base de dados onde são reproduzidos todos os fluxos de entrada de recursos e energia e todos os fluxos de saída de emissões para o ambiente.

São diversas as abordagens para a elaboração de um ICV. A contribuição de cada material ou processo pode ser calculada por meio de diversas técnicas, mas todas recorrem às bases de dados onde podem ser encontrados os dados necessários para estimar as emissões, como dados para processos, combustíveis e materiais específicos, sempre considerando atividades como reciclagem e reuso de suprimentos como fator de redução nas emissões no processo.

Seguindo as premissas da identificação das emissões presentes nos materiais, ANDRADE (2016) usou o termo “carbono embutido” para se referir às emissões do ciclo de vida associadas à fabricação de um determinado material, ou seja, às emissões aderidas ao seu passado através do seu processo de manufatura. Uma das bases de dados mais usadas é o Ecoinvent, criado na Suíça, e também a base ICE – *Inventory of Carbon and Energy*, criada pela Universidade de Bath, na Inglaterra (ANDRADE, 2016). Nelas são registrados o fator de emissão de diversos materiais comumente considerados em estudos de ICV.

Construído o ICV, a desenvolvimento de uma análise sobre os dados permitirá uma visão geral das emissões de cada etapa do ciclo de vida, permitindo a formulação de ações que diminuam as emissões em determinadas etapas.

2.2.3 Avaliação do impacto

Apesar de haver a sistematização para elaboração de um ICV, não há uma metodologia padrão definida para a avaliação dos impactos. De forma geral, os potenciais impactos ambientais são estimados, classificados e caracterizados, sendo estas etapas obrigatórias na determinação da metodologia a ser adotada. Logo após, de forma opcional, eles são normalizados, agrupados e ponderados. A avaliação dos impactos se constitui na

principal informação necessária para a interpretação dos resultados, pois ela irá determinar o significado e a dimensão desses impactos.

As etapas obrigatórias:

❖ A seleção das categorias de impacto e dos indicadores. As categorias de impacto e os indicadores comumente utilizados são mostrados na tabela 7.

Tabela 7: Categorias de impactos ambientais e indicadores.

Categoria de Impacto	Exemplos de dados ICV	Indicador	Unidade
Esgotamento abiótico	Quantidade de minerais e combustíveis fósseis	ADP	kg Sb eq.
Alterações climáticas	Quantidade de CO ₂	GWP	kg CO ₂ eq.
Acidificação	Quantidade de SO _x e NO _x	AP	kg SO ₂ eq.
Eutrofização	Quantidade de PO ₄ , NO e NO ₂	EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.
Formação foto-oxidante	Quantidade de NMHC	POCP	kg C ₂ H ₄ eq.
Esgotamento do ozônio estratosférico	Quantidade de HCFC	ODP	kg CFC-11eq.

Nota: ADP – Abiotic Depletion Potential; GWP – Global Warming Potential; AP – Acidification Potential; EP – Eutrophication Potential; POCP – Photo-Oxidant Creation Potential; ODP – Ozone Depletion Potential; eq. – Equivalente.

Fonte: IPCC (2014b).

❖ Classificação

É a atribuição dos elementos componentes das categorias que compõem o inventário. O ICV pode ser realizado considerando, por exemplo, que terá somente a categoria “alterações climáticas”, e que somente vai considerar a emissão de alguns gases, como por exemplo, CO₂ e CH₄.

❖ Caracterização

Se constitui na estruturação dos dados a serem elencados, de forma a calcular os indicadores por categorias. Essa orientação visa padronizar a apresentação dos resultados, favorecendo a uma organização diante da necessidade de unificação da unidade. Dentre as categorias haverá muitos elementos com indicadores de impactos ambientais. Deve-se, portanto, escolher um desses elementos para que sirva de

referência, possibilitando então comparação com os demais. Segundo IPCC (2014b), o CO₂ é a referência para a categoria “alterações climáticas”, o qual se atribui valor 1. Como exemplo, o CH₄ apresenta valor 25, num horizonte de 100 anos, o que significa dizer que a mesma quantidade de CH₄ tem potencial de aquecimento 25 vezes maior que o CO₂. O valor “25” nesse caso é denominado “fator de caracterização”, permitindo que o resultado do indicador GWP seja apresentado em unidades de CO₂ equivalente (CO₂e).

As etapas opcionais:

❖ Normalização

É o cálculo para dimensionamento dos resultados, relativizando os indicadores a uma informação de referência. Como exemplo, pode-se citar o valor máximo ou médio de uma categoria, ou a soma de seus valores considerando a fabricação de um produto, onde o indicador dessas categorias pode ser normalizado para que o resultado apresentado seja relativo ao valor máximo observado para aquela categoria de produto.

❖ Agregação

É a classificação dos resultados estruturado em grupos de categorias, favorecendo a apresentação do resultado unificado do grupo.

❖ Ponderação

Representa a dimensão do impacto ambiental através da associação de pesos por categoria, de forma a apresentar resultados comparáveis entre si.

2.2.4 Interpretação

Na fase de interpretação os resultados da análise do inventário e da avaliação dos impactos ambientais, são considerados em conjunto, visando produzir resultados consistentes com o objetivo e escopo do estudo. São também apresentadas nesta fase as conclusões e recomendações para as melhores práticas.

2.2.5 Ferramentas de *software* para a ACV

Dada a complexidade que alguns estudos de ACV podem assumir, foram desenvolvidos *softwares* para esse fim. Alguns aplicativos se destacam, como o SIMAPRO, o GREET e o GABI. Algumas dessas ferramentas contêm bases de dados já levantadas para alguns processos, enquanto outras apenas apresentam uma estrutura sistematizada do modelo, orientando e facilitando o usuário na sua utilização em um caso real. Utilizam fórmulas, algoritmos e simuladores, com uma interface gráfica interativa e rodam em computadores pessoais.

Mesmo diante das facilidades para processar de forma mais rápida estudos de ACV complexos, as bases de dados desses aplicativos contêm dados de países desenvolvidos, com realidades particulares do ponto de vista econômico e tecnológico. De acordo com D'AGOSTO (2004) “o uso de softwares comerciais dificulta a interpretação dos dados e a avaliação de requisitos de qualidade, principalmente se estes já dispuserem de bancos de dados próprios, raramente compatíveis com a realidade dos países em desenvolvimento”.

2.2.6 ACV em sistemas de transporte

São encontrados poucos trabalhos orientados à análise do ciclo de vida em transportes e, de modo geral, é observada a adoção de escopos e objetivos diferentes entre si, dificultando a comparação dos resultados desses estudos realizados.

Segundo CHESTER e HOVARTH (2009a), de forma geral, os estudos orientados ao planejamento dos transportes, apenas consideram as emissões produzidas na queima do combustível necessária à movimentação dos veículos, ignorando o uso indireto da energia. Porém essas emissões ocorrem nas diversas fases do seu ciclo de vida, as quais podem ser separadas em fases operacionais e fases não operacionais, como mostrado conceitualmente na figura 4.

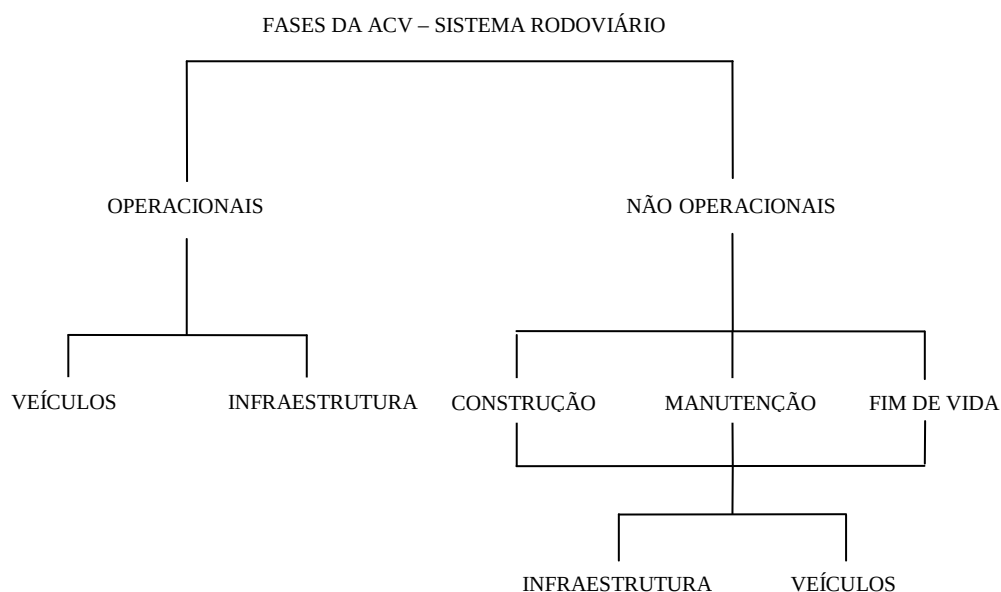


Figura 4: Fases operacionais e não operacionais do ciclo de vida de sistemas de transporte rodoviários.

Fonte: CHESTER (2008).

São consideradas emissões operacionais todas aquelas que resultam da movimentação dos veículos e das atividades inerentes ao funcionamento da infraestrutura do sistema. Já as emissões não operacionais resultam do uso de materiais e consumo de energia durante a construção, manutenção e fim de vida da infraestrutura e dos veículos.

A construção da infraestrutura do sistema inclui etapas como implantação do leito de tráfego das vias, sua pavimentação, bem como a construção de obras de arte (pontes e túneis), estações e terminais, considerando os materiais utilizados nessas construções.

2.2.7 ACV em Sistemas BRT

A operação da infraestrutura em sistemas BRT inclui itens como a energia gasta para a movimentação de veículos (queima de diesel), iluminação e energização dos componentes das estações. Usualmente não é computada a energização para sinalização de tráfego e para iluminação noturna, já que estas são compartilhadas das vias onde são implantados os corredores. A manutenção da infraestrutura inclui a troca da base de rolamento (concreto) num determinado tempo de uso. Já a manutenção dos veículos deve considerar a manufatura das peças de reposição em revisões de segurança correspondentes, bem como a energia gasta para o transporte dessas peças às garagens.

A infraestrutura necessária para o transporte por ônibus em faixa segregada assume aspecto diferente em sua concepção, a qual pode ser projetada desde a definição do traçado, das estações elevadas (pontos de parada) até os serviços e conexões que um corredor possa ter, se assemelhando através desses elementos mais ao formato de um sistema metroviário do que o transporte por ônibus convencional. Portanto, há como decisão recorrente para um projeto, a segregação de uma faixa de rolamento de uma ou mais vias, transformando-as em calhas de uso exclusivo, trazendo uma padronização do sistema.

As emissões de CO₂ nos sistemas BRT ocorrem nas diversas fases do seu ciclo de vida. A infraestrutura e os veículos podem ser divididos nas etapas de construção/fabricação, operação, manutenção, considerando também o fim de vida. As etapas relacionadas à construção da infraestrutura são compostas de atividades que demandam de combustíveis, seja para as entregas de materiais ou movimentação de pessoas, seja para o funcionamento de máquinas pesadas nas atividades de engenharia. Para a fabricação dos veículos devem ser consideradas a queima de combustíveis nos processos produtivos. Para a construção da infraestrutura, bem como para a fabricação dos veículos são atribuídos o tempo de vida associado aos desgastes inerentes à utilização. Muitos fabricantes definem um tempo de vida útil em suas especificações, favorecendo o dimensionamento do tempo de vida a ser estipulado no estudo. Os recursos de combustíveis e energia necessários a todas as fases podem estar associados à emissão de CO₂, tal como está o emprego de materiais através do “carbono embutido”, aderido ao material no seu processo produtivo.

Os processos de fabricação do aço e do concreto utilizados em larga escala na engenharia civil, consomem grandes quantidades de energia. A produção de uma tonelada de aço libera até 1,9 tCO₂ segundo WORLDSTEEL (2014). As emissões de CO₂ pela indústria do cimento necessário à produção do concreto em todo o mundo são responsáveis por cerca de 5% das emissões globais (BENHELAL *et al.*, 2013). Segundo LIMA (2010) a indústria brasileira de cimento emite 659 kgCO₂/t diante da média mundial que registra 810 kgCO₂/t. A energia não renovável, como óleo combustível, gás natural e carvão, utilizada nas fases do ciclo de vida, diretamente ou por meio da eletricidade, é responsável por outras parcelas de emissão. Dessa forma, a estruturação do ciclo de vida num sistema BRT pode ser dada em duas fases:

- 1) Fase não operacional = Construção da infraestrutura, fabricação dos veículos, manutenção da infraestrutura, manutenção dos veículos e seu fim de vida.
- 2) Fase operacional = Operação dos veículos e operação da infraestrutura.

A figura 5 mostra as atividades relacionadas aos recursos e energias empregados nas fases de um sistema BRT.

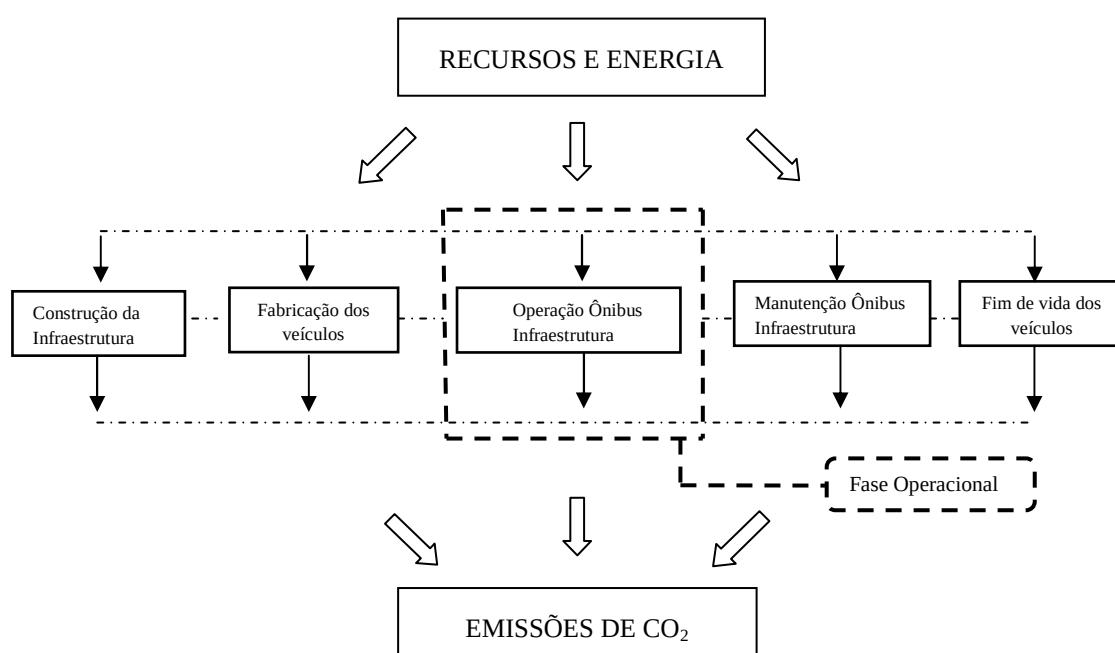


Figura 5: ACV de um sistema BRT.
Fonte: Adaptado de ANDRADE (2016).

2.2.7.1 Infraestrutura

A infraestrutura é composta basicamente por quatro elementos, como listados na sequência:

- a) Pista de rolamento: estrutura por onde correm os ônibus. É composta basicamente pela definição de uma calha exclusiva para o tráfego destes veículos. Usualmente utiliza faixa de rolamento de pista existente, empregando elementos como grades, defensas e muretas pré-moldadas, os quais exercem função de segregar as pistas do tráfego comum, como também do fluxo de pedestres. A estrutura das pistas pode ser construída parcial ou totalmente. Quando há o emprego de construção de novas pistas para o tráfego dos veículos,

estas são executadas em placas (tabuleiros) com 25cm de espessura que podem variar entre 5 e 10 metros de comprimento. Comumente, o concreto utilizado nas pistas recebe aditivos que agregam maior capacidade de carga e resistência mecânica aos esforços sofridos pelo tráfego de veículos que chegam a pesar 25 toneladas. O concreto apesar do maior custo em relação ao pavimento asfáltico betuminoso, tem seu emprego justificado onde o perfil do uso é mais agressivo, tendo seu tempo de vida útil estimado em 20 anos (DNIT, 2004). A armadura de aço é utilizada apenas em algumas partes do traçado, onde haja a necessidade de estruturar as peças, como por exemplo entre tabuleiros. Já nas pontes e túneis que possam existir num traçado, a utilização de aço é maior, com volume de emprego definido pelo tipo de estrutura.

- b) Estações e terminais: locais de embarque e desembarque de passageiros. Como padrão, elas são elevadas do piso da via e permitem acesso em mesmo nível com as portas dos veículos. São empregados regularmente terminais ou estações de maior porte para interconexão ou mesmo para permitir a transferência a outros modos de transporte.
- c) Garagens: locais para estacionamento dos veículos. Comum funcionarem também como postos de abastecimento e locais para manutenção.
- d) Sistemas de controle de tráfego: são baseados em computadores, câmeras e sensores para permitir o controle total da operação do sistema.

2.2.7.2 Veículos

Os veículos são os ônibus, predominantemente na configuração de articulados ou biarticulados, podendo também admitir ônibus convencionais, sendo a capacidade média de 140 passageiros (WRI BRASIL, 2016). Dentre os materiais utilizados registra-se a predominância do aço, alumínio, fibra de vidro e borracha. O combustível mais utilizado é o diesel, havendo também experiências com etanol e gás natural.

2.2.7.3 Declaração ambiental do produto

A observação cada vez maior por parte dos consumidores de produtos e usuários de serviços para questões ambientais com foco na sustentabilidade dos processos, resultou numa tendência. Sob essa premissa, são expedidos comunicados elaborados por fabricantes denominados “declaração ambiental do produto”, conhecido na literatura como EPD (*Environmental Product Declaration*). Fabricantes de ônibus emitem essas declarações para seus produtos, funcionando como uma chancela de qualidade ambiental, denotando a transparência dos processos produtivos adotados pela empresa. Uma declaração ambiental de produto é regida pela norma ISO e deve ser quantificada e obedecer a um conjunto de parâmetros pré-estabelecidos. A declaração deve ser registrada num programa de declarações ambientais, sendo uma referência no tema o *International EPD System*. Um dos itens que compõe as declarações está o potencial de aquecimento global, medido em kg de CO₂e por pkm ou passageiro-100 km, quando o objeto é um veículo.

A declaração deve atender a regras específicas para categorias de produtos, listando as fases específicas que serão cumpridas ao longa da vida. São publicadas pela EPD regras ou *Product Category Rules (PCR)*. Especificamente para sistemas BRT ou para veículos articulados ou biarticulados não existe ainda publicação EPD específica, porém as regras PCR 2013:20 – *Highways, streets and roads* e PCR 2016:04 – *Public and private passenger buses and coaches*, onde são estabelecidas as definições, escopo e fronteiras do levantamento das categorias associadas à infraestrutura e aos veículos. Os termos aplicados às fases constituintes da declaração são:

- a) *upstream* – fase correspondente à produção de materiais, considerando o uso de energia na fase de extração da matérias primas necessárias no processo de produção;
- b) *core* – fase que compreende a manufatura dos componentes relacionados à construção / produção, considerando o transporte até o destino final;
- c) *downstream* – fase que considera o uso em sua atividade fim, a manutenção, o desmonte e descarte do produto.

A figura 6 representa as fases e mostra o escopo da declaração de produto “infraestrutura rodoviária”.

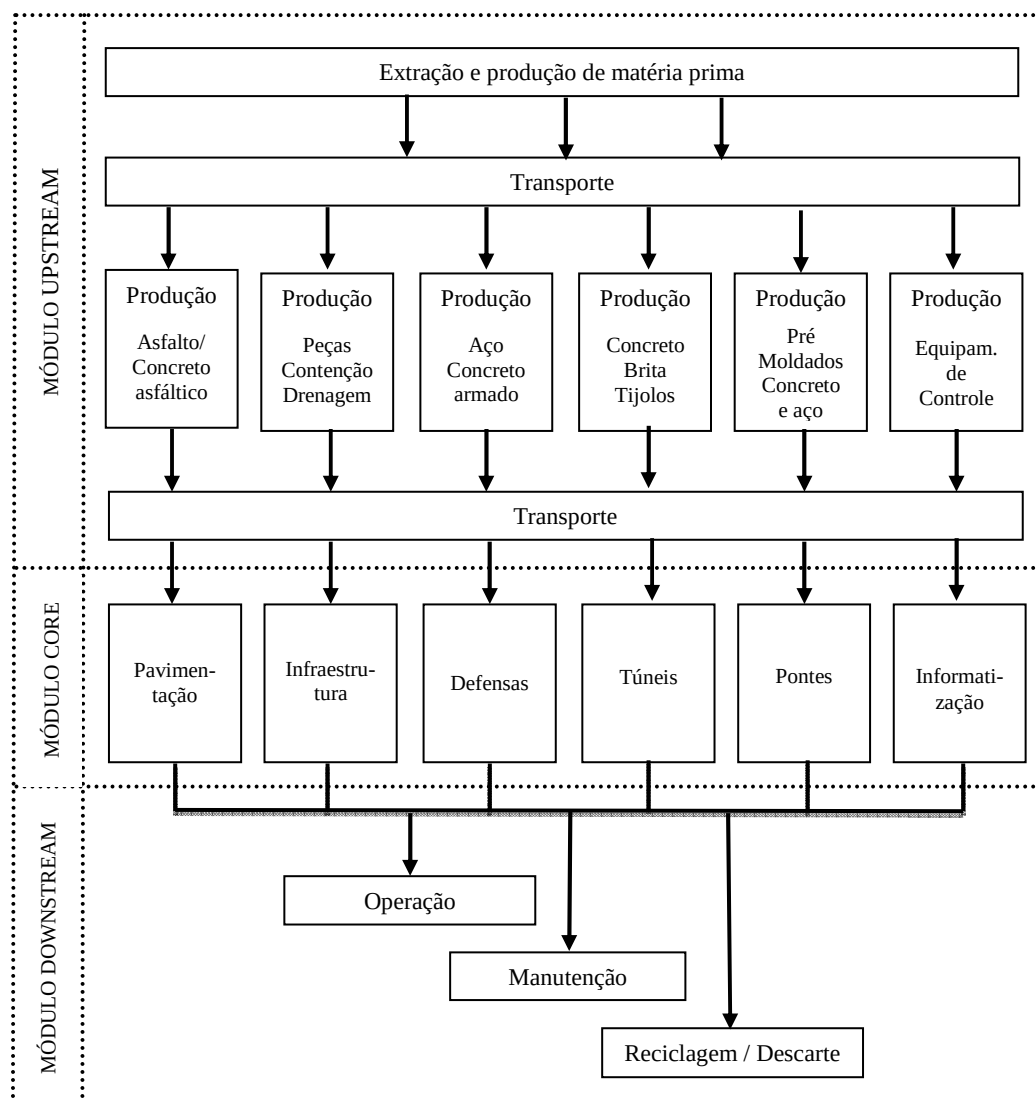


Figura 6: Declaração ambiental de produto – Infraestrutura Rodoviária.
Fonte: EPD (2013).

Já a figura 7 representa as fases do ciclo de vida do produto “ônibus de passageiros”.

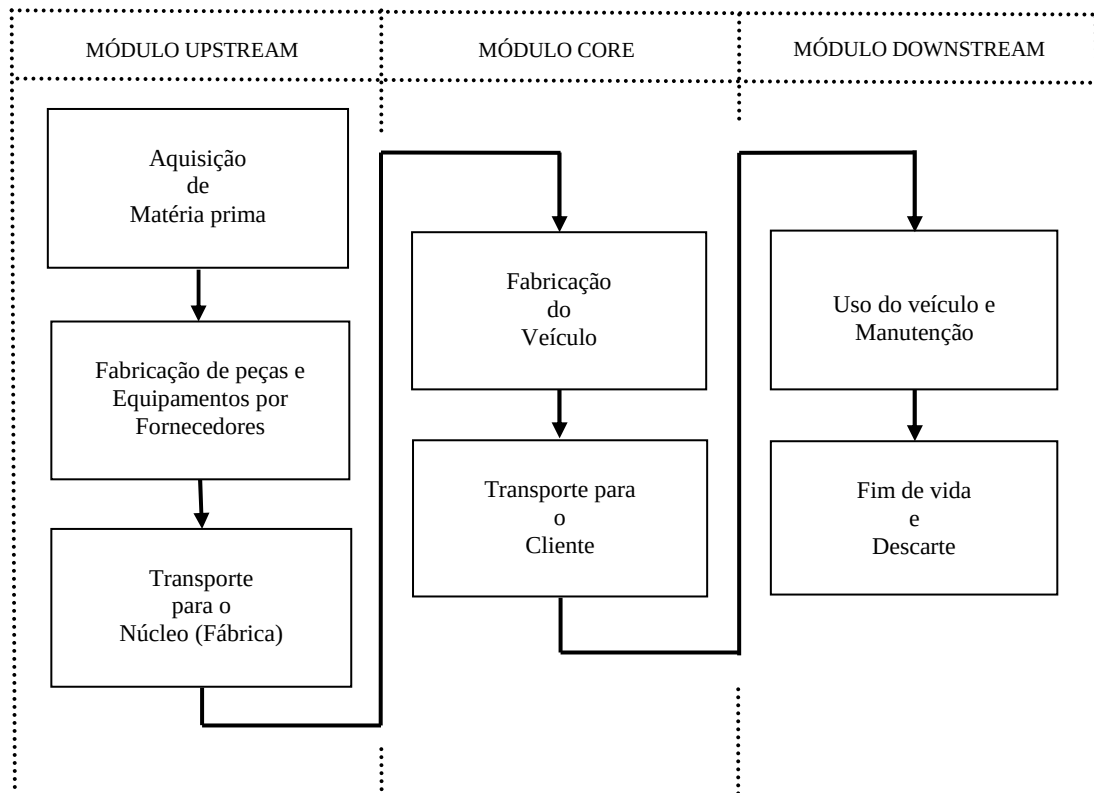


Figura 7: Declaração ambiental de produto – Ônibus.
Fonte: EPD (2016).

Por meio da metodologia de EPD, a montadora Volvo através de sua documentação de especificações do produto “ônibus articulado”, registra que cerca de 90% do impacto ambiental gerado ocorre durante a sua fase de uso, principalmente em decorrência do consumo de combustível e da descarga de dióxido de carbono e outras emissões (ANTP/VOLVO, 2016). O uso, representado pela operação, é predominante em termos de emissão de GEE, e o fim de vida é a menor parcela. A tabela 8 registra os dados computados à declaração do produto ônibus articulado e, para efeito comparativo, do produto trem, ambos com curva de impacto ambiental semelhantes.

Tabela 8: Declarações ambientais de veículos.

Fabricante	Veículo Modelo	Tempo vida	Total em kgCO ₂ e/pkm	Up stream	Core	Down stream (uso)	Down stream (fim de vida)
Volvo	BRT B340M	10 anos	0,037	2,235%	4,250%	92,220%	1,295%
Bombardier	Trem Innovia APM 300	30 anos	0,0005405	2,357%	1,593%	95,714%	0,336%

Fontes: BOMBARDIER (2014c) e VOLVO (2016).

Observa-se, portanto, que as emissões de uso representam a maior parte das emissões na vida do veículo, sendo pequenas as emissões associadas à sua construção e muito pequenas as emissões associadas ao seu descarte.

2.3 Experiências de ACV em sistemas rodoviários

Os estudos publicados para apoio a revisão necessária ao tema ACV de um sistema BRT abordam apenas itens relativos ao assunto, não sendo encontrado trabalho completo referencial do tema, ou que fosse objeto de mesmo interesse. Contudo, os trabalhos realizados nos Estados Unidos, Europa, Ásia e Brasil dão base à sustentação e avanço no conhecimento para análise de ciclo de vida nos sistemas de transportes.

2.3.1 Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte dos Estados Unidos

❖ HANSON *et al.* (2012) estudaram comparativamente quatro tipos de pavimentos de rodovias, sendo dois com uso de concreto e dois com uso de asfalto. Fixaram o tempo de vida em 30 anos, resultando então em dados de emissões ao longo de todo esse tempo. O pavimento de concreto produz para cara milha de estrada construída 703 a 894 tCO₂e e a pavimentação realizada com asfalto, apresenta valores entre 293 a 387 tCO₂, porém incorporadas às atividades de repavimentação ao final do 15º ano, necessidade dada em função da menor durabilidade desse tipo de pavimento. A conclusão em torno do resultado final do estudo é que a pavimentação asfáltica tradicional emite menos da metade de CO₂, porém com durabilidade de metade do tempo da pavimentação com concreto. Mesmo esse estudo tendo como foco apenas as emissões relacionadas à qualidade do pavimento, mostra aspectos relevantes na análise dos resultados, quando se observa, portanto, o custo x benefício de determinado

material / tecnologia em relação a sua alternativa, permitindo avaliar sob o aspecto do impacto ambiental a solução mais adequada.

❖ CHESTER (2008) estudou o ciclo de vida considerando o consumo de energia e as emissões de GEE e outros poluentes atmosféricos de automóveis, ônibus urbanos, metrô, ferrovias e aeronaves nos Estados Unidos. Esse estudo se baseou na elaboração de um inventário com a avaliação dos veículos, da infraestrutura e dos combustíveis utilizados, desconsiderando as emissões pelo fim de vida. Os resultados foram normalizados pelo tempo de vida dos veículos, por veículo-milha e passageiro-milha.

Na construção da infraestrutura da rodovia foram considerados diferentes tipos de configuração de estradas, com variadas dimensões e calculados valores de emissões relacionados à milha construída. A manutenção imposta nessas estradas foi atribuída exclusivamente aos veículos pesados (ônibus e caminhões), uma vez que o estudo assumiu que danos causados por automóveis são de menor relevância. Não foram contabilizadas também as emissões associadas às obras de arte (túneis e pontes), pela falta de dados disponíveis. O tempo de vida das estradas foi considerado como de 10 anos, após o qual é necessário uma repavimentação completa.

Para os sistemas ferroviários, somente foi analisada a construção de estações e da via férrea propriamente, sendo considerados dados referentes apenas a alguns materiais de maior emissão cuja quantidade foi estimada, como concreto, aço e madeira.

Dentre os veículos particulares, o estudo considerou alguns dos mais populares nos Estados Unidos, sendo o veículo sedan (mais leve e eficiente em seu consumo), o SUV – *Sport Utility Vehicle* (utilitário esportivo) e a Pick-up (a menos eficiente no consumo). Dentre as opções para o transporte rodoviário público foi escolhido o ônibus padrão, por ser o mais utilizado.

Ressaltando que a não inclusão de alguns elementos importantes resulta em dados subestimados, as emissões, por passageiro-milha, de diferentes meios de transporte, e o acréscimo na emissão operacional ao ser considerado o ciclo de vida foram determinadas com base no inventário elaborado. A tabela 9 registra os dados apurados.

Tabela 9: Acréscimo na emissão operacional de meios de transporte de passageiros dos Estados Unidos.

Sistema de transporte	Emissão Operacional dos veículos em gCO ₂ e/passageiro-milha	Emissão Total no ciclo de vida em gCO ₂ e/passageiro-milha	Acréscimo na emissão operacional dos veículos
MUNI (VLT)	69	170	146,38%
BART (metrô)	64	140	118,75%
CALTRAIN (ferrovia)	74	160	116,22%
GREEN LINE (VLT)	120	230	91,67%
SUV (utilitário esportivo)	270	450	66,67%
Sedan (automóvel)	232	380	65,22%
Pickup	420	620	47,62%
Ônibus (pico)	59	85	44,07%
Ônibus (fora do pico)	470	680	44,68%
CAHSR (trem de alta velocidade)	94	130	38,30%

Fonte: CHESTER (2008).

❖ CHESTER e HOVARTH (2009a) ampliaram o inventário de CHESTER (2008) para incluir outros sistemas, visando poder comparar com o ICV de outros sistemas de transporte. Os resultados desse novo estudo são mostrados resumidos na tabela 10.

Tabela 10: Emissões, em gCO₂e/passageiro-milha, no ciclo de vida do transporte rodoviário e metroviário nos Estados Unidos.

Sistema de transporte	Emissão Operacional dos veículos em gCO ₂ e/passageiro-milha	Emissão Total no ciclo de vida em gCO ₂ e/passageiro-Milha	Acréscimo na emissão operacional dos veículos
Automóvel Sedan Gasolina	232	380	63,79%
Ônibus urbano diesel	230	320	39,13%
Metrô Chicago	162	280	72,84%
Newark light rail	45	190	322,22%
Metrô Nova Iorque	76	150	97,37%
Ferrovia urbana Chicago	49	145	195,92%

Fonte: CHESTER e HOVARTH (2009a).

❖ CHESTER e HOVARTH (2009b) consideraram o ICV criado em seu trabalho anterior (CHESTER E HOVARTH, 2009a) para consolidar os dados e tecer conclusões. As conclusões mais importantes revelam que em relação à emissão operacional, há um acréscimo médio, quando se considera a emissão das fases não operacionais, de 63% no

transporte rodoviário e 155% no transporte metroviário, mostrando que as emissões de GEE nos sistemas metroviários são mais fortemente influenciadas pelos componentes não operacionais do que nos sistemas rodoviários.

❖ (CHESTER, 2010a) estudou a ferrovia de alta velocidade da Califórnia, pertencente ao corredor San Diego - Los Angeles - São Francisco - Sacramento. Este sistema foi comparado com alternativas considerando o uso de automóveis, aeronaves e ferrovia convencional. A principal conclusão registra que a taxa de ocupação do sistema é um fator decisivo quando estão sendo contabilizadas as emissões. De modo geral, o estudo aponta para uma taxa de ocupação em torno de 75% para que o tempo de retorno em emissões evitadas de GEE seja 6 anos. Registrou ainda que uma taxa de ocupação menos, em torno de 25%, altera drasticamente a taxa de retorno, implicando inclusive na possibilidade de nunca haver o benefício pelas emissões evitadas, mostrando a necessidade da preocupação com a demanda na fase de planejamento do sistema.

❖ CHESTER *et al.* (2010b) elaboraram estudo comparativo dos sistemas de transporte de passageiros (público e privado), com abordagem do ciclo de vida nas regiões metropolitanas de Nova Iorque, Chicago e São Francisco. Os resultados mostram os automóveis como maiores emissores nas três regiões, com participação de 88% a 96% do total. A região metropolitana de Nova Iorque apresentou a menor emissão por pkm transportado por ter um sistema de transporte de grande capilaridade, com grande rede de metrô e trem apresentando alta taxa de ocupação, além de contar com sistema hidroviário. A conclusão do estudo mostra que nas três regiões as emissões das fases não operacionais representam cerca de 50% das emissões operacionais.

❖ CHESTER *et al.* (2012) realizaram estudo de análise do ciclo de vida comparando o “Orange” (BRT) e “Gold Line” (VLT), ambos sistemas existentes na cidade de Los Angeles, comparando-os com automóvel sedan. Mantendo os modos de transporte, o estudo propôs criação de três sistemas hipotéticos, aos quais foram incorporadas melhorias tecnológicas sugerindo a diminuição das emissões ao longo de duas décadas para o futuro, sendo comparado, portanto, seis sistemas. Os combustíveis considerados no estudo foram a gasolina modificada da Califórnia para o Sedan, o gás natural para os ônibus da *Orange Line* e a eletricidade para o VLT da *Gold Line*. As conclusões registram que, considerando os seis sistemas, a emissão operacional é maior

que a não operacional. O estudo também concluiu que a emissão não operacional variou de 42% a 91% da emissão operacional. No resultado geral, o maior emissor foi o sedan, seguido do VLT da *Gold Line* e do ônibus da *Orange Line*. Na comparação com os veículos hipotéticos o maior emissor continuou sendo o sedan, porém o ônibus da BRT passou a ser o segundo e o VLT o terceiro, registrando ser essa ocorrência dada pela mudança da matriz energética, a qual previu a extinção de fontes térmicas à carvão, influenciando mais que os avanços tecnológicos no corredor BRT e no veículo sedan.

❖ CHANG e KENDALL (2011) realizaram estudo para análise do projeto de construção da infraestrutura de uma nova ferrovia entre São Francisco a Anaheim, no estado da Califórnia – Estados Unidos. Os elementos considerados para a construção da infraestrutura foram a preparação do solo, o assentamento dos trilhos, a construção dos túneis, das pontes e da rede elétrica, sendo desconsiderada a construção das estações e a manutenção do sistema. A contabilização do ICV resultou numa emissão de 2,4 milhões de tCO₂e, sendo a produção de material responsável por 80% das emissões, o transporte desse material por 16%, e a fabricação dos equipamentos de operação por apenas 4%. Os túneis e estruturas aéreas, embora representassem apenas 15% do comprimento da rota foram responsáveis por 60% das emissões. Em estimativa, o estudo conclui que a ferrovia evitaria anualmente a emissão de 1,15 milhões de tCO₂e pela transferência modal de usuários vindos de transportes mais poluentes, resultando em cerca de 2 anos para a recuperação dos efeitos da emissão de gases da fase não operacional. O estudo também registrou que uma queda de 75% da demanda esperada elevaria o tempo de recuperação para 20 anos, mostrando que o tempo de recuperação está diretamente ligado à taxa de ocupação do sistema.

2.3.2 Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte da Europa

❖ STRIPPLE (2001) realizou estudo para análise de uma rodovia na Suécia, considerando como método de construção o asfalto quente, o asfalto frio e o concreto. Estipulado o tempo de vida em 40 anos, os resultados mostram que as emissões de GEE são muito próximas quando considerados os dois tipos de asfalto, com ligeiro acréscimo para o asfalto quente e 35% maior quando observados os dados para o uso do concreto na pavimentação. As atividades de construção quando comparadas com a manutenção e

operação da rodovia, apresentam 80% das emissões. Considerando os 40 anos, a emissão total por km registra 2.000 tCO₂ para o asfalto e 2.700 tCO₂ para o concreto.

❖ SVENSON e EKLUND (2007) realizaram estudo tendo como foco uma ferrovia existente de 6,9 km da Suécia, inventariando os elementos utilizados na construção da infraestrutura em termos de quantidade de materiais e de energia. Considerando que não foram incluídas no estudo as obras de arte, os principais materiais encontrados, foram a brita (13.695 t, representando quase 94% da massa total) e o concreto (210 t, representando 4% da massa total). O estudo concluiu que a maior quantidade de energia (77% do total) é consumida na produção do aço utilizado, embora represente, em massa, apenas 2% do total. Conclui também que a colocação dos trilhos envolvendo o emprego do aço, concreto e brita é a atividade que demanda de mais energia e, por consequência responsável pela maior parcela de emissões. O estudo registra ainda que a parcela de energia associada à construção da estrutura elétrica e da sinalização é de baixa relevância, quando confrontados os dados da construção da via permanente.

❖ MILIUTENKO (2012) realizou pesquisa para o traçado de uma rodovia na Suécia com a abordagem de ciclo de vida nos túneis necessários à engenharia. Na primeira abordagem considerou túnel de 7,5 km escavado direto na rocha e sem o emprego de concreto. Na segunda abordagem, considerou túnel de 2,5 km escavado na terra e com emprego de concreto. Na terceira abordagem considerou túnel de 10 km escavado direto na rocha e com o emprego de concreto. Com abrangência de 100 anos, o estudo apenas considerou os elementos de engenharia, não sendo contabilizadas as emissões dos veículos e de fim de vida. As conclusões registram que os túneis com emprego de concreto tiveram uma emissão por metro de construção expressivamente maior do que o escavado na rocha sem concreto, revelando o impacto desse material quando medida a emissão de GEE. Registra que em média nas três abordagens para o método construtivo, o emprego dos materiais aparece liderando as emissões com 65% do total, seguido pelas atividades da construção no local (22%) e do transporte de materiais (3%). A parcela referente à eliminação de resíduos ficou registrada em 10%. Conclui também que as fases não operacionais responderam por 44% das emissões. Se comparado com as parcelas não operacionais mostradas em estudos anteriores esse valor se mostra baixo, porém, para esta rodovia o emprego de sistemas de ventilação nos túneis acarretou maior parcela das emissões operacionais.

