



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

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

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: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro

Julho de 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

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

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. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Pesq. Andréa Souza Santos, D.Sc.

Pesq. Anna Bernstad Saraiva Schott, Ph.D.

Profa. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida, D.Sc.

Prof. Carlos David Nassi, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2016

Andrade, Carlos Eduardo Sanches de

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 / Carlos Eduardo Sanches de Andrade. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIX, 193 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 146-158

1. Inventário de ciclo de vida. 2. Sistemas metroferroviários. 3. Emissões evitadas. I. D'Agosto, Márcio de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este projeto aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado durante todos estes anos de estudos acadêmicos, mesmo quando ousei continuar os estudos após as conclusões das duas graduações, em Administração e Engenharia de Produção, e das duas pós-graduações, em Marketing e em Qualidade e Produtividade, e do Mestrado em Engenharia de Transportes.

Também dedico este projeto a minha esposa Isabela Bittencourt, que me apoiou durante todo o curso de Doutorado, mesmo nos momentos em que eu não tinha tempo para lhe dedicar, conseguindo compreender o quanto significava para mim a obtenção do título de Doutor, que, ao longo de minha vida acadêmica, sempre persegui como objetivo.

Dedico, em especial, aos meus filhos Matheus e Maria Luz, que me dão a força necessária para sempre buscar alcançar os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. MÁRCIO DE ALMEIDA D'AGOSTO, que me orientou de forma motivante. Sua presença marcante na consolidação desta tese e exemplo de dedicação foi fundamental para a elaboração e os resultados obtidos neste trabalho.

À RioTrilhos, à Concessão Metroviária do Rio de Janeiro S.A. (Metrô Rio) e ao Consórcio Construtor da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, pelo pronto atendimento em me ajudar e autorizar o fornecimento de dados à elaboração desta tese. Em especial, ao Gerente de Engenharia da RioTrilhos Eduardo D'Aguiar, ao Diretor de Engenharia da Concessionária Metrô Rio Joubert Flores, e ao Gerente de Qualidade e Meio Ambiente do Consórcio Construtor Juliano Gomes Meirelles.

Aos funcionários da RioTrilhos, da Concessionária Metrô Rio e do Consórcio Construtor da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, que disponibilizaram o seu tempo para realizar o levantamento dos dados necessários para o desenvolvimento dessa Tese. Entre eles: RioTrilhos – João Junior, Luis Moreira e Eduardo Reis.

Concessionária Metrô Rio – Wang Wei, Ernesto de Oliveira, Nelson Walker, Yasmim Moura, Thiago de Oliveira e Pedro Mello.

Consórcio Construtor – Luciano Buzzo, Alexandre de Paula, Vania de Jesus e Renata Pedreira.

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

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

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

Julho/2016

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

O objetivo deste trabalho é avaliar a emissão de dióxido de carbono e o uso de energia no ciclo de vida de sistemas metroferroviários de transporte de passageiros. O método de trabalho partiu de uma revisão de literatura analisando os trabalhos publicados de avaliação do ciclo de vida de sistemas de transportes, buscando a escolha de modelos apropriados à proposição de um procedimento de inventário de ciclo de vida para sistemas metroferroviários de passageiros. O procedimento foi aplicado para a Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro e é baseado na coleta de dados durante a construção e na experiência do operador do sistema. Outro procedimento é proposto e aplicado para a quantificação das emissões evitadas pela implantação da Linha 4. Os resultados obtidos indicam que, para um ciclo de vida de 60 anos, a emissão por passageiro-quilômetro atinge 13,90 gramas de dióxido de carbono e em 14 anos após a inauguração do sistema a emissão não operacional será compensada, permitindo concluir que a Linha 4 contribuirá efetivamente para a redução das emissões totais de dióxido de carbono do setor de transportes da cidade do Rio de Janeiro.

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

ENERGY USE AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS ASSESSMENT IN THE
LIFECYCLE OF PASSENGER RAIL SYSTEMS: APPLICATION IN THE LINE 4 OF
THE RIO DE JANEIRO METRO

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

July/2016

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transportation Engineering

The focus of this work is to evaluate the carbon dioxide emissions and energy use in passenger rail systems lifecycle. The working method began with a literature review analyzing the works published of the lifecycle assessment of transport systems, seeking the choice of appropriate models to propose a procedure of lifecycle inventory for rail passenger systems. The procedure was applied to Line 4 of the Rio de Janeiro Metro and is based on data collection during the construction and system operator experience. Other procedure is proposed and applied to the quantification of emissions avoided by the implementation of Line 4. The results indicate that for a lifetime of 60 years, emissions per passenger kilometer reaches 13.90 grams of carbon dioxide and 14 years after the system inauguration, the nonoperating issuance will be compensated, allowing to conclude that the Line 4 effectively contribute to the reduction of total emissions of carbon dioxide from the city transportation sector in Rio de Janeiro.

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	OS SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS E A EMISSÃO DE CO₂...	5
2.1	As matrizes energéticas dos sistemas metroferroviários.....	7
2.2	A emissão da energia de tração nos sistemas metroferroviários.....	8
2.3	A emissão operacional nos sistemas metroferroviários.....	13
2.4	A emissão evitada pelo sistema metroferroviário.....	14
2.4.1	O fator mode shift.....	16
2.4.2	O fator congestion relief.....	17
2.4.3	O fator land use.....	19
2.4.4	Resultados de emissões evitadas em sistemas metroviários.....	20
2.5	A análise de ciclo de vida - Conceito e características.....	21
2.5.1	Definição do objetivo e escopo.....	24
2.5.2	Análise do ICV – Inventário de ciclo de vida.....	24
2.5.3	Avaliação do impacto.....	25
2.5.4	Interpretação.....	28
2.5.5	Modelos de ACV.....	28
2.5.6	Ferramentas de software para a ACV.....	28
2.6	ACV em sistemas de transporte.....	29
2.6.1	Sistemas de transporte rodoviário.....	30
2.6.2	Sistemas de transporte metroferroviário.....	31
2.6.2.1	Infraestrutura.....	34
2.6.2.2	Veículos.....	34
2.7	A declaração ambiental de produto.....	35
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
3.1	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte dos Estados Unidos.....	42
3.2	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte da Europa.....	50
3.3	Estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte da Ásia.....	57
3.4	Análise dos estudos de ciclo de vida em sistemas de transporte pesquisados.....	60

4	MÉTODO DE TRABALHO.....	65
4.1	Procedimento de ICV para um sistema metroferroviário.....	65
4.1.1	Construção da infraestrutura.....	68
4.1.2	Fabricação dos trens.....	71
4.1.3	Manutenção dos trens e da infraestrutura.....	72
4.1.4	Operação da infraestrutura.....	74
4.1.5	Operação dos trens.....	75
4.2	Fatores de emissão e densidade de energia.....	78
4.3	Análise do ICV.....	81
4.4	Procedimento para estimar a emissão evitada pela implantação de um sistema metroferroviário.....	81
5	APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ICV E EMISSÃO EVITADA NA LINHA 4 DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO.....	85
5.1	Construção da infraestrutura.....	88
5.1.1	Transporte Fornecedor – Obra.....	90
5.1.2	Transporte dentro da obra.....	94
5.1.3	Construção civil e via permanente - consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos.....	95
5.1.4	Construção civil e via permanente - consumo de energia elétrica pelos equipamentos.....	96
5.1.5	Construção civil e via permanente – energia e carbono embutido em materiais.....	97
5.1.6	Consolidação das emissões de construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	97
5.2	Fabricação dos trens.....	100
5.2.1	Fabricação dos trens - consumo de combustíveis fósseis.....	102
5.2.2	Fabricação dos trens - consumo de energia elétrica.....	103
5.2.3	Fabricação dos trens – energia e carbono embutido nos materiais.....	103
5.2.4	Transporte Fabricante – Obra.....	104
5.2.5	Consolidação da energia e emissões na fabricação dos trens.....	105
5.3	Manutenção dos trens e da infraestrutura.....	106
5.3.1	Equipamentos - consumo de combustíveis fósseis.....	107
5.3.2	Equipamentos - consumo de energia elétrica.....	107

5.3.3 Transporte - manutenção anual, substituição parcial de peças e componentes.....	108
5.3.4 Transporte – substituição completa de peças e componentes.....	109
5.3.5 Transporte – deslocamento das equipes de manutenção.....	109
5.3.6 Peças – energia e carbono embutido em materiais.....	110
5.4 Operação da infraestrutura.....	113
5.4.1 Equipamentos e transporte - consumo de combustíveis fósseis.....	113
5.4.2 Operação das estações - consumo de energia elétrica.....	114
5.5 Operação dos trens.....	115
5.5.1 Quantidade de PKM no ciclo de vida.....	115
5.5.2 Energia consumida e emissões produzidas na operação de trens.....	118
5.6 Consolidação do consumo de energia e emissões produzidas no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	121
5.7 Resultado do Inventário do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	121
5.8 Interpretação dos resultados do ICV.....	122
5.9 Análise de Sensibilidade.....	127
5.9.1 Sensibilidade em relação à carga de lotação.....	127
5.9.2 Sensibilidade em relação à matriz elétrica.....	128
5.10 Emissão evitada no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro...	129
5.11 Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	133
5.11.1 Valores limites do fator de emissão da eletricidade e da carga de lotação...	135
5.12 Possibilidades de mitigação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	137
5.12.1 Mitigação no cimento.....	137
5.12.2 Mitigação no aço.....	138
5.12.3 Mitigação na eletricidade.....	139
5.13 Comparações das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro com outros estudos de ciclos de vida.....	139
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146

APÊNDICE 1 – CÁLCULOS DAS ENERGIAS E EMISSÕES NA CONSTRUÇÃO DA INFRAESTRUTURA E FABRICAÇÃO DOS TRENS DA LINHA 4.....	159
APÊNDICE 2 – CÁLCULO DE PKM NO CICLO DE VIDA DA LINHA 4...	171
APÊNDICE 3 – MATERIAIS, EMISSÕES E ENERGIA NO CICLO DE VIDA DA LINHA 4 – RESULTADOS DO ICV.....	178
APÊNDICE 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	183
APÊNDICE 5– COMBUSTÍVEIS E EMISSÕES EVITADAS NO CICLO DE VIDA DA LINHA 4.....	189
APÊNDICE 6 – EMISSÕES ACUMULADAS, PRODUZIDAS E EVITADAS, ANO A ANO.....	192

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Valores médios da utilização de fontes térmicas na geração de energia elétrica, do Brasil e dos continentes, do grupo CoMET/NOVA – 2012.....	8
Figura 2: Emissões em sistemas de transporte, em gCO ₂ /PKM, nos Estados Unidos em 2008.....	12
Figura 3: Tipologia dos impactos de um sistema metroferroviário sobre a emissão de CO ₂	15
Figura 4: Representação do ciclo de vida.....	21
Figura 5: Fases da Análise do Ciclo de Vida.....	23
Figura 6: Fases operacionais e não operacionais do ciclo de vida de sistemas de transporte.....	30
Figura 7: ACV do sistema metroferroviário.....	33
Figura 8: Declaração ambiental de produto – Fases e escopo.....	36
Figura 9: Procedimento de pesquisa da revisão bibliográfica.....	39
Figura 10: São Francisco BART.....	44
Figura 11: São Francisco MUNI.....	44
Figura 12: Caltrain.....	44
Figura 13: Boston Green Line.....	45
Figura 14: CAHSR.....	45
Figura 15: Los Angeles Orange Line.....	48
Figura 16: Los Angeles Gold Line.....	49
Figura 17: Oslo Metro.....	56
Figura 18: Emissões totais, em tCO ₂ e, no ciclo de vida de 30 anos do trem do metrô de Oslo.....	56
Figura 19: Participação percentual de cada fase na emissão de CO ₂ e no ciclo de vida do trem do metrô de Roma.....	57

Figura 20: Procedimento do ICV para sistemas metroferroviários de passageiros..	67
Figura 21: Procedimento de emissões evitadas para sistemas metroferroviários de passageiros.....	83
Figura 22: Linhas 1 e 2 do Metrô do Rio de Janeiro.....	86
Figura 23: Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	87
Figura 24: TBM – <i>Tunnel Boring Machine</i> , utilizado nos trechos de maior densidade demográfica da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	89
Figura 25: Via Permanente em processo de montagem na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	94
Figura 26: Composição do trem da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.	101
Figura 27: Energia e emissões na fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	102
Figura 28: Emissões produzidas na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	124
Figura 29: Energia produzida na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	125
Figura 30: Emissão no ciclo de vida em função da carga de lotação da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	127
Figura 31: Energia no ciclo de vida em função da carga de lotação da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	128
Figura 32: Sensibilidade da emissão no ciclo de vida em relação ao fator de emissão da eletricidade.....	129
Figura 33: Atração de usuários pela disponibilidade da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	130
Figura 34: Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida da Linha 4.....	134
Figura 35: Ponto de recuperação das emissões ao final do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, correspondente ao fator máximo de emissão da eletricidade.....	135
Figura 36: Ponto de recuperação das emissões ao final do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, correspondente à carga de lotação mínima.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Percentual de energia elétrica consumida pela força de tração de sistemas metroviários.....	9
Tabela 2: Consumo da energia elétrica de tração dos trens, emissões de CO ₂ e fontes térmicas das matrizes energéticas de três metrô do grupo CoMET/NOVA, em 2012.....	10
Tabela 3: Emissões de CO ₂ da energia de tração dos trens em sistemas metroviários.....	10
Tabela 4: Emissões em gCO ₂ /PKM, de metrô, carros e ônibus.....	11
Tabela 5: Emissões médias nacionais, em gCO ₂ /PKM, nos Estados Unidos em 2008.....	11
Tabela 6: Consumo anual de energia elétrica de sistemas metroviários.....	13
Tabela 7: Emissões operacionais de sistemas metroviários.....	14
Tabela 8: Emissões evitadas por sistemas metroviários.....	20
Tabela 9: Categorias de impactos ambientais e indicadores.....	26
Tabela 10: Declarações ambientais de trens.....	37
Tabela 11: Emissões de GEE da Bothnia Line, em kgCO ₂ e/PKM.....	38
Tabela 12: Métodos de ACV utilizados no inventário de transporte de passageiros dos Estados Unidos.....	43
Tabela 13: Acréscimo na emissão operacional de meios de transporte de passageiros dos Estados Unidos.....	46
Tabela 14: Emissões, em gCO ₂ e/passageiro-milha, no ciclo de vida do transporte rodoviário e metroferroviário nos Estados Unidos.....	47
Tabela 15: Emissões, em gCO ₂ /PKM, do BRT e Metrô de Delhi.....	59
Tabela 16: Emissões de CO ₂ do BRT de Xiamen, China.....	60
Tabela 17: Trabalhos selecionados de ciclo de vida em sistemas metroferroviários.....	61
Tabela 18: Fatores de emissão e de energia utilizados.....	80
Tabela 19: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Materiais e Combustíveis.....	91

Tabela 20: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Via permanente – trilhos.....	92
Tabela 21: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Via permanente – dormentes.....	92
Tabela 22: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Via permanente – terceiro trilho.....	93
Tabela 23: Emissão e energia em transporte dentro da obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	95
Tabela 24: Emissão do consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos utilizados na obra da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	96
Tabela 25: Emissão e energia do consumo de energia elétrica pelos equipamentos utilizados na obra da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	96
Tabela 26: Energia e carbono embutido em materiais utilizados na construção do Metrô do Rio de Janeiro.....	97
Tabela 27: Energia na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	99
Tabela 28: Emissões na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	100
Tabela 29: Consumo de combustíveis fósseis na fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	103
Tabela 30: Consumo de energia elétrica e emissões de CO ₂ na fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	103
Tabela 31: Energia e carbono embutido em materiais de 1 trem da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	104
Tabela 32: Energia / Emissão do Transporte dos 15 trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	105
Tabela 33: Consolidação da energia/emissão da fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	106
Tabela 34: Consolidação da emissão e energia estimada na Manutenção dos trens e da infraestrutura da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	111
Tabela 35: Emissões e energia na operação da infraestrutura da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	114
Tabela 36: Matriz de distâncias, em km, entre as estações da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	116

Tabela 37: Matriz O-D de passageiros – 2016 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	116
Tabela 38: Matriz PKM – 2016 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	117
Tabela 39: Total de PKM da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	118
Tabela 40: Total anual de carro-km na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	119
Tabela 41: Evolução da carga de lotação no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	120
Tabela 42: Energia e emissão no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	121
Tabela 43: Resultados do ICV por PKM e por fase do ciclo de vida.....	122
Tabela 44: Emissões de CO ₂ e uso de energia por PKM por fases do ciclo de vida da Linha 4.....	123
Tabela 45: Participação da emissão em gCO ₂ /PKM dos recursos materiais e energéticos do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	126
Tabela 46: Participação da energia em kJ/PKM dos recursos materiais e energéticos do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	126
Tabela 47: Emissão evitada na operação dos trens durante o ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	132
Tabela 48: Emissões evitadas líquidas no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	133
Tabela 49: Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.....	134
Tabela 50: Emissões da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro e sistemas de metrô, VLT, BRT e automóvel.....	141

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
AGENEAL - Agência Municipal de Energia de Almada
AISI – American Iron and Steel Institute
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP - Agência Nacional do Petróleo
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
CH₄ - Metano
CO₂ - Dióxido de carbono
CO₂e - Dióxido de carbono equivalente
CoMET/NOVA - Community of Metros / Group of Metros
COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
COPPETEC - Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos
DEFRA – Department for Environment, Food & Rural Affairs
DETRAN – Departamento de Trânsito
CRC - Changchun Railway Vehicles Corporation
EIA - US Energy Information Administration
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

REET - Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation
GWP - Global Warming Potential
HSR - High Speed Rail
ICE – Inventory of Carbon and Energy
ICV - Inventário do Ciclo de Vida
IEA - International Energy Agency
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO - International Organization for Standardization
LASUP - Laboratório de Aplicações de Supercondutores
LCA - Life Cycle Assessment
LCI - Life Cycle Inventory
LCIA – Life Cycle Impact Assessment
LISBOA e-NOVA - Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa
LRT - Light Rail Transit
LVT - Light Vibration Track
LU - London Underground
MA - Ministério da Agricultura
MAGLEV - Magnetic Levitation
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MTA - Metropolitan Transport Authority
MTR - Mass Transit Railway System – Hong Kong
MUNI - San Francisco Municipal Railway
N₂O - Óxido nitroso
NATM - New Austrian Tunnelling Method
NYC - City of New York
ODP - Ozone Depletion Potential
OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development
PaLATE - Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects
PCR - Product Category Rules
PDE - Plano Decenal de Energia
PKM – Passageiro-quilômetro
PlaNYC - New York City Plan Reducing Greenhouse Gas Emissions
POCP - Photo-Oxidant Creation Potential

RTSC - Railway and Transport Strategy Centre
SIN - Sistema Interligado Nacional
SUV - Sport Utility Vehicle
TBM - Tunnel Boring Machine
TFL - Transport for London
TTI - Texas Transportation Institute
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
US-EPA - United States Environmental Protection Agency
VKM – Veículo-quilômetro
VLT - Veículo Leve sobre Trilhos
WBCSD – World Business Council for Sustainable Development
WMO - World Meteorological Organization
WORLDSTEEL - Worldsteel Association
WRI - World Resources Institute
WSC - World Shipping Council

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte de passageiros demandam a construção de infraestrutura, com estradas, túneis, viadutos, estações etc., necessária à operação dos veículos. Nos sistemas metroferroviários as atividades de construção dessa infraestrutura podem ser intensas, dependendo do traçado escolhido e das características topográficas, geológicas e geotécnicas ali encontradas (METRÔ SÃO PAULO, 2014a), gerando grandes quantidades de emissão de dióxido de carbono (CO₂), que geralmente não são medidas e consideradas como componente das emissões do sistema de transporte (CHESTER, 2008). Outras emissões não relacionadas diretamente à operação dos veículos, como as provenientes da cadeia de suprimento dos combustíveis fósseis, são abordadas em algumas pesquisas, complementando as emissões operacionais da queima de combustível decorrentes do seu uso final nos veículos. Uma pesquisa abrangente da emissão de carbono produzida pelos sistemas de transporte, que contemple outras emissões além da operacional, impõe a necessidade de se considerar o ciclo de vida desses sistemas. Essa abordagem permite que sejam conhecidas as emissões das diferentes fases do ciclo de vida dos sistemas de transporte. A análise da emissão de carbono no ciclo de vida dos sistemas de transporte permite uma visão além da tradicional, que trata apenas da emissão na operação dos veículos, ou seja, a emissão produzida no uso final dos veículos e dos combustíveis.

1.1 Justificativa do tema da tese

As pesquisas de emissão de CO₂ em sistemas de transporte geralmente consideram apenas a emissão produzida na operação (uso final), seja pela queima do combustível ou na geração da energia elétrica que movimenta os veículos, não levando em consideração outras emissões que ocorrem no ciclo de vida. Há, portanto, uma lacuna a ser preenchida nas pesquisas em sistemas de transporte de passageiros, aprofundando o estudo do ciclo de vida desses sistemas, face ao fato de que o tema parece ser pouco explorado no Brasil.

A contribuição deste trabalho está em pesquisar a emissão de CO₂ em sistemas metroferroviários de passageiros. Serão abordados os sistemas metroviários,

ferroviários ou VLT – Veículo Leve sobre Trilhos, considerando a abordagem do ciclo de vida e apresentando um procedimento de construção de um ICV – Inventário de Ciclo de Vida para esses sistemas. O procedimento será aplicado na implantação da Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro, que ligará Ipanema à Barra da Tijuca e à Gávea, com previsão de inauguração no segundo semestre de 2016.

Este trabalho tem um caráter de ineditismo no Brasil e na América Latina, onde não foram identificados trabalhos que considerem a abordagem de ciclo de vida em sistemas metroferroviários. Mesmo os trabalhos que consideram a abordagem de ciclo de vida em sistemas de transporte rodoviários desenvolvidos na América Latina cobrem apenas os aspectos ligados ao combustível, deixando de considerar a construção da infraestrutura e a fabricação dos veículos. Considerando essa maior extensão de abordagem do ciclo de vida, este trabalho é também inédito, na América Latina, em sistemas de transportes. Em relação à construção da infraestrutura o trabalho utiliza grande quantidade de dados reais de consumo de materiais na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, enquanto os trabalhos publicados de ciclo de vida de sistemas metroferroviários geralmente utilizam estimativas ou modelos que tenham alguma semelhança e que estejam contidos em bases de dados.

Outro aspecto inovador é a apresentação e aplicação de um modelo para a determinação da emissão de CO₂ evitada pela disponibilidade de um sistema metroferroviário de passageiros, considerando todo o ciclo de vida, permitindo uma melhor visão do impacto causado na região pela sua implantação.

A natureza da análise do ciclo de vida aliada à complexidade do tema impõe a delimitação do escopo do levantamento de informações e dados, restando sempre áreas não totalmente incluídas. Contudo o trabalho aqui apresentado constitui uma base inicial e motivadora para futuros trabalhos de aprofundamento em análise do ciclo de vida em sistemas de transportes brasileiros.

1.2 Objetivo da tese

O objetivo desta tese é investigar a emissão de CO₂ e o uso de energia em sistemas metroferroviários de transporte de passageiros sob uma abordagem de ciclo de vida. Um procedimento genérico de ICV será construído e servirá como base para aplicação na Linha 4 do sistema metroviário da cidade do Rio de Janeiro, planejada para entrada em operação no segundo semestre de 2016, analisando os resultados obtidos e comparando com resultados de trabalhos semelhantes. Outro procedimento, para a determinação das emissões evitadas pela implantação da Linha 4, também será apresentado e aplicado. Pretende-se que ao final do trabalho sejam respondidas questões como: a) Qual a importância relativa de cada fase do ciclo de vida da Linha 4?, b) Quais os fatores chave na emissão de CO₂ e uso de energia da L4?, c) Considerando o ciclo de vida, os sistemas metroferroviários continuariam a contribuir na redução das emissões totais do setor de transportes? e d) Em quanto tempo as emissões não operacionais serão compensadas pelos ganhos de redução de emissões na operação do sistema?

1.3 Estrutura da tese

Este trabalho é organizado em seis capítulos:

Capítulo 1: apresenta uma introdução, considerando o tema da tese e sua justificativa, incluindo aspectos de ineditismo. São também definidos os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: apresenta o contexto inicial do trabalho, como a importância das emissões de CO₂, os efeitos ambientais produzidos, as emissões no setor de transportes e nos sistemas metroferroviários e as abordagens e ferramentas utilizadas.

Capítulo 3: apresenta uma revisão bibliográfica que cobre os trabalhos publicados de ciclo de vida em sistemas metroferroviários e rodoviários, como base para a proposição de um procedimento de ICV.

Capítulo 4: apresenta o método de trabalho, propondo procedimentos para a construção do ICV e para a determinação da emissão evitada, no ciclo de vida, de um sistema metroferroviário de passageiros.

Capítulo 5: detalha a aplicação dos procedimentos propostos de ICV e de determinação da emissão evitada na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro e os resultados obtidos.

Capítulo 6: apresenta as conclusões e recomendações do trabalho.

2 OS SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS E A EMISSÃO DE CO₂

Os GEE - Gases de Efeito Estufa lançados à atmosfera pela natureza e pela ação humana absorvem parte da radiação infravermelha refletida na Terra, dificultando seu escape para o espaço e potencializando um maior aquecimento do planeta. A quantidade desses gases, principalmente o CO₂ resultante da atividade humana, tem crescido dramaticamente, provocando um aumento anual na temperatura média do planeta de 0,85 graus Celsius, no período entre 1880 e 2012. Os 30 anos entre 1983 e 2012 foram mais quentes do que qualquer período anterior de 30 anos nos últimos 1.400 anos. No pior cenário, sem esforços de redução de emissão de GEE por parte das nações, é previsto que a temperatura média poderá subir até 4,8 graus Celsius no próximo século (IPCC, 2014a).

No período de 1984 a 2013, o maior acréscimo anual de GEE emitido ocorreu em 2013, atingindo 2,9 partes por milhão (WMO, 2014), o que mostra a gravidade do problema.

O aquecimento global modifica o clima em diversas regiões do planeta, gerando impactos como fortes chuvas, inundações e aumento do nível do mar, contribuindo também para a ocorrência de desastres naturais.

Os efeitos danosos dos GEE motivaram várias nações a assumirem compromissos e implantarem ações de mitigação, ou seja, de redução de emissões de GEE, em vários setores, incluindo o de transportes.

Dentre os gases de efeito estufa emitidos por veículos podem ser citados o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). O CO₂ é o principal gás em termos de quantidade emitida, sendo o responsável pela maior contribuição para o aquecimento global. Por isso é usado como referência em termos de poder de aquecimento. Em relação a ele, considerado de valor unitário, o CH₄ tem valor 25 e o N₂O tem valor 298, considerando um tempo de 100 anos de permanência na atmosfera (IPCC, 2014b). Esses valores são uma medida do que se denomina “Potencial de Aquecimento Global” (em inglês GWP – *Global Warming Potential*) e são determinados para um horizonte de tempo, sendo utilizados 25, 100, ou 500 anos. A

massa emitida pelos GEE é calculada em quantidade equivalente de CO₂, ou seja, a quantidade de CO₂ que tem o mesmo potencial de aquecimento, medida em CO₂e (CO₂ equivalente).

A queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), de um modo geral, provoca emissão de GEE, além da emissão de outros gases poluentes, nocivos diretamente à saúde humana, mas que não afetam diretamente o aquecimento global.

A emissão de CO₂ em sistemas de transportes responde por cerca de 23% do total de emissões globais oriundas do consumo de combustíveis fósseis, sendo o transporte rodoviário responsável pela maior parte dessas emissões (OECD, 2010). É estimado que até 2050 a energia fóssil utilizada nos sistemas de transporte dobre, tendo como base o ano de 2009, o que aumentaria ainda mais a emissão de GEE, caso ações de mitigação dessas emissões não sejam implantadas (IEA, 2009). No Brasil, a energia consumida pelo setor de transportes em 2013 representou 32% da energia total, tendo havido um acréscimo de 5,2% em relação a 2012 (EPE, 2014). A quantidade de GEE emitidos naquele ano pelo setor de transportes do Brasil chegou a 215 milhões de toneladas, medidas em CO₂e, correspondendo a 46,9% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2014).

A consciência ambiental vem crescendo em todo mundo, e os governos vêm implantando políticas de estímulo à redução da emissão de gases do efeito estufa. Algumas cidades definiram quantitativamente objetivos de redução, como, por exemplo, Londres, que estabeleceu programa de redução de emissões de carbono no setor de transportes, cortando 60% das emissões até 2025, tendo como base o ano de 1999 (LU, 2009). Em Portugal, a cidade do Porto estabeleceu uma meta de redução de 45% até 2020, em relação a 2004 (ADEPORTO, 2010), enquanto que a cidade de Lisboa estabeleceu meta de 20% de redução entre 2013 e 2020, tendo como base o ano de 2012 (LISBOA e-NOVA, 2014). No Brasil, o Estado do Rio de Janeiro fixou pelo decreto nº 43.216 de 30/09/2011, objetivos de redução de 30% das emissões em transportes entre 2010 e 2030, 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).