❖ MILIUTENKO (2013) realizou também estudo para confrontar o método de construção de rodovias, considerando a pavimentação com asfalto reciclado de dois tipos (a quente e a frio) e outro método com a utilização do reuso do asfalto. A conclusão do estudo registrou que o uso do asfalto reciclado resulta em ganhos na emissão de CO₂, em torno de 20 kgCO₂e/t, tendo o asfalto quente apresentado resultado mais vantajoso, porém o reuso do asfalto não registra nenhum ganho, aumentando a emissão em cerca de 4 kgCO₂e/t.

2.3.3 Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte da Ásia

❖ CUI *et al.* (2010) realizaram estudo através de modelagem visando determinar as emissões de GEE em sistemas de BRT. Tal estudo foi aplicado no sistema BRT em operação na cidade de Xiamen, na China e tempo de vida estipulado foi de 50 anos. A tabela 11 apresenta os dados apurados na ACV, com dados referentes à infraestrutura, ao combustível e aos veículos. A reciclagem foi considerada como crédito ao sistema.

Tabela 11: Emissões de CO₂ do BRT de Xiamen, China.

Atividade	Emissões por ano (em tCO ₂ e)	% em relação ao total
Extração de materiais	21.001,42	37,55%
Transporte	149,89	0,27%
Manufatura	2.516,09	4,50%
Uso e manutenção	34.861,36	62,33%
Demolição	877,52	1,57%
Reciclagem e aterro	-3.476,21	-6,22%

Fonte: CUI *et al.* (2010).

❖ MORITA *et al.* (2011) realizaram estudo comparativo entre um sistema BRT e uma ferrovia. A comparação foi realizada entre uma ferrovia de 35 km em Tóquio e um sistema imaginário de BRT, o qual se atribui o mesmo trajeto e a mesma capacidade de transporte, de 270 mil passageiros/dia. O estudo estabeleceu que as fases não operacionais apresentariam a mesma emissão, dada a similaridade dos processos construtivos. Dessa forma, a fase operacional seria responsável pela determinação das emissões do sistema. A conclusão do estudo mostra que ao final de 50 anos a emissão da ferrovia seria cerca de seis vezes menor que a do BRT, resultado determinado pela utilização da eletricidade para operação da ferrovia, a qual é baseada em energia nuclear

naquele país, apresentando, portanto, menores emissões quando comparados ao combustível de origem fóssil utilizado pelo sistema BRT criado.

❖ TERI (2012) realizou estudo associado a órgão governamental da Índia o qual propôs avaliação do ciclo de vida de sistemas de transporte na cidade de Délhi. Fizeram parte do estudo um sistema de BRT, uma ferrovia de longa distância, uma rodovia, o metrô e uma estrada convencional da cidade. Sem considerar as emissões pelo fim de vida, o estudo estipulou uma existência de 30 anos dos sistemas, resultando em dados de emissão de CO₂ por km de construção, por veículo e por pkm, todos considerando lotação máxima. A tabela 12 mostra os resultados de emissão de CO₂ por pkm, para o BRT e o metrô.

Tabela 12: Emissões, em gCO₂/pkm, do BRT e metrô de Délhi.

Atividade	BRT	Metrô
Construção	1,6	4,9
Manutenção	0,7	0,6
Manufatura dos veículos	2,4	1,0
Manutenção dos veículos	0,4	0,6
Operação dos veículos	36,9	19,4
Operação das estações	0	30,7
TOTAIS	42	57,2

NOTA: Sem lançamento de valores para emissões relativas à operação das estações para o BRT.
Fonte: TERI (2012).

2.3.4 Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte no Brasil

❖ ANDRADE (2016) realizou pesquisa de ciclo de vida para investigar as emissões e o emprego de energias num sistema metroviário. Tendo como caso de estudo a Linha 4 do metrô, posta em operação no ano de 2016 na cidade do Rio de Janeiro, o trabalho utilizou dados reais da construção da infraestrutura, resultando num ICV abrangente que considerou todos os elementos responsáveis pelas emissões produzidas nas diversas fases do ciclo de vida, excetuando-se as emissões relacionadas ao fim de vida do sistema, bem como estudos relacionados ao ciclo de vida dos combustíveis. Foram consideradas no escopo as fases de construção da infraestrutura, fabricação dos

veículos, operação dos veículos, operação da infraestrutura, manutenção dos veículos e manutenção da infraestrutura, sendo adotado um ciclo de vida de 60 anos. Os resultados mostraram que a fase de construção da infraestrutura com 49,84% e de operação dos trens com 36,68% lideraram a emissão de CO₂. As demais fases, fabricação dos trens, manutenção e operação da infraestrutura têm relevância acentuadamente menor.

O trabalho ainda propôs modelo para determinação das emissões evitadas pelo sistema, o que possibilitou concluir sobre o gCO₂/pkm calculado em 13,90, bem como conhecer que o tempo de recuperação das emissões produzidas é registrado, ao longo de um período de 60 anos, no 14º ano de sua operação.

A pesquisa recomendou que novos estudos ciclo de vida de projetos de BRT, VLT e outros modos devam ser abordados para desenvolvimento do tema e, portanto, trazer a possibilidade de comparações futuras sobre a eficiência ambiental de outros modos de transporte.

2.3.4.1 Estudo sobre emissão evitada em corredor BRT no Brasil

Mesmo não havendo estudos sobre ciclo de vida em sistemas BRT no Brasil, um importante trabalho abordou as emissões evitadas no corredor BRT Transoeste implantado na cidade do Rio de Janeiro. OLIVEIRA et al. (2012) realizaram uma estimativa de emissões evitadas seguindo um modelo que utiliza o fator *mode shift*, permitindo apurar o benefício ambiental promovido por sua implantação num horizonte de 20 anos, configurando-se, portanto, em valiosa pesquisa indicadora da mudança do perfil das emissões, o que impacta diretamente no ciclo de vida desses sistemas.

O Transoeste é um dos corredores da rede BRT na cidade do Rio de Janeiro, a qual é formada ainda pelos corredores, Transcarioca, Transolímpica e Transbrasil, esse último ainda em construção. Sendo o primeiro a ficar pronto e entrar em operação no ano de 2012, este corredor com 56 km de extensão liga regiões distantes dentro da Zona Oeste, sendo suas estações limites Santa Cruz e Campo Grande de um lado e Alvorada na Barra da Tijuca de outro lado. A figura 8 mostra seu traçado.

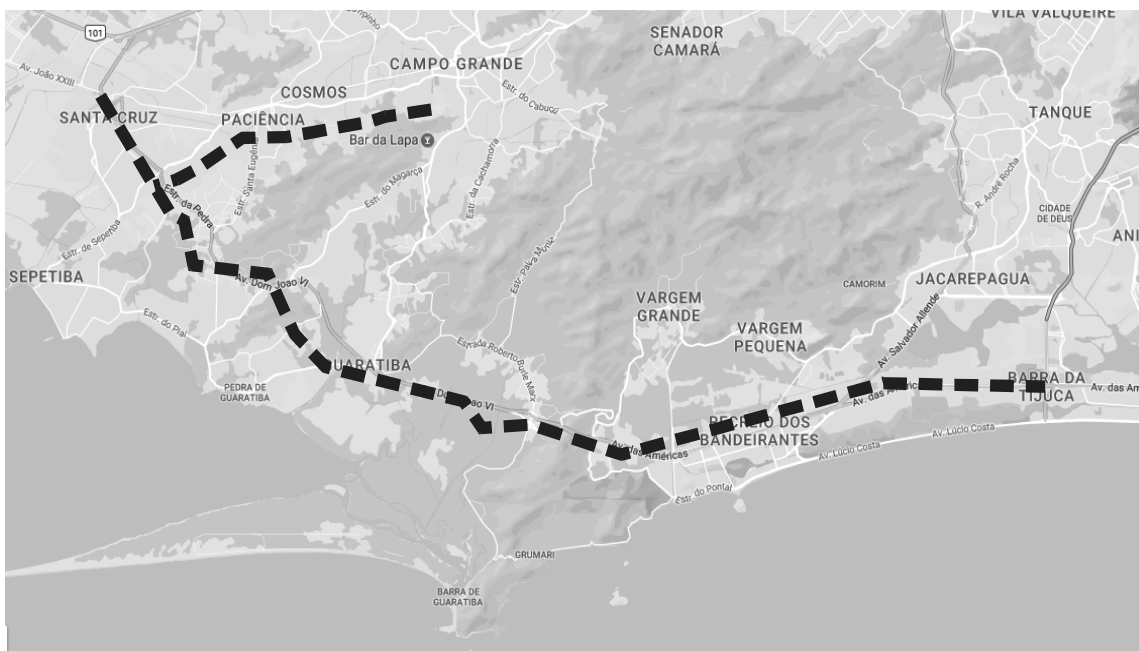


Figura 8: Traçado do corredor Transoeste.

Tabela 13: Modos de transporte e transferência modal no BRT Transoeste.

Modo de Transporte	Transferência Modal para o BRT ¹			Ocupação ² (pass./veíc.)	Distância Média por Viagem (km) ³	Velocidade Média (km/h) ⁴		
	2012	2021	2031	2012 - 2031	2012 – 2031	2012	2021	2031
Carro	2,0%	4,0%	8,0%	1,3	9,9	20	18	16
Motocicleta	1,0%	2,0%	4,0%	1,1	6,7	30	28	26
Táxi	0,4%	0,8%	1,6%	2,3	9,9	20	18	16
Ônibus	85,3%	82,2%	75,9%	50	17,1	16	14	12
Van Passageiro	6,8%	6,5%	6,0%	12	9,9	16	14	12
BRT	-	-	-	140	17,1	45	45	45

¹ Transferência Modal para o BRT Transoeste: pesquisa em campo realizada pelo ITDP. 4,5% dos entrevistados declararam não realizar a viagem anteriormente ao BRT. Transferência modal para veículos particulares estimada em dobrar a cada 10 anos.

² Ocupação por Modo: valores médios do Rio de Janeiro para veículos particulares. Para modos públicos, ocupação média de 80% a partir da capacidade máxima.

³ Distância Média por Viagem: valores-base do modelo TEEMP.

⁴ Velocidade Média: da cidade do Rio de Janeiro, segundo entrevista (Jornal O GLOBO, 2011) do então Secretário de Estado de Transportes, Júlio Lopes, para modos privados (estimativa para motocicleta), e segundo dados da Secretaria Municipal de Transportes (ITDP, 2013a), para ônibus e BRT; com projeção de queda de 2 km/h a cada dez anos para modos sem via exclusiva.

Fonte: OLIVEIRA et al. (2012).

Na tabela 13 estão reunidas as características para cada um dos modos de transporte presentes no corredor e a transferência modal para o BRT observada em pesquisa de campo realizada pelo ITDP (2013), após 9 meses de operação do corredor. A pesquisa aplicou formulário a mais de 400 passageiros do BRT Transoeste para determinar qual modo de transporte utilizavam antes da operação do corredor.

A tabela 14 reúne, para cada um dos modos de transporte do corredor, o tipo de fonte de energia e o consumo em termos de combustível utilizado.

Tabela 14: Combustíveis utilizados nos modos de transporte do corredor.

Modo de Transporte	Fonte de Energia ¹				Desempenho Energético Médio ²			
	Gasolina	Diesel	Etanol	GNV	Gasolina (km/l)	Diesel (km/l)	Etanol (km/l)	GNV (km/m ³)
Carro	83%	-	17%	-	11,3	-	8,5	15,6
Motocicleta	96%	-	4%	-	37,2	-	29,3	-
Táxi	62%	-	13%	25%	11,3	-	8,5	15,6
Ônibus	-	100%	-	-	-	2,7	-	-
Van Passageiro	-	100%	-	-	-	8,0	-	-
BRT	-	100%	-	-	-	1,7	-	-

¹ Fonte de Energia: dados para carros, motos e ônibus do MMA (2013, p. 26 e 46). Maior percentual de uso de GNV para táxis; van passageiro suposto igual ao ônibus.
² Desempenho médio a 50 km/h: dados para carros e motos do MMA (2013, p. 42 e 51); para vans estimado baseado em dados do mercado; para ônibus e BRT, em estudo da COPPE (2012).

Fonte: OLIVEIRA et al. (2012).

A Tabela 15 mostra os resultados de passageiros transportados por dia, o valor de passageiro-km diário, o valor de veículo-km e as emissões de CO₂ atribuídas aos modos de transporte. Estes dados permitem confrontar dois cenários distintos, com ou sem a existência do modo BRT, conferindo assim estimativa das emissões evitadas.

Tabela 15: Emissões evitadas no BRT Transoeste.

Modo de Transporte	Passageiros transportados (por dia)	Pass.-km (por dia)	Veíc.-km (por dia)	Emissões CO ₂ (t/ano)	Emissões CO ₂ (g/pass-km)	Emissões CO ₂ relativas ao BRT
Carro	11.820	117.022	90.017	6.338	148,4	13,6
Motocicleta	5.910	39.598	35.999	777	53,8	4,9
Táxi	2.364	23.404	10.176	692	81,1	7,4
Ônibus	186.903	3.196.047	63.921	22.493	19,3	1,8
Van Passageiro	14.900	147.507	12.292	1.460	27,1	2,5
Total (Cenário A)	221.898	3.523.579	212.405	31.760	24,7	2,3
BRT (Cenário B)	232.354	3.794.451	27.103	15.147	10,9	1,0
Variação absoluta (B - A)	10.456	270.872	-185.301	-16.613	-14	-
Variação relativa	5%	8%	-87%	-52%	-56%	-

Fonte: OLIVEIRA et al. (2012).

2.3.5 Análise dos estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte pesquisados

Algumas conclusões resultam da análise das pesquisas encontradas sobre a avaliação do ciclo de vida nos sistemas de transporte. Parte considerável dos trabalhos nos Estados Unidos em torno do tema foram propostos por Chester e são baseados em dados resultantes de programas de ACV, com a utilização de mapeamento pelo *Google Earth* e estimativas. O método utilizado faz uso em grande parte da composição dos dados com base na análise econômica de entrada/saída e excluem partes significativas das fases não operacionais, não computando, por exemplo, a construção de túneis e pontes. Os trabalhos analisados, apesar de abrangerem boa variedade de modos e de sistemas, não consideram o fim de vida.

Os trabalhos da Europa são, em sua maioria, para projetos de novos sistemas, conduzidos em conformidade com a ISO 14040 e com dados fornecidos pelos fabricantes, indicando que o objetivo do estudo seja motivado pela tomada de decisão para a construção de infraestruturas. De um modo geral, os estudos são específicos e abordam apenas alguns componentes da infraestrutura, não sendo identificado estudo abrangente que envolva ACV de um sistema como um todo.

Os trabalhos realizados na Ásia contemplam projetos de sistemas BRT em comparação com sistemas metroviários. Destaque para as pesquisas de Morita e Teri, onde podem ser encontrados valores das emissões para estes dois modos em cálculos que consideram simulações nas cidades de Tóquio e Délhi, os quais mostraram bom cenário resultante da aplicação do método de análise do ciclo de vida para conhecimento dos impactos ocasionados por emissões de CO₂.

De um modo geral as emissões das fases de construção e outras fases não operacionais de sistemas de transporte como BRT e metrô contribuem significativamente para as emissões totais do ciclo de vida. Para os sistemas metroviários, a matriz energética para geração da eletricidade é um fator de grande importância no valor total da emissão no ciclo de vida, quando observados os dados operacionais. Já nos sistemas BRT, a variação nesta fase pode se dar em função do tipo de motor e o tipo de combustível utilizado, sendo ainda elemento de variação a própria composição do combustível

utilizado para a operação dos veículos. Em ambos os sistemas observa-se que a taxa de ocupação dos veículos constitui-se em importante índice que fará a taxa de retorno ambiental ser maior ou menor, considerando o tempo total dentro do ciclo de vida, o que se relaciona com o resultado de pkm.

Quando consideradas, as emissões de fim de vida são geralmente pouco significativas em relação ao total, podendo até ser negativas, quando considerado o crédito referente à reciclagem.

Em relação às emissões não operacionais geralmente a construção da infraestrutura se mostra mais representativa, com a construção de túneis e pontes tendo a maior parcela das emissões, devido ao uso extensivo do aço e do concreto. A manutenção representa, em geral, uma pequena parte das emissões totais.

Nos sistemas BRT a emissão não operacional dos ônibus (fabricação, manutenção e fim de vida destes veículos) é geralmente muito pequena, quando comparada à emissão operacional e total do sistema.

A utilização de ferramenta computacional de modelagem para a estimar emissões evitadas num corredor BRT no Brasil, revela resultados que apontam um expressivo ganho ambiental. Sem considerar as emissões produzidas pela construção do corredor, a economia de CO₂ ao longo do tempo foi verificada, o que poderá ser comprovado em estudo amplo em torno do ciclo de vida desses sistemas.

3 METODOLOGIA

Serão três métodos de trabalho apresentados em distintos segmentos neste trabalho.

- a) Metodologia empregada para inventariar o ciclo de vida: será baseada na elaboração de um procedimento de ICV para um sistema BRT existente ou em fase de implantação, orientado a investigar os impactos ambientais sob o aspecto do aquecimento global pela emissão de CO₂. A elaboração do inventário terá abrangência total nos aspectos relacionados às atividades de construção da infraestrutura, da fabricação dos veículos, da operação dos veículos e da infraestrutura, bem como de manutenção dos veículos e da infraestrutura. Porém, o estudo voltado à análise do ciclo de vida não irá considerar os aspectos relacionados à obtenção de insumos na cadeia dos combustíveis, aos aspectos inerentes às atividades de fim de vida, como também não irá avançar para as implicações advindas do aumento de CO₂ na atmosfera. A pesquisa terá foco na quantificação das emissões produzidas com o foco de possibilitar confrontar com as emissões evitadas pelo sistema. O procedimento poderá também ser aplicado em ampliações de sistemas, os quais possam ser considerados como novos corredores deste modo de transporte, sendo possível também servir de guia para adaptação em outros modos de transportes.
- b) Metodologia empregada para determinação das emissões evitadas: será orientado estudo tanto para conhecimento da redução de quilômetros associada à migração de usuários de carros para o BRT, como também para o conhecimento da redução de quilometragem resultante da reorganização de linhas de ônibus regulares, as quais passam por alterações significativas após a implantação de um corredor BRT.
- c) Metodologia empregada para elaboração de ferramenta que possibilite a tomada de decisão para implantação de sistemas de transporte. Tal ferramenta possibilitará o gestor público melhor conhecer os aspectos relacionados ao ciclo de vida dos modos de transporte em fase de planejamento e projeto, orientando a tomada de decisão sob o aspecto dos impactos ambientais advindos da emissão de CO₂.

3.1 Procedimento de ICV para um sistema BRT

O objetivo é mensurar o impacto ambiental através da categoria “potencial de aquecimento global” (GWP) nas diversas fases do ciclo de vida de um sistema BRT. O escopo inclui a construção da infraestrutura e dos ônibus, a manutenção e a operação do sistema. Não foi considerado o fim de vida da infraestrutura e dos veículos, seguindo a mesma regra utilizada em todos os trabalhos, em relação à infraestrutura, e na maioria dos trabalhos pesquisados, em relação aos veículos (CHESTER *et al.* (2012), CHESTER *et al.* (2013), CHANG e KENDALL (2011), STRIPPLE (2001), CUI *et al.* (2010), MORITA *et al.* (2011) e TERI (2012). A relevância dessa fase no ciclo de vida de um sistema de transporte rodoviário pode ser considerada desprezível. Se observados os dados de fim de vida apenas dos veículos, pode ser observada parcela de 1,3% relacionada ao fim de vida, como mostrou a tabela 8.

Com relação ao tempo de estudo, deve ser observado o tempo estabelecido para o ciclo de vida. Apoiado na duração do item de maior tempo, a construção da infraestrutura, o ICV deve estipular um ou mais ciclos tendo em vista o tempo de vida do item e sua reconstrução.

Devem ser utilizados fatores de emissão relacionados com aspectos geográficos e respeitando a temporalidade. Também devem ser respeitados aspectos tecnológicos, ou seja, atribuir a utilização de elementos que estejam disponíveis no mercado, seja para a construção da infraestrutura e veículos, como combustíveis e insumos para a manutenção dos veículos.

Devem ser observadas todas as questões relacionadas aos processos de construção e produtivos. Para a infraestrutura deve ser levantado o máximo de elementos possível para a construção civil, como materiais brutos, bem como o gasto de energia associado ao uso de máquinas e processos de usinagem de materiais aplicados. Já para a fabricação dos veículos deve ser levantado o máximo de elementos associados ao consumo de materiais, como também relacionados ao processo produtivo, considerando o gasto de energia elétrica e de combustíveis associados. Para tal, todas as distâncias de fornecedores e de transporte necessário para a realização das obras farão parte do cálculo das emissões associadas ao transporte de materiais, peças e pessoas.

No segmento de operação e manutenção, devem ser levantadas as necessidades atribuídas ao perfeito funcionamento do sistema, seja para a infraestrutura, seja para a movimentação dos veículos.

Deve ser estabelecida unidade funcional para quantificação das emissões produzidas e evitadas. Usualmente a unidade empregada em estudos onde o objeto é o transporte de passageiros é *passageiro x quilômetro* (pkm).

Todos os dados processados para a elaboração do ICV tiveram origem nas empresas ou órgãos diretamente relacionados ao segmento pesquisado, como fornecedores, construtores, fabricantes dos veículos e planejadores e operadores do corredor.

A figura 9 apresenta uma visão global do procedimento, delimitando as fronteiras do escopo, ou seja, o que será considerado pelo estudo.

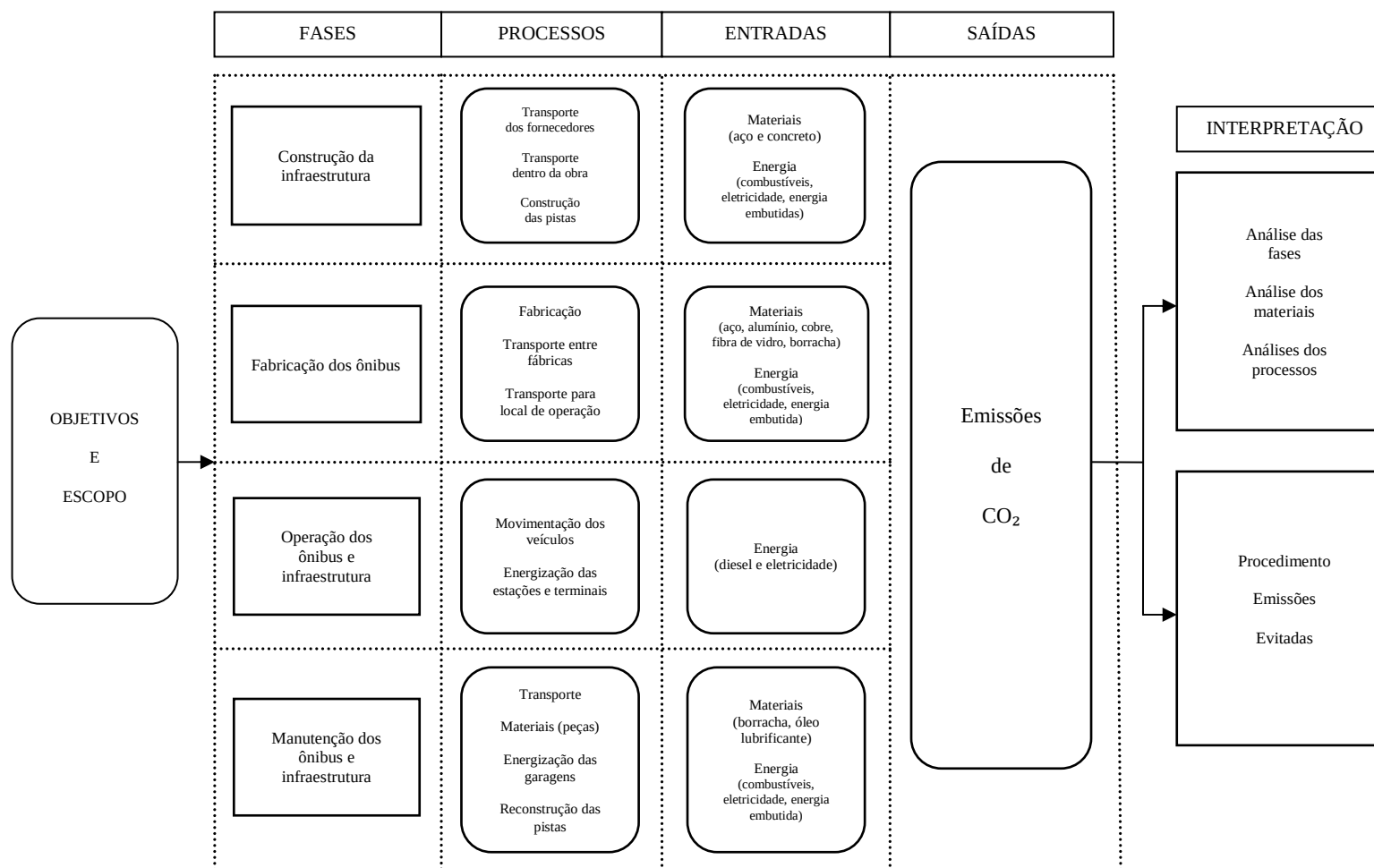


Figura 9: Procedimento do ICV de um sistema BRT.

3.1.1 Construção da infraestrutura

A construção da infraestrutura inclui etapas como a construção do leito de rolamento das vias, dos elevados e túneis (se houver), bem como das estações. No inventário elaborado para a presente pesquisa não foram consideradas as emissões produzidas no ciclo de vida dos combustíveis. As atividades incluídas no procedimento proposto são:

- a) Transporte fornecedor – obra: refere-se à emissão produzida e à energia consumida por todos os meios de transporte utilizados para a entrega dos materiais adquiridos para a construção do corredor. Essa entrega geralmente é feita para locais designados nas áreas de atividade da obra, seja nos canteiros base, seja diretamente no campo. São necessários dados de distância dos fornecedores até o ponto de entrega, dos veículos utilizados e das quantidades de viagens. Conhecida a distância percorrida e o rendimento médio do veículo, pode ser estabelecido o consumo em litros de combustível. A emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (1), conforme quadro 2.

Quadro 2: Expressão para determinar emissões do transporte do fornecedor.

$E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{rv} \right) \times f \quad (1)$	
sendo:	
E - emissão em kgCO ₂ (ou energia em MJ)	
d_i - distância em km do fornecedor até o ponto de entrega	
rv - rendimento do veículo em km/l	
f - fator de emissão do combustível em kgCO ₂ /l (ou densidade de energia em MJ/l)	

- b) Transporte dentro da obra: refere-se à emissão produzida e à energia consumida por todos os meios de transporte utilizados dentro da obra, como transporte de materiais do canteiro até outros locais, transporte de peças e equipamentos, transporte de materiais das escavações e transporte de pessoas. São necessárias as quantidades dos combustíveis empregados e os tipos destes combustíveis, comumente diesel e gasolina. Usualmente os registros desses dados se dão na forma de quilômetros percorridos ou por horas de utilização. Conhecidas essas

quantidades e o rendimento dos veículos, a emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (2) conforme quadro 3.

Quadro 3: Expressão para determinar as emissões pelo uso de combustível.

$E = \sum_{i=1}^m \left(\frac{d_i}{rv} \right) \times f1 + \sum_{i=1}^p (hv_i \times cs) \times f2 \quad (2)$	
sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou energia em MJ) d_i - distância percorrida pelos veículos em km rv - rendimento do veículo em km/l $f1$ - fator de emissão do combustível 1 em kgCO₂/l (ou densidade de energia em MJ/l) hv_i - quantidade de horas utilizadas no transporte pelos veículos cs - consumo do veículo em l/h $f2$ - fator de emissão do combustível 2 em kgCO₂/l (ou densidade de energia em MJ/l)	

- c) Consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos e máquinas pesadas: refere-se à emissão produzida e à energia associada ao consumo de combustível fóssil de todos os equipamentos e máquinas pesadas utilizados na obra, como guindastes, escavadeiras, geradores, marteleiros, compressores, etc. São necessários dados da quantidade de horas de utilização de cada equipamento, normalmente movidos a diesel. Conhecida a quantidade de combustível empregado, a emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (3), conforme quadro 4.

Quadro 4: Expressão para determinar as emissões pelo uso de combustíveis.

$E = \sum_{i=1}^t (hm_i \times cs) \times f \quad (3)$	
sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou energia em MJ) hm_i - quantidade de horas trabalhadas pelos equipamentos e máquinas pesadas cs - consumo do equipamento em l/h f - fator de emissão do combustível em kgCO₂/l (ou densidade de energia em MJ/l)	

- d) Consumo de energia elétrica nos canteiros de obras: refere-se à emissão produzida pelo consumo de energia elétrica de todos os equipamentos utilizados no funcionamento do canteiro de obras, como a usinagem do concreto, postos de abastecimento, escritórios, iluminação das áreas de construção, etc. São necessários dados de consumo de energia elétrica destas instalações. Conhecidas essas quantidades, a emissão pode ser calculada pela expressão (4), conforme quadro 5.

Quadro 5: Expressão para determinar as emissões pelo uso da energia elétrica.

$E = Ee \times f$ (4)	
sendo:	
E - a emissão em kg CO ₂ (ou tCO ₂)	
Ee - energia elétrica total consumida em kWh (ou MWh)	
f - fator de emissão da energia elétrica em kgCO ₂ /kWh (ou tCO ₂ /MWh)	

- e) Carbono embutido em materiais: dada a grande quantidade de fornecedores e da grande quantidade de processos produtivos envolvidos na fabricação dos mesmos, é normalmente inviabilizada a contabilização de itens que compõem esses materiais individualmente, seja pela complexa e extensa rotina de trabalho, seja pela impossibilidade de obtenção de todos os dados necessários. Dessa forma adota-se como regra o cálculo do carbono embutido, o qual refere-se às emissões dadas em função da energia utilizada no processo produtivo dos materiais mais representativos elencados no ICV. Os materiais mais usados na construção da infraestrutura, bem como na fabricação dos veículos devem ser considerados. De forma geral, o aço e o concreto comumente aparecem como mais usados quando se trata em sistemas construtivos realizados pela engenharia tradicional. Já o aço, alumínio, fibra de vidro, cobre e borracha aparecem como mais utilizados na fabricação dos ônibus. As atividades de manutenção e operação do sistema devem aparecer no inventário, sendo computadas as peças de reposição ou processos de recomposição de qualquer natureza. São necessários os dados de consumo desses materiais. Conhecida as quantidades, o carbono pode ser calculado pela expressão (5) conforme quadro 6.

Quadro 6: Expressão para determinar as emissões do carbono embutido.

$E = \left(\sum_{i=1}^y m_i \right) \times f \quad (5)$	
sendo:	
E - a emissão em kgCO ₂ (ou energia em MJ)	
m_i - massa do material em kg	
f - fator de emissão do material em kgCO ₂ /kg (ou densidade de energia em MJ/kg)	

Os dados necessários descritos nesse procedimento devem ser coletados, quando possível, diretamente em fonte ligada à construção, quando a implantação do sistema estiver em curso ou quando sua finalização ainda for recente. Quando inviabilizada a coleta de dados reais, os dados devem ser estimados com o cuidado de adoção de índices e quantidades que aproximem ao máximo os resultados da realidade, considerando os fatores temporais associados. Sistemas em fase de projeto dificilmente permitirão que os dados sejam levantados com o nível de detalhe mostrado no procedimento. Sistemas muito antigos dificultarão a coleta dos dados, pois as informações podem já não estar mais disponíveis.

3.1.2 Fabricação dos ônibus

A construção dos ônibus inclui a sua fabricação e o seu transporte até a garagem onde será parqueado. As atividades do procedimento são:

- a) Consumo de combustível fóssil na fabricação: refere-se à emissão produzida pelo consumo de todo combustível fóssil utilizado pelos equipamentos nos processos produtivos dos veículos. Devem ser coletados dados de quantidade utilizada de cada tipo de combustível ou das horas de utilização dos equipamentos utilizados. Conhecida essas quantidades, a emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (3), conforme quadro 4.
- b) Consumo de energia elétrica na fabricação: refere-se à emissão associada à energia empregada na produção de eletricidade que foi consumida pelos equipamentos utilizados na fabricação, como máquinas industriais, sistema de iluminação, etc. Devem ser coletados os dados de consumo de energia elétrica.

Conhecida essas quantidades, a emissão pode ser calculada pela expressão (4), conforme quadro 5.

- c) Carbono embutido em materiais: refere-se à energia utilizada no processo produtivo dos materiais mais representativos empregados na fabricação dos veículos, como metais, polímeros, elastômeros etc. Devem ser coletados os dados de consumo desses materiais empregados. Conhecidas as quantidades, o carbono pode ser calculado pela expressão (5), conforme quadro 6.
- d) Transporte entre fábricas: refere-se à emissão produzida pelo consumo de combustível necessário aos deslocamentos entre fábricas. Comumente, a fabricação dos veículos se dá em dois blocos distintos: chassis e carroceria. Quando estas partes forem produzidas em fábricas distintas devem ser consideradas as viagens para a união dessas partes, seja através de caminhões de transporte, seja pelo deslocamento do próprio veículo já em condições de circulação. Deve ser levantada a quilometragem percorrida nesse trajeto, bem como o tipo de combustível utilizado. Conhecendo-se o rendimento médio do veículo, pode ser estabelecido o consumo em litros de combustível. A emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (1), conforme quadro 2.
- e) Transporte fábrica – garagem: refere-se à emissão produzida pelo consumo de combustível necessário aos deslocamentos dos veículos prontos no local de sua finalização (fábrica do “casamento” chassis + carroceria) até a garagem ou local de base onde entrará em operação no sistema. Deve ser levantada a quilometragem percorrida nesse trajeto, bem como o tipo de combustível utilizado. Conhecendo-se o rendimento médio do veículo, pode ser estabelecido o consumo em litros de combustível. A emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (1), conforme quadro 2.

3.1.3 Operação dos ônibus

A operação dos veículos é a atividade fim de um sistema BRT, sendo considerada a fase do ciclo de vida responsável pelo transporte dos passageiros. As atividades do procedimento para avaliação do consumo de combustível podem ser divididas em:

- a) Consumo de combustível direto: refere-se à emissão produzida pelo consumo de combustíveis fósseis pela força de tração que movimenta os ônibus em operação, incluindo a utilização de itens de conforto, como a refrigeração destes veículos.
- b) Consumo de combustível indireto: refere-se à emissão produzida pelo consumo de combustíveis fósseis de caminhões – tanque para o abastecimento da estocagem existente nas garagens.

Esses dados de consumo podem ser coletados para sistemas já implantados e em funcionamento, ou estimados através de sistemas existentes assemelhados. Considerando os dois perfis de consumo listados anteriormente, devem ser levantados os dados dos combustíveis consumidos e o perfil de desempenho dada diferença de consumo que pode existir entre veículos, qual seja, caminhões – tanque e ônibus articulados. Ambas emissões podem ser determinadas pela expressão (1), conforme quadro 2.

3.1.4 Operação da infraestrutura

A operação da infraestrutura inclui itens como a iluminação das estações e terminais e o funcionamento dos demais equipamentos destas instalações, incluindo atividades relacionadas à operação e segurança. A atividade principal desse procedimento é o de quantificar o consumo de energia elétrica necessário para estas instalações. Esse consumo pode variar pelo horário de funcionamento de cada estação / terminal, bem como pelo acréscimo de energia consumida dada a utilização de equipamentos de ar condicionado e calefação.

Esses dados de consumo podem ser coletados para sistemas já implantados, ou estimados para sistemas em fase de implantação. Conhecidas essas quantidades, a emissão pode ser calculada pela expressão (4), conforme quadro 5.

3.1.5 Manutenção dos ônibus

A manutenção dos veículos inclui estimativa de itens como substituição de peças e fluidos lubrificantes, seguindo cartilha de rotina de manutenções programadas ao longo do tempo de vida dos veículos. Essas atividades podem ser divididas em três grupos distintos:

- a) Transporte: refere-se à emissão produzida pelos deslocamentos necessários para a entrega ou busca de itens que compõem a manutenção programada dos veículos, como óleo lubrificante e pneus. Deve ser levantada a quilometragem média dos ônibus em operação, visando conhecer o tempo e a periodicidade das manutenções. Devem ser levantados também os deslocamentos realizados pelo transporte na entrega ou busca desses componentes. Para tanto, devem ser conhecidos os dados do programa de manutenção dos veículos ou os dados estatísticos registrados pelos operadores dos sistemas, sempre que possível, visando identificar o número de viagens necessárias e a quilometragem percorrida. Conhecendo-se o rendimento médio do veículo envolvido nesse transporte, pode ser estabelecido o consumo em litros de combustível. A emissão, portanto, pode ser calculada pela expressão (1), conforme quadro 2.
- b) Consumo de energia elétrica: refere-se à emissão produzida pelo consumo de energia elétrica nas garagens onde as manutenções são realizadas. Devem ser coletados, sempre que possível, dados diretamente no operador do sistema, visando conhecer as atividades realizadas nessas garagens e o consumo de eletricidade associado apenas aos trabalhos relacionados à manutenção dos veículos, desprezando consumos associados aos escritórios e outras áreas não relacionadas. Para sistemas ainda em fase de projeto, estimativas devem ser feitas baseando os dados em sistema assemelhados. Conhecido o consumo de energia elétrica, a emissão pode ser calculada através da expressão (4), conforme quadro 5.
- c) Carbono embutido em materiais: refere-se ao carbono embutido em materiais que compõem itens de substituição de acordo com a manutenção programada dos veículos. Deve ser levantada a quilometragem média dos ônibus em operação, visando conhecer o tempo e a periodicidade das manutenções para conhecimento

das quantidades de emprego dos itens de manutenção. Para tanto, devem ser conhecidos os dados do programa de manutenção dos veículos ou os dados estatísticos registrados pelos operadores dos sistemas, sempre que possível. Conhecidas as quantidades, o carbono embutido pode ser calculado através da expressão (5), conforme quadro 6.

3.1.6 Manutenção da infraestrutura

A necessidade de manutenção da infraestrutura é dada em função de estimativas e é feita com base no seu tempo de vida. Comumente há um desgaste expressivamente maior do pavimento em relação às instalações de estações e terminais. Enquanto estações e terminais podem receber pequenos reparos pontuais ao longo do ciclo de vida, as pistas recebem severo desgaste em função do tráfego pesado que recebe. De acordo com experiências de ICV em sistemas de transporte rodoviário, como observado anteriormente na revisão bibliográfica, a pavimentação é inteiramente substituída ao final de seu tempo de vida. As atividades do procedimento de demolição e reconstrução das pistas são divididas em 4 grupos:

- a) Transporte – obra: refere-se à emissão produzida pelo consumo de combustível de todos os meios de transporte utilizados para a demolição e reconstrução da pista, incluindo remoção de entulho, reaterro e concretagem. Conhecendo-se o rendimento médio dos veículos envolvidos, as emissões podem ser calculadas através da expressão (1), conforme quadro 2.
- b) Consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos: refere-se à emissão produzida pelo consumo de combustível de todos os equipamentos utilizados na obra de demolição, como, escavadeiras, geradores etc. Conhecendo-se o rendimento médio desses maquinários, as emissões podem ser calculadas através da expressão (3), conforme quadro 4.
- c) Consumo de energia elétrica nos canteiros de obras: refere-se à emissão produzida pelo consumo de energia elétrica de todos os equipamentos utilizados no funcionamento do canteiro de obras montado para substituição das pistas. Atividades como usinagem de concreto e outros equipamentos com uso de

eletricidade deverão ser considerados. Levantadas as quantidades de energia elétrica, as emissões podem ser calculadas através da expressão (4), conforme quadro 5.

- d) Carbono embutido em materiais: refere-se às emissões do concreto e do aço utilizados para a reconstrução das pistas. Devem ser consideradas as quantidades desses materiais para a completa reconstrução das pistas. Com o volume e as emissões já conhecidos no inventário, basta nova aplicação deste item no cálculo para o ciclo de vida. Havendo previsão de alterações no projeto inicial do sistema ou processos construtivos diferentes, deverão ser consideradas as novas quantidades para o cálculo das emissões, o qual deverá ser realizado através da expressão (5), conforme quadro 6.