A abordagem usualmente utilizada na medição das emissões de CO₂ em sistemas de transporte considera as emissões decorrentes da queima do combustível, como nos automóveis, ônibus, caminhões, aeronaves, navios etc. Para sistemas movidos a energia elétrica, como ferrovias e metrô, considera-se a emissão indireta produzida na geração da eletricidade e provocada pela queima de combustíveis nas fontes térmicas que compõe a matriz de geração de eletricidade na maior parte dos países desenvolvidos. A composição da matriz de energia elétrica é um fator determinante na emissão dos sistemas metroferroviários.

2.1 As matrizes energéticas dos sistemas metroferroviários

Os grupos CoMET – *Community of Metros* e NOVA – *Group of Metros* são grupos internacionais de sistemas metroferroviários com o intuito de, em parceria, criarem projetos cobrindo diversas áreas de interesse comum, entre eles o uso eficiente da energia elétrica. O grupo CoMET reúne sistemas de maior porte e o grupo NOVA reúne sistemas de menor porte. Ambos trabalham em conjunto com a RTSC – *Railway and Transport Strategy Centre*, órgão de pesquisas do *Imperial College London* e contam com 32 membros em todos os continentes. Por um acordo de confidencialidade firmado entre os membros dos grupos, os dados obtidos nessas pesquisas não podem, quando publicados, identificar seus membros.

Na matriz de geração de energia elétrica dessa comunidade, constata-se que em todos os continentes existe um uso extensivo de fontes térmicas, com uma composição que envolve carvão, petróleo e gás natural (METRÔ RIO, 2014a). A figura 1 apresenta a utilização média de fontes térmicas, por continente, em 2012, dos 32 componentes do grupo.

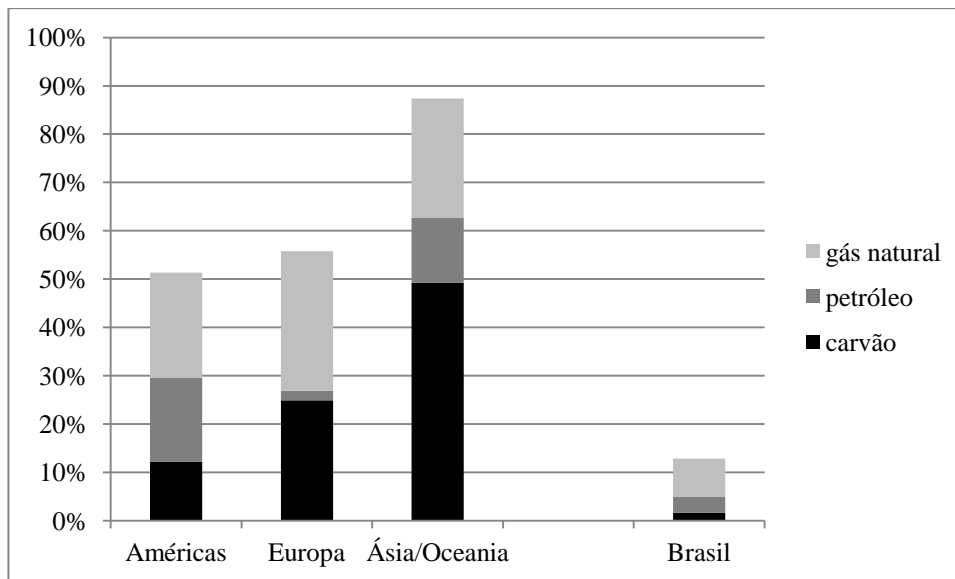


Figura 1: Valores médios da utilização de fontes térmicas na geração de energia elétrica, do Brasil e dos continentes, do grupo CoMET/NOVA – 2012.
 Fontes: Elaboração própria a partir de METRÔ RIO (2014a) e EPE (2013).

Conforme a figura 1 mostra, a Ásia/Oceania tem grande participação de fontes térmicas a carvão, petróleo e gás natural na geração de energia elétrica, o que vai implicar em que seus sistemas metroferroviários tenham maior emissão de CO₂ que os demais.

No Brasil há pouca utilização de fontes térmicas na geração de energia elétrica, com predominância de fontes renováveis, responsáveis por 79,30% do total da matriz energética (EPE, 2014). O uso de fontes térmicas para geração de energia elétrica no Brasil é menor do que a média de todos os continentes. Por isso os sistemas metroferroviários brasileiros tendem a ter emissões de CO₂, em média, menores que a maioria dos sistemas metroferroviários em todo o mundo.

2.2 A emissão da energia de tração nos sistemas metroferroviários

A emissão da energia de tração nos sistemas metroferroviários é a emissão de CO₂ relacionada somente à geração da energia usada pelos veículos que operam no sistema metroferroviário, que é a eletricidade que realiza a movimentação dos trens. Ela está diretamente ligada ao consumo de energia de tração dos trens, desprezando outros tipos de consumo de energia elétrica do sistema, como a iluminação das estações, funcionamento das escadas rolantes etc. A energia elétrica consumida na tração dos trens representa usualmente a maior parte da energia elétrica operacional total

consumida, tipicamente em torno de 60% a 80%, conforme mostrado na tabela 1. Tal abordagem é a mais apropriada para a comparação de resultados com outros meios de transporte quando se analisa a emissão provocada apenas pelo consumo de combustível necessário à movimentação do veículo.

Tabela 1: Percentual de energia elétrica consumida pela força de tração de sistemas metroviários.

Sistema	% da força de tração dos trens	Fonte:
Metrô de Nova Iorque	75%	MTA (2008)
Metrô do Porto	75%	METRÔ PORTO (2011)
Metrô do Rio de Janeiro	70%	METRÔ RIO (2014b)
Metrô de São Paulo	70%	METRÔ SÃO PAULO (2014b)
Metrô de Londres	67%	LU (2009)
Metrô de Los Angeles	65%	METRÔ LOS ANGELES (2014)

A medida “gramas de CO₂ por passageiro-km (gCO₂/PKM)” é comumente utilizada na avaliação da eficiência do sistema de transporte em termos de emissão de CO₂, por considerar a quantidade de passageiros transportados e a quilometragem por eles percorrida. Para obter esse resultado devem-se multiplicar os totais correspondentes de passageiros transportados no ano pela extensão média das viagens. O grupo CoMET/NOVA utiliza essa medida para que cada componente possa monitorar e comparar seu desempenho perante os demais componentes.

A tabela 2 mostra as emissões de carbono, pelo consumo da energia elétrica de tração, em 2012, em gCO₂/PKM, de três sistemas metroviários do grupo CoMET/NOVA, um de cada continente. A combinação de fontes térmicas para geração de energia elétrica nas matrizes energéticas é mostrada, confirmando a sua importância no resultado das emissões de CO₂.

Tabela 2: Consumo da energia elétrica de tração dos trens, emissões de CO₂ e fontes térmicas das matrizes energéticas de três metrô do grupo CoMET/NOVA, em 2012.

Continentes dos Metrô	Consumo da Energia Elétrica de Tração dos Trens (MWh)	Emissão produzida (tCO ₂)	tCO ₂ /MWh	Emissão (gCO ₂ /PKM)	Fontes Térmicas das Matrizes Energéticas			Total
					% carvão	% petróleo	% gás natural	
Ásia/Oceania	573.000	509.308	0,89	97	84%	1%	12%	97%
Américas	1.696.210	1.001.357	0,59	60	49%	1%	21%	71%
Europa	17.470	9.112	0,52	48	14%	15%	52%	81%

Fonte: METRÔ RIO (2014a).

Observa-se a variação nos resultados das emissões produzidas, decorrentes do tamanho dos sistemas e das variadas matrizes energéticas utilizadas. A quantidade de tCO₂/MWh indica que o metrô da Ásia/Oceania é o de maior emissão, o que é confirmado pelo grande percentual de carvão na matriz energética. Observa-se que as emissões por PKM seguem a mesma ordem, do maior para o menor valor, que a relação tCO₂/MWh, indicando que as cargas de lotação dos 3 metrô são semelhantes. As emissões por PKM são influenciadas pelas matrizes energéticas e pela carga de PKM, mas nesse caso a matriz energética é o fator principal. O metrô de maior emissão por PKM (97 gCO₂) é o que utiliza o maior percentual de fontes térmicas, com 84% de utilização de carvão, fonte térmica de maior emissão de CO₂ (BRASIL, 2013). O metrô de menor emissão (48 gCO₂) é o que tem o menor percentual de utilização de carvão.

Alguns metrô selecionados que publicaram dados de emissões devidas à energia de tração dos trens são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Emissões de CO₂ da energia de tração dos trens em sistemas metroviários.

Metrô	Energia anual de Tração (MWh)	Emissão anual Produzida (tCO ₂)	tCO ₂ /MWh	Emissão (gCO ₂ /PKM)	Ano Base Emissão
Londres ¹	820.000	507.662	0,62	63	2008
Lisboa ²	57.102	28.304	0,50	33	2010
Rio de Janeiro ³	146.668	14.085	0,10	7	2013
São Paulo ⁴	437.500	42.000	0,10	6	2013

Fontes: ¹ LU (2009), ² METRÔ LISBOA (2011), ³ METRÔ RIO (2014b), ⁴ METRÔ SÃO PAULO (2014b).

Observa-se que os metrô do Rio de Janeiro e São Paulo apresentaram os melhores resultados, em gCO₂/PKM, estando bem distanciados dos metrô de Londres e de

Lisboa. Isso pode ser explicado em parte porque a relação tCO_2/MWh é bem menor para esses sistemas, comprovando que a matriz energética brasileira tem menor uso de fontes térmicas. Contudo a relação gCO_2/PKM é influenciada também pela carga de PKM. O fato de Rio e São Paulo terem valores semelhantes para essa relação significa que a carga de PKM de São Paulo em relação à do Rio tem uma proporção semelhante à relação entre o consumo de eletricidade de tração, o que indica, em princípio, que as cargas de lotação desses sistemas devem ser semelhantes.

Para efeito de comparação de resultados com outros meios de transportes, na tabela 4 são apresentadas as emissões em CO_2 para ônibus, automóveis e metrô, de cada uma das localidades.

Tabela 4: Emissões em gCO_2/PKM , de metrô, carros e ônibus.

Local	Metrô	Automóveis	Ônibus	Fonte (metrô)	Fonte (automóveis e ônibus)
Londres	58	170	80	LU (2009)	TFL (2010)
Lisboa	33	180	85	METRÔ LISBOA (2011)	AGENEAL (2005)
São Paulo	6	110	64	METRÔ SÃO PAULO (2014b)	METRÔ SÃO PAULO (2014b)
Rio de Janeiro	7			METRÔ RIO (2014b)	

Observa-se que todos os sistemas metroviários analisados têm emissão menor que os automóveis e ônibus, sendo que os metrô do Rio de Janeiro e São Paulo têm os melhores desempenhos.

Nos Estados Unidos a emissão média nacional da energia de tração, segundo FTA (2010), teve valores conforme a tabela 5.

Tabela 5: Emissões médias nacionais, em gCO_2/PKM , nos Estados Unidos em 2008.

Automóveis	Ônibus	VLT	Ferrovias	Metrô
272	180	101	93	62

Fonte: FTA (2010).

As emissões da energia de tração (FTA, 2010) em sistemas de transporte selecionados de quatro regiões dos Estados Unidos (Nova Iorque, Maryland, Califórnia e

Massachusetts) são mostradas na figura 2. Elas são comparadas entre si, com a média regional dos ônibus e com a média nacional dos automóveis.

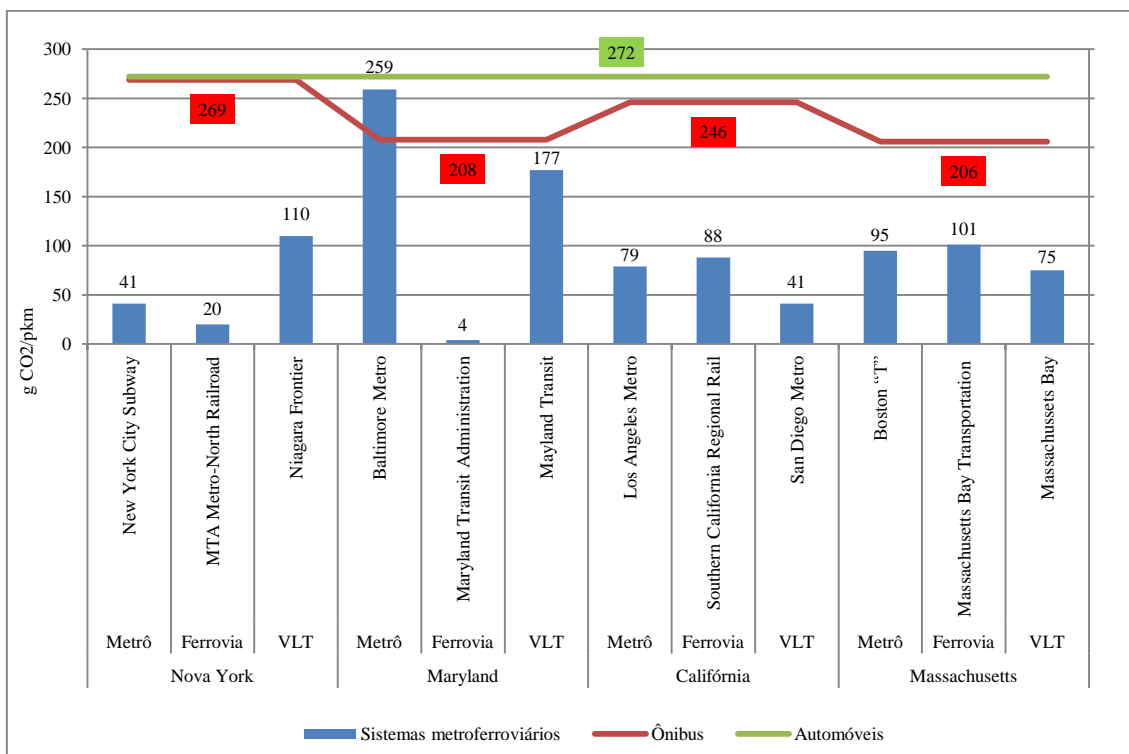


Figura 2: Emissões em sistemas de transporte, em gCO₂/PKM, nos Estados Unidos em 2008. Fonte: Elaboração própria a partir de FTA (2010).

Nos Estados Unidos, diferentemente do Brasil, a distribuição de energia elétrica é realizada por sub-regiões, permitindo a utilização de fatores de emissão mais próximos dos reais. Assim alguns sistemas podem ser alimentados por energia elétrica proveniente de fontes hidrelétricas enquanto em outros sistemas as fontes são térmicas, fazendo com que haja diferenças sensíveis entre a emissão dos sistemas.