3.2 Fatores de emissão e densidade de energia

O IPCC (2006) recomenda a utilização de fatores de emissão específicos (nível 3) ou nacionais (nível 2), sempre que possível. Na ausência desses fatores são admitidos fatores padrão listados pelo IPCC (nível 1) ou encontrados em outras fontes. Adotando essa recomendação, foram utilizados fatores de emissão brasileiros para combustíveis e energia elétrica adquiridos e utilizados no país. Na falta de dados disponíveis de fatores de emissão para o aço brasileiro foi utilizado o valor padrão do IPCC, assim como para a pequena parcela de aço importado. Não foi encontrado fator de emissão nacional ou no IPCC para o concreto pronto (usinado), sendo então utilizado o fator internacional publicado pelo ICE.

Mesmo procedimento foi utilizado em relação aos valores de densidade de energia. Para os combustíveis diesel e gasolina, no Brasil, foram computadas parcelas da adição de biodiesel e etanol anidro, respectivamente, subtraídas do cálculo da emissão líquida de CO₂. Essas parcelas foram retiradas, ano a ano, conforme percentual de adição definido na legislação (MA, 2015). Para o biodiesel os percentuais médios foram de 5% em 2011, 2012 e 2013 e 5,67% em 2014. Para o etanol anidro os percentuais médios foram de 20% em 2011 e 2012, 23% em 2013, 25% em 2014. Foi considerado que esses combustíveis renováveis têm suas emissões de CO₂ compensadas no plantio de suas matérias primas e, portanto, não foram consideradas.

Para a determinação da energia desses combustíveis foi utilizado o PCI – Poder Calorífico Inferior, divulgado pela ANP – Agência Nacional do Petróleo (diesel = 10.100 kcal/kg e gasolina A = 10.400 kcal/kg). A ANP (2014) também divulga a densidade (diesel = 0,84 kg/l e gasolina A = 0,742 kg/l) permitindo a conversão da energia para MJ/l. Considerando que 1 kcal = 0,004184 MJ então o conteúdo energético do diesel é $10.100 \times 0,004184 \times 0,84 = 35,50$ MJ/l e da gasolina A é $10.400 \times 0,004184 \times 0,742 = 32,29$ MJ/l (ANDRADE, 2016).

A emissão de CO₂ foi calculada através da expressão 6 mostrada no quadro 7:

Quadro7: Expressão para determinar as energias associadas aos combustíveis.

$(ECO_2)_c = PCI_c \times EC_c \times FO_c \times (44/12)$ (6)	
sendo: <i>c</i> - combustível <i>ECO₂</i> - a emissão de CO₂ <i>PCI</i> - poder calorífico inferior do combustível <i>EC</i> - fator de emissão do carbono <i>FO</i> - fator de oxidação <i>44/12</i> - fator de conversão do carbono para o dióxido de carbono	

O fator de emissão de carbono (diesel = 20,2 tC/TJ e gasolina = 18,9 tC/TJ) e o fator de oxidação (0,99) utilizados são os do IPCC, que também foram utilizados na elaboração do Relatório de Referência “Emissões de Dióxido de Carbono por Queima de Combustíveis Fósseis: Abordagem *Top-down*” do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI, 2010). Seguindo a metodologia e, exemplificando, o fator de emissão para o diesel foi assim calculado:

$$(35,50 / 1000000) \text{ TJ/l} \times 20,2 \text{ tC/TJ} \times 0,99 \times (44/12) = 0,00260 \text{ tCO}_2/\text{l} = 2,60 \text{ kg CO}_2/\text{l}$$

Adotando o mesmo método, o fator de emissão para a gasolina “A” resultou do cálculo:

$$(32,29 / 1000000) \text{ TJ/l} \times 18,9 \text{ tC/TJ} \times 0,99 \times (44/12) = 0,00222 \text{ tCO}_2/\text{l} = 2,22 \text{ kg CO}_2/\text{l}.$$

Outros fatores de emissão utilizados no estudo, como por exemplo, do óleo lubrificante, e querosene, foram também calculados de acordo com a abordagem extraída do MCTI.

Todos os fatores de emissão e densidades de energia utilizados nos cálculos deste trabalho estão reunidos na tabela 16:

Tabela 16: Fator de emissão de CO₂ e densidade de energia.

Material / Combustível	Fator de emissão de CO ₂	Fonte (Emissões)	Densidade de energia	Fonte (Energia)
Diesel	2,60 kgCO ₂ /l	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	10.100 kcal/kg = 35,50 MJ/l	ANP (2014)
Gasolina	2,22 kgCO ₂ /l	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	10.400 kcal/kg = 32,29 MJ/l	ANP (2014)
Aço	1,06 tCO ₂ /t	IPCC (2006)	20,10 MJ/kg	ICE (2011)
Concreto	0,100 tCO ₂ /t	ICE (2011)	0,75 MJ/kg	ICE (2011)
Eletricidade	Variável ⁽¹⁾	MCTI (2014)	-----	-----
Biodiesel	-----	-----	9.000 kcal/kg = 33,14 MJ/l	ANP (2014)
Etanol	1,52 kgCO ₂ /l	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	6.750 kcal/kg = 22,34 MJ/l	ANP (2014)
Querosene	2,47 tCO ₂ /t	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	10.400 kcal/kg = 34,76 MJ/l	ANP (2014)
Gás natural (GNV)	2,06 kgCO ₂ /m ³	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	10,710 kcal/kg = 37,20 MJ/m ³	ANP (2014)
Alumínio	1,70 tCO ₂ /t	ICE (2011)	155,00 MJ/kg	ICE (2011)
Cobre	2,60 tCO ₂ /t	ICE (2011)	42,00 MJ/kg	ICE (2011)
Fibra de vidro	1,54 tCO ₂ /t	ICE (2011)	28 MJ/kg	ICE (2011)
Borracha	2,66 tCO ₂ /t	ICE (2011)	91 MJ/kg	ICE (2011)
Óleo lubrificante	2,66 kgCO ₂ /l	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	10.120 kcal/kg = 37,05 MJ/l	ANP (2014)
Diesel (Europa)	2,65 kgCO ₂ /l	DEFRA (2015)	42,91 MJ/l	DEFRA (2015)
Navio Container (Global)	10 gCO ₂ /t-km	WSC (2014)	0,13 MJ/t-km	Mattila and Antikainen (2011)

⁽¹⁾Fator de emissão em kgCO₂/kWh: 0,0292 em 2011; 0,0653 em 2012; 0,096 em 2013; 0,1355 em 2014.

3.3 Análise do ICV

A elaboração do inventário de emissões possibilitará a comparação das emissões por fases do ciclo de vida, identificando as de maior e menor relevância. A emissão total da construção da infraestrutura e a emissão por quilômetro construído darão uma ideia da ordem de grandeza da emissão na construção de um sistema BRT. Os resultados obtidos nas emissões das diferentes fases do ciclo de vida permitirão uma comparação com estudos semelhantes feitos em outros trabalhos.

As emissões das fases não operacionais poderão ser confrontadas com a estimativa da emissão evitada pela transferência para o sistema BRT de uma parcela de usuários que utilizava carros particulares nos seus trajetos. Os resultados poderão ser analisados para uma estimativa do “tempo de recuperação” das emissões não operacionais, ou seja, o tempo necessário para que as emissões não operacionais sejam absorvidas pelo ganho na redução de emissões proporcionado pelo sistema, em comparação com o cenário após a transferência modal.

Outras análises mais específicas poderão resultar do ICV, como por exemplo, o peso que determinados elementos de engenharia têm na fase de construção da infraestrutura, visando conhecer o impacto que obras de arte promovem na contabilização final das emissões na fase não operacional, ou mesmo as variações desse impacto ocasionadas pelo regime de funcionamento e grau de conforto das estações.

3.4 Modelo adotado para estimar a emissão evitada pela implantação de um sistema BRT

A determinação da emissão de CO₂ evitada pelo sistema BRT será realizada utilizando duas abordagens. A primeira considera aspectos relacionados aos usuários do BRT que migraram do carro particular. A segunda abordagem terá como foco o conhecimento de quantos ônibus de itinerários regulares deixaram de circular, sendo necessária a análise do reordenamento das linhas necessário à harmonização do novo corredor com o sistema de transporte já existente.

3.4.1 Emissões evitadas pela redução da circulação de carros

Será elaborado modelo especificamente criado, que considera as bases do fator *mode shift* consistindo das seguintes etapas:

- ❖ Etapa 1: Determinação da demanda e do seu crescimento ao longo do ciclo de vida. É orientada a utilização de índices associados ao crescimento do número de passageiros, como dados da demanda planejada ou baseada em números que apontem para uma curva de tendência, ou mesmo pela previsão do operador considerando aumento da frota, etc.
- ❖ Etapa 2: Conhecimento do percentual da transferência modal associada ao sistema. É orientada a utilização de dados de pesquisa específica para identificação de quantos usuários do BRT deixaram o usar o carro em seus deslocamentos de rotina. Deverá ser considerado índice para a expectativa de crescimento, se houver, ao longo do ciclo de vida.
- ❖ Etapa 3: Conhecimento da quilometragem média de cada viagem realizada pelos passageiros associados à transferência modal.
- ❖ Etapa 4: Determinação da taxa de ocupação dos carros que deixaram de circular, visando melhor ajuste para o dimensionamento do número de pessoas que passaram para o BRT.
- ❖ Etapa 5: Determinação dos quilômetros evitados pelos carros que deixaram de circular. Deverá considerar o crescimento da demanda, bem como o crescimento da transferência modal ao longo do ciclo de vida.
- ❖ Etapa 6: Determinação das quantidades de combustíveis (etanol, gasolina, GNV e diesel) que deixaram de ser consumidos pelos carros. É orientada a aplicação de índices de rendimento padrão para cada tipo de combustível visando o cálculo do volume dos mesmos.
- ❖ Etapa 7: Determinação da emissão evitada tendo como base a quantidade de gasolina, etanol e GNV que deixaram de ser consumidos.

3.4.2 Emissões evitadas pela redução da circulação de ônibus

- ❖ Etapa 1: Conhecimento do planejamento do gestor orientado à reorganização de linhas de ônibus visando eliminar a concorrência destas com o corredor BRT através de novo ordenamento e arranjo. Tal conhecimento deve permitir identificar as linhas impactadas pela implantação do corredor com foco na redução da quilometragem resultante tanto do seccionamento e extinção de linhas, como pela diminuição da quantidade de viagens realizadas pelas novas linhas.
- ❖ Etapa 2: Determinação da quantidade de diesel que deixou de ser consumido pelos ônibus que deixaram de circular.
- ❖ Etapa 3: Determinação da emissão evitada tendo como base a quantidade de diesel que deixou de ser consumido.

A figura 10 mostra as etapas do procedimento para determinação das emissões evitadas por carros e ônibus.

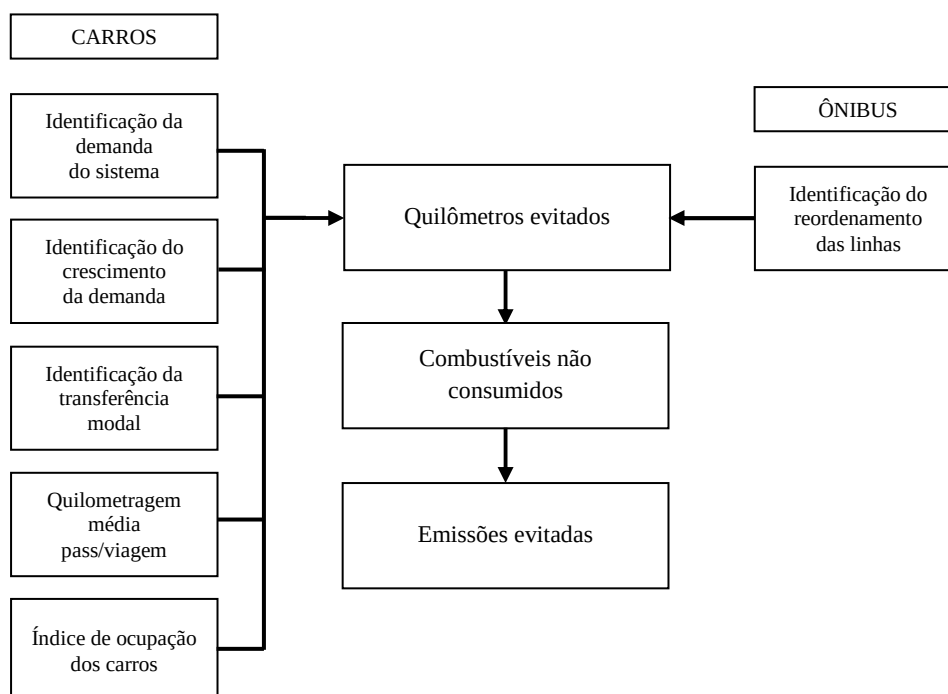


Figura 10: Etapas do procedimento para determinar emissões evitadas.

3.5 Modelo para ferramenta de auxílio à tomada de decisão

Com base nos resultados atingidos na presente pesquisa e, considerando os dados da Linha 4 do Metrô constantes da publicação recente de ANDRADE (2016), será possível a elaboração de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão construída em plataforma do software Excel, a qual consistirá num calculador de emissões para sistemas de transporte, avaliando o balanço entre as emissões produzidas e evitadas, sendo possível comparação entre modos de transporte através dos resultados. Denominada CEMTRANS (Comparador de Emissões entre Transportes), a ferramenta de auxílio à tomada de decisão tem como objetivo possibilitar o conhecimento prévio, de forma resumida, do impacto ambiental a ser provocado por um novo corredor, sendo orientada aos gestores públicos quando na fase de decisão da escolha do modo de transporte a implantar. Sob essa premissa, a ferramenta solicita dados gerais obrigatoriamente já conhecidos pelo gestor, como por exemplo, a extensão total do corredor, bem como dados estimados sobre a demanda esperada. Os valores utilizados para o processamento dos cálculos foram extraídos da presente pesquisa e da pesquisa de ANDRADE (2016), sendo, portanto, orientados ao cálculo de emissões de CO₂ para um sistema BRT de traçado urbano e um sistema metroviário subterrâneo, tal como foram estudados nas pesquisas.

Cabe ressaltar que a ferramenta deve ser utilizada para o estudo de estimativas de novos corredores, sendo obrigatória a associação dos dados de entrada num único conjunto operacional, como por exemplo, a extensão do novo corredor deve ser considerada em associação à quantidade de veículos que operará nesta extensão, cuidando para que não haja o uso de dados associados a uma rede ou sistema já existentes. Ressalta-se ainda para o entendimento prévio que o usuário deva ter, sobretudo para o lançamento de dados na ferramenta, o cuidado para corretamente relacionar, por exemplo, a demanda com o dimensionamento da oferta, evitando dessa forma resultados inconsistentes.

A título de exercício de comparações foi criado, com base nos dados de ambas as pesquisas, um terceiro modo de transporte, mesclando características do BRT e do Metrô. Dessa maneira, resguardado o grau de incerteza pela inexistência de dados reais, esse terceiro modo de transporte foi assumido como um VLT (Veículo Leve sobre Trilhos), admitindo para este modo características mistas se consideradas as fases operacionais e não operacionais, de BRT e Metrô. Visando melhor enquadrar o modo

VLT na ferramenta, foi realizada análise comparativa entre modos de transporte apoiada nos dados publicados por *Sustainable Urban Transport Project* (SUTP, 2008), onde encontram-se os custos para a construção da infraestrutura, aquisição de veículos, operação e manutenção entre vários modos de transporte tendo como base o ciclo de vida. Os dados referem-se a um corredor de 20 km em operação transportando 35.000 passageiros por hora por direção. Admitindo proporcionalidade entre os custos e as emissões, o VLT criado para a ferramenta recebeu fatores de ajuste de acordo com o valor de relação mais próximo aos outros dois modos de transporte, conforme mostrado na tabela 17.

Tabela 17: Fator de ajuste para adequar o modo VLT à ferramenta CEMTRANS.

Atividade	Custo (US\$ Milhões)			Ajuste VLT
	VLT	Metrô	BRT	
Construção da infraestrutura	300	800	185	BRT + 62%
Aquisição dos veículos	414	354	130	Metrô – 14,5%
Operação ⁽¹⁾	294	84	437	BRT – 37,2%
Manutenção ⁽²⁾	112	60	75	BRT + 50%
Operação da infraestrutura ⁽³⁾	-	-	-	BRT + 62%
Manutenção da Infraestrutura ⁽³⁾	-	-	-	BRT + 62%

⁽¹⁾ Admitido como operação dos veículos
⁽²⁾ Admitido como manutenção dos veículos
⁽³⁾ Admitidos como mesmo ajuste aplicado à construção da Infraestrutura.

Fonte: SUTP (2008)

3.5.1 Cálculo das emissões produzidas

As emissões produzidas deverão contemplar dados gerais de entrada que sejam conhecidos dos gestores, tais como, tempo do ciclo de vida pretendido, extensão do corredor, extensão das pontes, número de veículos a serem adquiridos e número de veículos em operação, além da estimativa da quilometragem percorrida por ano dos veículos em operação no corredor. Os dados de saída são calculados com base na medida de tCO₂ pelo índice estipulado para cada segmento identificado na aplicação do estudo de caso de ambas as pesquisas, sendo, portanto, a construção da infraestrutura,

fabricação dos veículos, operação dos veículos, manutenção dos veículos, operação da infraestrutura e manutenção da infraestrutura para cada um dos modos de transporte.

3.5.2 Cálculo das emissões evitadas

Baseado no modelo apresentado no item 3.4 da presente tese, o cálculo das emissões evitadas processará dados sobre a demanda esperada, a estimativa do percentual de usuários do sistema correspondente à transferência modal, a estimativa percentual de cada tipo de combustível entre os veículos retirados das vias em virtude da transferência modal, assim como a estimativa da quilometragem evitada pelo ônibus convencional em função da reorganização de linhas. Os dados de saída mostrarão a medida pkm do sistema, a quantidade de passageiros atraídos e a quilometragem total evitada ao longo do ciclo de vida e a emissão evitada, expressada em tCO₂ por cada tipo de combustível, gasolina, etanol, GNV e diesel.

Na ferramenta foram admitidos valores diferenciados para a estimativa da quilometragem média de cada viagem realizada por cada passageiro, tendo em vista a diferença dos perfis de cada um dos três modos de transportes calculados. Dessa forma, foi determinado com base na extensão do corredor, o valor de 50% para a quilometragem média viajada por cada passageiro no metrô, 27% para o BRT e 20% para o VLT. Tais valores foram lançados de forma diferenciada, tendo em vista os estudos da Linha 4 de ANDRADE (2016) e do BRT extraídos dos dados sobre as emissões evitadas encontradas no item 4.5, adiante nessa pesquisa. Para o perfil do usuário do corredor VLT, o valor foi adotado como menor do que os demais de forma deliberada, tendo como base as características da Linha Azul do VLT Rio, a qual opera na área central da cidade e que registra viagens mais curtas.

Já para a ocupação média de passageiros por veículo, a ferramenta admite o valor de 1,3, como encontrado em OLIVEIRA et al. (2012), considerando esse o carregamento médio do veículo carro particular.

3.5.3 Resultados

Os resultados finais serão produto do balanço entre as emissões produzidas e as emissões evitadas para cada modo de transporte comparado, sendo mostrados como:

- 1- gCO_2/pkm
- 2- tCO_2 líquida

Com a ferramenta, será possível a realização de análises de sensibilidade pela simulação dos dados de entrada, permitindo comparar uma vasta quantidade de configurações, tanto para variações dos dados conhecidos, como também para as estimativas adotadas.

Deve ser ressaltada a possibilidade de ocorrer grande variação nos resultados obtidos com o uso da ferramenta, considerando a amplitude permitida dos dados de entrada, bem como a interação de itens para cálculo. Dessa forma, o usuário deverá cuidar para que haja coerência, por exemplo, entre demanda e número de veículos, ou também entre extensão do corredor e número de veículos em operação, ou mesmo para lançar a correta expectativa de vida dos veículos para quantificar a substituição da frota ao longo do ciclo de vida, usando para tal, as projeções baseadas no planejamento realizado para o sistema a ser implantado, visando dirimir distorções nos resultados.

Ressalta-se também que a ferramenta permite acesso direto às células de cálculo, ou seja, as células em que o autor lançou os valores de referência para produzir os resultados tanto de tCO_2 por item de cada segmento, como também de outros valores de referência, como por exemplo, os percentuais da quilometragem média de cada viagem realizada pelos passageiros nos três modos de transporte obtidos pela extensão do corredor, como também do índice de carregamento médio do carro particular. Essa possibilidade de alteração dos dados de cálculo permite que o tomador de decisão possa usar valores diferentes obtidos ao final desta pesquisa sobre a ACV do Transcarioca, caso haja dados de outra ACV realizada sobre igual modo de transporte, bem como usar dados diferentes dos extraídos da ACV elaborada por ANDRADE (2016), como também poder usar dados reais sobre um corredor VLT, tão logo estejam disponíveis por pesquisa futura.

A figura 11 apresenta uma visão geral das fases do procedimento para elaboração da ferramenta de auxílio à tomada de decisão.

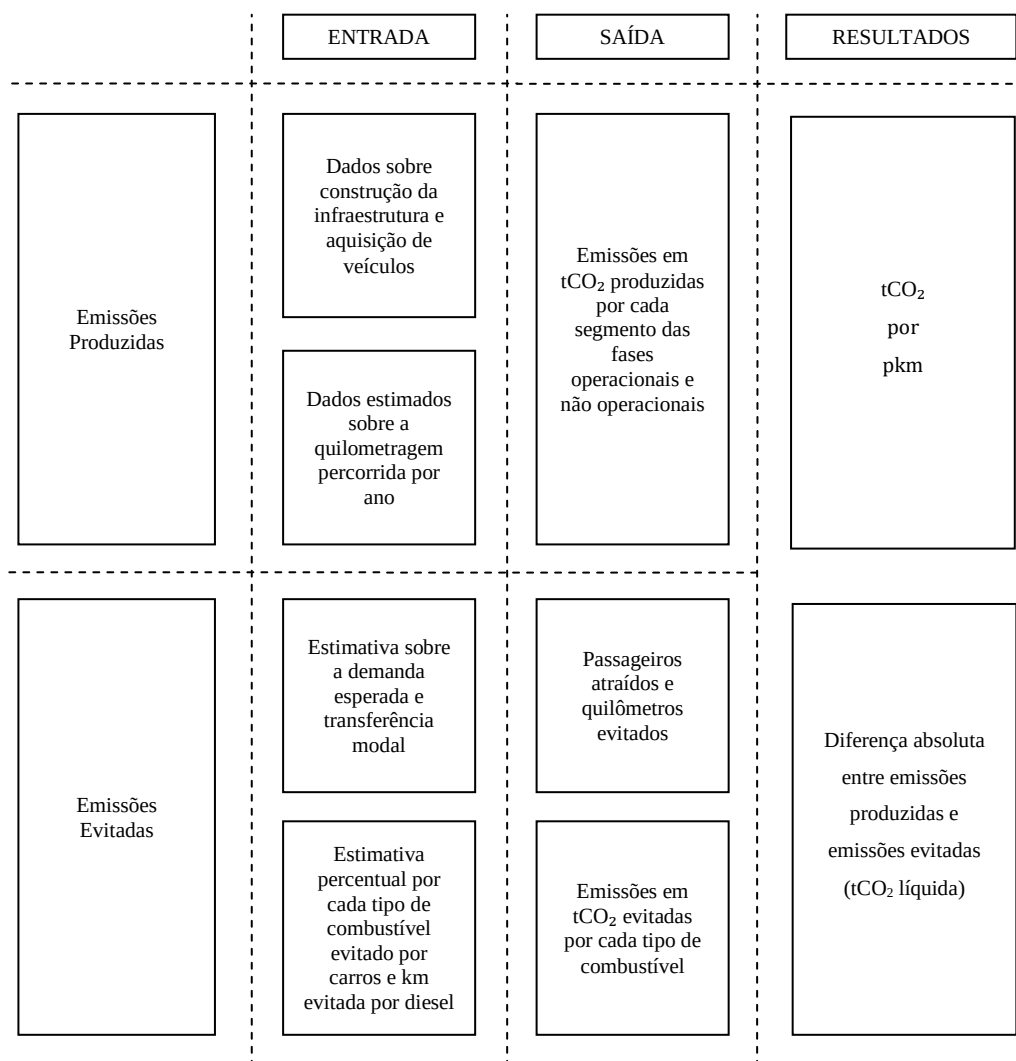


Figura 11: Fases do procedimento para ferramenta de auxílio à tomada de decisão.

A figura 12 mostra o arranjo gráfico da ferramenta em sua tela do usuário, podendo ser observados os campos de entrada e saída de dados, assim como os resultados finais. A tela completa, incluindo os campos onde foram lançados os valores internos para calcular as emissões encontra-se no apêndice 4, constando também de resumo descritivo de cada um desses parâmetros aplicados e processados na ferramenta CEMTRANS.

CEMTRANS V1.0																					
DADOS DE ENTRADA					DADOS DE SAÍDA																
					EMISSIONES PRODUZIDAS																
1	Ciclo de vida	0	anos		METRÔ (tCO ₂)	BRT (tCO ₂)	VLT (tCO ₂)														
2	Extensão do corredor	0	km	Construção da Infraestrutura	0	0	0														
3	Extensão do trecho percorrido em pontes	0	km	Fabricação dos veículos	0	0	0														
4	Quilometragem percorrida por ano	0	km	Operação dos veículos	0	0	0														
5	Nº de veículos fabricados no ciclo de vida	0	unidades	Operação da infraestrutura	0	0	0														
6	Nº de veículos em operação no corredor	0	unidades	Manutenção dos veículos	0	0	0														
				Manutenção da infraestrutura	0	0	0														
				TOTAL (tCO₂)	0	0	0														
					EMISSIONES EVITADAS																
7	Demanda total esperada no ciclo de vida	0	passageiros	Passageiro x Quilômetro (pkm)	0	0	0														
8	Transferência modal média no ciclo de vida	0,00%	passageiros	Passageiros atraídos no ciclo de vida	0																
9	% de carros a gasolina fora de circulação	0,00%	carros	Quilômetros evitados no ciclo de vida	0	0	0														
10	% de carros a etanol fora de circulação	0,00%	carros																		
11	% de carros a GNV fora de circulação	0,00%	carros	tCO ₂ evitada por gasolina	0	0	0														
12	Quilometragem evitada dos ônibus retirados	0	km	tCO ₂ evitada por etanol	0	0	0														
				tCO ₂ evitada por GNV	0	0	0														
				tCO ₂ evitado por diesel	0																
				TOTAL (tCO₂)	0	0	0														
DADOS DE ENTRADA 1 - Tempo de ciclo de vida em anos / 2 - Extensão do corredor em km / 3 - Somatório da extensão das pontes construídas em km / 4 - Quilometragem total percorrida pelos veículos por ano / 5 - Quantidade de veículos fabricados ao longo do ciclo de vida / 6 - Quantidade de veículos em operação no corredor / 7 - Demanda total de passageiros no esperada para o ciclo de vida / 8 - Percentual médio da transferência modal esperado / 9 - Estimativa percentual de uso da gasolina dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 10 - Estimativa percentual de uso de etanol dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 11 - Estimativa percentual de uso de GNV dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 12 - Quilometragem evitada pela retirada de ônibus de circulação pela reorganização de linhas. OBS. Os campos 9, 10 e 11 deverão apresentar soma de 100%.					RESULTADOS <table border="1"> <thead> <tr> <th>Modo</th> <th>METRÔ</th> <th>BRT</th> <th>VLT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - gCO₂/pkm</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2 - tCO₂ líquida</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS: CAMPO 1 - Quanto menor o valor obtido, melhor o desempenho ambiental do sistema. CAMPO 2 - Valores absolutos da emissão líquida. Valores negativos indicam que haverá compensação ambiental. Valores próximos a zero indicam balanço neutro. Valores positivos indicam não haver previsão de compensação ambiental ao longo do ciclo de vida do modo de transporte.					Modo	METRÔ	BRT	VLT	1 - gCO ₂ /pkm	0	0	0	2 - tCO ₂ líquida	0	0	0
Modo	METRÔ	BRT	VLT																		
1 - gCO ₂ /pkm	0	0	0																		
2 - tCO ₂ líquida	0	0	0																		

Figura 12: Tela do usuário da ferramenta CEMTRANS.

4 ESTUDO DE CASO - CORREDOR TRANSCARIOCA

O procedimento será aplicado ao corredor Transcarioca recém implantado na cidade do Rio de Janeiro. Este corredor foi finalizado e posto em operação em junho de 2014, sendo então possível, pelo pouco tempo de sua obra, a obtenção dos dados para a presente pesquisa. Os dados necessários foram obtidos por diversas fontes, já que para a realização do corredor um número considerável de atores contribuiu, como empreiteiras, fornecedores dos mais diversos segmentos, fábricas, transportadoras, etc. Em grande parte, mesmo com a existência de muitos atores, esses dados tiveram registros concentrados no setor público, principalmente nas secretarias municipais de obras (SMO) e de transportes (SMTR), responsáveis pela construção e operação do corredor, respectivamente.

4.1 O Corredor Transcarioca

O sistema de transporte de passageiros da cidade do Rio de Janeiro vem, ao longo dos últimos 4 anos passando por uma ampla reestruturação que teve início no compromisso em estabelecer maior mobilidade na cidade visando melhor atender a demanda de passageiros para os grandes eventos esportivos previstos que aconteceram nos anos de 2014 e 2016, respectivamente a Copa FIFA de futebol e os Jogos Olímpicos. Apontados como uma das grandes heranças da cidade após os grandes eventos, os corredores BRT, juntamente com a Linha 4 do metrô que liga a Barra da Tijuca à Zona Sul e o VLT que se apresentou como novo modo de transporte na área central da cidade, vêm transformando a forma de se deslocar na cidade que prevê o aumento do percentual de viagens de alto desempenho de 18% para 63% (WRI BRASIL, 2016). Os corredores BRT pelos seus 153 km de vias segregadas e pela grande capacidade de transporte do sistema, estimada em 1.500.000 passageiros por dia, segundo previsões dos operadores considerando os 4 corredores em funcionamento. A tabela 18 mostra os dados sobre o sistema carioca.

Corredor	Extensão	Trecho	Estações e terminais	Frota Média	Status
Transoeste	56 km	Alvorada - Santa Cruz	57 estações e 3 terminais	200 ônibus	Implantado (2012)
Transcarioca	39 km	Barra – Aeroporto Tom Jobim	43 estações e 5 terminais	160 ônibus	Implantado (2014)
Transolímpica	26 km	Deodoro - Barra	12 estações e 2 terminais	60 ônibus	Implantado (2016)
Transbrasil	32 km	Deodoro - Aeroporto Santos Dumont	26 estações e 5 terminais	450 ônibus	Em construção

71

Abrangendo regiões que formam eixo até então sem atendimento de transporte com mais capacidade e eficiência, o traçado de 39 km do corredor Transcarioca se inicia no Terminal Alvorada, onde recebe a alimentação de outras linhas regulares de ônibus, como também do corredor Transoeste. O itinerário então parte para Jacarepaguá, passando por outra região historicamente carente de serviço de transporte público, como as Vargens (Grande e Pequena) e Curicica. Em seguida aponta para o eixo suburbano de Madureira, centro geográfico da cidade e importante nó integrador com o modo ferroviário. Após, o corredor chega para atender a grande região da Leopoldina, tráfegando por eixos importantes dessa região, até alcançar a Ilha do Governador, onde tem seu destino final no aeroporto Tom Jobim.

4.2 Aplicação do procedimento de ICV no Corredor Transcarioca

O estudo foi realizado para um período de 40 anos, que corresponde a 2 ciclos do tempo de vida útil do pavimento das pistas e 4 ciclos do tempo de vida útil estimado para o ônibus articulado. Foram levantados, junto à fiscalização da secretaria de obras do município do Rio de Janeiro, todos os dados referentes à construção do corredor que ocorreu nos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014, cobrindo, portanto, a integralidade da fase de construção da infraestrutura. Os dados referentes aos veículos foram obtidos diretamente com 2 dos fornecedores responsáveis pelo produto pronto, ou seja, o “casamento” de chassi com carroceria, sendo estes Volvo e Neobus, respectivamente. Já os dados sobre a manutenção e operação do sistema foram conseguidos diretamente com o planejador do sistema, ou seja, a Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro.

4.2.1 Construção da infraestrutura

O corredor Transcarioca foi executado em dois lotes distintos. O primeiro trecho compreendeu o traçado da Barra da Tijuca até o bairro de Vila da Penha, sendo este lote iniciado em março de 2011. O segundo lote, compreendendo trecho entre Vila da Penha e Ilha do Governador (aeroporto Tom Jobim) foi iniciado 11 meses após, em fevereiro de 2012. Os trechos referentes a estes 2 lotes apresentam características distintas. O primeiro exigiu menos solicitações para a construção das pistas, dada a maior largura dos eixos por onde o corredor foi construído. Já o segundo lote apresentou maior dificuldade construtiva nesse aspecto, sendo inclusive realizada mudança do traçado

previsto no projeto por questões que envolviam não só dificuldades construtivas, como também envolvendo desapropriações e outras questões urbanas.

Basicamente, pode-se dividir a construção da infraestrutura do corredor em 2 frentes de atividades, as quais foram comuns aos 2 lotes: uma a aquisição e emprego de materiais e a outra com emprego de serviços com maquinarias e transportes. No primeiro grupo há subdivisão do emprego dos materiais aplicados diretamente no campo, como exemplo o aço usado nas pistas e estações, e os materiais utilizados para a pré fabricação de peças de concreto para as estruturas elevadas (pontes) e moduladas (estações e terminais). Já no segundo grupo a divisão se faz de um lado pela utilização de máquinas e no outro, o transporte utilizado para materiais e pessoas, transporte das peças pré fabricadas e também do concreto transportado em caminhões betoneiras para despejo nas pistas. A figura 14 ilustra essa divisão básica de atividades.

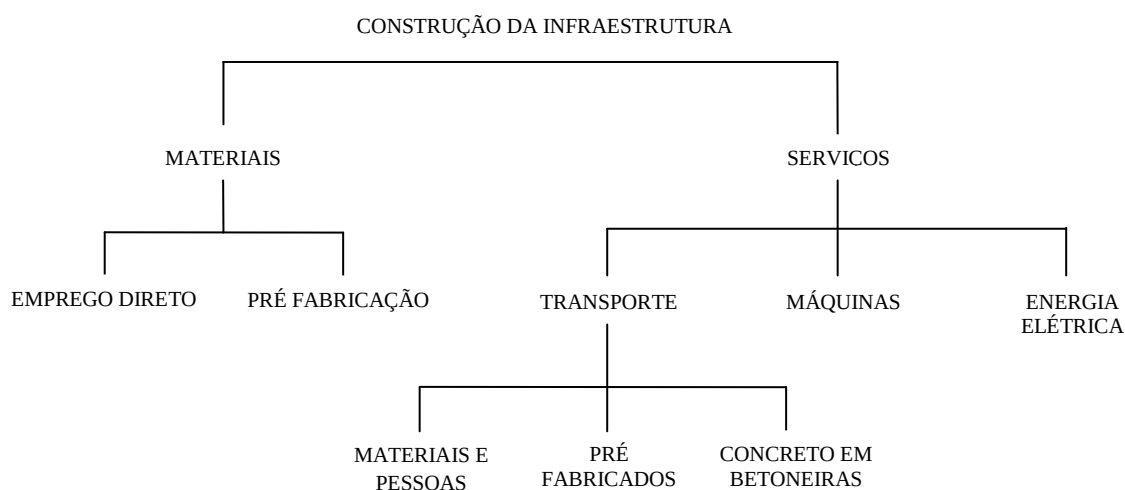


Figura 14: Atividades básicas na construção da infraestrutura.

Pelo volume das atividades descritas acima, a obra adotou dois canteiros de obras fixos, um em cada lote. No primeiro lote o canteiro foi instalado em Jacarepaguá e no segundo lote, o canteiro ficou na Ilha do Fundão (Cidade Universitária). Nesses canteiros, além dos escritórios da administração da obra, foram montadas usinas de concreto que forneceram 70% do concreto despejado nas pistas, sendo o restante comprado com fornecedores externos. Funcionou também nestes canteiros, fábrica de pré moldados de concreto – aço, a qual supriu integralmente a necessidade de vigas para vãos dos elevados e também do mergulhão do Campinho. Ainda como parte de atividades destes

canteiros pode-se incluir a operação de armazenagem de combustível e de abastecimento de veículos e máquinas utilizados na obra.

As pistas foram construídas com 3,60m de largura e 0,25m de espessura. Foi utilizado concreto asfáltico com acréscimo de aditivos para conferir maior resistência ao tráfego constante dos veículos. Em média, os caminhões betoneiras transportavam 7m³ de concreto, que ao ser lançado cobria 8 metros lineares do percurso. O emprego de aço no leito das pistas foi pequeno, sendo usadas apenas barras na ligação nas juntas entre as áreas concretadas.

As 43 estações e 5 terminais foram adquiridas de uma única empresa, MBP Metalúrgica em Barra do Piraí (RJ). Concebidas como módulos, essas estruturas foram sendo transportadas ao longo de 2013 e 2014, não havendo interferência da obra em si com a atividade de montagem, exceto pela construção das plataformas de concreto. Todos os postes e estruturas maiores empregados em alguns terminais também foram fornecidos e montados pela mesma empresa.

A construção dos 6 elevados, bem como do mergulhão do Campinho tiveram seus materiais e peças pré moldadas fabricadas nos canteiros de obras e utilizou concreto de fornecedor externo, por serem concretos especiais. Houve também o fornecimento das calandras (chapas de aço) para a construção do elevado sobre a Av. Brasil no bairro de Ramos, que foram importadas da Europa.

4.2.1.1 Transporte de fornecedores para construção das pistas

Para o cálculo das emissões e energia em função do diesel empregado em todas as movimentações de entrega do aço para consumo (barras, chapas e cabos), bem como do concreto usinado e dos componentes do concreto a usinar nos canteiros, foi realizado levantamento dos quantitativos e das distâncias percorridas nas planilhas da fiscalização da obra fornecidas pela SMO (Secretaria Municipal de Obras).

O aço utilizado em barras, chapas e cabos vieram dos fornecedores Gerdau, Premag e CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) no Estado do Rio de Janeiro, Arcelor Mittal e

Belgo Mineira no Estado de Minas Gerais e da Martifer, localizada em Pindamonhangaba no Estado de São Paulo.

O concreto recebeu seus componentes para ser usinado nos canteiros de dois fornecedores de cimento, sendo a Votorantim desde a cimenteira no bairro de Santa Cruz na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro e a Holcim, desde a fábrica no município de Cantagalo, norte fluminense do Estado do Rio de Janeiro. Já os agregados para a mistura do concreto tiveram suas origens nos municípios de Duque de Caxias e Itaguaí. Já os concretos adquiridos já usinados vieram do bairro do Caju, na cidade do Rio de Janeiro.

Na sequência serão registrados, nas tabelas 19 a 21, os dados de toda a emissão e energia empregadas para as atividades de transporte para a construção das pistas. Foi adotada estimativa do rendimento dos caminhões e utilizados fatores locais de emissão do diesel.

Tabela 19: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no fornecimento do aço utilizado nas pistas.

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Quilômetros ⁽¹⁾	40.342	62.120	81.340	31.399	215.201
Litros ⁽²⁾	15.456,70	23.800,77	31.164,75	12.030,27	82.452,49
Emissões (tCO₂)	38,18	58,79	76,98	26,51	45,06
Energia (MJ)	546.889,14	842.118,71	1.102.671,22	425.464,73	2.917.143,79
Parcela da Energia Renovável (MJ)					139.294,95

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Tabela 20: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no fornecimento de cimento, areia e brita para usinagem do concreto para as pistas.

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Quilômetros ⁽¹⁾	136.716	334.494	337.441	349.047	1.157.698
Litros ⁽²⁾	52.381,61	128.158,62	129.287,74	133.734,48	443.562,45
Emissões (tCO ₂)	129,38	316,55	319,84	327,99	1.093,27
Energia (MJ)	1.853.366,10	4.534.508,32	4.574.458,80	4.729.678,86	15.692.012,07
Parcela da Energia Renovável (MJ)					764.677,12

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Tabela 21: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte do concreto já usinado para as pistas.

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Quilômetros ⁽¹⁾	4.064	21.130	18.014	26.969	70.177
Litros ⁽²⁾	1.557,09	8.095,79	6.901,92	10.332,95	26.887,74
Emissões (tCO ₂)	3,85	20,00	17,05	25,34	66,23
Energia (MJ)	55.092,89	286.445,08	244.203,58	365.437,06	951.178,61
Parcela da Energia Renovável (MJ)					46.847,29

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.1.2 Transporte para atividades da obra

Para a movimentação de veículos de transporte de combustíveis, materiais, peças, equipamentos e pessoas realizada para as atividades da obra, foram considerados os deslocamentos dos caminhões tanques para abastecimento dos dois postos de combustíveis existentes, um em cada canteiro. Também foram considerados os deslocamentos em horas do caminhão comboio que transportou combustíveis e lubrificantes desde os canteiros-base até os locais onde foram operados os compressores e martelos movidos a diesel. Também foram consideradas as horas de deslocamentos

dos caminhões transportando materiais até e entre os locais de atividades (campo). Para finalizar esse segmento foram computadas também as emissões e energia para o transporte de pessoas na obra. Todas as atividades desse segmento foram levantadas nas planilhas da fiscalização da obra fornecidas pela SMO.

Nas tabelas 22 a 25, são registrados os dados de toda a emissão e energia empregadas para essas atividades de transporte na construção da infraestrutura.

Tabela 22: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte de combustível até os tanques nos canteiros-base.

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Horas ⁽¹⁾	458	1.195	1.569	1.308	5.530
Litros ⁽²⁾	6.027,28	15.726,20	20.648,04	17.213,28	59.614,80
Emissões (tCO₂)	14,89	38,84	51,00	42,22	146,95
Energia (MJ)	213.257,22	556.424,41	730.568,95	608.768,10	2.109.018,68
Parcela da Energia Renovável (MJ)					102.603,73

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do consumo de 13,16 litros/hora, baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Tabela 23: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte de combustível dos postos nos canteiros-base até às máquinas e equipamentos no campo.

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Horas ⁽¹⁾	1.658	2.274	3.100	4.882	11.914
Litros ⁽²⁾	21.819,28	29.925,84	40.796,00	64.247,12	156.788,24
Emissões (tCO₂)	53,89	73,92	100,77	157,57	386,15
Energia (MJ)	772.009,76	1.058.836,07	1.443.444,07	2.272.175,72	5.546.465,63
Parcela da Energia Renovável (MJ)					274.063,42

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do consumo de 13,16 litros/hora, baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Tabela 24: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte de materiais, peças e equipamentos nos locais de atividade (campo).

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Horas ⁽¹⁾	14.110	22.327	20.593	22.104	11.914
Litros ⁽²⁾	185.687,60	293.823,32	271.003,88	290.888,64	1.041.403,44
Emissões (tCO₂)	458,65	725,74	669,38	713,43	2.567,20
Energia (MJ)	6.569.998,66	10.396.056,71	9.588.659,28	10.287.622,33	36.842.336,98
Parcela da Energia Renovável (MJ)					1.790.193,83

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.
⁽²⁾ Calculado em função do consumo de 13,16 litros/hora, baseado em COPPETEC (2011).
Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Tabela 25: Emissão e Energia pelo transporte de pessoas e equipamentos nos locais de atividade por veículos menores movidos a gasolina.

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Horas ⁽¹⁾	20.535	30.105	30.475	35.375	116.490
Litros ⁽²⁾	73.309,95	107.474,85	108.795,75	126.288,75	415.869,30
Emissões (tCO₂)	130,20	190,88	185,98	210,27	717,32
Energia (MJ)	2.221.291,49	3.256.487,96	3.264.035,69	3.763.720,47	12.505.535,61
Parcela da Energia Renovável (MJ)					2.072.083,48

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.
⁽²⁾ Consumo de 3,57 litros/hora (velocidade média: 7 km/h a 25 km/h). Dados informados pela SMO.
Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Como pode ser observado na tabela 25, o consumo de gasolina foi registrado apenas nos veículos menores usados para transporte de pessoas e pequenos equipamentos entre os locais de atividades.

4.2.1.3 Consumo de combustíveis pelas máquinas pesadas

Houve expressivo volume de consumo de diesel pelas máquinas pesadas, como retroescavadeiras, carregadeiras e máquinas de terraplanagem. Esse consumo foi medido em horas ao longo dos 4 anos da obra pela fiscalização da SMO, sendo possível a obtenção do registro da utilização dessas máquinas. Foram utilizados fatores locais

para o cálculo das emissões do diesel. O rendimento das mesmas foi estimado para máquina média padrão de 126HP. A tabela 26 mostra os dados obtidos.

Tabela 26: Emissão e Energia pelas máquinas pesadas nos locais de atividade (campo).

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Horas ⁽¹⁾	13.835	17.908	22.717	32.708	87.168
Litros ⁽²⁾	162.561,25	210.419,00	266.924,75	384.319,00	1.024.224,00
Emissões (tCO₂)	401,53	519,73	659,30	942,57	2.523,14
Energia (MJ)	5.751.742,15	7.445.045,06	9.444.331,50	13.591.898,01	36.233.016,72
Parcela da Energia Renovável (MJ)					1.782.472,59

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Consumo de 11,75 litros/hora, baseado em máquina 126HP Boletim Informativo Caterpillar.

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.1.4 Consumo de combustíveis pelos equipamentos

Durante todo o período da obra foram utilizados equipamentos, como marteletes, perfuradores e compactadores movidos a energia elétrica fornecida por geradores móveis movidos a diesel. Esse consumo foi medido em horas pela fiscalização da SMO, sendo possível obter registro da utilização dessas máquinas. Foram utilizados fatores locais para o cálculo das emissões do diesel. O rendimento dos mesmos baseia-se nas especificações indicadas na contratação do serviço. A tabela 27 mostra os dados obtidos.

Tabela 27: Emissão e Energia pelos equipamentos movidos à diesel nos locais de atividade (campo).

Ano	2011	2012	2013	2014	Total
Horas ⁽¹⁾	53.439	64.352	45.329	79.406	242.526
Litros ⁽²⁾	1.656.609,00	1.994.912,00	1.405.199,00	2.461.586,00	7.518.306,00
Emissões (tCO₂)	4.091,82	4.927,43	3.470,84	6.037,24	18.527,33
Energia (MJ)	58.614.139,64	70.583.976,38	49.718.751,02	87.056.913,25	265.973.780,29
Parcela da Energia Renovável (MJ)					13.004.398,67

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.
⁽²⁾ Consumo de 31,00 litros/hora, baseado em Equipamento 139kva medido por SMO.
Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.2 Fabricação dos ônibus

Os 160 ônibus utilizados no corredor Transcarioca foram encomendados a quatro empresas distintas, sendo duas fabricantes de chassis (Volvo e Mercedes Benz) e outras duas fabricantes de carrocerias (Neobus e Marcopolo). Todos os veículos postos em operação no corredor Transcarioca são articulados, não havendo, portanto, a utilização de veículos bi articulados como ocorre no corredor Transoeste.

Medindo 19 metros de comprimento e pesando 26 toneladas, tanto o modelo B340M da Volvo quanto o O500 MA da Mercedes Benz, seguem normas regulamentadas por resoluções CONTRAN e normas ABNT NBR 14022, ABNT NBR 15570 e ABNT NBR 15646, as quais registram limites de pesos e medidas, como também itens de segurança, acessibilidade e conforto para veículos de transporte de passageiros no Brasil.

Os veículos produzidos possuem 3 eixos, 10 rodas e têm capacidade para transportar até 145 passageiros. São movidos a diesel e contam com motores de 350 cavalos e consumo estimado de 1,9 litros por quilômetro sem carga. Os motores foram construídos para atenderem as especificações do PROCONVE – Fase 7 e se destacam por serem mais potentes, econômicos e emitirem menos gases poluentes.

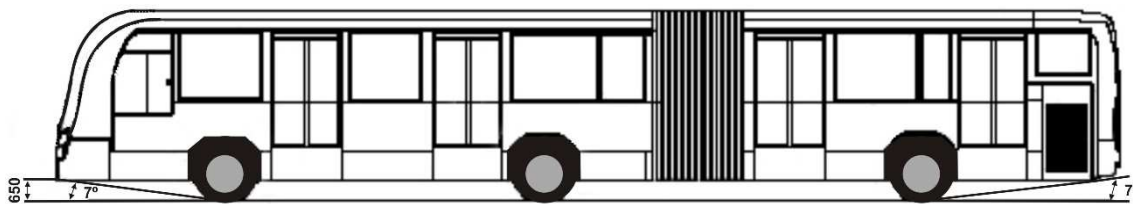


Figura 15: Visão geral do veículo utilizado no corredor Transcarioca.
Fonte: BHTRANS (2012).

Todos os quatro fabricantes estão localizados no Brasil, mas há a utilização de pequena parte de componentes importados. Foram apenas considerados fatores de emissão nacionais, desprezando fatores internacionais que estejam associados à pequena parcela de componentes importados. Por serem veículos construídos sobre uma cartilha técnica, foi admitido que ambos fabricantes de chassis utilizam processos produtivos similares, assim como deve ocorrer com os fabricantes de carroceria, ficando por conta dos deslocamentos entre fábricas e entre a fábrica da montagem final e seu destino de uso o fator relevante na variação das emissões. A figura 16 registra os segmentos considerados para o processo produtivo.

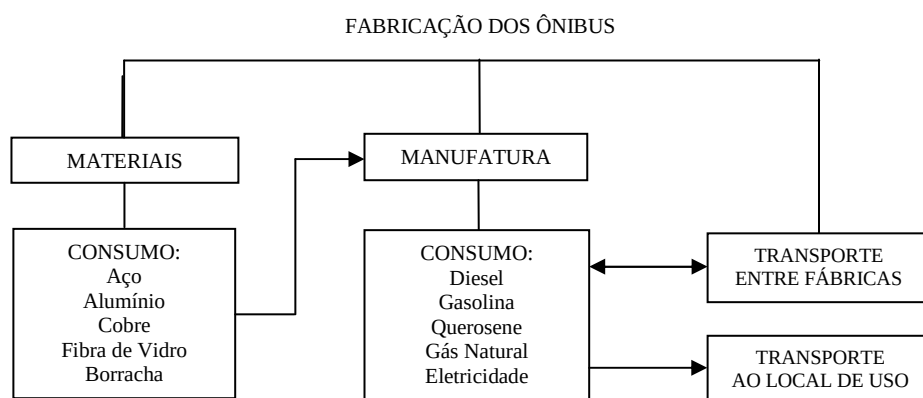


Figura 16: Atividades básicas para fabricação dos ônibus.

O processo produtivo nasce com a construção do chassis do veículo. Ao término dessa etapa, mesmo sendo produto inacabado, o chassis, que já dispõe de toda a motorização, eletrônica e itens de segurança, segue para a fábrica da carroceria, sendo este deslocamento realizado rodando por estradas, consumindo combustível. Ainda sobre o transporte, deverá também ser considerado o deslocamento dos 160 veículos desde a segunda fábrica até o seu local de operação, na cidade do Rio de Janeiro.

4.2.2.1 Carbono embutido nos materiais do ônibus

Os materiais utilizados na manufatura dos ônibus e seu carbono embutido são mostrados na tabela 28. Os dados de quantidade de aço, alumínio, cobre, fibra de vidro e borracha para produção de cada veículo foram obtidos diretamente com os fabricantes Volvo e Neobus, representando cerca de 90% do peso total do veículo que é de 26 toneladas. Para o cálculo da emissão e energia associados foram utilizados fatores de emissão globais, não havendo, portanto, parcela renovável no emprego da energia associada.

Tabela 28: Carbono embutido em materiais para fabricação de 1 ônibus.

Material	Fabricante	Quantidade (1 ônibus) ⁽¹⁾	Total	Emissões (tCO ₂)	Energia (MJ)
Aço (t)	Neobus	6,75	16,75	17,76 ⁽²⁾	336,68 ⁽²⁾
	Volvo	10,00			
Alumínio (t)	Neobus	1,10	1,18	9,72 ⁽²⁾	182,90 ⁽²⁾
	Volvo	0,08			
Cobre (t)	Neobus	0,17	0,97	2,52 ⁽²⁾	40,74 ⁽²⁾
	Volvo	0,80			
Fibra de vidro (t)	Neobus	4,20	4,20	6,47 ⁽³⁾	117,60 ⁽³⁾
	Volvo	0,00			
Borracha (t)	Neobus	0,17	0,88	2,34 ⁽³⁾	80,08 ⁽³⁾
	Volvo	0,71			
Total				38,81	758,00

Fonte: ⁽¹⁾ Dados dos Fabricantes, ⁽²⁾ Calculado com IPCC (2006), ⁽³⁾ Calculado com ICE (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.2.2 Consumo de combustíveis na fabricação dos ônibus

O processo de fabricação dos ônibus registra emissões de CO₂ pela utilização de combustíveis fósseis. Os combustíveis considerados foram o de maior incidência no processo produtivo, sendo o diesel, a gasolina, o querosene e o gás natural. Os dados de quantidade para fabricação de cada veículo foram obtidos diretamente com os fabricantes Volvo e Neobus, recebendo para o cálculo das emissões fatores locais, sendo considerados índices de desconto para a energia renovável existente no diesel pelo acréscimo de biodiesel e na gasolina com o acréscimo de etanol. Os dados aparecem registrados na tabela 29.

Tabela 29: Emissão e Energia pelo consumo de combustíveis na fabricação de 1 ônibus.

Combustível	Fabricante	Quantidade (1 ônibus) ⁽¹⁾	Total	Emissões (tCO ₂) ⁽²⁾	Energia (MJ) ⁽²⁾
Diesel (t)	Neobus	0,010	0,024	0,00006	0,8488
	Volvo	0,014			
Gasolina (t)	Neobus	0,015	0,045	0,00013	1,3501
	Volvo	0,030			
Querosene (t)	Neobus	0,002	0,004	0,00001	0,0006
	Volvo	0,002			
Gás natural (m ³)	Neobus	1,000	1,750	0,00361	113,9250
	Volvo	0,750			
			Total	0,00381	116,1244
Parcela da Energia Renovável					0,2763

Fonte: ⁽¹⁾ Dados dos Fabricantes, ⁽²⁾ Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.2.3 Consumo de energia elétrica na fabricação do ônibus

O processo de fabricação dos ônibus utiliza energia elétrica conforme tabela 30. Os dados do consumo foram fornecidos pelos fabricantes Volvo e Neobus. Para o cálculo foi computada parcela da energia renovável presente na geração da energia, considerando a matriz hidrelétrica. Foi utilizado o fator de emissão nacional referente a 2013, ano de maior atividade produtiva dos veículos.

Tabela 30: Emissão e Energia no consumo de eletricidade na fabricação de 1 ônibus.

Fabricante	MWh ⁽¹⁾	Total	Emissões (tCO ₂) ⁽²⁾	Energia (MJ)
Neobus	160,00	335,00	163,41	1.206.000,00
Volvo	175,00			
Parcela da Energia Renovável				956.358,00

Fonte: ⁽¹⁾ Dados dos Fabricantes, ⁽²⁾ Calculado baseado em CEMIG (2012).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.2.4 Transporte entre fábricas e para o local de operação

O segmento da produção de um veículo ônibus deve considerar duas fases de transporte. A primeira refere-se ao deslocamento do veículo inacabado da fábrica do chassis até a fábrica onde será efetuado o “casamento” da carroceria. A segunda refere-se ao deslocamento do ônibus acabado para o local de sua operação. Os cálculos das distâncias consideraram os seguintes endereços:

❖ **MERCEDES BENZ**

Av. 31 de Março, 1.834 – Jardim Borborema, São Bernardo do Campo – SP

❖ **NEOBUS**

Rua Santa Catarina – Vila Isabel, Três Rios – RJ

❖ **VOLVO**

Rua Jeronimo Durski, 925 – Bigorilho, Curitiba – PR

❖ **MARCOPOLO**

Av. Rio Branco, 4.889 – Ana Rech, Caxias do Sul – RS

❖ **LOCAL DE OPERAÇÃO (Garagem de um operador)**

Estrada do Gabinal, 1.395 – Freguesia (Jacarepaguá), Rio de Janeiro – RJ

Dessa maneira e considerando que os 4 fabricantes aparecem em todas as 4 combinações possíveis e que, as tentativas de contato com as empresas operadoras destes ônibus não retornaram contato visando levantamento da combinação de cada veículo adquirido, foi admitido hipoteticamente que o “casamento” entre chassis e carroceria para a fabricação dos 160 veículos foi dado pela combinação de 80 veículos Mercedes Benz – Neobus (1) e 80 veículos Volvo – Marcopolo (2), representando assim a situação de menor deslocamento entre fábricas na combinação 1 e o maior deslocamento na combinação 2, obtendo portanto, valor médio dessas emissões. A tabela 31 mostra as combinações entre chassis e carroceria, bem como as distâncias percorridas.

Tabela 31: Distâncias associadas ao transporte na fabricação dos ônibus.

Veículo Mercedes Benz (1) – Neobus (2)			
	km	Nº Veículos	Total (km)
Fábrica (1) → Fábrica (2)	447	80	46.720
Fábrica (2) → Garagem RJ	137		
Veículo Volvo (3) – Marcopolo (4)			
Fábrica (3) → Fábrica (4)	572	80	159.200
Fábrica (4) → Garagem RJ	1418		
Total Geral			205.920

Na sequência a tabela 32 apresenta as emissões e energia associadas ao transporte dos 160 veículos do corredor Transcarioca. Para o cálculo, foi considerado fator nacional de emissão do diesel.

Tabela 32: Emissões e Energia associadas ao transporte da fabricação dos veículos.

Quilometragem	Litros ⁽¹⁾	Emissões (tCO ₂) ⁽²⁾	Energia (MJ) ⁽²⁾
205.920	108.378,95	265,81	3.832.950,23
Parcela da Energia Renovável			203.648,16

Fonte: ⁽¹⁾ Calculado em função do rendimento de 1,90 km/l baseado em VOLVO (2011b).

⁽²⁾ Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.2.5 Consolidação das emissões na fabricação dos ônibus

Todas as emissões e energia associadas às etapas da fabricação dos 160 veículos produzidos inicialmente para operação no corredor, bem como as emissões relativas ao ciclo de vida do Transcarioca advindas das 4 renovações da frota que devem ocorrer de 10 em 10 anos, encontram-se registrados na tabela 33.

Tabela 33: Consolidação das emissões e energia para a fabricação dos ônibus.

Emissões / Energia	160 ônibus	640 ônibus
Emissões (tCO₂)	32.621,94	130.487,75
Energia (MJ)	196.932.809,33	787.659.054,46
Parcela da Energia Renovável	153.220.972,37	612.883.889,48

4.2.3 Operação dos ônibus

Para a operação dos 160 veículos, que rodam cumprindo 15 serviços distintos dentro do corredor Transcarioca, foi computada toda a emissão anual produzida diretamente pelos escapamentos destes veículos em operação, como também dos caminhões tanque que entregam o diesel para estocagem em 10 garagens dos operadores.

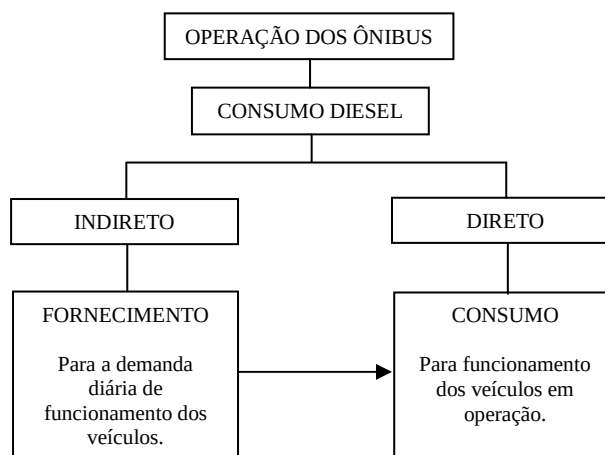


Figura 17: Atividades básicas para operação dos ônibus.

Para o cálculo do consumo anual indireto no fornecimento do combustível, bem como no consumo anual direto, foram considerados os dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Transportes (SMTR). Diferente do rendimento de 1,9 km/l informado pela montadora VOLVO, que considerou a rodagem sem carga e viagem em rodovia para o cálculo no segmento fabricação e deslocamento dos veículos, o consumo informado pelo operador do sistema cai para 1,4 km/l, sendo este dado medido estatisticamente no conhecimento do dia-a-dia dos abastecimentos destes veículos. Este decréscimo de rendimento é dado em função da carga dos veículos e o próprio perfil da viagem, a qual registra grande número de paradas e retomadas de velocidade.

4.2.3.1 Consumo indireto de diesel na operação dos ônibus

A demanda diária de diesel consumido indiretamente é dada em função das 2.156 viagens num total de 36.788 km rodados e a necessidade de 2.628 litros de diesel por dia por garagem. Considerando as 10 garagens com tanques de armazenamento de combustível e a capacidade de transporte de um caminhão tanque de 20.000 litros registra-se então uma demanda de 959.116 litros por garagem em um ano. Para quilometragem deste deslocamento foi calculada a distância entre o fornecedor Shell localizado na Rodovia Washington Luiz no município de Duque de Caxias até a garagem localizada na Estrada do Gabinal, sendo considerado este um deslocamento médio de 32 km. Este transporte de diesel resulta, portanto, em 48 viagens, com uma distância total de 1.535 km rodados por ano. Os dados do consumo indireto anual de combustível estão na tabela 34.

Tabela 34: Emissões e Energia associadas ao consumo indireto de diesel por ano para operação dos ônibus.

Quilometragem	Litros	Emissões (tCO ₂) ⁽¹⁾	Energia (MJ) ⁽¹⁾
1.535	587,96	1,44	20.794,03
Parcela da Energia Renovável			1.104,81

Fonte: ⁽¹⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).
Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.3.2 Consumo direto de diesel na operação dos ônibus

Para as emissões diretas foi considerado o consumo anual resultante dos 13.243.680 km rodados e a queima de 9.459.771 litros de diesel, de acordo com o rendimento de 1,4 km/l. Os dados das emissões e energia associadas ao consumo anual de combustível direto para a operação dos ônibus encontram-se na tabela 35.

Tabela 35: Emissões e Energia associadas ao consumo direto de diesel por ano na operação dos ônibus.

Quilometragem	Litros	Emissões (tCO ₂) ⁽¹⁾	Energia (MJ) ⁽¹⁾
13.243.680	9.459.771	23.200,85	334.556.054,78
Parcela da Energia Renovável			17.775.269,99

Fonte: ⁽¹⁾ Calculado em função do rendimento de 1,4 km/l baseado em dados da SMTR.
Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.3.3 Consolidação das emissões para operação dos ônibus

A consolidação dos dados das emissões diretas e indiretas no segmento da operação dos ônibus é mostrada na tabela 36, onde são registradas, também, as emissões ao longo de todo o ciclo de vida do corredor. Deve ser destacado que não foram considerados ganhos por eficiência energética e consequente diminuição de emissões ao longo do tempo pelos possíveis avanços nas tecnologias de motores e combustíveis.

Tabela 36: Consolidação das emissões e energia para a operação dos ônibus.

Emissões / Energia	1 ano	40 anos
Emissões (tCO₂)	23.202,29	928.091,53
Energia (MJ)	334.576.848,81	13.383.073.952,52
Parcela da Energia Renovável	17.776.374,79	711.054.991,67

4.2.4 Operação da infraestrutura

Para a operação da infraestrutura do corredor Transcarioca foi considerado apenas o consumo de eletricidade nas 43 estações e 5 terminais. Para a medição do consumo de energia elétrica foram usados dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Transportes (SMTR), a qual atua como mantenedora da infraestrutura. O corredor possui estações com funcionamento diário de 16h e 24h. Já os terminais funcionam todos em regime de 24h. Além da variação entre estações físicas, também há variação entre as estações do ano em função do uso do ar condicionado. Os meses de outubro a março, que compreende o período de primavera e verão, apresentam consumo

superiores dos demais meses do ano, em virtude do rendimento dos sistemas de ar condicionado.

4.2.4.1 Consumo de energia elétrica nas estações

A tabela 37 registra os dados de consumo mensal de eletricidade associados ao período de funcionamento diário, considerando também a média de consumo em função do período (estações) do ano. O somatório registra o consumo anual de energia elétrica por essas instalações (estações e terminais).

Tabela 37: Dados do consumo de eletricidade nas estações.

	Instalações 24h	Instalações 16h
Quantidade de estações	30	13
Inverno (kWh/mês) ⁽¹⁾	3.200	2.500
Verão (kWh/mês) ⁽¹⁾	4.200	3.200
Média/mês (kWh)	3.700	2.850
Consumo anual (kWh)	44.400	34.200
kWh/ano	1.332.000,00	444.600,00

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Transportes – SMTR

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.4.2 Consumo de energia elétrica nos terminais

Todos os terminais têm regime de funcionamento 24h. Em função do maior tamanho dessas instalações, o consumo de eletricidade anual é superior se comparado com as estações. Os dados do consumo considerando os períodos do ano, bem como o somatório revelando o consumo anual estão resumidos na tabela 38.

Tabela 38: Dados do consumo de eletricidade nos terminais.

Terminais (todos 24h)	
Quantidade de terminais	5
Inverno (kWh/mês)	4.800
Verão (kWh/mês)	6.000
Média/mês (kWh)	5.400
Consumo anual (kWh)	64.800
kWh/ano	324.000,00

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Transportes – SMTR

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.4.3 Consolidação das emissões para a operação da infraestrutura

A quantidade anual total de kWh somado todo o consumo da energia elétrica nas instalações da infraestrutura foi de 2.278.200,00. Já as emissões de CO₂ pelo uso da eletricidade e também a energia para a sua produção estão consolidados na tabela 39. Nela também estão registrados os dados relativos ao ciclo de vida do Transcarioca nesse segmento. Importante destacar que o fator de emissão utilizado para o cálculo refere-se ao ano de 2014, sendo este o ano inaugural do corredor Transcarioca.

Tabela 39: Consolidação das emissões e energia para a operação da infraestrutura.

Emissões / Energia	1 ano	40 anos
Emissões (tCO₂)	1.024,67	40.986,91
Energia (MJ)	7.562.160,00	302.486.400,00
Parcela da Energia Renovável	5.996.792,88	239.871.715,20

4.2.5 Manutenção dos ônibus

Pneus e óleo lubrificante representam os 2 itens de maior frequência nas rotinas de manutenção, como informado pelas empresas operadoras. Assim, a atividade de manutenção dos ônibus foi dividida em três partes. A primeira refere-se às emissões do transporte envolvido no fornecimento de pneus e óleo lubrificante entregues nas garagens. A segunda refere-se às emissões e energia do carbono embutido nesses materiais. A terceira parte está associada ao consumo de eletricidade nas 10 garagens das empresas operadoras que formam o consórcio Transcarioca, onde funcionam não só as oficinas de borracharia e para a troca de óleo, como também são equipadas para a atividade de lavagem dos veículos.

4.2.5.1 Carbono embutido em materiais

Componentes de consumo regular e com substituições agendadas em função da quilometragem dos veículos, os pneus e óleos lubrificantes apresentam troca

programada e formam parcela considerável das emissões e energia quando considerado o carbono embutido ao longo do ciclo de vida do veículo.

Cada veículo do corredor percorre diariamente a média de 230 km, perfazendo 83.923 km por ano. A vida útil de um pneu, como informado pela SMTR, é de 40.000 km, representando assim uma taxa de troca de 2,1 vezes por ano, o que resulta num consumo de 3.357 pneus, se considerados os 10 pneus de cada um dos 160 veículos. Segundo o fornecedor Pirelli, a massa da borracha de um pneu 295/80 R22 é de 62 kg, o que resulta em 208.128 kg de borracha por ano.

Considerando a mesma quilometragem descrita para o consumo de pneus, o consumo de óleo lubrificante se dá a cada 25.000 km, sendo a taxa anual de 3,36 vezes por ano. O cârter de cada veículo contém 20 litros de óleo, o que resulta em 3.200 litros na frota e um consumo total de 10.742 litros por ano.

De acordo com o consumo anual apurado e considerando fator de emissão internacional para a borracha e fator nacional para o óleo lubrificante, os dados de emissão e energia associados ao carbono embutido em materiais encontram-se descritos na tabela 40.

Tabela 40: Emissões e Energia do carbono embutido na manutenção dos veículos.

Material	Quantidade	Emissões (tCO ₂)	Energia (MJ)	Parcela Renovável (MJ)
Borracha pneus ⁽¹⁾	208,12 t.	553,62	18.939,66	15.019,15
Óleo lubrificante ⁽²⁾	10.742 l.	28,57	397.994,66	315.609,76
Total		582,19	416.934,32	330.628,91

Fonte: ⁽¹⁾ Fator de emissão em ICE (2011).

⁽²⁾ Fator de emissão calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.5.2 Transporte para fornecimento de pneus e óleo lubrificante

Os pneus e óleo lubrificante consumidos anualmente pela atividade de manutenção dos ônibus chegam através de entregas diretas dos fornecedores às garagens. Foi elaborada

estimativa com os dados informados pela SMTR, complementada com o levantamento das distâncias percorridas junto aos fornecedores. Os cálculos das distâncias consideraram os seguintes endereços para o fornecedor de pneu e óleo lubrificante, como também o destino, sendo considerada uma das garagens de entrega:

❖ PIRELLI (Pneus)

Rodovia Castelo Branco, 30 – Jardim Itaquiti, Barueri – SP

❖ LUBRAX (Óleo Lubrificante)

Av. Fabor, s/n – Campos Elísios, Duque de Caxias – RJ

❖ LOCAL DE ENTREGA (Garagem de um operador)

Estrada do Gabinal, 1.395 – Freguesia (Jacarepaguá), Rio de Janeiro – RJ

Com a demanda anual de 3.357 pneus e a capacidade de transporte de 180 unidades, são realizadas 19 viagens de 450 km por ano desde o fornecedor até a garagem, o que resulta em 8.392 km percorridos por ano.

Com a demanda anual de 10.742 litros de óleo lubrificante e a capacidade de transporte de 2.000 litros, são realizadas 5 viagens de 35 km por ano desde o fornecedor até a garagem, o que resulta em 188 km percorridos por ano. Os dados de emissão e energia associadas a esse transporte anualmente estão descritos na tabela 41. Os valores foram calculados utilizando fator de emissão local.

Tabela 41: Emissões e Energia associadas ao transporte para manutenção dos veículos.

	Pneus	Óleo Lubrificante	Total
Quilômetros	8.392	188	8.580
Litros ⁽¹⁾	3.215,43	72,03	3.287,46
Emissões (tCO₂) ⁽²⁾	7,89	0,18	8,07
Energia (MJ) ⁽²⁾	113.717,37	2.547,27	116.264,64
Parcela Renovável (MJ)	90.177,87	2.019,98	92.197,85

Fonte: ⁽¹⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).

⁽²⁾ Fator de emissão calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.5.3 Consumo de energia elétrica

A energia elétrica é consumida nas garagens por muitas atividades indiretas, como escritórios de administração e instalações para pessoal. Porém, admitindo que o uso de maior consumo elétrico vem das maquinarias de oficina e instalações de lavagem, foi considerado de forma conservadora que o consumo médio de eletricidade para as atividades de manutenção dos ônibus articulados que servem ao corredor Transcarioca seja de 50% do total consumido. Essa abordagem se faz necessária pois as garagens também operam linhas de ônibus convencionais fora do corredor.

Foi apurado o dado de 16.800 kWh por ano em cada garagem. Esse dado foi estimado admitindo 50% do consumo médio registrado no imóvel da empresa Viação Redentor Ltda e considerando ser igualmente esse o valor médio das 9 demais empresas do consórcio no segmento manutenção dos ônibus.

A tabela 42 mostra os dados de emissão e energia associadas ao consumo anual de eletricidade na atividade de manutenção dos ônibus. Foi usado fator de emissão nacional referente ao ano de 2014, ano de início das operações no corredor.

Tabela 42: Emissões e Energia associadas ao consumo de eletricidade para manutenção dos ônibus em 1 ano.

Quantidade (kWh) ⁽¹⁾	Emissões (tCO ₂) ⁽²⁾	Energia (MJ) ⁽²⁾
168.000	81,95	604.800,00
Parcela da Energia Renovável		479.606,40
Fonte: ⁽¹⁾ Dados dos Fabricantes, ⁽²⁾ Calculado baseado em CEMIG (2012).		
Obs.: Cálculos detalhados no anexo		

4.2.5.4 Consolidação das emissões para manutenção dos ônibus

Os dados consolidados de emissões e energia associadas às atividades de manutenção dos ônibus do corredor Transcarioca encontram-se na tabela 43.

Tabela 43: Consolidação das emissões e energia para a manutenção dos ônibus.

Emissões / Energia	1 ano	40 anos
Emissões (tCO₂)	672,21	26.888,32
Energia (MJ)	1.137.998,95	45.519.958,12
Parcela da Energia Renovável	902.433,17	36.097.326,79

4.2.6 Manutenção da infraestrutura

Considerando a longevidade da pavimentação de concreto empregado no corredor Transcarioca, bem como da estrutura metálica das estações e terminais, não há nas atividades do operador do sistema manutenção de rotina. Este apenas registra esporadicamente pequenos reparos nas instalações de estações e terminais, que pela baixa representatividade nas emissões de CO₂, não serão considerados para a manutenção da infraestrutura. Porém, assumindo o ciclo de vida de 40 anos do corredor, deve ser considerado o tempo de vida útil do pavimento de concreto das pistas, registrado como 20 anos (BIANCHI et al., 2013). A sua refeitura, portanto, requer esforços que já foram mensurados no segmento de construção da infraestrutura original, inclusive com a repetição das distâncias do transporte de fornecedores e deslocamentos para despejo do concreto no leito das pistas. A tabela 44 registra os itens de engenharia civil necessários para demolição e reconstrução dos 39 km do corredor Transcarioca na metade do seu ciclo de vida.

Tabela 44: Atividades e materiais para a reconstrução das pistas.

Atividades / Materiais	Quantidade
Transporte do concreto - usina/pistas (km)	70.177
Concreto para substituição total do pavimento (kg)	201.400.472,50
Transporte do aço - fornecedor/canteiros (km)	1.282
Aço para substituição total do pavimento (kg)	3.662.294,75
Demolição do pavimento antigo (h)	2.340
Remoção do pavimento antigo - entulho (km)	201.400

Não foram considerados o emprego do aço e do concreto protendido utilizados nas obras de arte. Mesmo sendo conhecida a necessidade de manutenção em estruturas com aço aparente, bem como em estruturas com sustentação de tirantes, caso de elevados no corredor Transcarioca, esta manutenção não será considerada por falta de dados.

O fator de emissão do diesel para cálculo dos transportes e do funcionamento de máquinas pesadas utilizou valor de desconto da energia renovável pelo acréscimo de biodiesel referente ao ano de 2014.

4.2.6.1 Transporte na manutenção da infraestrutura

O transporte envolvido na manutenção da infraestrutura considerou todos os deslocamentos necessários ao fornecimento de materiais, ao transporte do concreto em caminhões betoneira do canteiro até o local de despejo, bem como o transporte envolvido na remoção do entulho. A estimativa do transporte deste segmento considerou as mesmas distâncias, admitindo a instalação de canteiro com usinagem de concreto no mesmo local da construção original do corredor. A tabela 45 registra os dados relativos ao fornecimento de materiais e ao transporte do concreto desde a usinagem até o despejo no leito das pistas.

Tabela 45: Emissão e Energia pelo consumo de diesel no transporte do concreto e aço utilizados na reconstrução das pistas.

	Concreto	Aço	Total
Quilômetros ⁽¹⁾	70.177	1.282	71.459
Litros ⁽²⁾	26.887,74	491,19	27.378,93
Emissões (tCO ₂)	65,94	1,20	67,14
Energia (MJ)	950.916,85	17.371,44	968.288,29
Parcela Renovável (MJ)	50.523,08	922,96	51.446,04

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

Já a tabela 46 apresenta os dados do transporte envolvido na retirada do entulho, o qual foi estimado em 120.840m³ considerando fator de empolamento de 50%, como sugerido no manual de produção CATERPILLAR (2000). Para estimativa do transporte dessa atividade, o cálculo considerou como 2.500 kg o peso de 1m³ de concreto e o uso de caminhões com capacidade de transportar 15m³ de entulho. Esta atividade demandará ao fim de 20 anos, a realização de 8.056 viagens com percurso médio de 25 km até o vazadouro no bairro de Deodoro, perfazendo deslocamento total de 201.400 km.

Tabela 46: Emissão e Energia pelo transporte na remoção do entulho.

Quilômetros ⁽¹⁾	201.400
Litros ⁽²⁾	77.164,75
Emissões (tCO₂)	189,25
Energia (MJ)	2.729.023,09
Parcela Renovável (MJ)	144.995,50

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.

⁽²⁾ Calculado em função do rendimento de 2,61 km/l baseado em COPPETEC (2011).

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.6.2 Uso de máquinas pesadas na manutenção da infraestrutura

A atividade de demolição do pavimento não prevista no segmento da construção da infraestrutura original teve de ser estimado através de dados fornecidos pela SMO. A atividade de quebra do pavimento foi dimensionada com rendimento de 100 metros lineares, considerando as duas pistas, a cada 6 horas de trabalho, o que requer 2.340 horas de trabalho de máquina pesada para quebrar todo o pavimento dos 39 km do corredor. O consumo da máquina foi estimado para o uso de britadeira pneumática motorizada de 126 HP de potência, como em manual de usuário e especificações contido no Boletim Informativo do fabricante Caterpillar. A tabela 47 registra os dados relativos às emissões e energia pelo consumo de diesel necessário ao funcionamento das máquinas.

Tabela 47: Emissão e Energia pelas máquinas pesadas na demolição do pavimento.

Horas ⁽¹⁾	2.340
Litros ⁽²⁾	27.495,00
Emissões (tCO₂)	67,43
Energia (MJ)	972.393,34
Parcela Renovável (MJ)	51.664,15

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO.
⁽²⁾ Consumo de 11,75 litros/hora, baseado em máquina 126HP
Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.6.3 Carbono embutido em materiais na manutenção da infraestrutura

Para a utilização do concreto e do aço na reconstrução das pistas ao final de 20 anos, foram consideradas as mesmas quantidades desses materiais, bem como o fator de emissão utilizado para o cálculo da construção da infraestrutura original. Os dados são mostrados na tabela 48.

Tabela 48: Emissão e Energia pelo carbono embutido no concreto e aço utilizados na reconstrução das pistas.

	Concreto ⁽²⁾	Aço ⁽³⁾	Total
Quantidade (kg) ⁽¹⁾	201.400.472,50	3.662.294,75	
Emissões (tCO ₂)	20.140,05	366,23	20.506,28
Energia (MJ)	151.050,35	2.746,72	153.797,07

Fonte: ⁽¹⁾ Secretaria Municipal de Obras – SMO, ⁽²⁾ Fator emissão em ICE (2011)

⁽³⁾ Fator emissão em IPCC (2006), ⁽⁴⁾ Falta de dados

Obs.: Cálculos detalhados no anexo

4.2.6.4 *Consolidação dos dados para manutenção da infraestrutura*

Os dados consolidados de emissões e energia associadas às atividades de manutenção da infraestrutura do corredor Transcarioca encontram-se na tabela 49.

Tabela 49: Consolidação das emissões e energia para a manutenção da infraestrutura.

Emissões (tCO₂)	20.830,11
Energia (MJ)	4.823.501,79
Parcela da Energia Renovável	248.105,69

4.2.7 **Totalização das emissões para o ciclo de vida**

Considerando todas as etapas operacionais e não operacionais ao longo do ciclo de vida estipulado em 40 anos, o somatório das emissões produzidas, energias empregadas e a parcela da energia renovável estão registrados na Tabela 50.

Tabela 50: Totalização das emissões para o ciclo de vida.

Emissões (tCO₂)	1.271.799,24
Energia (MJ)	14.939.082.668,31
Parcela da Energia Renovável	1.648.100.360,14

A figura 18 registra os segmentos e os valores absolutos de CO₂ lançados na atmosfera considerando o que foi apurado no ICV. Em percentuais, a maior parcela (72,97%) vem da operação dos veículos ao longo dos 40 anos, seguida da fabricação dos mesmos com 10,26%. Em seguida a parcela percentual referente à emissão da construção da infraestrutura com 9,79%. Após, a operação da infraestrutura com 3,22%, a manutenção dos veículos com 2,11% e a manutenção da infraestrutura com 1,64% completam os segmentos estudados.