Observa-se que o único sistema que tem emissão maior que os ônibus é o Metrô de Baltimore. Isso se deve a uma baixa carga de lotação do sistema, de 17% na média (FTA, 2010), ou seja, para cada 100 lugares ofertados pelo sistema apenas 17 são ocupados por passageiros.

2.3 A emissão operacional nos sistemas metroferroviários

Considera toda a emissão produzida pela geração da energia elétrica consumida na operação do sistema, o que significa que outras emissões além daquelas produzidas na movimentação dos veículos serão também consideradas, como, por exemplo, na iluminação e no funcionamento dos equipamentos operacionais das estações.

Os sistemas metroferroviários são grandes consumidores de energia elétrica. O Metrô de Londres consome mais de 1 TWh por ano, valor responsável por 2,8% de todo o consumo da cidade, sendo o seu maior consumidor individual (LU, 2009). A tabela 6 apresenta os consumos anuais de energia elétrica de uma seleção de sistemas metroviários.

Tabela 6: Consumo anual de energia elétrica de sistemas metroviários.

Metrô	Consumo de energia elétrica	Fontes:
Nova Iorque	3,4 TWh	MTA (2008)
Hong Kong	1,4 TWh	MTR (2013)
Londres	1,0 TWh	LU (2009)
São Paulo	0,6 TWh	METRÔ SÃO PAULO (2014b)
Porto	0,5 TWh	METRÔ PORTO (2011)

Muitas empresas levantam e divulgam seus inventários corporativos de emissões de GEE. Essas emissões são classificadas por escopo, sendo que o chamado “Escopo 1” reúne as emissões diretas, o “Escopo 2”, as emissões indiretas pelo uso da eletricidade e o “Escopo 3” outras emissões indiretas (WRI, 2014).

A tabela 7 apresenta os dados de inventários de emissões operacionais, pelo uso da eletricidade, ou seja, os dados do “Escopo 2”, de sistemas metroviários selecionados.

Tabela 7: Emissões operacionais de sistemas metroviários.

	São Paulo	Rio de Janeiro	Bilbao	Nova Iorque	Lisboa
Ano Base Emissões	2013	2013	2010	2010	2010
Emissões Produzidas em tCO ₂	20.440	5.690	14.495	684.000	55.345
Emissão em gCO ₂ /PKM	7,5	9	25	42	64
FONTES	METRÔ SÃO PAULO (2014b)	METRÔ RIO (2014b)	METRÔ BILBAO (2012)	NYC (2011) MTA (2012)	METRÔ LISBOA (2011)

A abordagem da energia operacional é utilizada nos grupos CoMET/NOVA. Levantamento desse grupo em 30 sistemas de todos os continentes concluiu que as emissões por uso de eletricidade, em 2012, variaram de 6 gCO₂/PKM a 118 gCO₂/PKM, resultado influenciado pelas diferentes matrizes energéticas e diferentes cargas de lotação, sendo que a emissão média desses 30 metrô foi de 54 gCO₂/PKM (METRÔ RIO, 2014a). Entre os continentes, a maior média de emissão foi do continente Ásia/Oceania, com 67 gCO₂/PKM. A Europa apresentou a média de 51 gCO₂/PKM. A América foi o continente com menor emissão média entre os 30 metrô, com 38 gCO₂/PKM.

2.4 A emissão evitada pelo sistema metroferroviário

Nesta abordagem é analisado como seria o sistema de transporte na região se o sistema metroferroviário não tivesse sido implantado. A implantação desse sistema causa mudanças profundas no trânsito da região. Sem o sistema metroferroviário a região teria um trânsito mais intenso de carros e ônibus e possivelmente uma maior emissão de carbono.

Para se chegar a um valor mais representativo da emissão líquida do sistema é determinada a quantidade de emissão evitada pela implantação do sistema metroferroviário, funcionando como crédito ao sistema. A emissão do próprio sistema é também determinada, constituindo-se em débito ao sistema. Pode-se concluir, pela diferença débito-crédito, se o sistema de transporte tem emissão líquida positiva ou negativa. No primeiro caso o sistema emite CO₂ no valor calculado e no segundo caso evita a emissão.

Essa abordagem foi recomendada pela APTA - *American Public Transportation Association*, que apresentou um modelo para determinação da emissão evitada por sistemas de transporte público. O modelo, adaptado para sistemas metroferroviários, é mostrado na figura 3. A lógica dessa abordagem é considerar que a implantação do sistema metroferroviário altera o perfil do trânsito na região, favorecendo o seu uso e diminuindo o uso de automóveis e ônibus. Menos automóveis e ônibus no trânsito significam menor emissão de CO₂ pela ausência desses veículos e também pelo melhor desempenho dos veículos que trafegam, devido ao menor congestionamento do trânsito. O sistema metroferroviário favorece o crescimento da densidade populacional na região por ele atendida e pode encorajar os usuários a complementarem seu itinerário com bicicleta ou pequenas caminhadas, o que contribui para um menor uso de automóveis e ônibus. Ao contrário, a falta de um sistema metroferroviário acarreta o espalhamento da região, com comunidades se distanciando fisicamente, favorecendo a construção de casas e edifícios maiores, incentivando um maior uso do automóvel nos longos deslocamentos. Os *lay-outs* das cidades seriam então totalmente diferentes, com implicações na economia, no transporte etc. A dificuldade na aplicação desse modelo consiste na quantificação de cada um de seus elementos: na ausência do metrô qual seria a escolha de transporte do usuário? Como ficaria o trânsito na região?

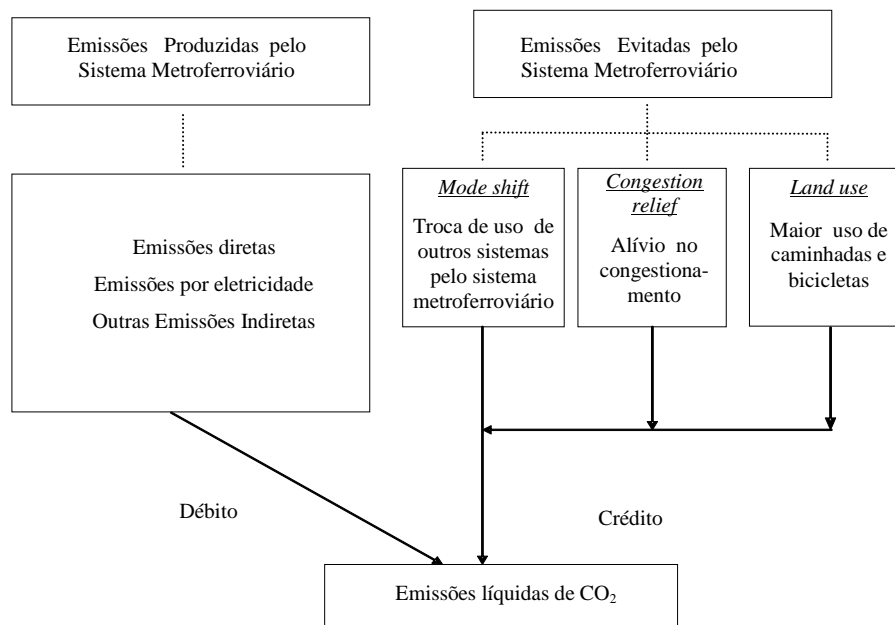


Figura 3: Tipologia dos impactos de um sistema metroferroviário sobre a emissão de CO₂. Fonte: Adaptado de APTA (2009).

O modelo considera os seguintes elementos:

a) Débito: a emissão gerada pelo sistema metroferroviário, podendo ser considerado como todo o inventário de emissões de GEE (emissões diretas + emissões por eletricidade + outras emissões indiretas), ou apenas parte dele.

b) Crédito: a emissão evitada pelo sistema, dividida em:

✓ *mode shift*, que representa os ganhos obtidos pelo fato de usuários de carro particular e outros meios de transporte de maior emissão trocarem seus meios de transporte pelo uso do sistema, conduzindo a uma menor quantidade de viagens desses veículos de maior emissão.

✓ *congestion relief*, que representa os ganhos obtidos pelo menor congestionamento do trânsito causado pelo menor número de veículos nas ruas e conduzindo a um melhor desempenho de combustível dos veículos que transitam.

✓ *land use factor*, que representa os ganhos obtidos pela maior densidade populacional, que conduz a viagens mais curtas e ao maior uso de caminhadas e bicicleta.

2.4.1 O fator *mode shift*

Caso o sistema de transporte público não existisse qual seria a escolha dos seus usuários? No estudo da APTA (2009) as opções eram usar automóveis, desistir da viagem, ou fazê-la a pé ou de bicicleta. O fator *mode shift* representava, portanto, o percentual dos usuários de transporte público que passariam a utilizar automóveis. Assim o valor 0,47 significa que 47% dos usuários utilizariam automóveis e 53% não fariam viagens, ou as fariam a pé ou de bicicleta.

Segundo FDT (2008), são quatro as maneiras mais usuais de se fazer a estimativa do fator *mode shift*:

a) Simular a ausência do sistema de transporte público em modelos de demanda de viagens. Isto requer uma grande quantidade de dados e complexos algoritmos que levem em conta vários fatores como níveis de utilidade para os usuários das escolhas dos modos de transporte, condições socioeconômicas dos usuários etc. Um estudo preliminar foi utilizado pela MTA (2009), coletando e comparando dados de viagens em Nova Iorque nos anos de 2000 a 2006. Comparando o acréscimo de 2006 relativamente a 2000, encontrou-se um fator *mode shift* de 0,29 na região central de Nova Iorque, que pode ser explicado pela maior densidade populacional, favorecendo caminhadas e o uso de bicicletas e menor propriedade de automóveis. Já em Long Island, o fator *mode shift* atingiu 0,92, refletindo a menor densidade populacional e a maior propriedade de automóveis.

b) Examinar o comportamento das viagens durante longas interrupções do sistema público, como em greves. Foi utilizado nas greves de transporte público em Nova Iorque, em 2005 e Los Angeles, em 2003.

c) Realizar pesquisa com os usuários sobre suas preferências de viagens. É recomendado perguntar ao usuário que opção ele escolheria na ausência do sistema de transporte público, oferecendo as 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 um conjunto de padrões baseado no tamanho da população. Esta última alternativa é utilizada quando as demais não são viáveis. Segundo APTA (2009) os usuários que migrariam para o automóvel teriam uma relação direta com a população atendida pelo sistema.

2.4.2 O fator *congestion relief*

Na ausência do sistema de transporte público, muitos usuários utilizariam veículos próprios, aumentando a quantidade de veículos em circulação nas vias compartilhadas. O efeito produzido seria um aumento no congestionamento das vias, diminuindo a velocidade dos veículos, consumindo mais combustível e aumentando a emissão de CO₂. O conceito de congestionamento implica na determinação de um ponto limite que,

ultrapassado, define a existência do congestionamento. Esse ponto limite é um valor definido para a relação volume/capacidade. Os trechos de vias que superarem esse valor são considerados congestionados. O objetivo, então, é estimar a quantidade adicional de combustível queimada e que foi consequência do aumento do congestionamento provocado pela quantidade adicional de veículos em circulação. Para atingir esse objetivo é necessário ter uma grande base de dados das principais vias, com dados de velocidades coletados, por faixas horárias, cobrindo as 24 horas. Nos Estados Unidos, o TTI – *Texas Transportation Institute* produz anualmente o relatório *Urban Mobility Report* com dados detalhados de várias regiões do país.

As técnicas recomendadas para a determinação do fator *congestion relief* são (APTA, 2009):

a) Aplicação de modelos regionais de demanda de viagens: retira-se o sistema do modelo e recalculam-se as horas-veículos de atrasos e/ou o combustível consumido no congestionamento.

b) Extrapolação a partir dos dados do *Urban Mobility Report*, dividido nas seguintes etapas:

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

A teoria sugere que a relação entre volume de tráfego e níveis de congestionamento é exponencial (MTA, 2009). Uma determinada via tem uma capacidade de tráfego que permite o fluxo livre de veículos. Ultrapassada essa capacidade, começa a haver um congestionamento, que cresce exponencialmente, fazendo com que ocorram mudanças nos modos de operação dos motores, aumentando o consumo de combustíveis e, conseqüentemente, a emissão de CO₂. Portanto, há uma correlação entre a densidade de tráfego e o consumo adicional de combustível. A densidade de tráfego pode ser expressa pela quantidade veículo-milha por milha de pista. A construção da curva exponencial que expressa a relação entre a densidade do tráfego e o consumo adicional de combustível permite encontrar o valor desse consumo adicional de combustível para um valor conhecido de densidade de tráfego.

Etapa 2: Usar o fator *mode shift* para calcular a quantidade adicional de veículo-milha incorporada ao tráfego.

Etapa 3: Estimar o consumo adicional de combustível produzido pelo congestionamento usando a curva densidade de tráfego \times excesso de combustível consumido.

Etapa 4: Calcular a emissão de CO₂ produzida por esse consumo adicional. Valores regionais, se disponíveis, devem ser utilizados.

2.4.3 O fator *land use*

Nas regiões com grande densidade populacional, com diversidade no uso do solo e com um eficiente sistema integrado de transporte público, as pessoas têm menos necessidade de usar automóveis do que nas regiões com baixa densidade populacional. Aumentar a densidade populacional e ao mesmo tempo implantar um bom sistema de transporte público é, portanto, uma maneira eficiente de minimizar as emissões de carbono.

O modelo (MTA, 2009) sugere dois métodos para a avaliação do impacto do fator *land use*:

- a) Um método que se baseia na análise geoespacial de proximidade ao transporte público.
- b) Um método que usa uma série de comparações entre o uso do solo e a quantidade de veículo-km (quantidade de veículos multiplicada pela extensão média percorrida) em regiões com diferentes usos do solo.

O MTA – *Metropolitan Transport Authority* aplicou esse modelo ao sistema de transporte público de Nova Iorque, em 2008, utilizando modelos matemáticos e uma grande base de dados para responder a essas questões. Conforme esse estudo da MTA (2009), supondo a não existência desse sistema de transporte, foi simulado o padrão de trânsito nas áreas mais densas em três cenários: a) Seria igual ao padrão das áreas de subúrbio de Nova Iorque e New Jersey; b) Seria igual ao padrão médio das cidades do

país; c) Seria igual ao padrão de uma cidade emergente, Dallas. Atualizando os dados para o ano de 2010, esse sistema de transporte da MTA emitiu cerca de 2 milhões de toneladas de GEE, porém evitou, numa estimativa conservadora, a emissão de 17 milhões de toneladas. Esse resultado corresponde a 4.717 gramas de carbono evitados a cada viagem realizada por um passageiro (MTA, 2012).