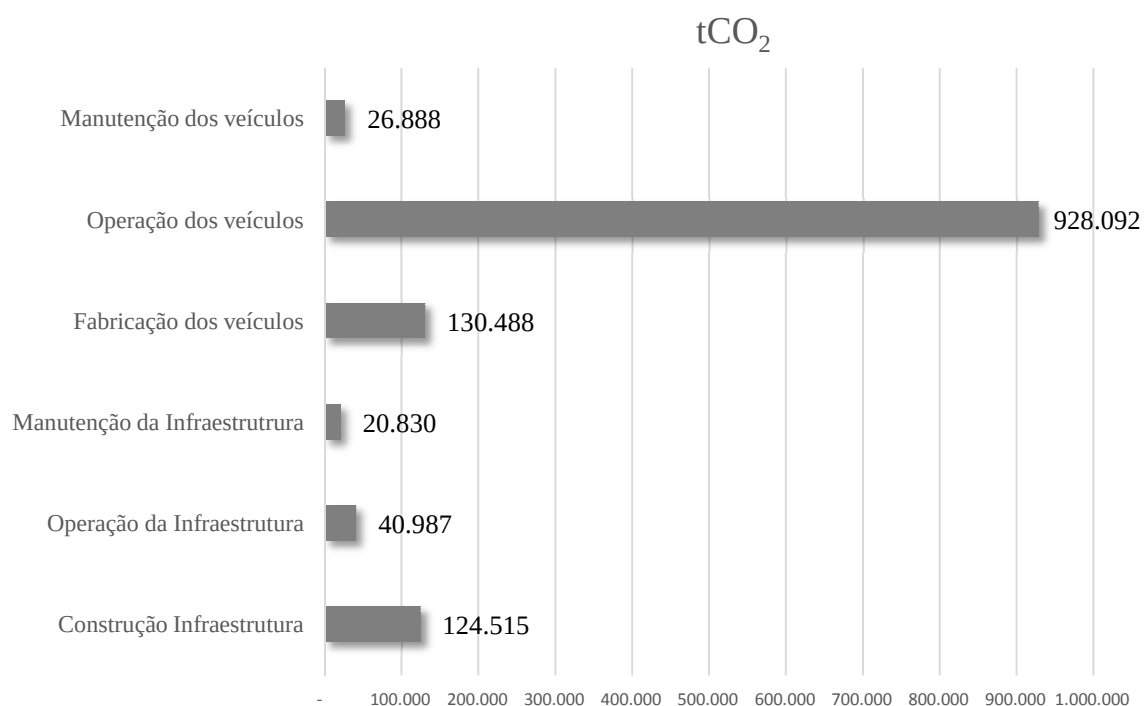


Figura 18: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do Transcarioca.

4.3 Interpretação dos resultados do ICV

Após a aplicação dos cálculos com o resultado da totalização do uso de materiais, transportes e máquinas e, conseqüentemente, da produção das emissões de CO₂, serão listados a seguir cortes em segmentos para o melhor entendimento dos impactos de cada uma das fases que compõem o ICV. A tabela 51 a seguir mostra a divisão percentual das emissões entre as fases operacionais e não operacionais do Transcarioca.

Tabela 51: Divisão das emissões entre fases operacionais e não operacionais.

Fases	Segmento	tCO ₂	%	
Fase operacional	Operação dos ônibus	928.091,53	72,97	76,20
	Operação da infraestrutura	40.986,91	3,23	
Fase não operacional	Construção da infraestrutura	124.514,62	9,79	23,80
	Fabricação dos ônibus	130.487,75	10,26	
	Manutenção dos ônibus	26.888,32	2,11	
	Manutenção da infraestrutura	20.830,11	1,64	

Já a figura 19, a seguir, apresenta as etapas do segmento de construção da infraestrutura, revelando a liderança do item carbono embutido no aço como o maior emissor de CO₂.

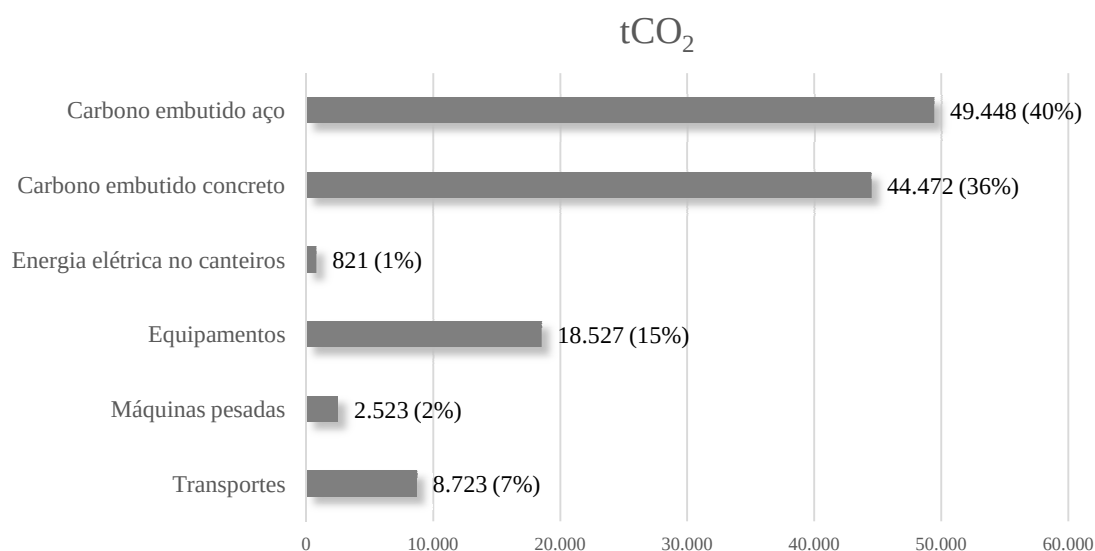


Figura 19: Emissões de CO₂ por segmento na construção da infraestrutura do Transcarioca.

Já a figura 20 apresenta, dentre as 3 aplicações pesquisadas no ICV, a liderança do uso do aço nas obras de arte do Transcarioca.

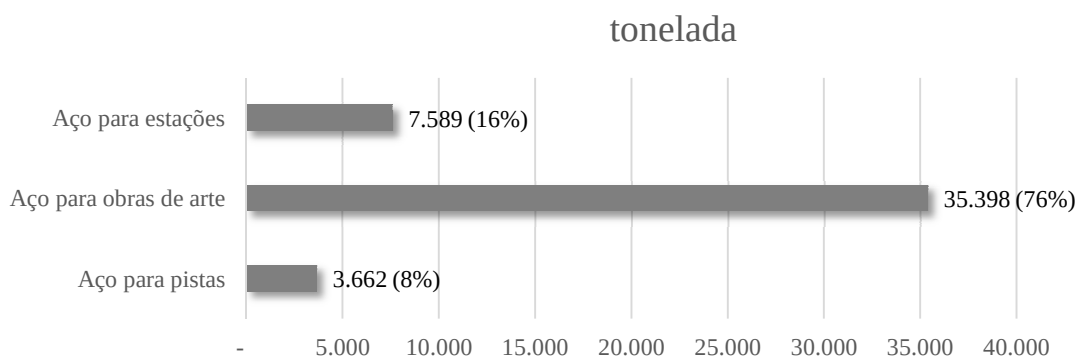


Figura 20: Uso do aço na construção da infraestrutura do Transcarioca.

Outro segmento importante dentre as emissões produzidas na fase de construção da infraestrutura é o relacionado aos transportes utilizados nas mais diversas atividades. A figura 21 relaciona estas atividades e aponta como desprezíveis o transporte realizado para a entrega das peças moduladas das estações e terminais, bem como para o transporte das estruturas para as obras de arte, ambos cumprindo deslocamentos menores e em menor quantidade, contrapondo a maior parcela de emissão registrada no transporte marítimo de uma pequena quantidade de aço importada de Portugal, revelando o impacto que a decisão de compra e escolha de fornecedores têm nas emissões desse segmento, ainda que pouco influente se confrontadas a participação dos transportes nas emissões totais para a construção da infraestrutura.

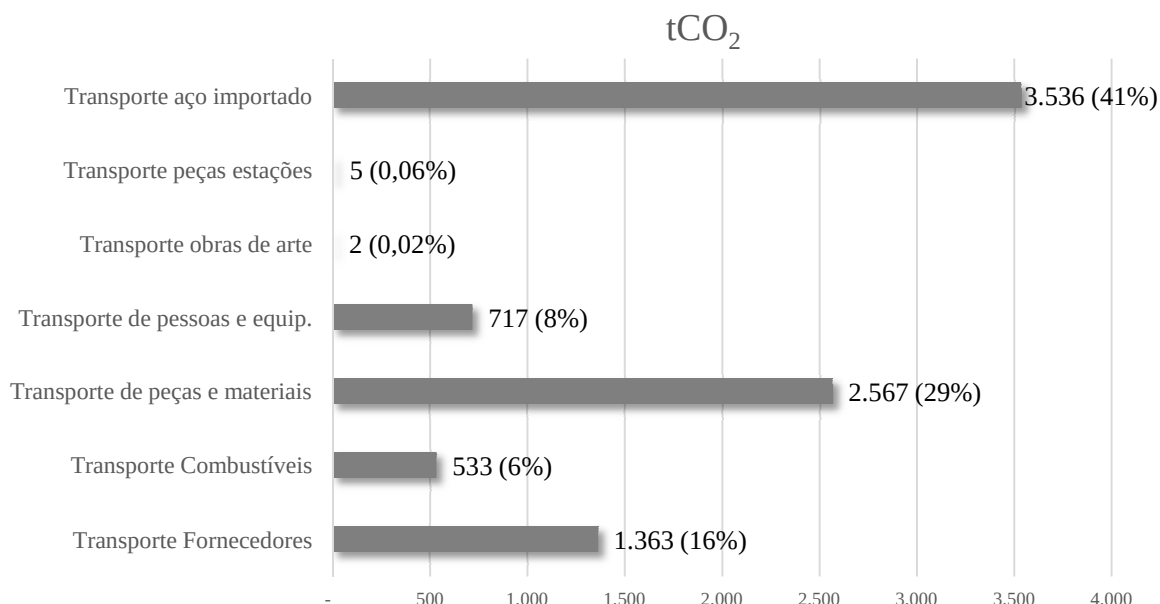


Figura 21: Emissões de CO₂ no segmento de transportes na construção da infraestrutura do Transcarioca.

Para o segmento da fabricação dos veículos, considerando os 40 anos do ciclo de vida e a produção de 640 veículos, registra-se como maior parcela das emissões a vinculada à produção da energia elétrica no processo produtivo desses veículos, seguido do carbono embutido em materiais, do transporte entre fábricas e para o local de operação e, por último, parcela desprezível dos combustíveis fósseis empregados na fabricação. A figura 22 apresenta os valores apurados no ICV.

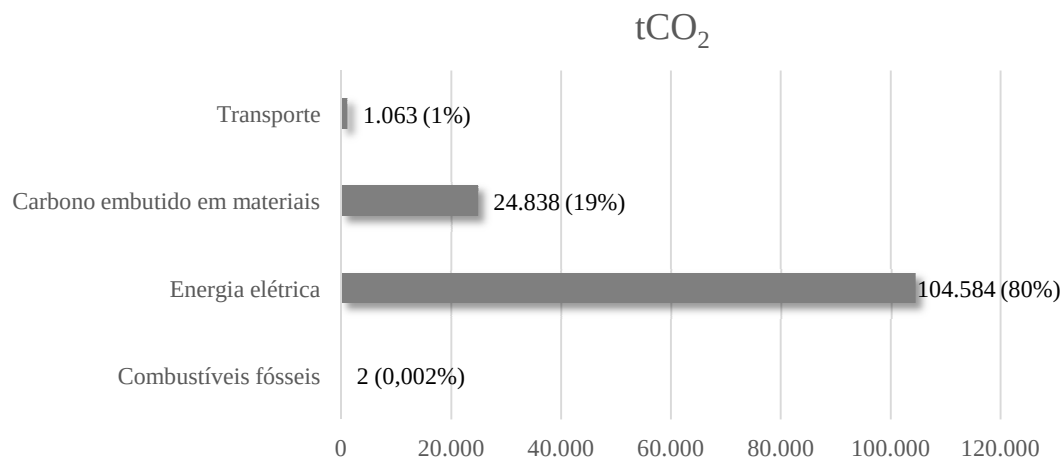


Figura 22: Emissões de CO₂ no segmento de fabricação dos veículos do Transcarioca.

Para o segmento manutenção dos veículos, o resultado dos cálculos registra o carbono embutido nos pneus como o maior emissor de CO₂. A figura 23 mostra os dados resultantes dos cálculos desse segmento.

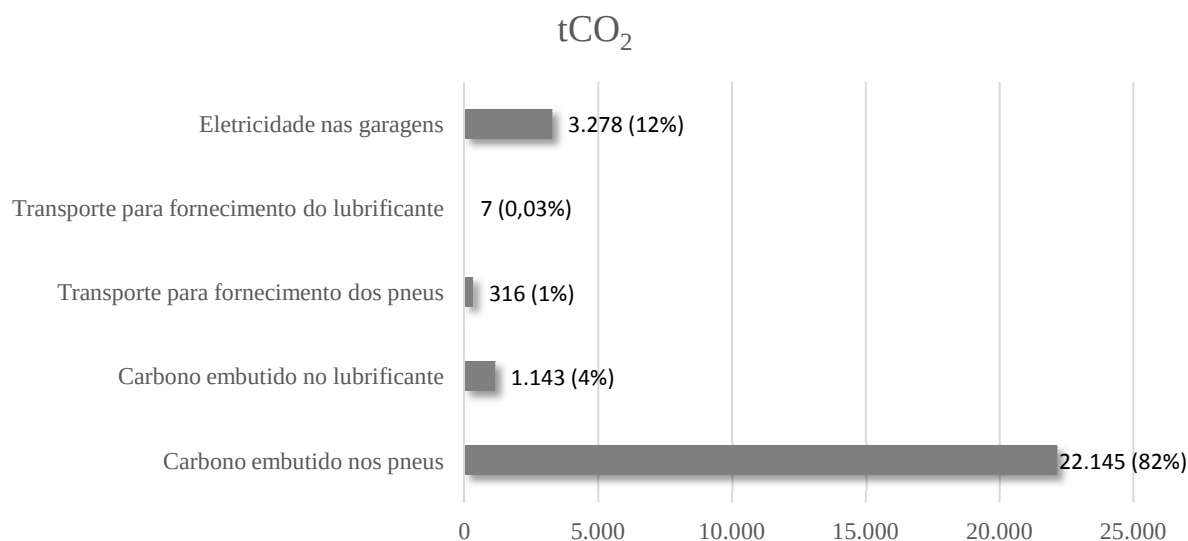


Figura 23: Emissões de CO₂ no segmento de manutenção dos veículos do Transcarioca.

O segmento de operação dos veículos, o de maior representatividade no ciclo de vida, pode ser mostrado com a individualização da contribuição das emissões dentre as atividades estudadas no ICV. A figura 24 revela que a parcela de contribuição do transporte de combustível até as garagens é desprezível.

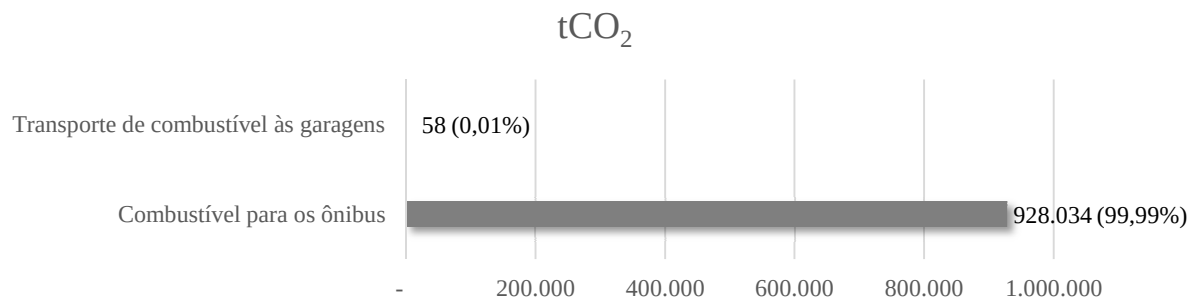


Figura 24: Emissões de CO₂ no segmento de operação dos veículos no Transcarioca.

4.4 Determinação do pkm do corredor

O estudo para a determinação do pkm do corredor Transcarioca buscou inicialmente utilizar dados geográficos com as distâncias entre as 48 estações (considerando os cinco terminais) fornecidos pela SMTR. A SMTR também foi responsável pelo fornecimento dos dados reais da demanda de passageiros do ano de 2016. Como a SMTR não registra os dados de desembarque de passageiros nas suas instalações (apenas registra o fluxo de embarque), para a determinação da demanda por cada instalação de embarque e desembarque foram utilizados os dados contidos na pesquisa do ITDP (2015), os quais possibilitaram construir a matriz origem - destino.

Com a disponibilidade dos dados elencados, a determinação do pkm do ano de 2016 foi dada através do procedimento descrito na sequência e pode ser encontrado no Apêndice 2:

- Construção de matriz de distâncias: os 39 km do corredor recebem 48 pontos de parada. Visando a determinação real das distâncias entre todas as estações e terminais foi construída matriz de distâncias.
- Construção de matriz de O-D de números absolutos: baseada na pesquisa do ITDP que colheu 1005 entrevistas, foi elaborada matriz com o número absoluto de embarques e desembarques, sendo possível a identificação do percentual referente a estas ações em cada uma das estações e terminais.
- Construção de matriz O-D referenciada: utilização do valor real do número de passageiros transportados, segundo registro de embarque da SMTR, para aplicar percentual obtido na etapa anterior. O número indicado é o de 60.706.898 passageiros transportados em 2016.

- d) Determinação do pkm anual do sistema: a quantidade de passageiro x quilômetro resultou do produto da matriz O-D referenciada pela matriz de distâncias, registrando o pkm de no ano de 2016.
- e) Determinação do pkm ao longo do ciclo de vida: referenciado no valor de pkm de 2016, foi adotada a mesma quantidade de pkm para 2015 e 50% desse valor para a ano de 2014, considerando que o sistema iniciou suas atividades no meio deste ano. Para os demais anos foi considerado o crescimento esperado pela SMTR de 50% sobre demanda registrada em 2016 pelos próximos 10 anos, com a manutenção da mesma quantidade de veículos. Notícias sobre a expectativa da SMTR às vésperas da inauguração do corredor davam conta de que, tão logo todos os serviços do corredor fossem postos em operação, a demanda de passageiros transportados deveria ser de 250.000 passageiros por dia, o que não se confirmou. A média mensal apurada nos números de 2016 revela que 166.320 passageiros foram transportados diariamente, ou seja 33% menos do que o esperado. Dessa forma, assumindo então um crescimento de 5% anual entre 2017 e 2026, o pkm apurado para o ciclo de vida do corredor Transcarioca, somados os 40 anos, é de 35.742.698.903, como registrado no quadro 8.

Quadro 8: Total de pkm ao longo do ciclo de vida.

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
320.562.322	641.124.644	641.124.644	673.180.876	705.237.108	737.293.341	769.349.573	801.405.805	833.462.037	865.518.269
2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
897.574.502	929.630.734	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966
2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966
2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053
961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966	961.686.966
■ Crescimento anual de 5%					Σ_{anos} = pkm total para o ciclo de vida: 35.742.698.503				

Considerando a totalização das emissões, como na tabela 56, e o pkm total para o ciclo de vida como indicado no quadro 8, podemos aferir que o gCO₂/pkm do corredor Transcarioca é de 35,58.

4.5 Aplicação de procedimento para emissões evitadas

Para entendimento do real impacto das emissões pela implantação do corredor Transcarioca é necessário o conhecimento das emissões evitadas através do processamento dos dados de demanda e transferência modal para apurar a quilometragem associada aos carros que deixaram de circular e dados de registro da SMTR sobre o reordenamento de linhas de ônibus alteradas pela implantação do Transcarioca.

4.5.1 Redução de quilometragem associada aos carros

O método empregado é orientado pelo uso do fator *mode shift*, sendo necessário, portanto, o conhecimento da quilometragem que deixou de ser percorrida por usuários do Transcarioca que antes se deslocavam com carros, visando calcular o volume de gasolina, etanol e GNV que deixaram de serem utilizados para a movimentação destes veículos. Para tanto, deverão ser consideradas a sequência de etapas para o processamento do cálculo:

- a) Determinação do crescimento da demanda: considerar o número de passageiros transportados em 2016 que é de 60.706.898. Para a previsão de aumento da demanda, aplicar mesmo índice de crescimento considerado para a determinação do pkm, ou seja, crescimento de 5% anual, entre os anos de 2017 e 2026, seguindo expectativa da SMTR. Para o ano de 2015 foi considerada a mesma demanda de 2016 e 2014 foi lançado 50% desse valor, considerando que o corredor foi posto em operação na metade do ano. O Quadro 9 mostra os dados de demanda ano a ano e o valor total de passageiros transportados ao longo de 40 anos.

Quadro 9: Total de passageiros transportados ao longo do ciclo de vida.

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
30.353.449	60.706.898	60.706.898	63.742.243	66.777.588	69.812.933	72.848.278	75.883.623	78.918.967	81.954.312
2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
84.989.657	88.025.002	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347
2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347
2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053
91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347	91.060.347
Crescimento anual de 5% Σ_{anos} = passageiros para o ciclo de vida: 3.384.409.564									

b) Determinação do crescimento da transferência modal: o valor inicial de transferência modal é 4%, como apurado em ITDP (2015). Para o crescimento do percentual da transferência modal, foi adotada abordagem encontrada em OLIVEIRA et al. (2012) para o corredor Transoeste, onde foi estimado que o mesmo dobrasse a cada 10 anos, justificando tal crescimento no desenvolvimento do corredor ao longo dos anos, sobretudo no ajuste da oferta com a incorporação de novos serviços que propiciem a diminuição de superlotação, aumentando assim o conforto das viagens e a atratividade do sistema. Foi admitido, de forma conservadora, que nos últimos 20 anos do ciclo de vida o percentual se mantém no valor atingido ao final dos 20 anos iniciais, ou seja 16%. O crescimento foi, portanto, estimado de forma crescente e contínua ao longo dos 20 anos iniciais, como mostrado na tabela 52.

Tabela 52: Crescimento da transferência modal.

Período	Crescimento / ano	Crescimento total
2014 → 2023 ⁽¹⁾	0,44%	8%
2024 → 2033	0,8%	16%
2034 → 2043	Sem crescimento	Sem crescimento
2044 → 2053	Sem crescimento	Sem crescimento
⁽¹⁾ Ano de partida (2014) considerado com transferência modal de 4% (ITDP, 2015) e sem crescimento.		

Já o quadro 10 registra a quantidade total de 444.620.963 passageiros que migraram do carro para o corredor Transcarioca considerando o ciclo de vida. Os dados são referenciados na demanda ajustada encontrada quadro 9, com a aplicação do crescimento do percentual de transferência modal como tabela 52, resultando na média de 13,14% de passageiros atraídos ao longo dos 40 anos.

Quadro 10: Total de passageiros dada a transferência modal no ciclo de vida.

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1.214.138	2.695.386	2.962.497	3.391.087	3.846.389	4.328.402	4.837.126	5.372.560	5.934.706	6.556.345
2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
7.479.090	8.450.400	9.470.276	10.198.759	10.927.242	11.655.724	12.384.207	13.112.690	13.841.173	14.569.656
2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043
14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656
2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053
14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656	14.569.656
Σ_{anos} = passageiros dada a transferência modal no ciclo de vida: 444.620.963									

- c) Determinação da quilometragem média de cada viagem realizada por passageiro: proceder a divisão do pkm do ano de 2016 pelo número de passageiros transportados em 2016. O resultado revela a quilometragem média de viagem de cada passageiro e é mostrado na tabela 53.

Tabela 53: Identificação da quilometragem média de viagem / passageiro.

pkm (2016)	Nº passageiros (2016)	Média de km/pass/viagem
641.124.644	60.706.898	10,56 km

- d) Determinação da taxa de ocupação dos veículos que deixaram de circular: considerar que a taxa de ocupação dos carros que deixaram de circular seja superior a 1, admitindo de forma razoável a existência de parcela de passageiros além dos condutores nesses veículos. Foi adotada taxa de ocupação de acordo com OLIVEIRA et al. (2012), que considera como 1,3 o carregamento médio do

veículo carro particular. Dessa forma pode-se aferir a quilometragem total evitada no ano de 2016.

- e) Determinação dos quilômetros evitados: tendo como base a demanda ajustada do corredor ao longo dos 40 anos do seu ciclo de vida, a quantidade de passageiros que realizou a transferência modal, aplicando a quilometragem média viajada por cada passageiro, bem como a taxa de ocupação dos veículos que deixaram de circular, pode-se calcular a quantidade de quilômetros evitados. A tabela 54 registra os dados apurados.

Tabela 54: Identificação da quilometragem total evitada no ciclo de vida.

Demanda Ajustada	Passageiros Transf. modal	km médio viagem/pass	km evitados Total	Índice de Ocupação	km evitados Real
3.384.409.564	444.620.693	10.56	4.695.194.518	1,3	3.611.688.090

Dessa forma temos que a redução da quilometragem percorrida por carros ao longo do ciclo de vida em função da transferência modal é de 3.611.688.090 km.

- f) Conhecimento da parcela percentual de veículos por tipo de combustível na quilometragem evitada: usar dados que permitam o conhecimento da frota circulante. Foram usados dados estatísticos de dezembro de 2016 do site do Detran-RJ (http://detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/07.asp), o qual registra frota total no município do Rio de Janeiro de 2.858.147. Desse total foram admitidas as 4 tecnologias possíveis para a queima de combustíveis em carros particulares rodando na cidade: gasolina, etanol, flex e GNV. Foi admitido que, dentre os veículos de tecnologia flex, 87% dos proprietários optam por gasolina e 13% por etanol, como metodologia encontrada em ANDRADE (2016). A tabela 55 registra o percentual para frota de veículos na cidade do Rio de Janeiro, segmentados por tipo de combustível utilizado.

Tabela 55: Percentual da frota por tipo de combustível na cidade do Rio de Janeiro.

Combustível	Quantidade de veículos ⁽¹⁾	Uso do combustível	Acréscimo veíc. (gasolina/etanol)	Quantidade de veíc. ajustado	%
Gasolina	1.255.870	100%	754.538	2.010.408	70,3
Flex	867.285	87% Gasolina ⁽²⁾ 13% Etanol ⁽²⁾		--	--
Etanol	211.372	100%	112.747	324.119	11,4
GNV	523.620	100%	--	523.620	18,3
Fonte: ⁽¹⁾ Detran/RJ, ⁽²⁾ ANDRADE (2016). Total				2.858.147	100,0

Aplicando os percentuais relacionados ao uso de gasolina, etanol e GNV da frota circulante na cidade do Rio de Janeiro, temos a quilometragem evitada por cada tipo de combustível. A tabela 56 registra os dados.

Tabela 56: Quilômetros evitados por tipo de combustível associados aos carros.

Tipo de combustível	Gasolina (70,3%)	Etanol (11,4%)	GNV (18,3%)	Total
Quilômetros evitados	2.539.016.728	411.732.442	660.938.921	3.611.688.090

4.5.2 Redução de quilometragem associada aos ônibus

Os dados fornecidos diretamente pela Secretaria Municipal de Transportes (SMTR) revelam dados sobre as alterações de linhas de ônibus de itinerário regulares para adequação destas ao serviço alimentador do corredor Transcarioca. Todo o planejamento atingiu 51 linhas as quais foram impactadas diretamente, as quais sobrepujam parte do seu itinerário ao traçado do corredor BRT, ou mesmo se utilizavam de vias paralelas que cumpriam itinerários com mesmo perfil de demanda do Transcarioca. Neste universo de 51 linhas, as alterações se deram com as seguintes ações:

- ❖ Linhas excluídas e criadas;
- ❖ Linhas com itinerários reduzidos;
- ❖ Linhas com itinerários alterados, mas com mesma quilometragem;
- ❖ Linhas com número de viagens diárias reduzidas ou aumentadas.

O planejamento determinou que apenas 4 linhas seriam mantidas com pequenas alterações de itinerário sem impacto na quilometragem dos trajetos, que outras 12 seriam extintas, que 35 tiveram seus trajetos reduzidos e apenas 1 linha foi criada.

A Tabela 57 mostra os dados que resultam do processamento dos dados da SMTR, considerando as ações no reordenamento das linhas antes e depois da implantação do corredor Transcarioca. Os dados referem-se aos registros do mês de maio de 2014 (1 mês antes da implantação e dezembro de 2014 (6 meses após a implantação).

Tabela 57: Reordenamento das linhas impactadas pelo corredor Transcarioca.

STATUS	LINHAS ANTES DO TRANSCARIOCA	km (Ida e Volta)	Nº viagens (Mai/14)	km/mês (A)	LINHAS DEPOIS DO TRANSCARIOCA	km (Ida e Volta)	Nº viagens (Dez/14)	km/mês (B)
REDUZIDA	Taquara - Castelo (via Sernambetiba)	114	2.364	269.496	Alvorada - Castelo (via Sernambetiba)	74	3.051	225.774
REDUZIDA	Méier - Alvorada (via L. Amarela)	61	368	22.448	Méier - Cidade de Deus (via/L. Amarela)	34	388	13.192
REDUZIDA	Senador Camará - Alvorada	63	5.844	368.172	Senador Camará - Taquara	42	3.854	161.868
REDUZIDA	Boiuna - Barra (via autódromo)	67	247	16.549	Boiuna - Taquara (via Rio Grande)	13	365	4.745
REDUZIDA	Colônia - Joatinga (via Barrasul)	74	743	54.982	Colônia - Recreio (via Curicica) circular	40	245	9.800
MANTIDA	Taquara - Hosp. Cardoso Fontes	8	167	1.336	Capela - Tanque	8	266	2.128
REDUZIDA	Colônia - Alvorada (via autódromo)	61	3.953	241.133	Colônia - Rede Sarah (via Curicica)	32	1.143	36.576
MANTIDA	Pau da Fome - Taquara	17	324	5.508	Pau da Fome - Taquara (via Rod. Caldas)	17	396	6.732
REDUZIDA	Sulacap - Barra	55	5.841	321.255	Alvorada - Joatinga (via Erico Verissimo)	17	3.086	52.462
REDUZIDA	Sulacap - Alvorada (via Novo Leblon)	42	654	27.468	Sulacap - Taquara	20	406	8.120
EXTINTA	Colônia - Joatinga (via Barrasul)	79	627	49.533	---	0	0	0
EXTINTA	Alvorada - Ayrton Senna	7	3.254	22.778	---	0	0	0
REDUZIDA	Cascadura - Gávea	70	3.674	257.180	Tanque - Gávea	59	621	36.639
REDUZIDA	Pça. Seca - Del Castilho	40	1.494	59.760	Del Castilho - Tanque	28	588	16.464
REDUZIDA	Saens Pena - Gard. Azul (via Madureira)	66	2.037	134.442	Saens Pena - Madureira	32	1.722	55.104
REDUZIDA	Méier - Alvorada (via Madureira)	60	279	16.740	Méier - Madureira	18	395	7.110
REDUZIDA	Gardênia Azul - Cascadura	30	554	16.620	Gardênia Azul - Tanque (via Pau Ferro)	11	547	6.017
REDUZIDA	Rio das Pedras - Madureira	36	3.917	141.012	Rio das Pedras - Tanque	21	4.685	98.385
REDUZIDA	Cascadura - Riocentro	41	658	26.978	Curicica - Recreio (via Arroio Pavuna)	27	468	12.636
REDUZIDA	Vargem Grande - Cascadura	73	854	62.342	Pontal - Curicica	46	698	32.108
REDUZIDA	Cascadura - Barra (via Itanhangá)	59	900	53.100	Tanque - Alvorada (via Estr. Jacarep.)	55	864	47.520
REDUZIDA	Cascadura - Recreio (via Vg. Grande)	82	2.541	208.362	Curicica - Recreio (via Vargem Grande)	56	2.785	155.960
REDUZIDA	Cascadura - Recreio (via S. Allende)	55	1.035	56.925	Curicica - Recreio (via S. Allende)	28	1.986	55.608
REDUZIDA	Curicica - Madureira (via Guerengüê)	28	876	24.528	Taquara - Curicica (via Guerengüê)	12	804	9.648
REDUZIDA	Madureira - Boiuna	28	1.862	52.136	Boiuna - Taquara	13	1.668	21.684
REDUZIDA	Madureira - Colônia	24	1.458	34.992	Colônia - Taquara	10	1.668	16.680
REDUZIDA	Madureira - Sta. Maria	28	685	19.180	Sta. Maria - Taquara	14	852	11.928
REDUZIDA	Madureira - Pau da Fome	29	741	21.489	Pau da Fome - Tanque (via Meringuava)	11	899	9.889
REDUZIDA	Madureira - Freguesia	35	2.385	83.475	Madureira - Madureira Shop. (via Cascadura)	10	1.874	18.740
REDUZIDA	Gardênia Azul - Pça. XV (via Madureira)	69	2.079	143.451	Madureira - Pça. XV	38	2.383	90.554
REDUZIDA	Cidade de Deus - Rodoviária	65	1.666	108.290	Rodoviária - Madureira	42	1.754	73.668
REDUZIDA	Madureira - Ponte de Marapendi	43	1.122	48.246	Merck - Downtown	32	1.418	45.376
EXTINTA	Madureira - Alvorada	41	2.170	88.970	---	---	---	---
EXTINTA	Cascadura - Recreio (via A. Senna)	66	3.511	231.726	---	---	---	---
EXTINTA	Cascadura - Riocentro (via Camorim)	33	617	20.361	---	---	---	---
EXTINTA	Cascadura - Barra (via A. Senna)	51	1.030	52.530	---	---	---	---
EXTINTA	Lgo. Piabas - Hosp. Cardoso Fontes	36	1.136	40.896	---	---	---	---
EXTINTA	Curicica - Freguesia (circular)	27	30	810	---	---	---	---
EXTINTA	Taquara - Hosp. Cardoso Fontes	30	318	9.540	---	---	---	---
EXTINTA	Chácara - Pça. Seca	5	852	4.260	---	---	---	---
MANTIDA	Pau da Fome - Taquara (via Rod. Caldas)	17	634	10.778	Pau da Fome - Taquara (via Rod. Caldas)	17	398	6.766
MANTIDA	Curicica - Taquara	21	599	12.579	Curicica - Taquara	21	125	2.625
CRIADA	---	---	---	---	Via Parque - Alvorada (via Península)	10	715	7.150
REDUZIDA	Madureira - Tiradentes	57	4.224	240.768	Vicente de Carvalho - Tiradentes	49	4.429	217.021
REDUZIDA	Penha - Méier (via Cascadura)	42	2.486	104.412	Madureira - Méier (via Cascadura)	20	2.066	41.320
REDUZIDA	Cascadura - Vila Cruzeiro	25	4.273	106.825	Vila Cruzeiro - Lgo. da Penha	3	4.742	14.226
REDUZIDA	Bananal - Madureira	63	390	24.570	Bananal - Fundão	27	390	10.530
REDUZIDA	Galeão - Bonsucesso	24	5.500	132.000	Campeões - Bonsucesso (circular)	6	5.500	33.000
REDUZIDA	Jd. Violeta - Bonsucesso (via Bangu)	72	3.745	269.640	Jd. Violeta - Madureira (via Bangu)	40	2.534	101.360
EXTINTA	Pça. Seca - Cidade Universitária	28	385	10.780	---	---	---	---
EXTINTA	Benfica - Madureira	40	645	25.800	---	---	---	---
TOTAIS ANTES DO TRANSCARIOCA		2.287	87.748	4.357.151	TOTAIS APÓS O TRANSCARIOCA	1.053	62.778	1.777.113

REDUÇÃO DE QUILOMETRAGEM POR MÊS (A) - (B) = **2.580.038 km**

Fonte: SMTR

O reordenamento de linhas promoveu, portanto, a diminuição de 40,79% da quilometragem percorrida anteriormente nos itinerários das linhas de ônibus existentes antes da implantação do corredor. Admitindo a manutenção desse planejamento desde dezembro de 2014 até o fim do ciclo de vida, ou seja, 39 anos, teremos a totalização dos quilômetros evitados. A tabela 58 mostra os dados referentes aos quilômetros evitados por ônibus ao longo do ciclo de vida, resultante das alterações nas linhas impactadas pelo Transcarioca.

Tabela 58: Quilômetros evitados associados aos ônibus.

	Mês	Ano	Ciclo de Vida
Quilômetros evitados	2.580.038	30.960.456	1.207.457.784

4.5.3 Combustíveis não consumidos e emissões evitadas

Com o conhecimento da quilometragem evitada por tipo de combustível, podem ser calculados o volume em litros da gasolina, etanol e diesel, bem como o m³ do GNV evitados, considerando a estimativa do desempenho médio (km/combustível). Em MMA (2013) encontram-se rendimentos de veículos particulares rodando em deslocamentos urbanos, registrando valor de 9,74 km/l para carros movidos a gasolina e 6,90 km/l para carros movidos a etanol. Já para o GNV foi utilizado o valor médio de rendimento encontrado em RABENSCHLAG (2013) que é de 14,08 km/m³, enquanto o rendimento dos ônibus foi utilizado valor de 2,57 km/l, dado indicado para ônibus convencionais sem ar condicionado, encontrado em COPPETEC (2015). Utilizando os fatores de emissão dos combustíveis como registrado na tabela 16 e, considerando o desconto pelo uso do etanol e do biodiesel na gasolina e no diesel, respectivamente, temos com a aplicação da expressão (1) o volume de combustível que deixou de ser consumido, bem como as emissões evitadas no ciclo de vida do corredor Transcarioca. Tais dados encontram-se registrados na tabela 59 e os cálculos detalhados encontram-se no Apêndice 3.

Tabela 59: Combustíveis não consumidos e emissões evitadas no ciclo de vida.

Combustível	Quilômetros evitados (km)	Rendimento	Combustível não consumido	Emissões evitadas (tCO ₂)
Gasolina	2.539.016.728	9,74 km/l	260.679.335,52 (l)	422.456,93
Etanol	411.732.442	6,9 km/l	59.671.368,41 (l)	90.700,48
GNV	660.938.921	14,08 km/m ³	46.941.684,73 (m ³)	96.699,87
Diesel	1.207.457.784	2,57 km/l	469.827.931,52 (l)	1.152.290,59
Total				1.762.147,87

4.6 Emissões produzidas vs. Emissões evitadas

Confrontando as emissões produzidas com as emissões evitadas ao longo do ciclo de vida, temos como resultado as emissões evitadas líquidas, como mostrado na tabela 60.

Tabela 60: Emissões evitadas líquidas no ciclo de vida do Transcarioca.

Emissão Produzida	Emissão Evitada	Emissão Evitada Líquida
1.271.799,24 tCO ₂	1.762.147,87 tCO ₂	490.348,63 tCO₂

Para aferir o ponto de recuperação, ou seja, o momento no tempo em que as emissões evitadas acumuladas passam a ser maior do que as emissões produzidas acumuladas, foram realizados lançamentos de acordo com o ICV e consideraram o que segue:

❖ Para as emissões produzidas

- Toda a emissão da construção da infraestrutura e da fabricação dos primeiros 160 ônibus logo no primeiro ano (2014);
- Toda a emissão operacional e de manutenção em parcelas iguais do 1º ao 40º ano;
- Emissão referente à fabricação de 160 novos veículos a cada 10 anos, portanto lançados nos anos de 2014, 2024 e 2034;
- Refeitura das pistas no 20º ano (2034);

❖ Para as emissões evitadas

a) Toda a redução de emissão associada aos ônibus foi lançada em parcelas iguais do 1º ao 40º ano;

b) A redução de emissões associada aos carros teve lançamento considerando o crescimento da demanda nos primeiros 10 anos (total 50%), bem como o crescimento da transferência modal de 4% para 8% nos primeiros 10 anos e de 8% para 16% do 11º ano (2024) ao 20º ano (2034).

A Figura 25 mostra que o ponto de recuperação encontra-se no ano de 2029, ou seja, no 16º ano após o corredor Transcarioca ter entrado em operação.

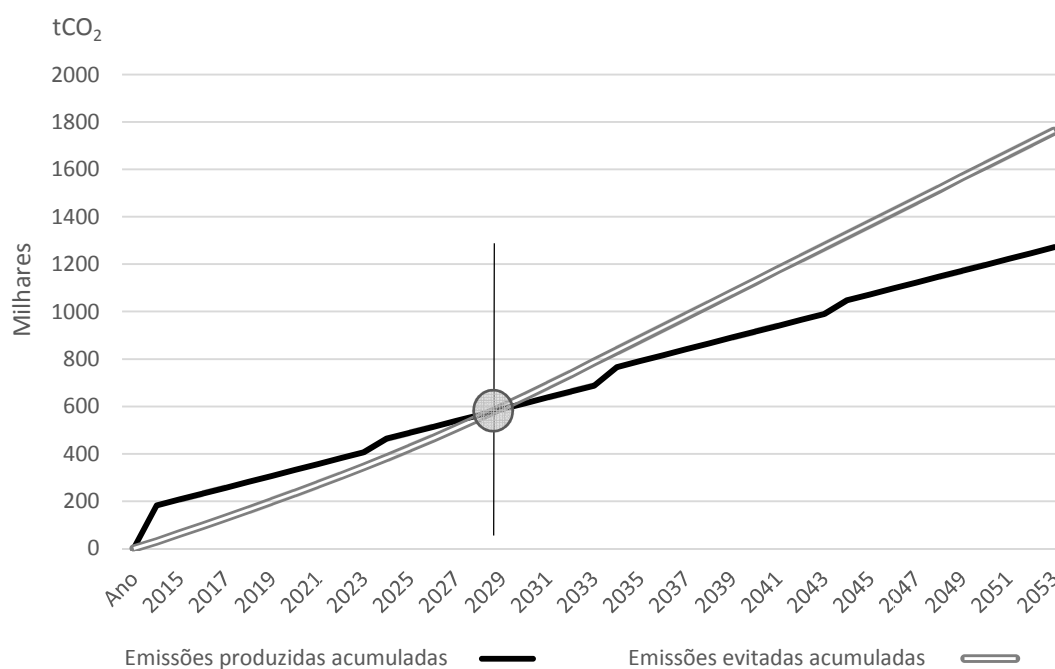


Figura 25: Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida do Transcarioca.

Já a tabela 61 registra os dados ano a ano, mostrando a evolução do acúmulo do que foi produzido e do que foi evitado, conforme lançamentos que seguem como referência os procedimentos contidos no ICV, sendo destacado o ano de início da compensação do CO₂ evitado em relação ao CO₂ produzido, apresentando, portanto, balanço favorável sob o aspecto ambiental aferido no Transcarioca.

Tabela 61: Acúmulo de emissões produzidas e evitadas no ciclo de vida.

Ano	Emissões produzidas acumuladas		Emissões evitadas acumuladas	
	Parcial (tCO ₂)	Total (tCO ₂)	Parcial (tCO ₂)	Total (tCO ₂)
2014	24.899	182.036	28.807	30.474
2015	24.899	206.935	28.807	62.982
2016	24.899	231.834	28.807	95.857
2017	24.899	256.733	28.807	129.320
2018	24.899	281.632	28.807	163.408
2019	24.899	306.532	28.807	198.158
2020	24.899	331.431	28.807	233.606
2021	24.899	356.330	28.807	269.789
2022	24.899	381.229	28.807	306.744
2023	24.899	406.128	28.807	344.553
2024	57.521	463.649	28.807	383.629
2025	24.899	488.549	28.807	424.038
2026	24.899	513.448	28.807	465.547
2027	24.899	538.347	28.807	508.153
2028	24.899	563.246	28.807	551.772
2029	24.899	588.145	28.807	596.589
2030	24.899	613.044	28.807	642.493
2031	24.899	637.944	28.807	689.318
2032	24.899	662.843	28.807	737.128
2033	24.899	687.742	28.807	785.938
2034	78.351	766.093	28.807	834.749
2035	24.899	790.992	28.807	883.559
2036	24.899	815.891	28.807	932.370
2037	24.899	840.791	28.807	981.180
2038	24.899	865.690	28.807	1.029.990
2039	24.899	890.589	28.807	1.078.801
2040	24.899	915.488	28.807	1.127.611
2041	24.899	940.387	28.807	1.176.422
2042	24.899	965.286	28.807	1.225.232
2043	24.899	990.186	28.807	1.274.043
2044	57.521	1.047.707	28.807	1.322.853
2045	24.899	1.072.606	28.807	1.371.663
2046	24.899	1.097.505	28.807	1.420.474
2047	24.899	1.122.404	28.807	1.469.284
2048	24.899	1.147.303	28.807	1.518.095
2049	24.899	1.172.203	28.807	1.566.905
2050	24.899	1.197.102	28.807	1.615.715
2051	24.899	1.222.001	28.807	1.664.526
2052	24.899	1.246.900	28.807	1.713.336
2053	24.899	1.271.799	28.807	1.762.147
Total Produzido			Total Evitado	

4.7 Comparações das emissões no ciclo de vida do corredor Transcarioca com outros estudos de ciclo de vida

O somatório das emissões para a construção da infraestrutura do corredor Transcarioca é de 124.514 tCO₂, o que resulta em 3.192 tCO₂/km. Pesquisa de STRIPPLE (2001) que analisou as emissões associadas à pavimentação de uma rodovia na Suécia com o mesmo tempo de ciclo de vida, 40 anos, obteve valor de 2.700 tCO₂/km quando pavimentado com concreto, mesmo tipo de pavimento adotado pelo Transcarioca. Tal diferença a maior do BRT está relacionada à construção de estações e terminais, instalações não encontradas na infraestrutura prevista no trabalho sueco.

Ainda considerando a tCO₂/km, pode-se confrontar o BRT Transcarioca com os dados obtidos para a Linha 4 do Metrô na pesquisa de ANDRADE (2016). Estando ambos os sistemas na mesma cidade, porém com características de construções distintas, o sistema sobre trilhos apresenta 41.514 tCO₂/km, ou seja, mais de 11 vezes o apurado no sistema BRT. Essa diferença está associada à construção subterrânea em 97% do trajeto do metrô, o que demanda de esforço adicional de engenharia e, consequentemente, um maior volume de emissões.

Abordando sobre o peso das emissões de obras de arte na construção da infraestrutura, pode-se citar a pesquisa de CHANG e KENDALL (2011) sobre a análise de construção de uma nova ferrovia no estado da Califórnia nos Estados Unidos. O resultado apontou para uma representativa participação das emissões quando há construção dessas obras de arte, cerca de 60% das emissões provenientes da construção da infraestrutura vieram de pontes e túneis, os quais representavam apenas 15% do trajeto da ferrovia. No corredor Transcarioca 3,28 km do total de 39 km, ou seja 8,5% de todo o percurso teve de ser cumprido por pontes, 6 no total. Analisando os dados da construção da infraestrutura separadamente e considerando os volumes de aço, concreto e uso de maquinários e transportes nas 6 pontes executadas, temos que 44% do que foi emitido de CO₂ para a construção da infraestrutura tiveram origem nas seis obras de arte. Relacionando os valores da pesquisa americana com os valores obtidos no Transcarioca pode-se confirmar a representatividade em mesma grandeza das emissões advindas das obras de arte na construção da infraestrutura, revelando que a presença destas

construções deve ser considerada no cálculo amplo das emissões quando a abordagem for uma ACV.

Tendo como foco as emissões associadas à operação do sistema, o BRT carioca pode ser confrontado com o existente na cidade de Xiamen na China, o qual foi caso de estudo de CUI *et al.* (2010). Com ciclo de vida de 50 anos, o BRT chinês apresentou 62,33% de suas emissões associadas ao uso do sistema, contra 72,97% apurado no Transcarioca que teve definido em 40 anos o seu ciclo de vida.

O valor apurado para o gCO_2/pkm do Transcarioca revela similaridade com o estudo de TERI (2012), o qual também analisou ciclo de vida em corredor na cidade de Délhi na Índia. A pesquisa asiática apurou 42 gCO_2/pkm num sistema BRT cujo ciclo de vida foi estipulado em 30 anos. O corredor Transcarioca apresentou valor de 35,58 gCO_2/pkm ao longo dos seus 40 anos, resultados que apresentam similaridade que pode ser apoiada no fato de se tratarem de sistemas de transporte iguais, operados sob a mesma matriz energética e construídos em países emergentes.

Ainda com referência na gCO_2/pkm , os resultados encontrados entre os trabalhos pesquisados apresentam grande variação e são influenciados por diversos fatores, entre os quais a abrangência do levantamento, o projeto, a matriz energética, entre outros. Tais resultados não permitem atribuir maior ou menor eficiência dos sistemas, uma vez que o processamento do ICV apresenta especificidades e perspectivas com objetivos distintos. Ainda assim, desprezadas as diferenças dos aspectos específicos dos estudos, a tabela 62 apresenta alguns valores de gCO_2/pkm em comparação com o dado obtido no presente estudo do corredor Transcarioca, observando que para os 2 sistemas nacionais o escopo foi expressivamente mais abrangente do que os sistemas norte-americanos pesquisados.

Tabela 62: Comparação de gCO₂/pkm no ciclo de vida entre sistemas de transporte.

Corredor	Sistema	Total (gCO ₂ /pkm)
Transcarioca	BRT	35,58
Linha 4 ⁽¹⁾	Metrô	13,90
CALTRAN ⁽²⁾	Ferrovias	99,41
MUNI ⁽²⁾	VLT	105,63
Fontes: ⁽¹⁾ ANDRADE (2016) e ⁽²⁾ CHESTER (2008).		

Com relação ao ponto de recuperação, o dado obtido pelo presente estudo aponta para neutralização das emissões operacionais no período do seu ciclo de vida. Tal dado representa o mais importante resultado quando realizada uma ACV em sistemas de transporte, visto que o motivo desta gira em torno dos aspectos ambientais relacionados. Da mesma forma que os resultados de gCO₂/pkm são diretamente influenciados pelas diferenças entre a abrangência dos dados considerados nos estudos, o ponto de recuperação igualmente se relaciona com estas diferenças, sobretudo com a consideração dos elementos da construção da infraestrutura e, principalmente com a matriz energética envolvida na operação do sistema ao longo do ciclo de vida. Colocado em perspectiva à similaridade do escopo, objetivo, abrangência do ICV e, somado ao fato de serem sistemas implantados na mesma cidade, o BRT Transcarioca e a Linha 4 do Metrô apresentam tempo de recuperação das emissões não operacionais distintas. A tabela 63 registra os dados.

Tabela 63: Comparação entre pontos de recuperação no ciclo de vida entre o BRT Transcarioca e a Linha 4 do Metrô.

Corredor	Sistema	Ponto de recuperação	Ciclo de vida	% do Tempo
Transcarioca	BRT	16º ano	40 anos	40%
Linha 4 ⁽¹⁾	Metrô	14º ano	60 anos	23%
Fonte: ⁽¹⁾ ANDRADE (2016).				

Os dados obtidos no ICV elaborado na presente pesquisa permitiram por em perspectiva as emissões (tCO₂) e as energias (MJ) do Transcarioca com os dados encontrados em ANDRADE (2016) para a Linha 4 do metrô. Dessa forma, algumas especificidades analisadas por essas medidas podem ser conhecidas, revelando importantes distinções

entre o sistema metroviário e o BRT quando analisados sob o ciclo de vida, considerando o tempo de vida estipulado para cada estudo. A figura 26 apresenta as diferenças encontradas para a produção da energia.

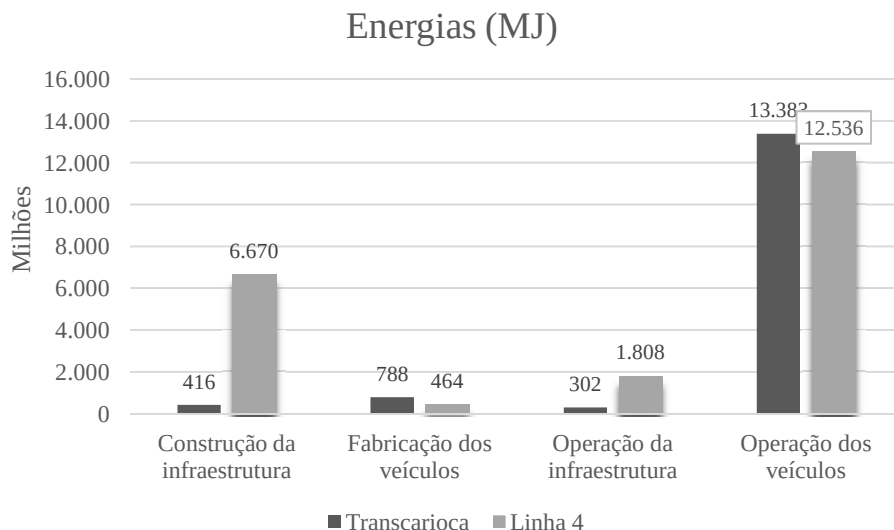


Figura 26: Comparação da energia produzida entre Transcarioca e Linha 4.

Considerando os distintos ciclos de vida, nota-se o consumo de energia expressivamente maior para a construção da infraestrutura no sistema sobre trilhos em função do emprego de equipamentos pesados de funcionamento elétrico, como o perfurador de túnel empregado. Outro destaque se dá em função do valor maior para a energia produzida em função da operação da infraestrutura, explicada pelas diferenças entre ambos os sistemas, considerando que o BRT basicamente considera nesse segmento apenas a energização das estações e terminais, as quais são instalações de escala menor se comparadas com as mesmas instalações metroviárias. O Transcarioca, porém, apresenta maior consumo de energia na atividade de fabricação dos veículos, resultado que expressa as diferenças da forma industrial empregada para a ação, considerando que tais processos de fabricação se deram no Brasil para os ônibus e na China no caso dos trens. Com relação à operação dos veículos, encontram-se valores pareados, revelando que, mesmo com o uso de matrizes energéticas distintas no emprego da tração dos veículos, no BRT além das emissões de CO₂, a energia empregada no refino dos combustíveis fósseis para a movimentação dos ônibus é de volume expressivo, a ponto de superar a energia gasta pelo metrô para esta finalidade, o qual utiliza como tração dos veículos apenas a energia elétrica.

A seguir a figura 27 apresenta os dados comparando as emissões de tCO₂ entre os sistemas implantados na cidade do Rio de Janeiro.

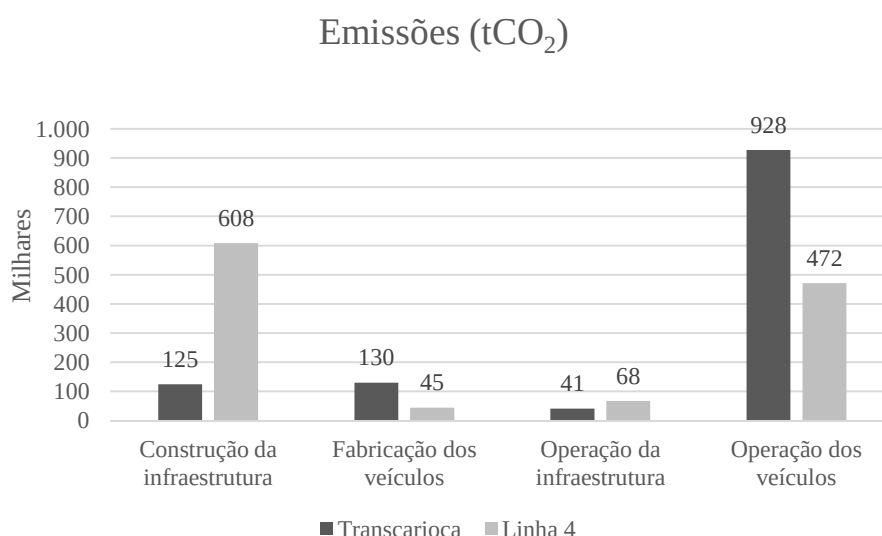


Figura 27: Comparação das emissões produzidas entre Transcarioca e Linha 4.

Na comparação entre as emissões de CO₂ entre o BRT e o metrô no ciclo de vida, temos como destaque o valor 4,9 vezes maior registrado no segmento da construção da infraestrutura para o metrô em função do maior peso da engenharia empregada. Já para operação da infraestrutura o BRT apresenta valor 40% menor, sendo explicado pelo uso de viaturas de serviço em deslocamento na superfície para o metrô, bem como o maior volume de emissões relacionadas à produção de energia elétrica para esse segmento, o qual diferentemente do BRT, considera a iluminação e energização de vários componentes de sinalização e controle, bem como das instalações subterrâneas. No segmento fabricação dos veículos, esperava-se que o valor maior de energia empregado no processo produtivo brasileiro, fosse invertido quando observado o volume de emissões, considerando a diferença entre as matrizes energéticas entre os dois países. Porém essa expectativa não se confirmou com o registro de maior emissão de CO₂ também para o ônibus fabricado no Brasil com relação ao trem fabricado na China. Essa diferença pode ser explicada se considerada a implicação do tempo de vida dos veículos e o tempo de vida da ACV. Mesmo desprezadas as distintas configurações de cada veículo, a soma de 640 ônibus articulados, contra apenas 30 trens, pode indicar a maior emissão neste segmento. Por fim, a emissão de CO₂ se mostra 2 vezes maior no BRT em relação ao metrô, registro explicado, principalmente, pela diferença da matriz

energética utilizada na força de tração dos veículos ao longo do seu ciclo de vida. A tabela 64 mostra os valores percentuais na comparação das emissões de CO₂ entre os dois sistemas.

Tabela 64: Comparação percentual das emissões no ciclo de vida entre o BRT Transcarioca e a Linha 4 do Metrô.

Segmento	Transcarioca (%)	Linha 4 (%)
Construção da infraestrutura	9,8	49,8
Fabricação dos veículos	10,3	3,7
Operação da infraestrutura	3,2	5,6
Operação dos veículos	72,9	38,7
Manutenção (Infraestrutura + Veículos)	3,8	2,2
Total	100	100

4.8 Aplicação da ferramenta de auxílio à tomada de decisão

Com base no conhecimento apurado na presente pesquisa, bem como na publicação de ANDRADE (2016) sobre a Linha 4 do Metrô também recém construída na mesma cidade, onde as delimitações de escopo foram similares e adotadas com o rigor de dados reais, foi possível alimentar o modelo no bloco “Emissões Produzidas” em condições de comparação que possibilitam entender os impactos de cada uma das fases inerentes à implantação dos sistemas de transporte estudados, bem como conhecer qual modo de transporte se mostra mais favorável do ponto de vista ambiental. Cabe ressaltar que no bloco de “Emissões Evitadas”, a modelagem de dados se deu apoiada na metodologia adotada no item 3.4 da presente pesquisa. Deve-se ressaltar também o maior grau de incerteza dos resultados para o modo VLT, tendo em vista que os dados de cálculo não se apoiaram em dados reais de análise deste sistema de transporte, apenas se justificando para mostrar a flexibilidade da ferramenta em permitir incorporar outros modos para comparações. A ferramenta para uso, bem como a tela contendo a descrição dos dados de cálculo adotados encontram-se no Apêndice 4.

A ferramenta CEMTRANS pode ser validada em seus dados de saída e resultados através da entrada de dados obtidos em toda a pesquisa de ICV aqui realizada para o corredor Transcarioca. A figura 28 mostra a tela da ferramenta contendo os dados de

entrada referentes ao Transcarioca, apresentando no campo “RESULTADOS”, na coluna “BRT”, os dados de saída iguais aos apurados na pesquisa, ou seja, a quantidade de gCO₂/pkm igual a 35,58 e a diferença líquida das emissões igual a -409.380 tCO₂. O dado de saída (1) gCO₂/pkm indica a medida de emissões por passageiro ao final do ciclo de vida referente a cada modo de transporte, já o dado de saída (2) “tCO₂ líquida”, quando precedido de sinal negativo, indica que haverá compensação ambiental pela implantação do sistema se considerado o ciclo de vida. Valores próximos a zero indicarão neutralidade nas emissões, assim como valores positivos indicam que não há previsão de compensação ambiental referente às emissões.

CEMTRANS V1.0						
DADOS DE ENTRADA			DADOS DE SAÍDA			
EMISSIONES PRODUZIDAS			EMISSIONES EVITADAS			
1 Ciclo de vida	40	anos	Construção da Infraestrutura	METRÔ (tCO ₂)	BRT (tCO ₂)	VLT (tCO ₂)
2 Extensão do corredor	39	km	Fabricação dos veículos	1.619.046	124.515	201.714
3 Extensão do trecho percorrido em pontes	3,28	km	Operação dos veículos	957.760	130.488	818.885
4 Quilometragem percorrida por ano	13.243.680	km	Operação da infraestrutura	295.280	928.117	582.858
5 Nº de veículos fabricados no ciclo de vida	640	unidades	Manutenção dos veículos	45.380	40.987	66.399
6 Nº de veículos em operação no corredor	160	unidades	Manutenção da infraestrutura	7.142	26.888	40.332
				46.290	20.830	33.745
			TOTAL (tCO ₂)	2.970.898	1.271.825	1.743.932
7 Demanda total esperada no ciclo de vida	3.384.409.564	passageiros	Passageiro x Quilômetro (pkm)	65.995.986.498	35.742.698.503	26.398.394.599
8 Transferência modal média no ciclo de vida	13,14%	passageiros	Passageiros atraídos no ciclo de vida		444.620.963	
9 % de carros a gasolina fora de circulação	70,30%	carros	Quilômetros evitados no ciclo de vida	6.669.314.445	3.612.027.156	2.667.725.778
10 % de carros a etanol fora de circulação	11,40%	carros	tCO ₂ evitada por gasolina	780.105	422.496	312.042
11 % de carros a GNV fora de circulação	18,30%	carros	tCO ₂ evitada por etanol	167.487	90.709	66.995
12 Quilometragem evitada dos ônibus retirados	1.207.457.784	km	tCO ₂ evitada por GNV	178.565	96.709	71.426
			tCO ₂ evitado por diesel		1.152.291	
			TOTAL (tCO ₂)	2.278.447	1.762.205	1.602.753
DADOS DE ENTRADA			RESULTADOS			
1 - Tempo de ciclo de vida em anos / 2 - Extensão do corredor em km / 3 - Somatório da extensão das pontes construídas em km / 4 - Quilometragem total percorrida pelos veículos por ano / 5 - Quantidade de veículos fabricados ao longo do ciclo de vida / 6 - Quantidade de veículos em operação no corredor / 7 - Demanda total de passageiros no esperada para o ciclo de vida / 8 - Percentual médio da transferência modal esperada / 9 - Estimativa percentual de uso da gasolina dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 10 - Estimativa percentual de uso de etanol dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 11 - Estimativa percentual de uso de GNV dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 12 - Quilometragem evitada pela retirada de ônibus de circulação pela reorganização de linhas.			Modo	METRÔ	BRT	VLT
OBS. Os campos 9, 10 e 11 deverão apresentar soma de 100%.			1 - gCO ₂ /pkm	45,02	35,58	66,06
			2 - tCO ₂ líquida	692.450	-490.380	141.179
INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS: CAMPO 1 - Quanto menor o valor obtido, melhor o desempenho ambiental do sistema. CAMPO 2 - Valores absolutos da emissão líquida. Valores negativos indicam que haverá compensação ambiental. Valores próximos a zero indicam balanço neutro. Valores positivos indicam não haver previsão de compensação ambiental ao longo do ciclo de vida do modo de transporte.						

Figura 28: Tela do usuário do CEMTRANS processando os dados do Transcarioca.

Dessa maneira os dados processados para o Transcarioca mostram o BRT com o menor resultado de gCO₂/pkm e com valor negativo para as emissões líquidas, indicando que um corredor BRT, em comparação com corredores dos outros dois modos de transporte, se mostrou mais eficiente ambientalmente, nas condições de ACV processadas.

Na sequência, a comparação apresentada na figura 29 considera dados de entrada da Linha 4 no bloco “Emissões Produzidas” de acordo com ANDRADE (2016). Já no bloco “Emissões Evitadas”, para o campo “Demanda total esperada no ciclo de vida” esta simulação utilizou valor já conhecido, em detrimento da estimativa realizada na pesquisa de ANDRADE (2016), já que a mesma foi realizada antes do corredor ser

posto em operação. Seguindo estudos de demanda encomendados pelo governo estadual e publicados na imprensa, a Linha 4 transportou em abril de 2017 140.000 passageiros por dia, ou seja, 46,6% menos do que o previsto que era de 300.000 passageiros (O GLOBO, 2017). Contudo, mesmo sendo considerada para a simulação a menor demanda já conhecida, foi aplicado a esse valor um crescimento de 57% ao longo do ciclo de vida, seguindo as projeções futuras indicadas pelos dados levantados de crescimento urbano e sócio econômico, como apontado em ANDRADE (2016), o qual se baseou nos estudos da Fundação Getúlio Vargas, sendo adotado, portanto, a demanda total de 4.747.680.000 passageiros transportados em 60 anos. Os demais dados dos campos do bloco “Emissões Evitadas” foram lançados também de forma conservadora, destacando a “Transferência modal média no ciclo de vida” como 20,00%, e a “Quilometragem evitada dos ônibus retirados” igual a lançada na modelagem do BRT, 1.207.457.784 km. A figura 29 mostra a tela.

CEMTRANS V1.0							
DADOS DE ENTRADA			DADOS DE SAÍDA				
EMISSIONES PRODUZIDAS							
1	Ciclo de vida	60	anos		METRÔ (tCO ₂)	BRT (tCO ₂)	VLT (tCO ₂)
2	Extensão do corredor	14,643	km	Construção da Infraestrutura	607.890	35.618	57.700
3	Extensão do trecho percorrido em pontes	0,565	km	Fabricação dos veículos	44.895	6.117	38.385
4	Quilometragem percorrida por ano	14.107.891	km	Operação dos veículos	471.822	1.483.022	931.338
5	Nº de veículos fabricados no ciclo de vida	30	unidades	Operação da infraestrutura	68.070	61.480	99.598
6	Nº de veículos em operação no corredor	15	unidades	Manutenção dos veículos	1.004	3.781	5.672
				Manutenção da infraestrutura	26.070	11.731	19.005
				TOTAL (tCO ₂)	1.219.751	1.601.749	1.151.698
EMISSIONES EVITADAS							
7	Demanda total esperada no ciclo de vida	4.747.680.000	passageiros	Passageiro x Quilômetro (pkm)	34.760.139.120	18.825.708.023	13.904.055.648
8	Transferência modal média no ciclo de vida	20,00%	passageiros	Passageiros atraídos no ciclo de vida	949.536.000		
9	% de carros a gasolina fora de circulação	60,00%	carros	Quilômetros evitados no ciclo de vida	5.347.713.711	2.896.262.773	2.139.085.484
10	% de carros a etanol fora de circulação	20,00%	carros	tCO ₂ evitada por gasolina	533.871	289.138	213.548
11	% de carros a GNV fora de circulação	20,00%	carros	tCO ₂ evitada por etanol	235.609	127.603	94.244
12	Quilometragem evitada dos ônibus retirados	1.207.457.784	km	tCO ₂ evitada por GNV	156.481	84.749	62.593
				tCO ₂ evitado por diesel		1.152.291	
				TOTAL (tCO ₂)	2.078.252	1.653.781	1.522.675
RESULTADOS							
				Modo	METRÔ	BRT	VLT
				1 - gCO ₂ /pkm	35,09	85,08	82,83
				2 - tCO ₂ líquida	-858.501	-52.032	-370.977
INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS:							
CAMPO 1 - Quanto menor o valor obtido, melhor o desempenho ambiental do sistema.							
CAMPO 2 - Valores absolutos da emissão líquida. Valores negativos indicam que haverá compensação ambiental. Valores próximos a zero indicam balanço neutro. Valores positivos indicam não haver previsão de compensação ambiental ao longo do ciclo de vida do modo de transporte.							
DADOS DE ENTRADA							
1 - Tempo de ciclo de vida em anos / 2 - Extensão do corredor em km / 3 - Somatório da extensão das pontes construídas em km / 4 - Quilometragem total percorrida pelos veículos por ano / 5 - Quantidade de veículos fabricados ao longo do ciclo de vida / 6 - Quantidade de veículos em operação no corredor / 7 - Demanda total de passageiros no esperada para o ciclo de vida / 8 - Percentual médio da transferência modal esperado / 9 - Estimativa percentual de uso da gasolina dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 10 - Estimativa percentual de uso de etanol dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 11 - Estimativa percentual de uso de GNV dentre os carros retirados de circulação pela transferência modal / 12 - Quilometragem evitada pela retirada de ônibus de circulação pela reorganização de linhas.							
OBS. Os campos 9, 10 e 11 deverão apresentar soma de 100%.							

Figura 29: Tela do usuário do CEMTRANS processando os dados da Linha 4.

Nesta simulação apresentada na figura 29 os dados de saída no bloco “Emissões Produzidas” na coluna “METRÔ” mostram o total emitido de 1.219.751 tCO₂, sendo o somatório das emissões de cada fase como em ANDRADE (2016). Os resultados finais mostram que os três modos trariam compensação ambiental, registrando o METRÔ como o mais favorável ambientalmente com -858.501 tCO₂, seguido do VLT com -370.977 tCO₂ e registrando o BRT com o pior desempenho entre os três, quando

considerados dados de entrada conforme a Linha 4 do metrô. Deve-se destacar que o traçado cumprido pela Linha 4 foi compulsoriamente executado quase em sua totalidade de forma subterrânea pelas implicações geográficas existentes, sendo ainda assim indicado pela ferramenta como a opção ambientalmente mais favorável.

Foi realizada também uma simulação para o sistema VLT Rio, em sua Linha 1 (azul), corredor que apresenta 12 km de extensão, localizado na zona portuária da mesma cidade do Rio de Janeiro, o qual faz parte de uma pequena rede desse modo de transporte que soma 28 km no total. Os dados de entrada relativos à demanda, quilometragem percorrida por ano e quantidade de veículos referem-se à previsão da CDURP – Companhia de Desenvolvimento Urbano da Região do Porto Maravilha do Rio de Janeiro. O ciclo de vida arbitrado foi o de 40 anos, como no BRT Transcarioca. Mesmo sem dados sobre a vida útil dos veículos utilizados nesse modo, foi considerada a substituição integral das 25 composições da frota deste corredor no 20º ano, perfazendo o total de 50 veículos fabricados para o ciclo de vida. Foi considerada para a simulação uma transferência modal média de 25%, justificada mais alta por se tratar de uma área central, com históricos problemas de congestionamentos e com alta taxa de viagens com veículos particulares. A quilometragem evitada por ônibus foi determinada como 1.000.000.000 km. A figura 30 mostra a tela da simulação.

CEMTRANS V1.0							
DADOS DE ENTRADA			DADOS DE SAÍDA				
EMISSIONES PRODUZIDAS							
1	Ciclo de vida	40	anos		METRÔ (tCO ₂)	BRT (tCO ₂)	VLT (tCO ₂)
2	Extensão do corredor	12	km	Construção da Infraestrutura	498.168	21.455	34.757
3	Extensão do trecho percorrido em pontes	0	km	Fabricação dos veículos	74.825	10.194	63.975
4	Quilometragem percorrida por ano	8.000.000	km	Operação dos veículos	178.367	560.640	352.082
5	Nº de veículos fabricados no ciclo de vida	50	unidades	Operação da infraestrutura	45.380	40.987	66.399
6	Nº de veículos em operação no corredor	25	unidades	Manutenção dos veículos	1.116	4.201	6.302
				Manutenção da infraestrutura	14.243	6.409	10.383
				TOTAL (tCO ₂)	812.099	643.887	533.898
EMISSIONES EVITADAS							
7	Demanda total esperada no ciclo de vida	2.500.000.000	passageiros	Passageiro x Quilômetro (pkm)	15.000.000.000	8.123.834.584	6.000.000.000
8	Transferência modal média no ciclo de vida	25,00%	passageiros	Passageiros atraídos no ciclo de vida		625.000.000	
9	% de carros a gasolina fora de circulação	60,00%	carros	Quilômetros evitados no ciclo de vida	2.884.615.385	1.562.275.882	1.153.846.154
10	% de carros a etanol fora de circulação	20,00%	carros				
11	% de carros a GNV fora de circulação	20,00%	carros	tCO ₂ evitada por gasolina	287.976	155.964	115.190
12	Quilometragem evitada dos ônibus retirados	1.000.000.000	km	tCO ₂ evitada por etanol	127.090	68.831	50.836
				tCO ₂ evitada por GNV	84.408	45.714	33.763
				tCO ₂ evitado por diesel		954.311	
				TOTAL (tCO ₂)	1.453.785	1.224.821	1.154.101
RESULTADOS							
				Modo	METRÔ	BRT	VLT
				1 - gCO ₂ /pkm	54,14	79,26	88,98
				2 - tCO ₂ líquida	-641.686	-580.934	-620.203
INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS: CAMPO 1 - Quanto menor o valor obtido, melhor o desempenho ambiental do sistema. CAMPO 2 - Valores absolutos da emissão líquida. Valores negativos indicam que haverá compensação ambiental. Valores próximos a zero indicam balanço neutro. Valores positivos indicam não haver previsão de compensação ambiental ao longo do ciclo de vida do modo de transporte.							
OBS. Os campos 9, 10 e 11 deverão apresentar soma de 100%.							

Figura 30: Tela do usuário do CEMTRANS processando os dados do VLT Rio.

Os dados processados para simular o VLT Rio mostram no resultado final este modo de transporte em segundo lugar, com -620.203 tCO₂, sendo o metrô o modo melhor avaliado ambientalmente, com -641.686 tCO₂. Já o BRT aparece como o mais desfavorável do ponto de vista ambiental, uma economia -580.934 tCO₂.

Como visto nas três telas processadas pela ferramenta CEMTRANS, o modo metrô apresentou melhores resultados em 2 simulações. É esperado que resultados favoráveis ao metrô sejam predominantes nas simulações, uma vez que, apesar da alta emissão para a construção da infraestrutura, sua baixa emissão CO₂ para a operação dos veículos, maior capacidade de transporte de passageiros, bem como a maior extensão média por viagem de cada passageiro, registram menor impacto deste modo de transporte quando considerado todo o ciclo de vida. Já a simulação com dados de entrada do corredor Transcarioca apresentaram o metrô em terceiro lugar, fato explicado pela maior extensão do corredor (39 km), a grande quantidade de veículos produzidos e a demanda reduzida.

Os valores de gCO₂/pkm resultantes das simulações apresentam resultados, tanto em suas grandezas, como nas comparações entre modos, equivalência com valores pesquisados na revisão bibliográfica desta presente pesquisa.

Por fim, deve ser novamente destacado o alto grau de incerteza nos resultados para o modo VLT, lembrando que os dados de cálculo utilizados na ferramenta foram estimados referenciados nos dados conhecidos nas análises de ciclo de vida de BRT e metrô.

4.9 Análise de sensibilidade com uso da ferramenta CEMTRANS

Com a ferramenta CEMTRANS desenvolvida é possível realizar uma análise de sensibilidade visando entender melhor as alterações no balanço final em estudos de ACV quando alguns aspectos do estudo são dimensionados a menor ou a maior do que o esperado nas projeções de planejamento. O estudo da sensibilidade a seguir foi realizado no corredor Transcarioca, objeto da presente Tese, utilizando a ferramenta para uma análise comparativa dos dados alterados para a demanda, transferência modal, construção de pontes e também para a quilometragem evitada por ônibus em virtude da

reorganização de linhas, lembrando que cada um dos dados de entrada da ferramenta pode ser alterado em conjunto ou separadamente, oferecendo uma grande quantidade de estudos possíveis.

4.9.1 Sensibilidade pela demanda

A demanda esperada para o corredor Transcarioca ao longo do seu ciclo de vida é 3.384.409.564 passageiros, como registrado no quadro 9. Para uma demanda menor, foi admitido volume de passageiros sem considerar o crescimento aplicado ao cálculo da pesquisa, resultando, portanto, em 2.397.922.471 passageiros, ou - 29%. Para uma demanda maior, foi admitida a previsão da SMTR ainda na fase de planejamento e construção do corredor, a qual dava conta de que o Transcarioca viria a transportar 320.000 passageiros por dia, o que daria 4.672.000.000 passageiros ao longo do ciclo de vida, o que representa + 38% do valor de referência. Mantidos os demais valores de entrada e alterando apenas os dados da demanda, o volume de emissões líquidas de tCO₂ mostra a sensibilidade de acordo com tabela 65.

Tabela 65: Sensibilidade por alteração da demanda.

Demanda de passageiros		tCO ₂ líquida	Variação Ganho (+) Perda (-)
Pesquisa (valor referência)	3.384.409.564	- 490.380	
Estimada a menor	2.397.922.471	- 312.602	- 64%
Estimada a maior	4.672.000.000	- 722.420	+ 47%

O resultado mostra maior sensibilidade na diferença de tCO₂ quando a demanda é diminuída, indicando que o volume de passageiros a ser transportado no sistema tem alta relevância no balanço final de um estudo de ACV.

4.9.2 Sensibilidade pela transferência modal

A transferência modal média para o ciclo de vida adotada na pesquisa do Transcarioca, resultante de metodologia que atribui crescimento ao longo dos primeiros 20 anos, foi de 13,14%. Para compor um cenário mais desfavorável, a simulação com esse dado de entrada a menor, foi imaginada uma transferência modal sem crescimento ao longo do tempo, permanecendo, portanto, em 4% nos 40 anos do corredor. Já para o dado a

maior, foi adotada uma transferência modal de 39%, imaginando um crescimento proporcional igual ao do valor adotado a menor, ou seja, aproximadamente 3 vezes o valor de referência. Mantidos os demais valores de entrada e alterando apenas os dados da transferência modal, o volume de tCO₂ líquida mostra a sensibilidade de acordo com tabela 66.

Tabela 66: Sensibilidade por alteração da transferência modal.

Transferência modal		tCO ₂ líquida	Variação Ganho (+) Perda (-)
Pesquisa (valor referência)	13,14%	- 490.380	
Estimada a menor	4%	- 66.170	- 86%
Estimada a maior	39%	- 1.691.082	+ 245%

O resultado para esta simulação mostra maior sensibilidade na diferença de tCO₂ quando a transferência modal é aumentada, indicando a expressiva contribuição nos resultados finais da ACV em virtude dos veículos que deixaram de circular pela implantação do sistema de transporte.

4.9.3 Sensibilidade pela construção de pontes na infraestrutura

Deve-se ressaltar que tal elemento de projeto pode apresentar impactos distintos dos estudados na presente pesquisa, qual seja, o cômputo das emissões associadas à sua construção, caso seja considerada a hipotética análise de um novo corredor projetado em grande parte ou em sua totalidade de forma suspensa, o que provocaria a necessidade de analisar as alterações no tráfego existente, seus congestionamentos e a alteração urbana ao longo do tempo de estudo do ciclo de vida.

Visando investigar o impacto nas emissões produzidas apenas pela construção de pontes necessárias à infraestrutura, foi realizada simulação com variação no dado de entrada que solicita a quilometragem do corredor percorrido por estas estruturas. O valor de referência desse dado no Transcarioca é de 3,28 km. Foi adotado para o dado a menor o valor zero, ou seja, imaginando a inexistência dessas obras de arte no corredor. Para o valor a maior foi adotado o dobro do valor de referência, ou seja, 6,56 km. Mantidos os demais valores de entrada e alterando apenas o dado referente à extensão do trecho

percorrido em pontes, o volume de tCO₂ líquida mostra a sensibilidade de acordo com tabela 67.

Tabela 67: Sensibilidade por alteração da extensão das pontes construídas.

Trecho percorridos em pontes (km)		tCO ₂ líquida	Variação Ganho (+) Perda (-)
Pesquisa (valor referência)	3,28	- 490.380	
Estimada a menor	0	- 545.166	+ 10%
Estimada a maior	6,56	- 434.594	- 13%

Os resultados da simulação mostram variação discreta para os dados alterados adotados nesta simulação, revelando o impacto dessas estruturas nos resultados finais de uma ACV, tendo como referência a emissão de CO₂. Com a utilização da ferramenta pode ser também simulado um corredor integralmente suspenso, como por exemplo a de um traçado construído sobre uma via expressa já existente.