2.4.4 Resultados de emissões evitadas em sistemas metroviários

A tabela 8 apresenta resultados de emissões evitadas publicados por metrô selecionados. As diferenças nos resultados são devidas a características locais (em Nova Iorque foi considerado todo o sistema de transporte público controlado pelo MTA, o que inclui também o sistema de ônibus) e utilização de métodos diferentes.

Tabela 8: Emissões evitadas por sistemas metroviários.

	São Paulo	Lisboa	Porto	Nova Iorque
Ano base das emissões	2013	2010	2012	2010
Emissões produzidas (em tCO ₂)	Energia de tração dos trens 42.000	Diretas + Energia elétrica da empresa 56.851	Energia elétrica da empresa 13.302	Resultado Inventário GEE 2.100.000
Emissões evitadas (em tCO ₂)	<i>mode shift + congestion relief</i> 862.000	<i>mode shift</i> 130.275	<i>mode shift</i> 59.512	<i>mode shift + congestion relief + land use</i> 17.000.000
Resultado = Emissões líquidas evitadas (em tCO ₂)	- 820.000	- 73.424	- 46.210	- 14.900.000
Toneladas evitadas / tonelada produzida	20,5	2,3	4,5	8,1
FONTES	METRÔ SÃO PAULO (2014b)	METRÔ LISBOA (2011)	METRÔ PORTO (2013)	MTA (2012)

As cidades de Lisboa e Porto tiveram os resultados menos significativos em função da matriz energética local, já que Portugal importa 90% da energia primária que utiliza, onde grande parte dessa energia é de origem térmica (LISBOA e-NOVA, 2010).

Contudo cada sistema utilizou parâmetros diferentes no cálculo tanto da emissão produzida quanto da evitada.

2.5 A análise de ciclo de vida - Conceito e características

A avaliação do impacto ambiental produzido por um sistema, sob a abordagem do ciclo de vida, considera todas as suas fases, desde a sua construção até o fim de vida desse sistema. A metodologia mais comumente utilizada nessa abordagem é denominada ACV - Análise do Ciclo de Vida (em inglês LCA - *Life Cycle Assessment*). A ACV, portanto, tem como finalidade avaliar o impacto ambiental causado por um produto ou serviço ao longo de sua vida.

Uma representação do ciclo de vida é mostrada na figura 4. As entradas são as matérias primas e a energia. As saídas são as emissões atmosféricas, entre as quais o CO₂, e resíduos diversos.

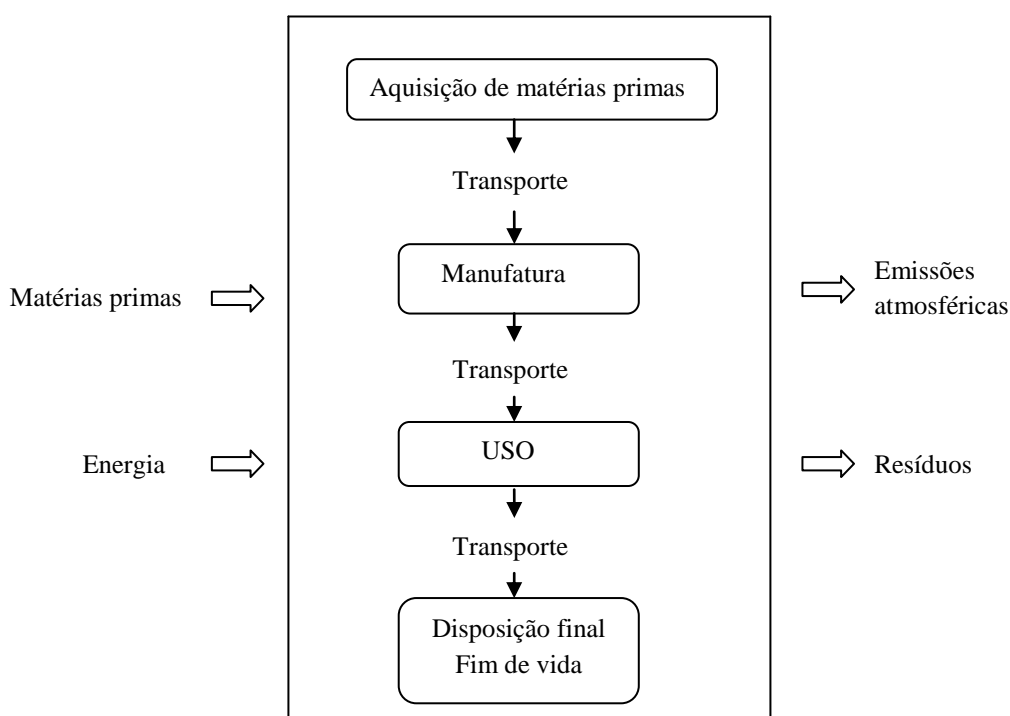


Figura 4: Representação do ciclo de vida. Fonte: Elaboração própria a partir de ISO (2009).

O ciclo de vida é abordado em sua totalidade, da extração à disposição final, denominado “do berço ao túmulo” (em inglês: *cradle to grave*). Conforme o objetivo da ACV, seu escopo pode ser parcial, como *cradle to gate* (da extração à produção) e *gate to gate* (cadeia de produção, que adiciona valor agregado ao produto). A norma estabelece conceitos gerais, não particularizando técnicas específicas para cada fase da avaliação ou para um produto/serviço em particular.

É sempre esperado certo grau de incerteza nos resultados de um estudo de ACV, uma vez que os dados de entrada costumam ser em grandes quantidades, tendo certa variabilidade e por vezes são obtidos por meio de estimativas. Por isso, a ACV é usualmente enriquecida com análises de sensibilidade e de incerteza. A análise de sensibilidade mostra quão sensíveis são os resultados para o método adotado. A análise de incerteza quantifica a incerteza dos resultados.

A ACV de um produto ou serviço realizada em um determinado local reflete as características desse local, sendo difícil a determinação de valores que possam ser utilizados em qualquer situação. Um mesmo produto ou serviço produzido em locais diferentes poderá ter ACV diferentes, em função das diferenças locais. Duas ACV realizadas no mesmo local para o mesmo produto/serviço poderão ser diferentes, em função de diferenças no escopo, qualidade dos dados, premissas e métodos de avaliação dos impactos.

A norma ISO 14040 é uma das normas da família ISO 14000. As normas dessa família atendem ao gerenciamento ambiental e estabelecem regras que auxiliam na obtenção da redução de matérias primas, consumo de energia e desperdícios, por meio do aperfeiçoamento da eficiência dos processos e do uso de recursos renováveis. A norma ISO 14040 aborda a ACV, relacionando essa avaliação com os aspectos ambientais e potenciais impactos ambientais através do ciclo de vida do produto/serviço, desde a extração de matéria prima, passando pela produção, uso, tratamento do fim de vida, reciclagem e disposição final. A ISO 14040 define o ciclo de vida como sendo “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: “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). Essa metodologia consiste de quatro fases principais (figura 5):

- 1) Definição do objetivo e escopo do estudo, com determinação de seus limites e nível de detalhe.
- 2) Análise de inventário, que envolve coleta de dados e cálculo dos impactos ambientais.
- 3) Avaliação dos impactos, que estima os potenciais impactos ambientais sob uma visão de conjunto.
- 4) Interpretação dos resultados, que permite as conclusões finais dos resultados obtidos nas fases de análise de inventário e avaliação dos impactos (ISO, 2009).

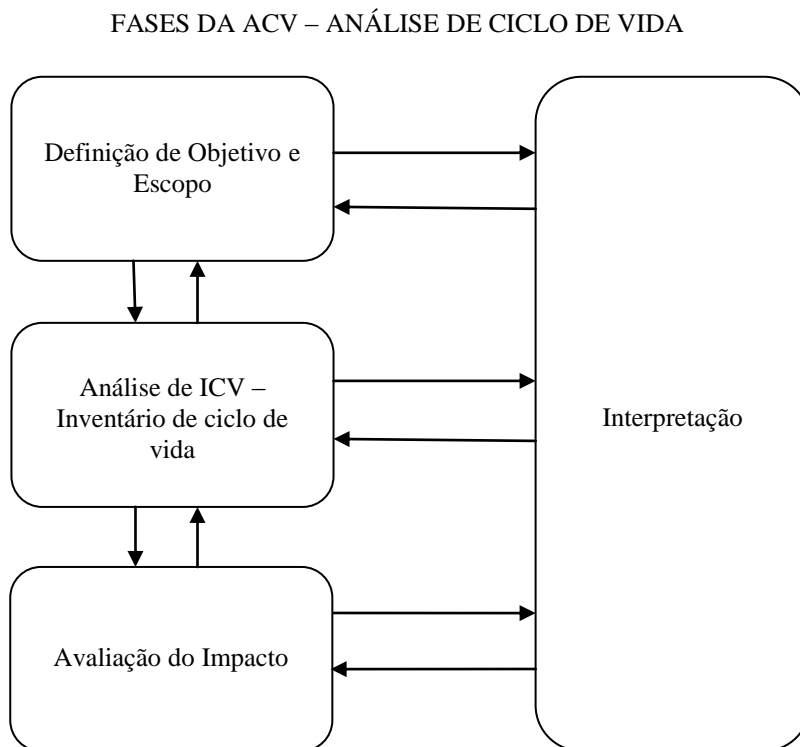


Figura 5: Fases da Análise do Ciclo de Vida. Fonte: ISO (2009).

2.5.1 Definição do objetivo e escopo

Uma ACV é realizada com determinado objetivo, por exemplo, o impacto no aquecimento global da fabricação e uso de um produto, descobrindo as etapas de maior importância e que podem ser objeto de planos de ação para diminuição do impacto. O escopo estará alinhado com o objetivo, determinando o contexto em que se fará o estudo e delimitando suas fronteiras, ou seja, o que será ou não abrangido pelo estudo. O modelo, os processos e método de trabalho são definidos. As unidades funcionais são estabelecidas e serão utilizadas nos fluxos de entrada/saída. Estas unidades funcionais servem para assegurar que diferentes estudos de ACV de produtos semelhantes possam ser comparados. As etapas de resultados pouco significativos podem ser excluídas do estudo.

2.5.2 Análise do ICV – Inventário de ciclo de vida

Nesta etapa é construído o inventário de ciclo de vida, baseado na estimativa dos fluxos de materiais e energia que ocorrem ao longo do ciclo de vida. É a fase mais longa e complexa, que produz uma 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, calculados por unidades funcionais.

O inventário de ciclo de vida pode ser construído utilizando-se diferentes abordagens. A contribuição de cada material ou processo pode ser estimada por meio de diversas técnicas. O reuso de materiais ou uso de material reciclado pode ser interpretado como um fator de redução de emissões. Segundo WORLDSTEEL (2014a), o aço, conforme o seu tipo, pode ter uma redução de impactos da ordem de 25% a 50%, quando incluída a reciclagem. Há muitas bases de dados onde podem ser encontrados os dados necessários para o cálculo das emissões, como dados para processos, combustíveis e materiais específicos. Quando a base de dados provê dados que englobam as emissões do ciclo de vida (da extração até a manufatura) de um determinado material, como um tipo específico de aço, esse dado representa o que se denomina em inglês como *embodied carbon* (tradução literal: carbono encarnado), ou seja, na utilização desse material em outro processo, o valor do seu carbono “encarnado” representa as emissões do ciclo de

vida associadas à sua fabricação, ou seja, ao seu passado. Como o termo *embodied carbon* não tem uma tradução em português amplamente utilizada na literatura e a possível tradução “carbono armazenado” é muito utilizada com outro significado (material com potencial de no futuro gerar carbono), será utilizado neste trabalho o termo “carbono embutido”.

Uma análise do inventário vai permitir uma visão geral das emissões de cada etapa do ciclo de vida, possibilitando ações no sentido de diminuição das emissões em algumas etapas.

2.5.3 Avaliação do impacto

Nesta etapa os potenciais impactos ambientais são estimados e classificados, caracterizados, normalizados e ponderados. Essa avaliação é a principal informação necessária ao último estágio, da interpretação. Ela vai determinar o significado e a magnitude dos impactos ambientais. Não há uma metodologia padrão definida e várias metodologias existentes podem ser usadas.

A avaliação do impacto contém etapas obrigatórias e opcionais, segundo a norma. São obrigatórias:

- A seleção das categorias de impacto e dos indicadores. As categorias de impacto e os indicadores comumente utilizados são mostrados na tabela 9.

Tabela 9: Categorias de impactos ambientais e indicadores.

Categoria de Impacto	Exemplos de dados ICV	Indicador
Esgotamento abiótico	Quantidade de minerais e combustíveis fósseis	ADP
Alterações climáticas	Quantidade de CO ₂	GWP
Acidificação	Quantidade de SO _x e NO _x	AP
Eutrofização	Quantidade de PO ₄ e NO ₂	EP
Formação foto-oxidante	Quantidade de NMHC	POCP
Esgotamento do ozônio estratosférico	Quantidade de HCFC	ODP

Fonte: IPCC (2014b).

Nota: ADP – Abiotic Depletion Potential; GWP – Global Warming Potential; AP – Acidification Potential; EP – Eutrophication Potential; POCP - Photo-Oxidant Creation Potential; ODP - Ozone Depletion Potential; SO_x - Óxido de enxofre; NO_x - Óxido de nitrogênio; PO₄ – Fosfato; NO₂ – Dióxido de Nitrogênio; NMHC – Hidrocarbonetos não metano; HCFC – Hidroclorofluorcarbonos.

➤ Classificação.

É a atribuição dos resultados do ICV a uma ou mais categorias de impacto ambiental. Por exemplo, as emissões de CO₂ são atribuídas à categoria “alterações climáticas”, as emissões de NO_x podem ser atribuídas às categorias acidificação e eutrofização.

➤ Caracterização.

A caracterização é o cálculo dos indicadores das categorias, realizado de uma maneira padronizada de apresentação dos resultados. Para cada categoria há vários elementos de impacto ambiental e um deles servirá como referência para que os demais tenham seu poder de impacto avaliado. Assim, o CO₂ é a referência para a categoria “alterações climáticas”, assumido com valor unitário e o CH₄ tem valor 25, em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2014b). Isso significa que a mesma quantidade de CH₄ tem valor de aquecimento 25 vezes maior que o CO₂. Esse valor, 25, é denominado “fator de caracterização”, permitindo que o resultado do indicador GWP seja apresentado em unidades de CO₂ equivalente.

As etapas opcionais compreendem a normalização, o agrupamento e a ponderação.

➤ Normalização.

É o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores relativamente a uma informação de referência, como por exemplo, o valor máximo ou médio de uma categoria, ou a soma de seus valores. Essa divisão produzirá um valor adimensional. Por exemplo, na construção de um veículo, o indicador de cada categoria pode ser normalizado para que o resultado apresentado seja relativo ao valor máximo observado para aquela categoria em construções de veículos.

➤ Agregação.

É a classificação dos resultados reunindo grupos de categorias para apresentação do resultado unificado do grupo.

➤ Ponderação.

É a atribuição de pesos, que representam a magnitude do impacto ambiental, a cada categoria, de modo a apresentar resultados comparáveis. Existem várias técnicas de ponderação. Uma delas, desenvolvida pela US-EPA – *United States Environmental Protection Agency* atribui o peso 5 às categorias de indicadores ADP, AD, EP e OLD, o peso 6 à categoria de indicador PCOP e o peso 16 à categoria “alterações climáticas” - GWP, evidenciando a maior importância da categoria “alterações climáticas” (HUPPES e OERS, 2011). Já SOARES *et al.* (2006) atribuíram diferentes valores a cada categoria, desde 6,1 (eutrofização terrestre - EP) a 18,2 (alterações climáticas - GWP).

Existem diversos métodos de avaliação de impacto com diferentes metodologias de caracterização, normalização e ponderação. Os *softwares* de ACV, como o SIMAPRO, incorporam alguns desses métodos, como o ECO-Indicator 99, o Ecopoints 97 e o CML baseline 2000.

2.5.4 Interpretação

Nesta fase os resultados da análise do inventário e da avaliação dos impactos ambientais (ou somente da análise do inventário se for realizado apenas o ICV – Inventário de Ciclo de Vida) são considerados em conjunto para prover resultados consistentes com o objetivo e escopo do estudo. Análises de sensibilidade e incerteza podem ser conduzidas. Conclusões e recomendações são também apresentadas.

2.5.5 Métodos de abordagem de ACV

Os métodos comumente utilizados são o método baseado em processos e o método baseado em análise econômica das entradas e saídas (em inglês: EIO-LCA - *Economic Input/Output - Life Cycle Assessment*). O método baseado em processos identifica e quantifica as entradas (recursos de materiais e energia) e saídas (emissões e resíduos) de cada estágio do ciclo de vida, baseado na modelagem da unidade de processo. A identificação das entradas pode se estender a vários níveis, aumentando a complexidade. É necessário, portanto, estabelecer os limites da análise. O método baseado em análise econômica é uma maneira simplificada de se fazer a ACV. Procura-se uma associação entre os valores monetários de produção das indústrias e os efeitos ambientais. Muitas nações levantam e publicam o modelo econômico de grande quantidade de indústrias, facilitando a obtenção desses dados.

2.5.6 Ferramentas de *software* para a ACV

Em virtude da grande quantidade de dados necessários para realizar um estudo de ACV, o mesmo pode ser realizado com a utilização de *softwares* desenvolvidos especificamente para isso. Várias dessas ferramentas de *software* (SIMAPRO, GREET, GABI etc.) foram desenvolvidas por órgãos governamentais ou empresas privadas para auxiliar na análise do ciclo de vida. Algumas dessas ferramentas contêm bases de dados já levantados para alguns processos, enquanto outras apenas apresentam uma sistematização do modelo, orientando e facilitando ao usuário sua utilização em um caso real. Utilizam fórmulas, algoritmos e simuladores, com uma interface gráfica interativa e rodam em computadores pessoais. O SIMAPRO é um dos *softwares* de

ACV mais abrangentes e utilizados em todo o mundo. Ele contém bases de dados de inventário de ciclo de vida (inventários internacionais, incluindo o setor de transportes) e permite a simulação de Monte Carlo, para a análise de incertezas. Esta simulação é um método estatístico para diminuir a incerteza, utilizando um algoritmo que atribui valores aleatórios às variáveis um grande número de vezes, tipicamente milhares de vezes. O resultado obtido vai convergir para um valor com uma probabilidade conhecida. O SIMAPRO contém 17 diferentes métodos de avaliação de impacto ambiental. Uma das bases de dados utilizados pelo SIMAPRO e outros *softwares* é o Ecoinvent, criado na Suíça e que incorpora dados de suprimento de energia, materiais, combustíveis, transporte, processos de manufatura etc. No setor de transportes, inclui dados sobre transporte rodoviário, transporte ferroviário movido a diesel e eletricidade, construção da infraestrutura e a manufatura de locomotivas.

Contudo, as bases de dados desses *softwares* contêm dados de países desenvolvidos. Segundo 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”.

2.6 ACV em sistemas de transporte

Segundo CHESTER e HOVARTH (2009a) usualmente as decisões na área de planejamento de transportes são tomadas considerando apenas a emissão decorrente do uso do combustível, ignorando o uso indireto da energia. Poucos estudos são encontrados na literatura que abrangem estudos de ciclo de vida em transportes. Observa-se que nas pesquisas realizadas os objetivos, escopos e fronteiras são geralmente diferentes, contribuindo para dificuldades de comparação dos resultados dos estudos realizados. A grande complexidade desse levantamento tem dificultado as pesquisas nessa área.

A emissão de CO₂ nos sistemas de transporte ocorre nas diversas fases do seu ciclo de vida, que podem, conceitualmente, ser separadas em fases operacionais e fases não operacionais, como mostrado na figura 6.

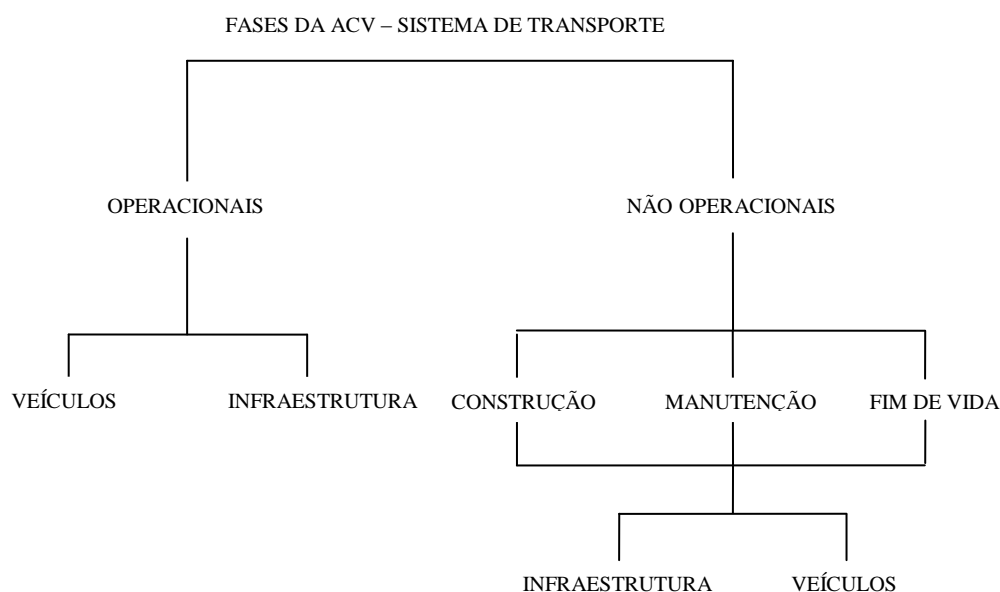


Figura 6: Fases operacionais e não operacionais do ciclo de vida de sistemas de transporte. Fonte: Elaboração própria a partir de CHESTER (2008).

As emissões operacionais são devidas ao consumo de energia na movimentação dos veículos e na operação da infraestrutura e as emissões não operacionais são devidas ao 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 a construção das fundações das vias, a pavimentação, a construção de túneis, elevados e estações, além da manufatura dos materiais utilizados nessas construções. Nos sistemas metroferroviários inclui também a construção das estruturas que suportam os trilhos e a alimentação energética e a manufatura desses materiais. A operação da infraestrutura inclui itens como a iluminação das estações e o funcionamento das escadas rolantes. A manutenção da infraestrutura e dos veículos inclui a manufatura das peças de reposição correspondentes.

2.6.1 Sistemas de transporte rodoviário

A infraestrutura necessária para o transporte rodoviário compreende as estradas, de diversos tipos, como autoestradas, vias principais, vias arteriais, vias urbanas, vias rurais etc., que necessitam de algum tipo de iluminação. As vias de transporte público

necessitam de construções adicionais, como estações. A pavimentação das vias utiliza materiais como asfalto ou cimento. Algumas vias podem ter partes elevadas, com viadutos ou pontes ou partes escavadas em túneis. As vias de transporte devem ser submetidas periodicamente a procedimentos de manutenção, como recuperação do pavimento. O fim de vida de uma via de transporte pode ocorrer em situações específicas, como replanejamento urbano.

2.6.2 Sistemas de transporte metroferroviário

A infraestrutura necessária para o transporte metroferroviário tem variados graus de complexidade conforme o tipo do sistema. Um sistema VLT normalmente necessita de uma infraestrutura mais simples, que pode ser a colocação dos trilhos numa via existente, enquanto um sistema metroviário pode demandar uma complexa construção de túneis e partes aéreas.

A terminologia utilizada para sistemas sobre trilhos pode variar entre países e mesmo entre cidades de um mesmo país. Muitas vezes as características dos diferentes sistemas se confundem dificultando uma classificação rigorosa.

“Metrô” é uma modalidade de serviço de transporte operando eletricamente sobre trilhos com capacidade para um alto volume de tráfego. É caracterizado por trens de passageiros de um ou mais carros com alta velocidade e rápida aceleração, em vias segregadas, com sinalização sofisticada (APTA, 2014).

“Ferrovia” ou “estrada de ferro” é um sistema de transporte baseado em trens correndo sobre trilhos previamente dispostos. Usualmente serve para transporte de carga ou passageiros. Como transporte de passageiros, também é denominado “trem metropolitano” quando atende a uma região metropolitana. O trem metropolitano é bastante semelhante aos metrôs, se diferenciando deles por atender a vários municípios e ter intervalos maiores de partida entre os trens (CPTM, 2014). Segundo APTA (2014) o trem metropolitano é uma modalidade de serviço de transporte urbano de passageiros, caracterizada por propulsão elétrica ou a diesel, para viagens de curta distância entre o centro da cidade e subúrbios adjacentes.

“VLT” é uma modalidade de serviço de transporte operando carros de passageiros individualmente ou em trens, geralmente de dois ou três carros em trilhos fixos, e frequentemente separado de outros tráfegos em parte ou em todo o caminho. Seus veículos são tipicamente movidos a eletricidade e podem utilizar uma linha elétrica aérea ou enterrada. São dirigidos por um operador a bordo (APTA, 2014). Segundo TRB (2001) VLT é um sistema sobre trilhos metropolitano eletrificado, caracterizado pela flexibilidade para operar com carro único ou trens curtos sobre vias exclusivas ao nível do solo, em estruturas aéreas ou subterrâneas, ou ocasionalmente, em vias compartilhadas. O embarque e desembarque de passageiros é feito ao nível do trilho ou do piso do carro.

No exterior são usadas expressões como *commuter rail* (trem urbano, que percorre a cidade e subúrbios e compartilha os trilhos com outras linhas do sistema), *heavy rail* (ferrovia pesada, tanto significando “metrô” como ferrovias de grande capacidade), *light rail* ou LRT – *Light Rail Transit* (ferrovia leve, no Brasil denominado VLT), HSR – *High Speed Rail*, trem de alta velocidade (maiores que 200 km/h), ainda não implantados no Brasil e MAGLEV – *Magnetic Levitation*, que no Brasil teve um protótipo desenvolvido na UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro pela COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia e pela Escola Politécnica através do LASUP - Laboratório de Aplicações de Supercondutores. O trem brasileiro flutua sobre os trilhos, sofrendo apenas o arrasto aerodinâmico durante seu deslocamento.

A emissão de CO₂ pelos metrôs e ferrovias ocorre nas diversas fases do seu ciclo de vida, como mostrado na figura 7. A infraestrutura e os veículos podem ser divididos nas etapas de construção, operação, manutenção e fim de vida. Esta última etapa costuma ser desprezada, nos trabalhos publicados, para a infraestrutura, por não haver usualmente um tempo de vida estipulado, no sentido tradicional, que envolve o completo desuso e descarte (CHESTER, 2008). Para os veículos, pode-se trabalhar com o conceito de fim de vida, porque geralmente os fornecedores definem um tempo de vida em suas especificações (ALSTOM, 2014). Os recursos e energia necessários a todas as fases podem estar associados à emissão de CO₂. Os materiais empregados carregam o “carbono embutido”, ou seja, o carbono oriundo do processo de produção do material.

Os processos de fabricação do cimento e do aço, muito utilizados nos sistemas metroferroviários, consomem grandes quantidades de energia. São liberadas na produção de uma tonelada de cimento de 0,65 a 0,92 tCO₂, com uma média mundial de 0,83 tCO₂ (IEA, 2007). A produção de uma tonelada de aço libera em média, em todo o mundo, 1,8 tCO₂ (WORLDSTEEL, 2014b). As emissões de CO₂ pela indústria de cimento em todo o mundo são responsáveis por cerca de 5% das emissões globais (WORREL *et al.*, 2001; BENHELAL *et al.*, 2013). A tecnologia e as fontes de energia utilizadas no processo de fabricação do cimento e do aço são fatores importantes para a maior ou menor emissão de gases. No Brasil, segundo MCTI (2009), a produção de cimento, em 2005, emitiu 14.349.000 tCO₂, sendo responsável por 56% das emissões de processos industriais e 0,9% das emissões do país e a indústria siderúrgica emitiu 46.418.000 tCO₂, sendo responsável por 13% das emissões do setor de energia e 2,9% das emissões do país. Segundo LIMA (2010) a indústria brasileira de cimento emite menos que a média mundial (659 kgCO₂/t contra 810 kgCO₂/t). A energia não renovável, como óleo, gás natural e carvão, utilizada nas fases do ciclo de vida, diretamente ou por meio da eletricidade, é responsável por outras parcelas de emissão. Portanto, o ciclo de vida nos sistemas metroferroviários compreende duas fases:

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

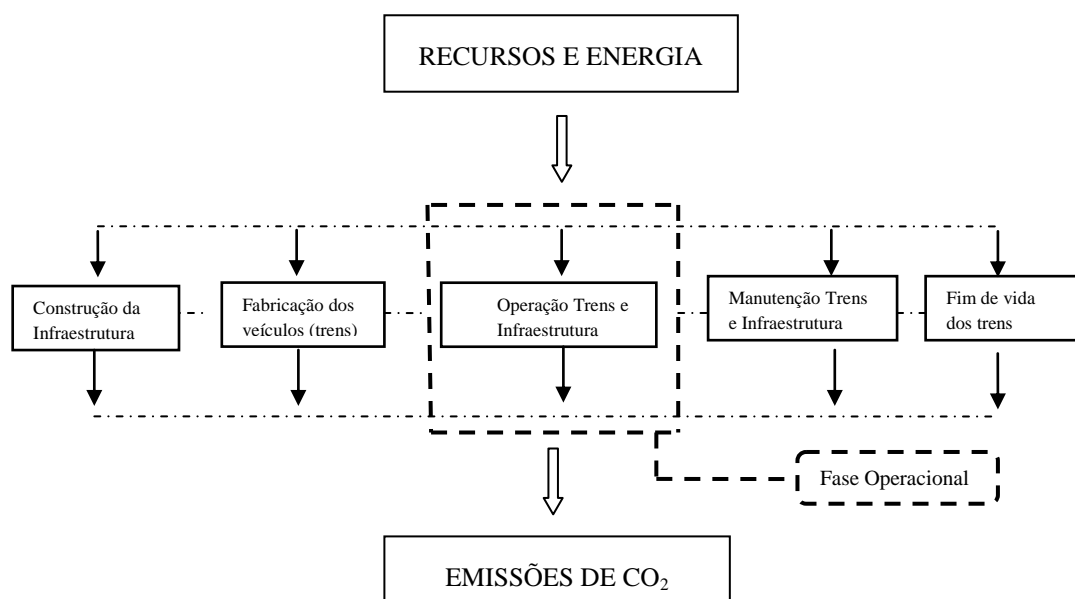


Figura 7: ACV do sistema metroferroviário. Fonte: Elaboração própria.