4.9.4 Sensibilidade pela quilometragem evitada por ônibus a diesel em função da reorganização de linhas

Reconhecido na pesquisa como importante item de impacto nas emissões evitadas, pelo grande volume de combustível e baixo rendimento desses veículos em comparação aos demais, a quilometragem evitada por ônibus movidos a diesel pode também mostrar os resultados de acordo com simulação que altere esse dado de entrada na ferramenta, podendo ser avaliado os resultados finais da ACV. Tendo como base a simulação feita para o Transcarioca, o dado a menor neste campo foi adotado como zero, imaginando que não foi realizada a reorganização das linhas existentes na região onde foi implantado o corredor. Para o dado a maior foi adotado valor 50% maior do que o valor de referência. Mantidos os demais valores, a tabela 68 mostra os resultados.

Tabela 68: Sensibilidade pela quilometragem evitada por ônibus à diesel.

Quilometragem evitada por ônibus à diesel (km)		tCO ₂ líquida	Varição Ganho (+) Perda (-)
Pesquisa (valor referência)	1.207.457.784	- 490.380	
Estimada a menor	0	+ 661.911	- 234%
Estimada a maior	1.811.186.676	- 1.066.525	+ 117%

Os resultados mostram que há um expressivo impacto da reorganização de linhas e seu consequente impacto na quilometragem evitada por diesel nos resultados finais de uma ACV. O não replanejamento do sistema de transporte como um todo após a implantação do corredor Transcarioca poderia ter resultado na não compensação ambiental pela implantação do BRT, apresentando ainda valor líquido positivo de 661.911 tCO₂. Por outro lado, uma maior economia de diesel caso uma reorganização indicasse quilometragem evitada por ônibus 50% maior, poderia trazer resultados ainda mais favoráveis, com um acréscimo de 576.145 tCO₂ com relação ao valor de referência.

Por fim, deve-se destacar que a ferramenta CEMTRANS pode ser utilizada para medir a sensibilidade pela alteração de mais de um dado de entrada. A combinação de alterações impostas em mais de um dado de entrada permite um grande arranjo de combinações a serem simuladas, favorecendo o conhecimento das variações associadas aos aspectos relacionados num estudo de ACV para sistemas de transporte.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

A pesquisa apoiada num estudo de ciclo de vida aplicado em sistemas de transportes permite maior conhecimento das emissões de CO₂ relacionadas às fases componentes de todo o sistema. Essa visão ampliada permitiu a elaboração de ferramenta que possibilita, de forma antecipada, mensurar os impactos positivos e negativos quando da implantação de um corredor de transporte, sendo esta, portanto, a maior contribuição do trabalho aqui apresentado, servindo para o avanço sobre o tema que trata das emissões associadas a sistemas de transporte. Ainda que haja limitações na pesquisa, sobretudo pelas inúmeras possibilidades de se aproximar ainda mais dos detalhes de cada aspecto relacionado a um estudo de ciclo de vida, a possibilidade de se ter o volume produzido e evitado de emissões de CO₂ previamente calculado em ordem de grandeza comparável entre modos de transporte deve ajudar na tomada de decisão de gestores interessados em conhecer os impactos provocados por um novo corredor projetado, permitindo conhecer além das emissões apenas associadas à operação do sistema. A ferramenta elaborada utilizou um conjunto de resultados referentes às emissões obtidas nesta pesquisa, bem como na pesquisa de ANDRADE (2016) sobre a Linha 4 do metrô, a qual apresentou método de mesma natureza para seus resultados. De forma complementar, o melhor entendimento de todo o processo deve contribuir para a escolha de elementos de projeto e planejamento que possam contribuir para a redução das emissões de CO₂.

Este trabalho teve como foco o conhecimento associado às emissões de CO₂ por sistemas BRT, propondo um procedimento de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) genérico que cobrisse os principais elementos componentes de sua atividade ao longo de período estipulado, visando a coleção de dados que permitissem um processamento posterior visando uso numa ferramenta de auxílio à tomada de decisão. O procedimento ICV proposto nesta pesquisa foi aplicado no corredor Transcarioca do Rio de Janeiro sob uma abordagem que se debruçou aos cálculos individuais das fontes de emissões, sem a utilização de banco de dados existentes para obter resultados para esse fim, como tradicionalmente é feito. Dessa maneira pôde-se alcançar resultados mais fiéis à realidade brasileira, uma vez que banco de dados e softwares existentes foram desenvolvidos com base em realidades diferentes das encontradas no Brasil. A abordagem adotada para o ICV foi a coleta de dados diretamente com a fiscalização da

obra, responsável pela construção da infraestrutura, bem como também diretamente com os operadores do sistema, onde buscou-se por dados reais e informações mais precisas dos recursos e forma de operação, diminuindo substancialmente a necessidade de estimativas. Para a determinação das emissões evitadas, o procedimento aplicado utilizou dados do próprio operador do sistema, bem como do ITDP Brasil para estimar a evolução da transferência modal, permitindo apurar valores com baixo índice de incerteza, considerando que dados reais de demanda e de pesquisa com o usuário do sistema foram utilizados.

A construção do corredor Transcarioca produziu considerável volume de CO₂, calculado em 124,5 mil toneladas. Esse valor representa 3.192 tCO₂ por quilômetro construído, tendo como uso mais intenso o aço e o concreto, 49,4 mil tCO₂ e 44,4 mil tCO₂ respectivamente. Para a realização do traçado foi necessária a construção de 6 pontes, as quais somadas perfazem 3,28 quilômetros de extensão, sendo estas responsáveis por 44% das emissões relativas à obra da infraestrutura, ou 35,3 mil tCO₂, contra apenas 7,5 mil tCO₂ do aço utilizado nas estações e 3,6 mil tCO₂ do aço empregado nas pistas. A mitigação das emissões provenientes da construção da infraestrutura pode ter como fator de mitigação em análises futuras a determinação de traçados que minimizem a construção dessas estruturas, ou mesmo que se racionalize o consumo de recurso para suas construções. Outra possibilidade para a mitigação das emissões na construção da infraestrutura é na otimização das máquinas pesadas e equipamentos nos canteiros de obra, uma vez que estes segmentos foram responsáveis pela emissão de 21 mil tCO₂. O segmento de transporte de materiais para as obras, apesar de menos expressivo no contexto da construção da infraestrutura, apenas 8,7 tCO₂, apresenta potencial para mitigação das emissões, considerando que possa ser evitado o uso de chapas de aço importadas, o qual representou 40% desse segmento, 3,5 tCO₂.

No ciclo de vida de 40 anos a operação dos veículos foi o segmento de maior relevância, com 928 mil tCO₂, responsável por 72,97% das emissões. Outro segmento a ser destacado fica por conta da fabricação dos ônibus, o qual representou 130 mil tCO₂, ou 10,26 % das emissões produzidas. Segmentos de operação da infraestrutura, manutenção dos veículos e da infraestrutura aparecem com menos de 3,5%, revelando o pequeno impacto, no cômputo geral, de suas emissões no ciclo de vida.

A pesquisa apurou o valor de 35,58 gCO₂/pkm, indicando que o corredor Transcarioca apresentou valor de grandeza média, se comparado com outros resultados dessa medida em outros estudos para esse modo de transporte.

Um procedimento para determinação da emissão evitada por um sistema BRT foi aplicado utilizando-se do fator *mode shift*, tendo como objetivo a quantificação das emissões evitadas advindas da retirada de veículos das ruas, supondo a atração que o corredor Transcarioca tenha provocado sobre usuários de meios de transporte mais poluentes. Dessa forma, identificando o acúmulo ano a ano das emissões produzidas e das emissões evitadas pôde-se conhecer o ponto onde a emissão evitada acumulada compensa a emissão produzida acumulada. Esse ponto ocorre 16 anos após a implantação do sistema, o que significa que após esse prazo haverá um ganho líquido de emissão evitada.

O desenvolvimento deste trabalho foi incentivado pela pesquisa realizada para a Linha 4 do metrô realizada por ANDRADE (2016). Porém, apesar de ter escopo e metodologias similares, o presente trabalho apresenta detalhamento maior em alguns aspectos trabalhados, como por exemplo, nos dados referentes às fases do ICV, possibilitando inclusive a identificação do impacto das obras de arte na fase de construção da infraestrutura. Já na metodologia para conhecimento das emissões evitadas, o maior detalhamento se deu em função da incorporação de estudo sobre o reordenamento de linhas no sistema de transporte público existente, resultando em maior precisão nos aspectos relacionados. Foi também conseguido menor grau de incerteza no que se refere aos dados sobre a demanda, uma vez que o presente trabalho dispôs da quantidade real de passageiros transportados nos primeiros anos de operação do corredor, diferente da pesquisa sobre a linha 4, a qual foi finalizada antes do sistema ter sido colocado em operação.

Porém o maior avanço com referência à pesquisa de ANDRADE (2016) foi o desenvolvimento da ferramenta CEMTRANS, a qual se valeu dos dados apurados na pesquisa sobre o ciclo de vida do metrô, resultando, portanto, num avanço geral para a compreensão do tema pela possibilidade de análise comparativa com os dados apurados na presente pesquisa.

As comparações resultantes ao final da pesquisa indicam que o sistema metroviário apresenta maior emissão na fase de construção da infraestrutura, compensando essa característica desfavorável com uma operação mais limpa de veículos. Inversamente, o sistema BRT apresenta menor impacto pelas emissões na construção da infraestrutura, porém registra desvantagens dadas as emissões mais poluentes ao longo do ciclo de vida, especialmente no que diz respeito à operação dos veículos.

Com o conhecimento dos dados de dois trabalhos realizados pela metodologia de ACV em dois modos de transportes distintos, a ferramenta CEMTRANS foi validada com os dados do Transcarioca e se mostrou eficiente nas simulações feitas para se medir a sensibilidade pela alteração dos dados de entrada, permitindo conhecer identificar as possibilidades de simulações visando apurar os impactos específicos de elementos constituintes do projeto e da operação.

5.2 Recomendações

Nos aspectos relacionados à análise do ciclo de vida, recomenda-se que novas pesquisas possam relacionar as implicações do aumento de CO₂ para atmosfera não só voltado para as questões climáticas, como também aos aspectos de saúde pública, socioeconômicos, bem como para o tecido urbano onde os corredores de transporte se inserem. Da mesma forma, espera-se que trabalhos com maior abrangência possam considerar os aspectos relacionados à obtenção dos insumos necessários à fabricação e refino na cadeia dos combustíveis, visando investigar se há o registro de impactos significativos nos resultados dessas atividades no curso do ciclo de vida.

Recomenda-se que trabalhos futuros possam incorporar à ferramenta pesquisa de dados relativos a um sistema VLT, visando aferir com menor grau de incerteza os dados de saída alcançados nessa primeira versão. Novas análises de ciclo de vida também poderiam incluir no escopo a reciclagem e do fim de vida, aspectos que não foram estudados na presente pesquisa. Outros gases do efeito estufa poderiam ser incluídos, denotando maior abrangência nos aspectos relacionados às emissões.

Recomenda que outras metodologias para conhecimento da emissão evitada possam ser investigadas em trabalhos futuros. O fator *congestion relief* e *land use* podem ser

investigados na associação com as análises de ciclo de vida, o que permitirá entender impactos não mensurados na pesquisa aqui realizada, como por exemplo, aspectos relacionados às modificações impostas à malha urbana e as interações sociais decorrentes da implantação de novos corredores de transporte. Dessa forma, o dado de entrada “quilômetros percorridos em pontes” deve ser melhor investigado sob este aspecto urbano, uma vez que na hipótese de um corredor totalmente construído de forma suspensa, este deverá apresentar elementos de impacto diferentes, sobretudo na conformação do tráfego, que podem interferir no cálculo final das emissões, necessitando, portanto, de uma melhor investigação e lançamento para dado de cálculo existente para esse aspecto, nessa primeira versão da ferramenta CEMTRANS.

Através do acesso aos dados de cálculo utilizados, espera-se o aperfeiçoamento da ferramenta através de novos fatores de cálculo obtidos em futuras pesquisas de ACV, visando dirimir ao máximo distorções pela maior abrangência encontrada nessa primeira versão da ferramenta. Espera-se também que o maior rigor e abrangência ao incorporar novos modos de transporte possa atrair ao longo do tempo os gestores públicos ao seu uso, consolidando uma maior integração entre centros de pesquisa e governos, favorecendo o estabelecimento de diretrizes futuras para novos projetos que primassem pela baixa emissão de carbono, alinhando-se assim com a comunidade internacional no reconhecimento da importância da redução das emissões de CO₂.

É importante destacar que a ferramenta deve ser usada com o conhecimento das relações entre projeções de demanda e dimensionamento da oferta de um corredor, conferindo dessa forma coerência nos dados para que não haja distorções nos resultados obtidos. Recomenda-se, portanto, que os gestores ao utilizarem a ferramenta, possam estimar de forma coerente a demanda com referência à quantidade, capacidade e intervalos dos veículos escolhidos para o modo de transporte.

Por fim, o autor espera que este trabalho venha a contribuir e incentivar em nosso país uma expansão de pesquisas de ciclo de vida em transportes e, consequentemente, ampliar o conhecimento dos impactos destes ainda na fase de planejamento, permitindo assim, de forma mais ampla, adotar meios para mitigar as emissões em contribuição com ações para conter o aquecimento global.

BIBLIOGRAFIA

- 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 D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ANP, 2014, *Anuário Estatístico de 2014*. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/2439-anuario-estatistico-2014>.
- ANTP / VOLVO, 2016, *Impactos ambientais da substituição dos ônibus urbanos por veículos menos poluentes - 1ª edição - AB Volvo 2016*. Curitiba, PR.
- APTA, 2009, *Recommended practices for quantifying greenhouse gas emissions from transit*. American Public Transportation Association. Washington, DC., USA.
- APTA. 2014, *Fact book glossary*. American Public Transportation Association. Washington, DC., USA.
- ARAÚJO, A., 2017, “Informações sobre construção da infraestrutura do corredor Transcarioca”. Comunicação pessoal fiscalização de contrato da Secretaria Municipal de Obras do Rio de Janeiro – SMO.
- BIANCHI, F.; BRITO, I. e CASTRO, V., 2013, “Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível”. 3º Congresso de Iniciação Científica do Centro Universitário do Distrito Federal, Vol. 1 – Nº 1 Brasília, Nov.
- BENHELAL, E., ZAHEDI, G., SHAMSAEI, E., BAHADORI, A., 2013, Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142–161.
- BOMBARDIER, 2014, *Environmental Product Declaration for INNOVIA APM 300*. Reg. no. S-P-00193. Montreal, Canadá.

- CATERPILLAR, 2015, *Boletim informativos 02/2015* - 1ª Edição. São Paulo, SP. Editora Prisma 2015.
- CATERPILLAR, 2000, *Manual de Produção Caterpillar* - 31ª Edição. Peoria, Illinois - USA. Editora Caterpillar Inc. 2000
- CARDOSO, A., 2017, “Informações sobre operação e planejamento do sistema VLT Rio”. Comunicação pessoal assistente de operações, Companhia de Desenvolvimento Urbano da Região do Porto Maravilha do Rio de Janeiro - CEDURP.
- CHANG, B. e KENDALL, A., 2011, Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California’s high-speed rail system. *Transportation Research Part D*, v. 16, p. 429-434.
- CHESTER, M., 2008, *Life-cycle environmental inventory of passenger transportation in the United States*. Tese de D.Sc., Universidade da Califórnia, Berkeley, USA.
- CHESTER, M. e HORVATH, A., 2009a, “Life-cycle energy and emissions inventory for motorcycles, diesel, automobiles, school buses and metropolitan rails.” In IDEAS - Federal Reserve Bank of St. Louis, USA.
- CHESTER, M. e HORVATH, A., 2009b, Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 2009, v 4 no. 2.
- CHESTER, M. e HORVATH, A., 2010a, Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California. *Environmental Research Letters*, 2010, v 5 pp.45-68.
- CHESTER, M., HORVATH, A. e MADANAT, S., 2010b, Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions. *Atmospheric Environment*, 2010, v 44 pp.1071-1079.

- CHESTER, M.; EISENSTEIN, W.; PINCETL, S.; ELIZABETH, Z.; MATUTE, J. e BUNGE, P., 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.; EISENSTEIN, W.; PINCETL, S.; ELIZABETH, Z. e MATUTE, J., 2013, Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. *Environmental Research Letters* v8, 2013.
- CNT, 2016, *Boletim estatístico – Pesquisa CNT de rodovias 2016 - 10ª Edição*. Curitiba, PR. Editora Prisma 2016.
- COPPETEC, 2011, *Inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores do Estado do Rio de Janeiro*. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. Rio de Janeiro, RJ.
- COPPETEC, 2015, *Comparativo de consumo de combustível entre ônibus equipados com aparelhos de ar condicionado e ônibus convencionais*. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos.
- CUI, S.; NIU, H.; WANG, W.; ZHANG, G.; GAO, L.; LIN, J., 2010, Carbon footprint analysis of the Bus Rapid Transit (BRT) system: a case study of Xiamen City. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. Vol. 17, No. 4, 2010, p.329–337.
- D'AGOSTO, M. A., 2004, *Análise da eficiência da cadeia energética para as principais fontes de energia utilizadas em veículos rodoviários no Brasil*. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- DETRAN/RJ, 2017, “Dados estatísticos da frota de veículos por tipo de combustível”. Disponível em: http://detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/07.asp. Acesso em 29/05/2017.

- DNIT, 2004, *Manual de pavimentos rígidos*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR
Publicação 714. Brasília, DF.
- EPD, 2014, Environmental product declaration. International EPD System. SE-100 31 -
Estocolmo, Suécia.
- EPD, 2016, Public and private buses and coaches – Product category rules 2016:04.
Estocolmo, Suécia.
- EPE, 2013, *Balanço energético nacional de 2012*. Empresa de Pesquisa Energética.
Brasília, DF.
- EPE, 2016, Balanço energético nacional de 2015. Empresa de Pesquisa Energética.
Publicação 011/16. Brasília, DF.
- EPE, 2016, Anuário estatístico de Energia Elétrica. Empresa de Pesquisa Energética.
Publicação 025/16. Brasília, DF.
- FAULHABER e NACIF, 2012, *Rio Maravilha: desapropriações, remoções e reforço
do padrão de organização espacial centro-periferia no Rio de Janeiro*. 1ª Edição
- Rio de Janeiro, RJ.
- FDT, 2008, Conserve by transit: Analysis of the energy consumption and climate
change benefits of transit. Florida Department of Transportation. Florida, USA.
- FTA, 2010, Public Transportation's Role in Responding to Climate Change. Federal
Transit Administration. Washington, DC, USA.
- GUO, B.; GENG, Y.; FRANKE, B.; HAO, H.; LIU, Y.; CHIU, A., 2014, Uncovering
China's transport CO₂ emission patterns at the regional level. *Energy Police*, v74,
2014, p. 134-146.
- HANSON, C.; NOLAND, R. B. e CAVALE, K. R., 2012, Life-Cycle Greenhouse Gas
Emissions of Materials Used in Road Construction. *Transportation Research*

Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2287, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., 2012, pp. 174–181.

ICE, 2011, *Inventory of carbon and energy*. University of Bath, Inglaterra, Reino Unido.

IEA, 2007, *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions*. International Energy Agency. Paris, França.

IEA, 2009, *Transport, energy and CO₂*. International Energy Agency. Disponível em <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>. Acesso em 10/10/2016.

INAMURA, H.; PIANTANAKULCHAI, M. e TAKEYAMA, Y., 2000, A Life Cycle Inventory Analysis of Carbon Dioxide for a Highway Construction Project Using Input-Output Scheme: A Case Study of the Tohoku Expressway Construction Works.

IPCC, 2014a, *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014 – Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.

IPCC, 2014b, *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. Intergovernmental panel on climate change, 2014.

IPEA, 2011, *Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, DF.

ISO, 2009, ISO 14040:2009 *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Organização Internacional para Padronização.

- ITDP, 2012, *Impact Analysis of Transoeste Bus Rapid Transit System in Rio de Janeiro*. Institute for Transportation & Development Policy. New York, USA.
- ITDP, 2015, *Análise de Impacto do BRT Transcarioca na Mobilidade Urbana do Rio de Janeiro*. Institute for Transportation & Development Policy. Rio de Janeiro, RJ.
- KAFER, T., 2017, “Dados sobre tecnologias e processo produtivo do veículo articulado”. Comunicação pessoal gerência de produção e suprimentos da empresa Neobus Ônibus Ltda.
- LIMA, J. A. R., 2010 *Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as condições climáticas*. Tese D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.
- LISBOA e-NOVA, 2010, *Uma estratégia energético ambiental para a cidade de Lisboa*. Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa. Lisboa, Portugal.
- LU, 2009, *London Underground carbon footprint*. London Underground. London, UK.
- MA, 2012, Mistura carburante automotiva (Etanol anidro/Gasolina) – Cronologia. Ministério da Agricultura. Brasília, DF.
- MACHADO, C. L., 2016, “Contribuição dos corredores BRT para as políticas governamentais sobre as mudanças climáticas na ótica da redução de CO₂ no Rio de Janeiro”. XXX Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro, Nov.
- MCTI, 2010, *Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases do efeito estufa*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília, DF.
- MCTI, 2014, *Estimativas Anuais de Emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília, DF.

- MERCEDES BENZ, 2013, “Relatório de Sustentabilidade”. Disponível em <https://www.mercedes-benz.com.br/institucional/sustentabilidade/relatorio-de-sustentabilidade>. Acesso em 18/11/2016.
- MILIUTENKO, S., 2012, *Life cycle impacts of road infrastructure – Assessment of energy use and greenhouse gas emissions*. Disponível em <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:503911/FULLTEXT01>.
- MILIUTENKO, S., 2013, Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. *Journal of Cleaner Production*. v. 43, p. 156–165.
- MMA, 2013, *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários*. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF.
- MORITA, Y.; YAMASAKI, T.; SHIMIZU, K.; KATO, H. e SHIBAHARA, N., 2011, A Study on Greenhouse Gas Emission of Urban Railway Projects in Tokyo Metropolitan Area. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v.8.
- MTA, 2009, *Impact of public transportation on GHG in the MTA area*. Metropolitan Transport Authority. New York, USA.
- MTA, 2013, Sustainability report. Metropolitan Transport Authority. New York, USA.
- NREL, 2006, *Analysis of connected and automated vehicle technologies highlights uncertainty in potential effects on fuel use*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado, USA.
- OLIVEIRA, G. T.; 2012, ANDRADE, C. E. S.; JUNIOR, I. C. L.; NASSI, C. D., 2012, “Redução de emissões de dióxido de carbono com a implementação do BRT Transoeste na cidade do Rio de Janeiro”. XXVI Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, Joinville, SC, Out.

- O GLOBO, 2017, “Média de passageiros da linha 4 do metrô é 46% abaixo da esperada”. Disponível em <https://oglobo.globo.com/rio/media-de-passageiros-da-linha-4-do-metro-46-abaixo-da-esperada-21214768#ixzz4q7Ue0wBR>. Acesso em 17/05/2017.
- PlaNYC, 2007, *A greener, greater New York. New York City Plan Reducing Greenhouse Gas Emissions*. New York, USA.
- RABENSCHLAG, 2013, “Análise da viabilidade econômica do uso de GNV em frota de taxi”. IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Rio de Janeiro, RJ, Jun.
- RATP, 2017, “Bus: offre renforcée sur cinq lignes en Île-de-France”. Disponível em: <https://www.ratp.fr/en/node/7208>.
- ROCHA, M., 2016, “Informações sobre atuação do consórcio Transcarioca”. Comunicação pessoal assistente de operações do Consórcio Transcarioca S/A.
- STRIPPLE, H., 2001, *Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis*. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden.
- SUTP, 2008, “Recent development in Bus Rapid Transit”. In *Cities for Mobility World Congress*, Stuttgart, Jun.
- TERI, 2012, *Life cycle analysis of transport modes New Delhi*. The Energy and Resources Institute. New Delhi, India.
- TOGNOZZI, M., 2017, “Informações sobre operação, planejamento e manutenção do corredor Transcarioca”. Comunicação pessoal assessoria de gestão da diretoria de operações da Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro – SMTR.
- VIEIRA, P., 2017, “Informações sobre a operação e manutenção dos veículos e das garagens”. Comunicação pessoal gerência de operações e gerência de manutenção da Viação Redentor Ltda.

VOLVO, 2011, *Environmental Product Declaration for Volvo B340M*. 6ª Edição do Volvo Sustainable Mobility Awards. Gotemburgo, Sweden.

TFL, 2010, *Environment Report 2010*. Transport for London. London, UK.

WILHEM, W., 2017, “Informações sobre a tecnologia e processo produtivo do chassis de ônibus articulado”. Comunicação pessoal assistente da divisão de produção da empresa Volvo do Brasil veículos Ltda.

WORLDSTEEL, 2014, *Steel's contribution to a low carbon future*. Worldsteel Association. Bruxelas, Begium.

WRI, 2014, *GHG Protocol*. World Resources Institute. Washington, D.C., USA.

WRI BRASIL, 2016, *O Legado das Olimpíadas do Rio de Janeiro: a mobilidade urbana*. Porto Alegre, RS.

APÊNDICE 1 – CÁLCULOS DE EMISSÕES PRODUZIDAS E ENERGIAS

A) CONSTRUÇÃO DA INFRAESTRUTURA

1) Transporte fornecedores de aço e componentes para concreto

a) Transporte de materiais para pistas (aço para consumo) -> Emissões

2011	distância (Km)	40.342	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	15.456,70			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	38,18				

2012	distância (Km)	62.120	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	23.800,77			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	58,79				

2013	distância (Km)	81.340	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	31.164,75			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	76,98				

2014	distância (Km)	31.399	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	12.030,27			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	29,51				

total 203,45 tCO₂

distância total (km) 215.201

consumo diesel total (l) 82.452,49

b) Transporte de materiais para pistas (aço para consumo) -> Energia

2011	distância (Km)	40.342	divide					
	rend veíc (km/l)	2,61						
	litros	15.456,70						
			densid energia diesel	35,50			multipl	soma
			parcela renovável	0,95				
			densid energia biodiesel	33,14			multipli	
			parcela renovável	0,05				
		resultado	35,38					
MJ	546.889,14							

2012	distância (Km)	62.120	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	23.800,77				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipli	
			parcela renovável	0,05		
		resultado	35,38			
MJ	842.118,71					

2013	distância (Km)	81.340	divide					
	rend veíc (km/l)	2,61						
	litros	31.164,75						
			densid energia diesel	35,50			multipl	soma
			parcela renovável	0,95				
			densid energia biodiesel	33,14			multipl	
			parcela renovável	0,05				
			resultado	35,38				
MJ	1.102.671,22							

2014	distância (Km)	31.399	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	12.030,27				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
MJ	425.464,73					

total 2.917.143,79 MJ

sendo a energia renovável 139.294,95 MJ

c) Transporte de materiais para pistas (concreto à usar) -> Emissões

2011	distância (Km)	136.716	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	52.381,61			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	129,38				

2012	distância (Km)	334.494	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	128.158,62			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	316,55				

2013	distância (Km)	337.441	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	129.287,74			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	319,34				

2014	distância (Km)	349.047	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	133.734,48			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	327,99				

total 1.093,27 tCO₂

distância total (km) 1.157.698

consumo diesel total (l) 443.562,45

d) Transporte de materiais para pistas (concreto à usinar) -> Energia

2011	distância (Km)	136.716	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	52.381,61				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipli	
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ	1.853.366,10					

2012	distância (Km)	334.494	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	128.158,62				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipli	
			parcela renovável	0,05		
		resultado	35,38			
MJ	4.534.508,32					

2013	distância (Km)	337.441	divide					
	rend veíc (km/l)	2,61						
	litros	129.287,74						
			densid energia diesel	35,50			multipl	soma
			parcela renovável	0,95				
			densid energia biodiesel	33,14			multipl	
			parcela renovável	0,05				
		resultado	35,38					
MJ	4.574.458,80							

2014	distância (Km)	349.047	divide					
	rend veíc (km/l)	2,61						
	litros	133.734,48						
			densid energia diesel	35,50			multipl	soma
			parcela renovável	0,9433				
			densid energia biodiesel	33,14			multipl	
			parcela renovável	0,0567				
	resultado			35,37				
MJ	4.729.678,86							

total 15.692.012,07 MJ

sendo a energia renovável 764.677,12 MJ

2) Transporte em betoneiras de concreto usinado para pistas

a) Transporte do concreto usinado -> Emissões

2011	distância (Km)	4.064	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	1.557,09			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
		resultado		0,00247	
tCO ₂	3,85				

2012	distância (Km)	21.130	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	8.095,79			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
		resultado	0,00247		
tCO ₂	20,00				

2013	distância (Km)	18.014	divide		multipl
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	6.901,92			
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	
		resultado		0,00247	
tCO ₂	17,05				

2014	distância (Km)	26.969	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	10.332,95			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	25,34				

total 66,23 tCO₂

distância total (km) 70.177

consumo diesel total (l) 26.887,74

b) Transporte do concreto usinado -> Energia

2011	distância (Km)	4.064	divide			soma
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	1.557,09				
			densid energia diesel	35,50	multipl	
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipli	
			parcela renovável	0,05		
		resultado	35,38			
MJ	55.092,89					

2012	distância (Km)	21.130	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	8.095,79				
			densid energia diesel	35,50	multipl	
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipli	soma
			parcela renovável	0,05		
		resultado	35,38			
MJ	286.445,08					

2013	distância (Km)	18.014	divide				
	rend veíc (km/l)	2,61					
	litros	6.901,92					
			densid energia diesel	35,50		multipl	soma
			parcela renovável	0,95			
			densid energia biodiesel	33,14		multipl	
			parcela renovável	0,05			
			resultado	35,38			
MJ	244.203,58						

2014	distância (Km)	26.969	divide		soma
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	10.332,95			
		densid energia diesel	35,50	multipl	
		parcela renovável	0,9433	multipl	
		densid energia biodiesel	33,14		
		parcela renovável	0,0567		
	resultado	35,37			
MJ	365.437,06				

total 951.178,61 MJ

sendo a energia renovável 46.847,29 MJ

3) Combustíveis para funcionamento do canteiro de obras

a) Transporte de combustível para abastecimento de 2 postos nos canteiros-base -> Emissões

2011	horas consumo de diesel	458
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	6.027,28

2012	horas consumo de diesel	1.195
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	15.726,20

2013	horas consumo de diesel	1.569
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	20.648,04

2014	horas consumo de diesel	1.308
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	17.213,28

total de litros (diesel) 59.614,80

2011	litros	6.027,28			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	14,89	

2012	litros	15.726,20			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	38,84	

2013	litros	20.648,04			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	51,00	

2014	litros	17.213,28			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	42,22	

total 146,95 tCO₂

b) Transporte de combustível para abastecimento de 2 postos nos canteiros-base -> Energia

2011	litros	6.027,28				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ		213.257,22				

2012	litros	15.726,20				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ		556.424,41				

2013	litros	20.648,04				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ		730.568,95				

2014	litros	17.213,28				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
MJ		608.768,10				

total 2.109.018,68 MJ

sendo a energia renovável 102.603,73 MJ

c) Transporte de combustível do posto na base à máquinas e equipam nos locais de atividade -> Emissões

2011	horas consumo de diesel	1.658
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	21.819,28

2012	horas consumo de diesel	2.274
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	29.925,84

2013	horas consumo de diesel	3.100
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	40.796,00

2014	horas consumo de diesel	4.882
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	64.247,12

total de litros (diesel) 156.788,24

2011	litros	21.819,28			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	53,89	

2012	litros	29.925,84			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	73,92	

2013	litros	40.796,00			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	100,77	

2014	litros	64.247,12			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	157,57	

total 386,15 tCO₂

d) Transporte de combustível do posto na base à máquinas e equipam nos locais de atividade -> Energia

2011	litros	21.819,28				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ		772.009,76				

2012	litros	29.925,84			multipl	soma
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ	1.058.836,07					

2013	litros	40.796,00			multipl	soma
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,05	multipl	
			resultado	35,38		
MJ	1.443.444,07					

2014	litros	64.247,12			multipl	soma
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,0567	multipl	
			resultado	35,37		
MJ	2.272.175,72					

total 5.546.465,63 MJ

sendo a energia renovável 274.063,42 MJ

e) Transporte de materiais, peças e equipamentos em caminhões nos locais de atividade -> Emissões

2011	horas consumo de diesel	14.110
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	185.687,60

2012	horas consumo de diesel	22.327
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	293.823,32

2013	horas consumo de diesel	20.593
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	271.003,88

2014	horas consumo de diesel	22.104
	consumo em litros / hora (diesel)	13,16
	litros	290.888,64

total de litros (diesel) 1.041.403,44

2011	litros	185.687,60			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,95	divide
			conversão	1.000	
			tCO ₂	458,65	

2012	litros	293.823,32			multipl
		fator emissão diesel	2,60		
		parcela renovável	0,95	divide	
		conversão	1.000		
		tCO ₂		725,74	

2013	litros	271.003,88			multipl
		fator emissão diesel	2,60		
		parcela renovável	0,95	divide	
		conversão	1.000		
		tCO ₂	669,38		

2014	litros	290.888,64			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,9433	divide
			conversão	1.000	
			tCO ₂		713,43

total 2.567,20 tCO₂

f) Transporte de materiais, peças e equipamentos em caminhões nos locais de atividade -> Energia

2011	litros	185.687,60			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50			
		parcela renovável	0,95	multipl		
		densid energia biodiesel	33,14			
		parcela renovável	0,05			
	resultado		35,38			
MJ	6.569.998,66					

2012	litros	293.823,32			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50			
		parcela renovável	0,95	multipl		
		densid energia biodiesel	33,14			
		parcela renovável	0,05			
	resultado	35,38				
MJ	10.396.056,71					

2013	litros	271.003,88				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,95		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		

MJ 9.588.659,28

2014	litros	290.888,64				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		

MJ 10.287.622,33

total 36.842.336,98 MJ

sendo a energia renovável 1.790.193,83 MJ

g) Funcionamento de máquinas pesadas nos locais de atividade -> Emissões

2011	horas consumo de diesel	13.835
	consumo em litros / hora (diesel) máquina média (126HP)	11,75
	litros	162.561,25

2012	horas consumo de diesel	17.908
	consumo em litros / hora (diesel) máquina média (126HP)	11,75
	litros	210.419,00

2013	horas consumo de diesel	22.717
	consumo em litros / hora (diesel) máquina média (126HP)	11,75
	litros	266.924,75

2014	horas consumo de diesel	32.708
	consumo em litros / hora (diesel) máquina média (126HP)	11,75
	litros	384.319,00

total de litros (diesel) 1.024.224,00

2011	litros	162.561,25			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	401,53	

2012	litros	210.419,00			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	519,73	

2013	litros	266.924,75			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	659,30	

2014	litros	384.319,00			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	942,57	

total 2.523,14 tCO₂

h) Funcionamento de máquinas pesadas nos locais de atividade -> Energia

2011	litros	162.561,25			multipl	soma
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,95	multipl	
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ	5.751.742,15					

2012	litros	210.419,00			multipl	soma
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,95	multipl	
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ	7.445.045,06					

2013	litros	266.924,75			multipl	soma
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,95	multipl	
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,05		
			resultado	35,38		
MJ	9.444.331,50					

2014	litros	384.319,00				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
MJ		13.591.898,01				

total 36.233.016,72 MJ

sendo a energia renovável 1.782.472,59 MJ

i) Funcionamento de equipamentos (geradores e compressores) nos locais de atividade -> Emissões

2011	horas consumo de diesel	53.439
	consumo em litros / hora (diesel) Equip médio (139 Kva)	31,00
	litros	1.656.609,00

2012	horas consumo de diesel	64.352
	consumo em litros / hora (diesel) Equip médio (139 Kva)	31,00
	litros	1.994.912,00

2013	horas consumo de diesel	45.329
	consumo em litros / hora (diesel) Equip médio (139 Kva)	31,00
	litros	1.405.199,00

2014	horas consumo de diesel	79.406
	consumo em litros / hora (diesel) Equip médio (139 Kva)	31,00
	litros	2.461.586,00

total de litros (diesel) 7.518.306,00

2011	litros	1.656.609,00			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	4.091,82	

2012	litros	1.994.912,00			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	4.927,43	

2013	litros	1.405.199,00			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	3.470,84	

2014	litros	2.461.586,00			multipl
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	6.037,24	

total 18.527,33 tCO₂

j) Funcionamento de equipamentos (geradores e compressores) nos locais de atividade -> Energia

2011	litros	1.656.609,00			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50			
		parcela renovável	0,95			
		densid energia biodiesel	33,14	multipl		
		parcela renovável	0,05			
		resultado	35,38			
MJ	58.614.139,64					

2012	litros	1.994.912,00			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50			
		parcela renovável	0,95			
		densid energia biodiesel	33,14	multipl		
		parcela renovável	0,05			
		resultado	35,38			
MJ	70.583.976,38					

2013	litros	1.405.199,00			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50			
		parcela renovável	0,95			
		densid energia biodiesel	33,14	multipl		
		parcela renovável	0,05			
		resultado	35,38			
MJ	49.718.751,02					

2014	litros	2.461.586,00			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50			
		parcela renovável	0,9433			
		densid energia biodiesel	33,14	multipl		
		parcela renovável	0,0567			
		resultado	35,37			
MJ	87.056.913,25					

total 265.973.780,29 MJ

sendo a energia renovável 13.004.398,67 MJ

k) Transporte de pessoas e equipamentos nos locais de atividade -> Emissões

2011	horas consumo de gasolina	20.535
	consumo em litros / hora (gasolina) em regime de 25km/h	3,57
	litros	73.309,95

2012	horas consumo de gasolina	30.105
	consumo em litros / hora (gasolina) em regime de 25km/h	3,57
	litros	107.474,85

2013	horas consumo de gasolina	30.475
	consumo em litros / hora (gasolina) em regime de 25km/h	3,57
	litros	108.795,75

2014	horas consumo de gasolina	35.375
	consumo em litros / hora (gasolina) em regime de 25km/h	3,57
	litros	126.288,75

total de litros (gasolina) 415.869,30

2011	litros	73.309,95			
			fator emissão gasolina	2,22	multipl
			parcela renovável	0,80	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	130,20	

2012	litros	107.474,85			
			fator emissão gasolina	2,22	multipl
			parcela renovável	0,80	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	190,88	

2013	litros	108.795,75			
			fator emissão gasolina	2,22	multipl
			parcela renovável	0,77	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	185,98	

2014	litros	126.288,75			
			fator emissão gasolina	2,22	multipl
			parcela renovável	0,75	
			conversão	1.000	divide
			tCO ₂	210,27	

total 717,32 tCO₂

I) Transporte de pessoas e equipamentos nos locais de atividade -> Energia

2011	litros	73.309,95			multipl	soma
			densid energia gasolina	32,29		
			parcela renovável	0,80	multipl	soma
			densid energia etanol	22,34		
			parcela renovável	0,20		
			resultado	30,30		
MJ		2.221.291,49				

2012	litros	107.474,85			multipl	soma
			densid energia gasolina	32,29		
			parcela renovável	0,80	multipl	soma
			densid energia etanol	22,34		
			parcela renovável	0,20		
			resultado	30,30		
MJ		3.256.487,96				

2013	litros	108.795,75			multipl	soma
			densid energia gasolina	32,29		
			parcela renovável	0,77	multipl	soma
			densid energia etanol	22,34		
			parcela renovável	0,23		
			resultado	30,00		
MJ		3.264.035,69				

2014	litros	126.288,75			multipl	soma
			densid energia gasolina	32,29		
			parcela renovável	0,75	multipl	soma
			densid energia etanol	22,34		
			parcela renovável	0,25		
			resultado	29,80		
MJ		3.763.720,47				

total 12.505.535,61 MJ

sendo a energia renovável 2.072.083,48 MJ

4) Transporte das peças para obras de arte

a) Transporte das peças fabricadas no canteiro base aos locais de montagem -> Emissões

2012	distância (Km)	693	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	265,52			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂		0,66			

2013	distância (Km)	1.089	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	417,24			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂		1,03			

2014	distância (Km)	240	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	91,95			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂		0,23			

total 1,91 tCO₂

b) Transporte das peças fabricadas no canteiro base aos locais de montagem -> Energia

distância total (km) 2.022

consumo diesel total (l) 774,71

2012	distância (Km)	693	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	265,52			
			densid energia diesel	35,50	multipl
			parcela renovável	0,95	
			densid energia biodiesel	33,14	multipli
			parcela renovável	0,05	
			resultado	35,38	
MJ		9.394,53			

soma

2013	distância (Km)	1.089	divide		multipl	soma	
	rend veíc (km/l)	2,61					
	litros	417,24					
			densid energia diesel	35,50			
			parcela renovável	0,95			
			densid energia biodiesel	33,14			multipl
			parcela renovável	0,05			
			resultado	35,38			
MJ	14.762,83						

2014	distância (Km)	240	divide						
	rend veíc (km/l)	2,61							
	litros	91,95							
			densid energia diesel	35,50			multipl	soma	
			parcela renovável	0,9433					
			densid energia biodiesel	33,14			multipl		
			parcela renovável	0,0567					
		resultado	35,37						
MJ	3.252,06								

total 27.409,43 MJ

sendo a energia renovável 1.304,12 MJ

c) Transporte das peças de aço importadas de Portugal ao local de dobra e montagem -> Emissões

c1) 2 viagens rodoviárias de 98 km da Martifer até Cidade do Porto

2013	distância (Km)	196	divide		multipl	
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	75,10				
			fator emissão diesel	2,65		divide
			parcela renovável	1		
			conversão	1.000		
			resultado	0,00265		
tCO ₂	0,20					

c2) 1 viagem de 8.265 km da porto na cidade do Porto até porto do Caju no Rio de Janeiro

2013	distância (Km)	8.265	divide			
	rend veíc (km/l)	0,018				
	litros	459.166,67				
			fator emissão navio	10,00	multipl	
			parcela renovável	0,77		
			conversão	1.000	divide	
			resultado	0,0077		
tCO ₂	3.535,58					

c3) 3 viagem de 7 km do porto do Caju até local de dobra e montagem (Bonsucesso-RJ)

2013	distância (Km)	21	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	8,05			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00247	
tCO ₂	0,02				

total 3.535,80 tCO₂

d) Transporte das peças de aço importadas de Portugal ao local de dobra e montagem -> Energia

d1) 2 viagens rodoviárias de 98 km da Martifer até Cidade do Porto

2013	distância (Km)	196	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	75,10			
				Valor Europeu	
			densid energia diesel	35,86	multipl
			parcela renovável	1	
			densid energia biodiesel	1	multipl
			parcela renovável	1	
			resultado	35,86	
MJ	2.692,93				

soma

d2) 2 viagens rodoviárias de 98 km da Martifer até Cidade do Porto

2013	distância (Km)	8.265	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	3.166,67			
				Valor Europeu	
			densid energia diesel	35,86	multipl
			parcela renovável	1	
			densid energia biodiesel	1	multipl
			parcela renovável	1	
			resultado	35,86	
MJ	113.556,67				

soma

d3) 2 viagens rodoviárias de 98 km da Martifer até Cidade do Porto

2013	distância (Km)	21	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	8,05			
			densid energia diesel	35,50	multipl
			parcela renovável	0,95	
			densid energia biodiesel	33,14	multipl
			parcela renovável	0,05	
			resultado	35,38	
MJ	284,68				

soma

total 116.534,28 MJ

sendo a energia renovável 13,33 MJ

5) Transporte das peças para estações e terminais

a) Transporte peças estações / terminais (aço) -> Emissões

2013	distância (Km)	2.605	divide		multipl
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	998,08			
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,95	
			conversão	1.000	
		resultado	0,00247		divide
tCO ₂	2,47				

2014	distância (Km)	2.721	divide		multipl
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	1.042,53			
			fator emissão diesel	2,60	
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	
		resultado	0,00245258		divide
tCO ₂	2,56				

total 5,02 tCO₂

b) Transporte peças estações / terminais (aço) -> Energia

distância total (km) 5.326,00

consumo diesel total (l) 2.040,61

2013	distância (Km)	2.605	divide		multipl	soma	
	rend veíc (km/l)	2,61					
	resultado	998,08					
			densid energia diesel	35,50			
			parcela renovável	0,95			
			densid energia biodiesel	33,14			multipl
			parcela renovável	0,05			
			resultado	35,38			
MJ	35.314,22						

2014	distância (Km)	2.721	divide		multipl	soma	
	rend veíc (km/l)	2,61					
	resultado	1.042,53					
			densid energia diesel	35,50			
			parcela renovável	0,9433			
			densid energia biodiesel	33,14			multipl
			parcela renovável	0,0567			
			resultado	35,37			
	MJ	36.870,27					

total 72.184,49 MJ

sendo a energia renovável 3.612,78 MJ

6) Construção Civil - Energia Elétrica

a) Consumo Energia Elétrica nos Canteiros -> Emissões

2011	energia elétrica (MWh)	1.948	multipl	soma
	fator emissão	0,0292		
2012	energia elétrica (MWh)	2.565	multipl	
	fator emissão	0,0653		
2013	energia elétrica (MWh)	3.015	multipl	
	fator emissão	0,0960		
2014	energia elétrica (MWh)	2.267	multipl	
	fator emissão	0,1355		
total		820,99	tCO ₂	

b) Consumo Energia Elétrica nos Canteiros -> Energia

2011	energia elétrica (MWh)	1.948	soma
2012	energia elétrica (MWh)	2.565	
2013	energia elétrica (MWh)	3.015	
2014	energia elétrica (MWh)	2.267	
total		9.795	multiplicado
conversão KW		1.000	
conversão		3,6	
total		35.262.000,00	MJ

sendo a energia renovável 27.962.766,00 MJ

7) Construção Civil - Carbono Embutido em Materiais

a) Emissões Concreto

concreto pavimentação pistas (massa) kg	201.400.472,50	soma
concreto obras de arte (massa) kg	133.377.846,25	
concreto estações e terminais (massa) kg	109.940.255,00	
conversão	1.000	divide
ton	444.718,57	

concreto (massa total) t	444.718,57	multipl
fator emissão	0,1	
total	44.471,86	tCO ₂

b) Energia Concreto

concreto (massa total) t	444.718,57	multipl
densidade da energia	0,75	
total	333.538,93	MJ

sendo a energia renovável

zero

 MJ
falta de dados

c) Emissões Aço

aço pavimentação pistas (massa) kg	3.662.294,75	soma
aço obras de arte (massa) kg	35.397.492,22	
aço estações e terminais (massa) kg	7.589.263,35	
conversão	1.000	
ton	46.649,05	

aço (massa total) t	46.649,05	multipl
fator emissão	1,06	
total	49.447,99	tCO ₂

d) Energia Aço

aço (massa total) t	46.649,05	multipl
densidade da energia	20,10	
total	937.645,91	MJ

sendo a energia renovável

zero

 MJ
falta de dados

8) Total geral da construção da Infraestrutura

Emissões	124.514,62	tCO ₂
Energia	415.519.801,43	MJ
Renovável	47.944.331,31	MJ

B) FABRICAÇÃO DOS VEÍCULOS

1) Consumo de energia no processo produtivo

Combustível	Fabricante	Quantidades	Total
Diesel (t)	Neobus	0,010	0,024
Diesel (t)	Volvo	0,014	
Gasolina (t)	Neobus	0,015	0,045
Gasolina (t)	Volvo	0,030	
Querosene (t)	Neobus	0,002	0,004
Querosene (t)	Volvo	0,002	
Gás Natural (m ³)	Neobus	1,000	1,750
Gás Natural (m ³)	Volvo	0,750	

a) Emissões de combustíveis associadas ao processo de fabricação (1 veículo)

a.1) Diesel

toneladas	0,024			multipl
		fator emissão diesel	2,60	
		parcela renovável	0,9433	
		conversão	1.000	
		tCO ₂	0,00006	

a.2) Gasolina

toneladas	0,045			multipl
		fator emissão gasolina	2,22	
		parcela renovável	0,75	
		conversão	1.000	
		tCO ₂	0,00013	

a.3) Querosene

toneladas	0,004			multipl
		fator emissão querosene	2,47	
		parcela renovável	1	
		conversão	1.000	
		tCO ₂	0,00001	

a.4) Gás Natural

m³	1,750			
		fator emissão gás natural	2,06	multipl
		parcela renovável	1	
		conversão	1.000	
		tCO ₂	0,00361	

total geral para 160 veículos	0,61 tCO ₂
-------------------------------	-----------------------

b) Energia associada à produção dos combustíveis consumidos na fabricação (1 veículo)

b.1) Diesel

toneladas	0,024			multipl	soma
		densid energia diesel	35,50		
		parcela renovável	0,9433		
		densid energia biodiesel	33,14		
		parcela renovável	0,0567		
		resultado	35,37		
		MJ	0,8488		

b.2) Gasolina

toneladas	0,045			multipl	soma
		densid energia diesel	32,29		
		parcela renovável	0,77		
		densid energia biodiesel	22,34		
		parcela renovável	0,23		
		resultado	30,00		
		MJ	1.3501		

b.3) Querosene

toneladas	0,004			
		densid energia querosene	34,76	multipl
		resultado	0,14	
		MJ	0,0006	

b.4) Gás Natural

m3	1,750			
		densid energia gás nat	37,20	multipl
		resultado	65,10	
		MJ	113,9250	

total geral para 160 veículos	18.579,91 MJ
-------------------------------	--------------

sendo a energia renovável 44,21 MJ

c) Consumo de energia elétrica para fabricação (1 veículo) - Emissões pelo uso de eletricidade

Fabricante	MW	Total
Neobus	160,00	335,00
Volvo	175,00	

energia elétrica (MW)	335,00	multipl
conversão KW	1.000	
conversão	3,6	
fator emissão (2014)	135,5	
conversão	1.000.000	divide
total	163,41	tCO ₂

total geral para 160 veículos	26.146,08	tCO ₂
-------------------------------	-----------	------------------

d) Consumo de energia elétrica para fabricação (1 veículo) - Energia produção de eletricidade

energia elétrica (MW)	335,00	multipl
conversão KW	1.000	
conversão	3,6	
total	1.206.000,00	MJ

total geral para 160 veículos	192.960.000,00	MJ
-------------------------------	----------------	----

sendo a energia renovável

153.017.280,00

 MJ

2) Carbono embutido nos materiais de produção (1 veículo)

Combustível	Fabricante	Quantidades (t)	Total
Aço	Neobus	6,75	16,75
Aço	Volvo	10,00	
Alumínio	Neobus	1,10	1,18
Alumínio	Volvo	0,08	
Cobre	Neobus	0,17	0,97
Cobre	Volvo	0,80	
Fibra de Vidro	Neobus	4,20	4,20
Fibra de Vidro	Volvo	0,00	
Borracha	Neobus	0,17	0,88
Borracha	Volvo	0,71	

a) Emissões associadas ao material para produção de 1 veículo

a.1) Aço

aço (massa total) t	16,75	multipl
fator emissão	1,06	
total	17,76	tCO ₂

aço para 160 veículos	2.840,80	tCO ₂
-----------------------	----------	------------------

a.2) Alumínio

alumínio (massa total) t	1,18	multipl
fator emissão	8,24	
total	9,72	

tCO₂

alumínio para 160 veículos	1.555,71
----------------------------	----------

tCO₂

a.3) Cobre

cobre (massa total) t	0,97	multipl
fator emissão	2,60	
total	2,52	

tCO₂

cobre para 160 veículos	403,52
-------------------------	--------

tCO₂

a.4) Fibra de Vidro

fibra vidro (massa total) t	4,20	multipl
fator emissão	1,54	
total	6,47	

tCO₂

fibra de vidro para 160 veículos	1.034,88
----------------------------------	----------

tCO₂

a.5) Borracha

borracha (massa total) t	0,88	multipl
fator emissão	2,66	
total	2,34	

tCO₂

borracha para 160 veículos	374,53
----------------------------	--------

tCO₂

total geral para 160 veículos	6.209,44
-------------------------------	----------

tCO₂

b) Energia associada ao material para produção de 1 veículo

b.1) Aço

aço (massa total) t	16,75	multipl
conversão kg	1.000	
densidade energia	20,10	
total	336,68	MJ

MJ

aço para 160 veículos	53.868,00
-----------------------	-----------

MJ

b.2) Alumínio

alumínio (massa total) t	1,18	multipl
conversão kg	1.000	
densidade energia	155,00	
total	182,90	MJ

alumínio para 160 veículos	29.264,00	MJ
----------------------------	-----------	----

b.3) Cobre

cobre (massa total) t	0,97	multipl
conversão kg	1.000	
densidade energia	42,00	
total	40,74	MJ

cobre para 160 veículos	6.518,40	MJ
-------------------------	----------	----

b.4) Fibra de Vidro

fibra vidro (massa total) t	4,20	multipl
conversão kg	1.000	
densidade energia	28,00	
total	117,60	MJ

fibra de vidro para 160 veículos	18.816,00	MJ
----------------------------------	-----------	----

b.5) Borracha

borracha (massa total) t	0,88	multipl
conversão kg	1.000	
densidade energia	91,00	
total	80,08	MJ

borracha para 160 veículos	12.812,80	MJ
----------------------------	-----------	----

total geral para 160 veículos	121.279,20	MJ
-------------------------------	------------	----

3) Deslocamento (transporte) dos veículos entre fábricas e até o local de operação

a) combinação 1 (menor quilometragem)

Mercedes Benz --> Neobus (km)	447	soma
Neobus --> garagem RJ (km)	137	
total	584	multipl
nº veículos	80	
total geral	46.720	km

b) combinação 2 (maior quilometragem)

Volvo --> Marcopolo (km)	572	soma
Marcopolo --> garagem RJ (km)	1.418	
total	1.990	multipl
nº veículos	80	
total geral	159.200	

c) total de quilômetros percorridos pela frota no deslocamento

(a) + (b)	205.920	km
-----------	---------	----

d) Emissões de escapamentos (diesel)

distância (Km)	205.920	divide		
rend veíc (km/l)	1,9			
litros	108.378,95			
		fator emissão diesel	2,60	multipl
		parcela renovável	0,9433	
		conversão	1.000	divide
		resultado	0,00245258	
		tCO ₂	265,81	

e) Energia produção do diesel consumido

distância (Km)	205.920	divide			
rend veíc (km/l)	1,9				
litros	108.378,95				
		densid energia diesel	35,50	multipl	soma
		parcela renovável	0,9433		
		densid energia biodiesel	33,14	multipl	
		parcela renovável	0,0567		
		resultado	35,37		
		MJ	3.832.950,23		

sendo a energia renovável

203.648,16	MJ
------------	----

4) Total geral da fabricação dos ônibus

a) Emissões para os 160 ônibus iniciais

Emissões	32.621,94	tCO ₂
Energia	196.932.809,33	MJ
Renovável	153.220.972,37	MJ

b) Emissões para as 4 renovações de frota no ciclo de vida (640 ônibus)

Emissões	130.487,75	tCO ₂
Energia	787.731.237,34	MJ
Renovável	612.883.889,48	MJ

C) OPERAÇÃO DOS ÔNIBUS

1) Combustível para funcionamento dos veículos

a) Funcionamento dos veículos -> Emissões

quant. veículos	160
quant. serviços	15
viagens/dia	2.156
km/dia	36.788
km/mês	1.103.640

ANO	distância (Km)	13.243.680	divide		
	rend veíc (km/l)	1,4			
	litros	9.459.771			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	23.200,85				

b) Funcionamento dos veículos -> Energia

ANO	litros	9.459.771			
			densid energia diesel	35,50	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			densid energia biodiesel	33,14	multipl
			parcela renovável	0,0567	
			resultado	35,37	
MJ	334.556.054,78				

sendo a energia renovável 17.775.269,99 MJ

c) Transporte de combustível para abastecimento dos veículos -> Emissões

viagens/dia	2.156	divide
km/dia	36.788	
rendimento BRT km/l	1,4	
demanda/dia (l)	26.277	

garagens com tanques	10
demanda/garagem/dia (l)	2.628
demanda/garagem/ano (l)	959.116

capacidade tanque/caminhão (l)	20.000
número de viagens/ano	48
km do fornecedor até garagens (média)	32
distância total / ano (km)	1.535

ANO	distância (Km)	1.535	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	587,96			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	1,44				

d) Transporte de combustível para abastecimento dos veículos -> Energia

ANO	litros	587,96			
			densid energia diesel	35,50	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			densid energia biodiesel	33,14	multipl
			parcela renovável	0,0567	
			resultado	35,37	
MJ	20.794,03				

sendo a energia renovável 1.104,81 MJ

2) Total geral da operação dos ônibus

a) Emissões em 1 ano

Emissões	23.202,29	tCO ₂
Energia	334.576.848,81	MJ
Renovável	17.776.374,79	MJ

b) Emissões em 40 anos (ciclo de vida)

Emissões	928.091,53	tCO ₂
Energia	13.383.073.952,52	MJ
Renovável	711.054.991,67	MJ

D) OPERAÇÃO DA INFRAESTRUTURA

1) Energia elétrica para funcionamento das 48 estações e terminais

Estações 24h	
inverno (KWh/mês)	3.200
verão (KWh/mês)	4.200
média/mês (KWh)	3.700
consumo anual (KWh)	44.400
quantidade de estações	30
KWh/ano	1.332.000,00

Estações 16h	
inverno (KWh/mês)	2.500
verão (KWh/mês)	3.200
média/mês (KWh)	2.850
consumo anual (KWh)	34.200
quantidade de estações	13
KWh/ano	444.600,00

Terminais (todos 24h)	
inverno (KWh/mês)	4.800
verão (KWh/mês)	6.000
média/mês (KWh)	5.400
consumo anual (KWh)	64.800
quantidade de terminais	5
KWh/ano	324.000,00

a) Emissões pelo uso de eletricidade

ANO	total KWh/ano	2.100.600,00	multipl
	conversão	3,6	
	fator emissão	135,5	
	conversão	1.000.000	divide
	total	1.024,67	tCO ₂

b) Energia produção de eletricidade

ANO	total KWh/ano	2.100.600,00	multipl
	conversão	3,6	
	total	7.562.160,00	MJ

sendo a energia renovável 5.996.792,88 MJ

2) Total geral da operação da infraestrutura

a) Emissões em 1 ano

Emissões	1.024,67	tCO ₂
Energia	7.562.160,00	MJ
Renovável	5.996.792,88	MJ

b) Emissões em 40 anos (ciclo de vida)

Emissões	40.986,91	tCO ₂
Energia	302.486.400,00	MJ
Renovável	239.871.715,20	MJ

E) MANUTENÇÃO DOS ÔNIBUS

1) Consumo de pneus (rotina)

viagens/dia	2.156,0	divide
km/dia	36.788	
quant. veículos	160	
km/veículo/dia	230	
km/veículo/ano	83.923	

vida útil média dos pneus (km)	40.000	multipl
quant. de pneus por veículo	10	
quant. de veículos	160	
quant. de pneus na frota	1.600	multipl
quant. trocas/ano	2,10	
quant. pneus (un)/ano	3.357	

massa borracha (kg) 1 pneu	62
massa total borracha (kg)/ano	208.128

a) Pneus -> Carbono embutido na borracha

ANO	borracha (massa total) kg	208.128	multipl
	fator emissão	2,66	
	conversão	1.000	divide
	total	553,62	tCO ₂

b) Pneus -> Energia para produção da borracha

ANO	borracha (massa total) kg	208.128	multipl
	fator emissão	91	
	conversão	1	
	total	18.939,66	MJ

sendo a energia renovável 15.019,15 MJ

c) Pneus -> Emissões no transporte do fornecedor

demanda anual de pneus	3.357	divide
unidades transportadas/viagem	180	
viagens/ano	19	multipl
distância média da fábrica às garagens (km)	450	
km/ano	8.392	

ANO	distância (km)	8.392	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	3.215,43			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	7,89				

d) Pneus -> Energia no transporte do fornecedor

ANO	distância (km)	8.392	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	3.215,43				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
MJ	113.717,37					

sendo a energia renovável 90.177,87 MJ

2) Consumo de óleo lubrificante para motor (rotina)

viagens/dia	2156	multipl
km/dia	36.788	divide
quant. veículos	160	
km/veículo/dia	230	
km/veículo/ano	83.923	

intervalo da troca de óleo (km)	25.000	
litros de óleo/veículo (l)	20	multipl
quant. de veículos	160	
quant. de litros na frota	3.200	multipl
quant. trocas/ano	3,36	
quant. litros/ano	10.742	

a) Óleo lubrificante -> Carbono embutido

ANO	óleo lubrificante (litros)	10.742	multipl
	fator emissão	2,66	
	conversão	1.000	divide
	total	28,57	tCO ₂

b) Óleo lubrificante -> Energia para produção

ANO	óleo lubrificante (litros)	10.742	multipl
	fator emissão	37,05	
	conversão	1	
	total	397.994,66	MJ

sendo a energia renovável

315.609,76 MJ

c) Óleo lubrificante -> Emissões no transporte do fornecedor

demanda anual de óleo	10.742	divide
litros transportados/viagem	2.000	
viagens/ano	5	multipl
distância média da fábrica às garagens (km)	35	
km/ano	188	

ANO	distância (Km)	188	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	72,03			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
tCO ₂	0,18				

d) Óleo lubrificante -> Energia no transporte do fornecedor

ANO	distância (Km)	188	divide		multipl	soma
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	72,03				
			densid energia diesel	35,50		
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
MJ		2.547,27				

sendo a energia renovável 2.019,98 MJ

3) Consumo de eletricidade

ANO	quant. de garagens	10	multipl
	50% KW/h ano/garagem	16.800	
	resultado	168.000	

a) Emissões pelo uso da eletricidade (oficina - borracharia - lavagem)

ANO	total KWh/ano	168.000	multipl
	conversão	3,6	
	fator emissão	135,5	
	conversão	1.000.000	divide
	total	81,95	tCO ₂

b) Energia produção de eletricidade

ANO	resultado	168.000	multipl
	conversão	3,6	
	total	604.800,00	MJ

sendo a energia renovável 479.606,40 MJ

4) Total geral da manutenção dos veículos por ano

a) Emissões em 1 ano

Emissões	672,21	tCO ₂
Energia	1.137.998,95	MJ
Renovável	902.433,17	MJ

b) Emissões em 40 anos (ciclo de vida)

Emissões	26.888,32	tCO ₂
Energia	45.519.958,12	MJ
Renovável	36.097.326,79	MJ

F) MANUTENÇÃO DA INFRAESTRUTURA

20º ANO	transporte do concreto - usina/pistas (km)	70.177
	concreto para substituição total do pavimento (kg)	201.400.472,50
	transporte do aço - fornecedor/canteiros (km)	1.282
	aço para substituição total do pavimento (kg)	3.662.294,75
	demolição do pavimento antigo (h)	2.340
	remoção do pavimento antigo - entulho (km)	201.400

1) Concreto e aço para a reconstrução das pistas em 20 anos

a) Transporte do concreto usinado -> Emissões

20º ANO	distância (Km)	70.177	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	26.887,74			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
	tCO ₂	65,94			

b) Transporte do concreto usinado -> Energia

20º ANO	distância (Km)	70.177	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	26.887,74				
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma
			parcela renovável	0,9433		
			densid energia biodiesel	33,14	multipl	
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
MJ	950.916,85					

sendo a energia renovável 50.523,08 MJ

c) Carbono embutido no concreto para a reconstrução das pistas

20º	concreto (massa total) kg	201.400.472,50	multipl
ANO	fator emissão	0,1	
	conversão	1.000	
	total	20.140,05	tCO ₂

d) Energia no concreto para a reconstrução das pistas

20º	concreto (massa total) kg	201.400.472,50	multipl
ANO	densidade da energia	0,75	
	conversão	1.000	
	total	151.050,35	MJ

sendo a energia renovável

zero
falta de dados

e) Transporte do aço -> Emissões

20º ANO	distância (Km)	1.282	divide		
	rend veíc (km/l)	2,61			
	litros	491,19			
			fator emissão diesel	2,60	multipl
			parcela renovável	0,9433	
			conversão	1.000	divide
			resultado	0,00245258	
	tCO ₂	1,20			

f) Transporte do aço -> Energia

20º ANO	distância (Km)	1.282	divide					
	rend veíc (km/l)	2,61						
	litros	491,19						
			densid energia diesel	35,50			multipl	soma
			parcela renovável	0,9433				
			densid energia biodiesel	33,14			multipl	
			parcela renovável	0,0567				
			resultado	35,37				
MJ	17.371,44							

sendo a energia renovável

922,96
MJ

g) Carbono embutido no aço para a reconstrução das pistas

20º	concreto (massa total) kg	3.662.294,75	multipl
ANO	fator emissão	0,1	
	conversão	1.000	
	total	366,23	tCO ₂

h) Energia no aço para a reconstrução das pistas

20º ANO	concreto (massa total) kg	3.662.294,75	multipl
	densidade da energia	0,75	
	conversão	1.000	
	total	2.746,72	MJ

sendo a energia renovável

zero

falta de dados

2) Atividades para a demolição e remoção do entulho

a) Uso de máquinas pesadas -> Emissões

20º ANO	horas	2.340	multipl		multipl	soma
	rend veic (l/h)	11,75				
	litros	27.495,00				
	fator emissão diesel	2,60				
	parcela renovável	0,9433	divide			
	conversão	1.000				
	tCO ₂	67,43				

b) Uso de máquinas pesadas -> Energia

20º ANO	litros	27.495,00					
			densid energia diesel	35,50	multipl	soma	
			parcela renovável	0,9433			
			densid energia biodiesel	33,14	multipl		
			parcela renovável	0,0567			
			resultado	35,37			
			MJ	972.393,34			

sendo a energia renovável

51.664,15 MJ

c) Transporte de entulho -> Emissões

20º ANO	distância (Km)	201.400	divide			
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	77.164,75				
			fator emissão diesel	2,60	multipl	
			parcela renovável	0,9433		
			conversão	1.000	divide	
			resultado	0,00245258		
		tCO ₂	189,25			

d) Transporte de entulho -> Energia

20º ANO	distância (Km)	201.400	divide			soma
	rend veíc (km/l)	2,61				
	litros	77.164,75				
			densid energia diesel	35,50	multipl	
			parcela renovável	0,9433	multipl	
			densid energia biodiesel	33,14		
			parcela renovável	0,0567		
			resultado	35,37		
			MJ	2.729.023,09		

sendo a energia renovável 144.995,50 MJ

3) Total geral da manutenção da infraestrutura em 20 anos

Emissões	20.830,11	tCO ₂
Energia	4.823.501,79	MJ
Renovável	248.105,69	MJ

APÊNDICE 2 – MATRIZES DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO pkm

(1) DISTÂNCIAS ENTRE ESTAÇÕES																																																
Rótulos de Linha	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
01- Terminal Alvorada		550	1250	1750	4000	5050	5600	6750	7650	8200	8950	9400	9800	10400	10850	10970	11620	12070	12870	13670	15020	15770	16270	16870	17620	18520	18820	19570	20070	20670	21320	22120	22970	23420	24770	25220	25670	26370	26820	27270	27670	28620	29870	30420	31870	33220	37770	39720
02- Lourenço Jorge	550		700	1200	3450	4500	5050	6200	7100	7650	8400	8850	9250	9850	10300	10420	11070	11520	12320	13120	14470	15220	15720	16320	17070	17870	18270	19020	19520	20120	20770	21570	22420	22870	24220	24670	25120	25820	26270	26720	27120	28070	29320	29870	31320	32670	37220	39170
03- Aeroporto de J.P.A	1250	700		500	2750	3800	4350	5500	6400	6950	7700	8150	8550	9150	9600	9720	10370	10820	11620	12420	13770	14520	15020	15620	16370	17270	17570	18320	18820	19420	20070	20870	21720	22170	23520	23970	24420	25120	25570	26020	26420	27370	28620	29170	30620	31970	36520	38470
04- Estação Via Parque	1750	1200	500		2250	3300	3850	5000	5900	6450	7200	7650	8050	8650	9100	9220	9870	10320	11120	11920	13270	14020	14520	15120	15870	16770	17070	17820	18320	18920	19570	20370	21220	21670	23020	23470	23920	24620	25070	25520	25920	26870	28120	28670	30120	31470	36020	37970
05- C. Metropolitana	4000	3450	2750	2250		1050	1600	2750	3650	4200	4950	5400	5800	6400	6850	6970	7620	8070	8870	9670	11020	11770	12270	12870	13620	14520	14820	15570	16070	16670	17320	18120	18970	19420	20770	21220	21670	22370	22820	23270	23670	24620	25870	26420	27870	29220	33770	35720
06- Hospital Sarah	5050	4500	3800	3300	1050		550	1700	2600	3150	3900	4350	4750	5350	5800	5920	6570	7020	7820	8620	9970	10720	11220	11820	12570	13470	13770	14520	15020	15620	16270	17070	17920	18370	19720	20170	20620	21320	21770	22220	22620	23570	24820	25370	26820	28170	32720	34670
07- Rio II	5600	5050	4350	3850	1600	550		1150	2050	2600	3350	3800	4200	4800	5250	5370	6020	6470	7270	8070	9420	10170	10670	11270	12020	12920	13220	13970	14470	15070	15720	16520	17370	17820	19170	19620	20070	20770	21220	21670	22070	23020	24270	24820	26270	27620	32170	34120
08- Pedro Correia	6750	6200	5500	5000	2750	1700	1150		900	1450	2200	2650	3050	3650	4100	4220	4870	5320	6120	6920	8270	9020	9520	10120	10870	11770	12070	12820	13320	13920	14570	15370	16220	16670	18020	18470	18920	19620	20070	20520	20920	21870	23120	23670	25120	26470	31020	32970
09- Estação Curicica	7650	7100	6400	5900	3650	2600	2050	900		550	1300	1750	2150	2750	3200	3320	3970	4420	5220	6020	7370	8120	8620	9220	9970	10870	11170	11920	12420	13020	13670	14470	15320	15770	17120	17570	18020	18720	19170	19620	20020	20970	22220	22770	24220	25570	30120	32070
10- Praia do Bandolim	8200	7650	6950	6450	4200	3150	2600	1450	550		750	1200	1600	2200	2650	2770	3420	3870	4670	5470	6820	7570	8070	8670	9420	10320	10620	11370	11870	12470	13120	13920	14770	15220	16570	17020	17470	18170	18620	19070	19470	20420	21670	22220	23670	25020	29570	31520
11- Arroio Pavuna	8950	8400	7700	7200	4950	3900	3350	2200	1300	750		450	850	1450	1900	2020	2670	3120	3920	4720	6070	6820	7320	7920	8670	9570	9870	10620	11120	11720	12370	13170	14020	14470	15820	16270	16720	17420	17870	18320	18720	19670	20920	21470	22920	24270	28820	30770
12- Vila Sapê	9400	8850	8150	7650	5400	4350	3800	2650	1750	1200	450		400	1000	1450	1570	2220	2670	3470	4270	5620	6370	6870	7470	8220	9120	9420	10170	10670	11270	11920	12720	13570	14020	15370	15820	16270	16970	17420	17870	18270	19220	20470	21020	22470	23820	28370	30320
13- Rec. Palmeiras	9800	9250	8550	8050	5800	4750	4200	3050	2150	1600	850	400		600	1050	1170	1820	2270	3070	3870	5220	5970	6470	7070	7820	8720	9020	9770	10270	10870	11520	12320	13170	13620	14970	15420	15870	16570	17020	17470	17870	18820	20070	20620	22070	23420	27970	29920
14- Divina Providência	10400	9850	9150	8650	6400	5350	4800	3650	2750	2200	1450	1000	600		450	570	1220	1670	2470	3270	4620	5370	5870	6470	7220	8120	8420	9170	9670	10270	10920	11720	12570	13020	14370	14820	15270	15970	16420	16870	17270	18220	19470	20020	21470	22820	27370	29320
15- Santa Eliângela	10850	10300	9600	9100	6850	5800	5250	4100	3200	2650	1900	1450	1050	450		120	770	1220	2020	2820	4170	4920	5420	6020	6770	7670	7970	8720	9220	9820	10470	11270	12120	12570	13920	14370	14820	15520	15970	16420	16820	17770	19020	19570	21020	22370	26920	28870
16- Marell	10970	10420	9720	9220	6970	5920	5370	4220	3320	2770	2020	1570	1170	570	120		650	1100	1900	2700	4050	4800	5300	5900	6650	7550	7850	8600	9100	9700	10350	11150	12000	12450	13800	14250	14700	15400	15850	16300	16700	17650	18900	19450	20900	22250	26800	28750
17- André Rocha	11620	11070	10370	9870	7620	6570	6020	4870	3970	3420	2670	2220	1820	1220	770	650		450	1250	2050	3400	4150	4650	5250	6000	6900	7200	7950	8450	9050	9700	10500	11350	11800	13150	13600	14050	14750	15200	15650	16050	17000	18250	18800	20250	21600	26150	28100
18- Terminal Taquara	12070	11520	10820	10320	8070	7020	6470	5320	4420	3870	3120	2670	2270	1670	1220	1100	450		800	1600	2950	3700	4200	4800	5550	6450	6750	7500	8000	8600	9250	10050	10900	11350	12700	13150	13600	14050	14750	15200	15600	16550	17800	18350	19800	21150	25700	27650
19- Aracy Cabral	12870	12320	11620	11120	8870	7820	7270	6120	5220	4670	3920	3470	3070	2470	2020	1900	1250	800		800	2150	2900	3400	4000	4750	5650	5950	6700	7200	7800	8450	9250	10100	10550	11900	12350	12800	13500	13950	14400	14800	15750	17000	17550	19000	20350	24900	26850
20- Terminal Tanque	13670	13120	12420	11920	9670	8620	8070	6920	6020	5470	4720	4270	3870	3270	2820	2700	2050	1600	800		1350	2100	2600	3200	3950	4850	5150	5900	6400	7000	7650	8450	9300	9750	11100	11550	12000	12700	13150	13600	14000	14950	16200	16750	18200	19550	24100	26050
21- Içasse	15020	14470	13770	13270	11020	9970	9420	8270	7370	6820	6070	5620	5220	4620	4170	4050	3400	2950	2150	1350		750	1250	1850	2600	3500	3800	4550	5050	5650	6300	7100	7950	8400	9750	10200	10650	11350	11800	12250	12650	13600	14850	15400	16850	18200	22750	24700
22- Praça Seca	15770	15220	14520	14020	11770	10720	10170	9020	8120	7570	6820	6370	5970	5370	4920	4800	4150	3700	2900	2100	750		500	1100	1850	2750	3050	3800	4300	4900	5550	6350	7200	7650	9000	9450	9900	10600	11050	11500	11900	12850	14100	14650	16100	17450	22000	23950
23- Cap. Menezes	16270	15720	15020	14520	12270	11220	10670	9520	8620	8070	7320	6870	6470	5870	5420	5300	4650	4200	3400	2600	1250	500		600																								

[illegible]

APÊNDICE 3 – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES EVITADAS

GASOLINA			ETANOL			GNV			DIESEL			
Quilômetros	2.539.016.728		Quilômetros	411.732.442		Quilômetros	660.938.921		Quilômetros	1.207.457.784		
Rendimento	9,74	km/l	Rendimento	6,90	km/l	Rendimento	14,08	km/m³	Rendimento	2,57		
Litros	260.679.335,52		Litros	59.671.368,41		Litros	46.941.684,73		Litros	469.827.931,52		
fator emissão gasolina	2,22	KgCO ₂ /l	fator emissão etanol	1,52	KgCO ₂ /l	fator emissão do GNV	2,06	kgCO ₂ /m³	fator emissão diesel	2,60	KgCO ₂ /l	
desc / acrésc renovável	0,73								desc / acrésc renovável	0,9433		
conversão	1000		conversão	1000		conversão	1000		conversão	1000		Total evitado (tCO ₂)
tCO ₂	422.456,93		tCO ₂	90.700,48		tCO ₂	96.699,87		tCO ₂	1.152.290,59		1.762.147,87

APÊNDICE 4 – TELA DE CÁLCULO DA FERRAMENTA DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO
(ARQUIVO PARA USO CONSTANDO DA TELA DE DADOS PROCESSADOS ANEXADO EM CD)

DADOS DE SAÍDA			
	METRÔ (tCO ₂)	BRT (tCO ₂)	VLT (tCO ₂)
Infraestrutura	1.619.046	124.515	201.714
Operação	957.760	130.488	818.885
Manutenção	295.280	928.117	582.858
Operação	45.380	40.987	66.399
Manutenção	7.142	26.888	40.332
Infraestrutura	46.290	20.830	33.745
TOTAL (tCO₂)	2.970.898	1.271.825	1.743.932
RESULTADOS			
Modo	METRÔ	BRT	VLT
1 - gCO ₂ /PKM	45,02	35,58	66,06
2 - tCO ₂ líquida	692.450	-490.380	141.179

RESULTADOS:
 O valor obtido, melhor o desempenho ambiental do sistema.
 Valores negativos indicam que haverá compensação dos danos da emissão líquida. Valores positivos indicam não haver balanço neutro. Valores positivos indicam não haver balanço ambiental ao longo do ciclo de vida do modo de transporte.

VALORES PARA CÁLCULO									
Valores para cálculo de emissões produzidas						Valores para infraestrutura e pontes			
	METRÔ		BRT		VLT		BRT		VLT
A	-	A1	16.703,1807317073	A2	27.059,1527853658	S	54.786	S1	88.754
B	41.514,0	B1	1.787,90223589743	B2	2.896,40162215384	T	69.728	T1	112.960
C	1.496,5	C1	203,8871094	C2	1.279,5				
D	0,000557397	D1	0,001752	D2	0,001100256				
E	1.134,5	E1	1.024,67275	E2	1.659,96986				
F	1,116	F1	4,2013	F2	6,30195				
G	29,67288124	G1	13,3526346153846	G2	21,6312680769231				
Valores para percentual do km/pass/viagem						Valor para ocupação média / veículo			
	METRÔ		BRT		VLT				
I	0,5	I1	0,27	I2	0,2				
J	19,5	J1	10,6	J2	7,8				
Valores para cálculo emissões evitadas						tCO ₂ por tipo de combustível			
	METRÔ		BRT		VLT				
K1	481.368.383,4532820	K2	260.703.808,0894280	K3	192.547.353,3813130	O	0,0016205990115596		gasolina
L1	110.188.673,4391300	L2	59.676.970,4063697	L3	44.075.469,3756519	P	0,0015199990760457		etanol
M1	86.682.140,8689625	M2	46.946.091,5894905	M3	34.672.856,3475850	Q	0,0020599987386353		GNV
N	469.827.931,5175100					R	0,0024525800036583		diesel

DESCRIÇÃO DOS VALORES PARA PROCESSAMENTO DOS CÁLCULOS:
 A, A1 e A2 = Emissão em tCO₂ por km construído de pontes para cada modo de transporte / B, B1 e B2 = Emissão em tCO₂ por km de infraestrutura construída por cada modo de transporte / C, C1 e C2 = Emissão em tCO₂ por veículo fabricado em cada modo de transporte / D, D1 e D2 = Emissão em tCO₂ por km de operação dos veículos em cada modo de transporte / E, E1 e E2 = Emissão em tCO₂ por ano para operação da infraestrutura em cada modo de transporte / F, F1 e F2 = Emissão em tCO₂ por veículo por ano para a manutenção dos veículos em cada modo de transporte / G, G1 e G2 = Emissão em tCO₂ por km para a manutenção da infraestrutura em cada modo de transporte / H = Ocupação passageiro por veículo / I1, I2 e I3 = Percentual da quilometragem média da viagem por passageiro em cada modo de transporte / J1, J2 e J3 = quilometragem média da viagem por passageiro / K1, K2 e K3 = Valores absolutos de litros de gasolina evitados em cada modo de transporte (rendimento atribuído de 9,74 km por litro) / L1, L2 e L3 = Valores absolutos de litros de etanol evitados em cada modo de transporte (rendimento atribuído de 6,9 km por litro) / M1, M2 e M3 = Valores absolutos de metros cúbicos de GNV evitados em cada modo de transporte (rendimento atribuído de 14,08 km por m³) / N = Valor absoluto de litros de diesel evitado (rendimento atribuído de 2,57 km por litro) / O = Emissão em tCO₂ evitada por litro de gasolina / P = Emissão em tCO₂ evitada por litro de etanol / Q = Emissão em tCO₂ evitada por m³ de GNV / R = Emissão em tCO₂ evitada por litro de diesel / S = Valor absoluto em tCO₂ para o km construído de infraestrutura excluindo pontes nos modos BRT e VLT / T = Valor absoluto em tCO₂ para o km construído de pontes na infraestrutura nos modos BRT e VLT em cada modo de transporte.

DESCRIPTIVO DOS VALORES DE CÁLCULO —