2.6.2.1 Infraestrutura

A infraestrutura é composta basicamente por quatro elementos, que são:

a) Via permanente: estrutura por onde correm os trens. É composta de trilhos - estruturas compostas de perfis de aço laminado, dispostos de forma paralela entre si, que compõe a via férrea propriamente dita; dormentes - estruturas perpendiculares aos trilhos onde eles são colocados e repousam; fixação - elementos para fixar os trilhos nos dormentes; lastro - material granular obtido pela britagem de rochas e que circundam os dormentes e trilhos. Fornece a base de sustentação do sistema. Conforme o tipo de solo pode ser necessário um tratamento com a colocação de fundações. Os dormentes podem ser de madeira ou concreto. Os dormentes de concreto podem ser: monobloco (um único bloco); bibloco (dois blocos ligados por uma barra de aço); e blocos independentes, acomodados na via em placas (*slab track*). As fixações podem ser: rígidas (pregos e parafusos) e elásticas. Há duas categorias de vias permanentes: com e sem lastro. As vias sem lastro são apoiadas em *slab tracks* e podem ser de diferentes tipos.

b) Estações: locais de embarque e desembarque de passageiros. Podem ser subterrâneas, ao nível do solo, ou elevadas, acima do nível do solo.

c) Sistemas de eletrificação e sinalização: sistemas de energização dos trilhos ou cabos necessários para a movimentação dos veículos que transportam os passageiros. O sistema de sinalização permite que ocorra o controle do espaçamento entre os veículos com a devida segurança.

d) Sistemas de controle de tráfego: são baseados em computadores e permitem o controle total da operação do sistema, como o controle das partidas e paradas dos veículos.

2.6.2.2 Veículos

Os veículos são os trens, denominados de “material rodante”. Podem ser de alta velocidade (acima de 200 km/h) ou convencionais (até 200 km/h). A infraestrutura para

ambos é semelhante e a fonte de energia mais utilizada nos trens de passageiros urbanos é a energia elétrica, enquanto os trens de alta velocidade podem utilizar a tração diesel-elétrica. Os trens de metrô e ferrovias suburbanas cobrem trajetos dentro das cidades, enquanto os trens de alta velocidade cobrem grandes distâncias ligando diferentes cidades. Há uma diversidade de trens, conforme o uso que se fará, e fabricantes em vários países do mundo. Os trens são compostos de carros, geralmente 4, 6 ou 8 carros. No Brasil os sistemas que utilizam trens são as ferrovias urbanas ou entre cidades, metrôs e o VLT. Ainda não foram implantados trens de alta velocidade.

2.7 A declaração ambiental de produto

A necessidade de uma ferramenta de avaliação que permita a aferição de quão amigável é um produto comercializado originou a criação da “declaração ambiental de produto” (em inglês EPD – *Environmental Product Declaration*). No setor de transportes essa é uma ferramenta particularmente útil para os veículos. Alguns fabricantes de trens emitiram essas declarações para seus produtos, o que funciona como uma espécie de “selo de qualidade ambiental”. A declaração ambiental pode ser também desenvolvida como uma forma de mostrar à sociedade os impactos ambientais causados por um produto ou serviço.

Uma declaração ambiental de produto é um documento verificado externamente que apresenta dados ambientais do produto baseados na sua avaliação de ciclo de vida e outras informações relevantes e de acordo com a norma ISO 14025 (Declarações ambientais – tipo III). Essa norma define que a declaração ambiental deve ser quantificada e obedecer a um conjunto de parâmetros pré-estabelecidos baseados na norma geral ISO 14040, mas sem exclusão de informações ambientais adicionais. A declaração deve ser criada e registrada em um programa de declarações ambientais tipo III, tal como o *International EPD System*, criado com essa finalidade. Um dos componentes da declaração é o potencial de aquecimento global, que, para veículos, é medido em kg de CO₂e por PKM ou passageiro-100 km.

A declaração deve atender a regras específicas para categorias de produtos. Para sistemas metroferroviários existe a regra PCR 2009:05 - *Product Category Rules (PCR)*

for preparing an environmental product declaration (EPD) for rail vehicles, que estabelece as definições, escopo e fronteiras do levantamento. Na nomenclatura da declaração os resultados são apresentados nas fases *upstream*, que abrange a produção de materiais, energia e subcomponentes, *core*, que compreende a manufatura propriamente dita e o transporte até o destino final e *downstream* que considera o uso, manutenção, desmonte e descarte do produto. A figura 8 representa as fases do ciclo de vida nessa terminologia e mostra o escopo do que é abrangido pela declaração.

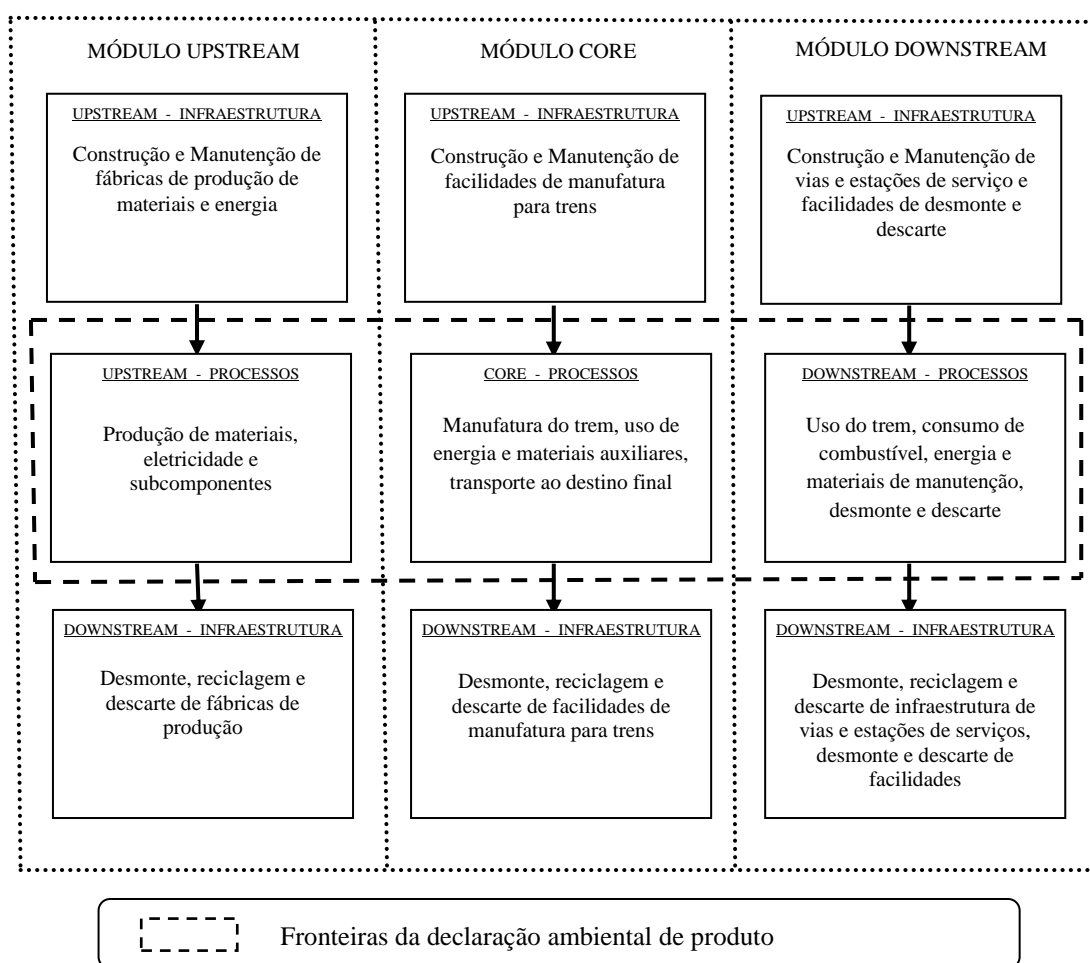


Figura 8: Declaração ambiental de produto – Fases e escopo.

Fonte: EPD (2014).

O uso (a operação) é predominante em termos de emissão de GEE, e o fim de vida é a menor parcela, conforme exemplos de EPDs da tabela 10.

A estimativa da quantidade de PKM é realizada em função da capacidade de transporte do trem, de uma taxa de ocupação e quilometragem anual estimada. Em todas as situações mostradas a emissão decorrente do uso do trem é a maior parcela. A matriz de

eletricidade utilizada no cálculo da emissão operacional do trem é a mesma do local onde foi fabricado. A emissão atribuída ao uso do trem pode, portanto, variar, caso ele seja utilizado em outro local. De qualquer maneira, em termos absolutos, a emissão nas fases não operacionais é muito baixa. Nos exemplos mostrados foi sempre menor que 1 gCO₂e/PKM. A tabela 10 mostra ainda que as emissões de fim de vida são as menos representativas, menos de 0,5% do total.

Tabela 10: Declarações ambientais de trens.

Fabricante	Trem	Tempo vida	Total em kgCO ₂ e/PKM	Up stream	Core	Down Stream (uso)	Down stream (fim de vida)
Ansaldo Breda	MLA Metrobus Brescia 80 km/h	30 anos	0,0178392	1,458%	1,009%	97,534%	0,004%
Bombardier	Spacium 140 km/h	40 anos	0,0047213	2,817%	1,43%	95,551%	0,229%
Alstom	DT5 80 km/h	30 anos	0,00033431	2,82%	1,063%	96,119%	0,065%
Bombardier	Innovia Art 200 80 km/h	30 anos	0,0011079	9,828%	2,954%	87,126%	0,139%
Bombardier	Innovia APM 300 80 km/h	30 anos	0,0005405	2,357%	1,593%	95,714%	0,425%
Bombardier	Flexity Outlook 71 km/h	30 anos	0,0013761	5,661%	1,556%	92,593%	0,126%
Ansaldo Breda	ETR 1000 360 km/h	25 anos	0,0009483	2,455%	0,793%	96,752%	0%

Fontes: ANSALDO BRED A (2014a); BOMBARDIER (2014a); ALSTOM (2014); BOMBARDIER (2014b); BOMBARDIER (2014c); BOMBARDIER (2014d); ANSALDO BRED A (2014b).

A EPD pode ser utilizada como fonte de dados para uma ACV, como ocorreu nas ACVs dos trens de metrô de Oslo (STRUCKL e WIMMER, 2007) e de Roma (DEL PERO *et al.*, 2014). Observa-se que as emissões de uso do sistema representam, em larga escala, a maior parte, sendo insignificantes as emissões de fim de vida e pequenas, menores que 3%, as emissões associadas à fabricação dos trens.

Uma grande ferrovia da Suécia, a Bothnia Line, para passageiros e carga, foi objeto da primeira EPD realizada para o transporte de passageiros, considerando toda a construção da ferrovia. Foi considerado um tempo de 60 anos para a avaliação. A tabela 11 mostra os resultados obtidos da EPD, em kgCO₂e/PKM, para o transporte de

passageiros. A infraestrutura corresponde à maior parte (84,13%) e a operação dos trens a apenas 0,61%, devido a matriz elétrica com baixa emissão.

Tabela 11: Emissões de GEE da Bothnia Line, em kgCO₂e/PKM.

Infraestrutura			Serviço de transporte		Total
Construção	Operação	Manutenção	Veículos (Produção e Manutenção)	Operação dos trens	
0,0080	$3,7 \times 10^{-5}$	0,0029	0,0021	$7,9 \times 10^{-5}$	0,013

Fonte: BOTNIABANAN AB (2010).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi conduzida uma revisão bibliográfica através de pesquisas em bases de dados, de acordo com o procedimento mostrado na figura 9. O objetivo foi identificar e coletar informações sobre os trabalhos já realizados sobre a aplicação do ciclo de vida em sistemas metroferroviários, objeto desta tese. Pretendeu-se selecionar um conjunto de trabalhos publicados que possam subsidiar a elaboração de um procedimento que permita construir um ICV de um sistema metroferroviário. Para possibilitar comparações com sistemas rodoviários as pesquisas também abrangeram esses sistemas.

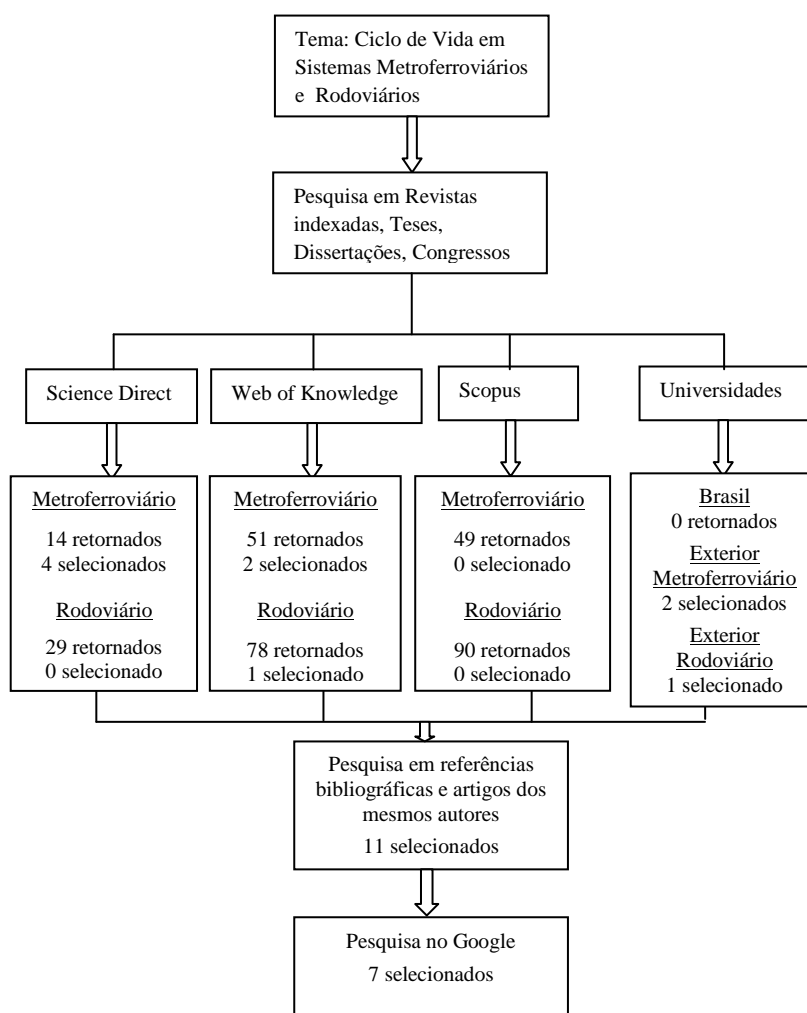


Figura 9: Procedimento de pesquisa da revisão bibliográfica.

As pesquisas foram feitas para um horizonte de tempo de 10 anos, para artigos em inglês, espanhol ou português e a chave de pesquisa, para os sistemas metroferroviários, foi:

(life cycle OR LCA OR LCI OR LCIA)

AND (metro OR rail OR railway OR “train” OR subway OR LRT OR HSR OR mass transit).

Para os sistemas rodoviários a chave de pesquisa foi:

(life cycle OR LCA OR LCI OR LCIA)

AND (road OR highway OR bus OR BRT OR auto AND NOT cost AND NOT fuel).*

Para a localização de artigos em português ou espanhol foi utilizada a chave “ciclo de vida”.

Os critérios de exclusão foram: artigos com foco exclusivamente em custos ou em combustíveis ou que não abordam consumo de energia ou emissão de carbono.

As pesquisas de artigos obedeceram à ordem:

1°. *Science Direct*, por reunir mais de 12 milhões de artigos de 2.500 revistas indexadas, com acesso disponível ao texto completo.

2°. *Web of Knowledge – Web of Science*, que reúne mais de 90 milhões de registros, cobrindo 5.600 publicações e mais de 8 milhões de registros relacionados a mais de 160.000 congressos.

3°. *Scopus*, que reúne artigos de mais de 21.000 revistas de 2.500 editores e mais de 6 milhões de artigos de congressos.

A utilização do *Web of Knowledge* e do *Scopus* teve o objetivo de ampliar a quantidade de artigos a serem analisados. Contudo, no total das três bases de dados foram selecionados, de acordo com os critérios de exclusão, apenas 7 artigos.

As pesquisas de Teses e Dissertações foram realizadas nas bibliotecas digitais da:

- a) UFRJ – Programa de Engenharia de Transportes.

- b) USP – áreas de Ciência Ambiental, Engenharia de Ciência Ambiental, Energia, Engenharia de Construção Civil e Urbana, Engenharia de Transportes e Infraestrutura de Transportes.
- c) IME – Engenharia de Transportes.
- d) UNB –Transportes.
- e) Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), que reúne material de diversos cursos de pós-graduação.

Nessas pesquisas foi utilizada a palavra chave “ciclo de vida” e nenhuma ocorrência que aborde o ciclo de vida de sistemas metroferroviários foi retornada. Para sistemas rodoviários houve algumas ocorrências de ciclo de vida de combustíveis, não selecionadas pelo critério de exclusão definido. Nenhuma ocorrência que contemple a construção da infraestrutura ou dos veículos foi retornada.

- f) Portal DIVA, portal internacional que reúne teses e trabalhos acadêmicos de 36 universidades e institutos de pesquisa da Suécia e Noruega, países com reconhecida consciência ambiental.

Nessa pesquisa foi utilizada a palavra-chave *life cycle metro*, que não retornou qualquer ocorrência, *life cycle rail/railway/LRT/HSR*, que retornou 12 ocorrências, das quais duas teses foram aproveitadas, e *life cycle road/highway/bus/BRT*, que retornou 50 ocorrências, sendo aproveitada uma tese.

Assim o resultado de todas essas pesquisas consistiu em 10 trabalhos selecionados. A partir das referências bibliográficas desses trabalhos e de outros trabalhos dos mesmos autores foi possível ampliar a seleção para mais 11 trabalhos. Apesar da grande abrangência das bases pesquisadas muitas outras revistas e publicações não são alcançadas, tornando necessárias pesquisas específicas. Foram pesquisadas as Revistas Transportes, Revista dos Transportes Públicos e JTL/RELIT, não sendo encontrado qualquer artigo. WILLERS e RODRIGUES (2014) pesquisaram os artigos sobre ciclo de vida publicados no Brasil, encontrando 120 artigos, dos quais 21 efetivamente aplicaram a ACV. Contudo nenhum deles atende aos objetivos desta revisão bibliográfica. Finalmente novas pesquisas foram feitas utilizando-se o Google, que acrescentaram mais 7 artigos, sendo 4 de revistas internacionais, 2 de congressos

internacionais e 1 de instituto de pesquisa internacional. Portanto, foram selecionados, no total, 28 trabalhos.

Os trabalhos selecionados, de acordo com o procedimento exposto, referem-se a estudos realizados nos Estados Unidos, na Europa e na Ásia. Não foi localizado nenhum estudo no Brasil ou em outros países da América Latina.

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

A partir de bases de dados existentes nos Estados Unidos, especialmente o PaLATE (*Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*), desenvolvido na Universidade da Califórnia e o GREET (*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*), desenvolvido pelo Argonne National Laboratory, HANSON *et al.* (2012) compararam quatro tipos de pavimentos de rodovias, sendo dois com uso de concreto e dois com uso de asfalto. O resultado representa valores médios de uma rodovia americana. Ao fim de 30 anos, tempo fixado para o estudo, a utilização de pavimentos de concreto acumula, para cada milha de estrada, 703 a 894 tCO_{2e} e na pavimentação com asfalto, 293 a 387 tCO₂, já considerando que haveria uma repavimentação de asfalto depois de 15 anos, uma vez que o asfalto é menos durável que o concreto. Esses resultados referem-se somente ao material utilizado, permitindo concluir que o asfalto emite menos da metade que o concreto, mesmo sendo menos durável.

CHESTER (2008) realizou estudo de ciclo de vida abrangendo o consumo de energia e as emissões de GEE e poluentes atmosféricos dos seguintes meios de transporte de passageiros nos Estados Unidos: automóveis, ônibus urbanos, metrô, ferrovias e aeronaves. Realizou um inventário com a avaliação dos veículos, da infraestrutura e dos combustíveis. A fase de fim de vida não foi considerada. Os resultados foram normalizados pelo tempo de vida dos veículos, por veículo-milha e passageiro-milha. A avaliação adotou um critério híbrido: parte utilizou o método baseado em processos e outra parte modelos econômicos (EIO-LCA). Em todos os tipos de transporte, nos veículos e na infraestrutura, foram computados os seguros realizados, considerando que foi necessária a construção de uma estrutura para que as empresas de seguros possam

executar o seu trabalho, com consumo de energia. A tabela 12 resume os métodos utilizados.

Todos os processos foram estimados a partir de bases de dados regionais, nacionais e desenvolvidos por fornecedores de *softwares* de ACV. Na operação dos veículos rodoviários foi utilizado o programa EPA Mobile 6.2.

Tabela 12: Métodos de ACV utilizados no inventário de transporte de passageiros dos Estados Unidos.

<u>Transporte Rodoviário</u>	
<u>Componentes</u>	<u>Método de ACV</u>
Veículos	
Manufatura / Manutenção / Seguros	EIO-LCA
Operação	Processo
Infraestrutura	
Construção / Manutenção	Híbrido (Processo e EIO-LCA)
Operação	EIO-LCA
Combustíveis	
Gasolina e Diesel	EIO-LCA
<u>Transporte Metroferroviário</u>	
<u>Componentes</u>	<u>Método de ACV</u>
Veículos	
Manufatura / Operação / Manutenção	Processo
Seguros	EIO-LCA
Infraestrutura	
Construção / Manutenção	Híbrido (Processo e EIO-LCA)
Operação	Processo
Combustíveis	
Produção indireta energia elétrica	Processo
Perdas de transmissão e distribuição	Processo

Fonte: CHESTER (2008).

Os sistemas metroferroviários analisados foram:

- São Francisco BART - *Bay Area Rapid Transit* (figura 10) – cobre São Francisco e cidades vizinhas, com total de 104 milhas e 44 estações, das quais 15 subterrâneas. Classificado como *heavy rail*, com características de metrô (metrô).



Figura 10: São Francisco BART

- São Francisco MUNI - *San Francisco Municipal Railway* (figura 11) – cobre São Francisco, com 33 estações, das quais 9 subterrâneas. Classificado como *light rail*, com características de ferrovia urbana (VLT).



Figura 11: São Francisco MUNI

- Caltrain – *California Train* (figura 12) – sistema urbano de locomotivas movidas a diesel que opera numa única linha na península de São Francisco, de Gilroy a São Francisco. Foi considerado no estudo como *heavy rail*.



Figura 12: Caltrain

- Boston Green Line (figura 13) – sistema urbano de trens elétricos com quatro linhas operando na Baía de Massachusetts, de Cambridge a Newton, passando pelo centro de Boston. Considerado como *light rail* (VLT).



Figura 13: Boston Green Line

- CAHSR - *California High Speed Rail* (figura 14) - projeto de trem de alta velocidade na Califórnia.



Figura 14: CAHSR

Todos os veículos foram assumidos como semelhantes aos trens suíços e alemães já modelados na base de dados do programa SIMAPRO, e feitos alguns ajustes. O SIMAPRO tinha 3 modelos de trem: um VLT, um trem pesado de longa distância e um trem de alta velocidade, cada um deles com um determinado peso. Os 5 trens analisados por Chester foram enquadrados numa dessas categorias, foi utilizada a matriz elétrica de cada região onde operam e os resultados de manufatura do trem foram ajustados proporcionalmente ao peso de cada trem. Os resultados finais foram normalizados para o tempo de vida útil dos trens, considerado como 26 anos. A construção de túneis e pontes não foi contemplada no levantamento, devido à indisponibilidade dos dados necessários, o que conduziu a resultados subestimados. Somente foi analisada a construção de estações e colocação de trilhos, sendo considerados os dados referentes

apenas a alguns materiais de maior emissão cuja quantidade foi estimada, como concreto, aço e madeira.

No transporte rodoviário privado foram escolhidos alguns dos tipos de automóveis mais vendidos nos Estados Unidos, o automóvel sedan, o mais leve e eficiente em termos de consumo de combustível, o SUV – *Sport Utility Vehicle*, um utilitário esportivo e a Pickup, a mais pesada e mais vendida. No transporte rodoviário público foi escolhido o ônibus, por ser o mais utilizado. Na construção da infraestrutura rodoviária foram considerados diferentes tipos de estradas e as emissões foram calculadas com base em fatores de emissão por milha construída. A manutenção das estradas foi colocada totalmente como relacionada aos ônibus uma vez que se constatou que os danos causados pelos automóveis são insignificantes face aos causados pelos ônibus e caminhões. O tempo de vida das estradas foi considerado como de 10 anos, após o qual é necessário uma repavimentação completa. Na operação da infraestrutura foi considerado o uso de herbicidas (na vegetação) e sal (na retirada da neve) nas estradas.

Com base no inventário foram determinadas (tabela 13) as emissões, por passageiro-milha, de diferentes meios de transporte, e o acréscimo na emissão operacional ao ser considerado o ciclo de vida.

Tabela 13: 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)	230	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 para incluir os sistemas metroferroviários de Chicago e da cidade de Nova Iorque e os compararam com outros modos de transporte inventariados. Um resumo dessa comparação é mostrado na tabela 14, em ordem decrescente de emissão total.

Tabela 14: Emissões, em gCO₂e/passageiro-milha, no ciclo de vida do transporte rodoviário e metroferroviário 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	230	380	65,22%
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%
Metrô Nova Iorque/NJ PATH	97	150	54,64%
Ferrovia urbana Chicago	49	145	195,92%
Ferrovia urbana em Nova Iorque	66	125	89,39%

Fonte: CHESTER e HOVARTH (2009a).

CHESTER e HOVARTH (2009b) utilizaram o inventário criado em seu trabalho anterior e consolidaram os dados para concluir que, em relação à emissão operacional, há um acréscimo médio, quando se computa a emissão das fases não operacionais, de 63% no transporte rodoviário e 155% no transporte metroferroviário, concluindo que as emissões de GEE nos sistemas metroferroviários são mais fortemente influenciadas pelos componentes não operacionais do que nos sistemas de transporte rodoviários.

Um projeto de trem de alta velocidade na Califórnia, que atende ao corredor San Diego - Los Angeles - São Francisco - Sacramento, foi confrontado com outras possíveis soluções com uso de automóveis, aeronaves e ferrovia convencional (CHESTER, 2010a). A conclusão foi de que, sob o ponto de vista de emissões de GEE, a taxa de ocupação do sistema é um fator decisivo. Se o sistema for capaz de atrair usuários suficientes para manter uma taxa de ocupação de 75%, o tempo de retorno do investimento, em termos de GEE, seria de 6 anos, mas, ao contrário, se a taxa de

ocupação for baixa, como 25%, o tempo de retorno será tão grande que pode ser considerado que nunca haverá o retorno do investimento.

Um estudo comparativo dos sistemas de transporte de passageiros (público e privado), com abordagem do ciclo de vida, foi realizado para as regiões metropolitanas de Nova Iorque, Chicago e São Francisco (CHESTER *et al.*, 2010b). Os automóveis dominam a emissão nas três regiões, com participação de 88% a 96% do total de emissões. A cidade de Nova Iorque tem a menor emissão por PKM transportado por ter um sistema de transporte de grande compartilhamento, com grande utilização de sistemas de transporte sobre trilhos e transporte aquaviário. Nas três cidades as emissões das fases não operacionais representam cerca de 50% das emissões operacionais, considerando todo o sistema de trânsito.

CHESTER *et al.* (2012) aplicaram a análise do ciclo de vida aos sistemas de transporte de Los Angeles Metro Orange (ônibus BRT – *Bus Rapid Transit* – figura 15) e Gold Line (VLT – figura 16) comparando com automóvel sedan.



Figura 15: Los Angeles Orange Line

Os sistemas foram também comparados com sistemas hipotéticos que incorporam melhorias tecnológicas para diminuição da emissão, melhorias essas esperadas para as próximas duas a três décadas. Assim seis sistemas foram comparados: os três existentes (Metro Orange Line, Gold Line e Sedan) e os mesmos três sistemas hipotéticos.



Figura 16: Los Angeles Gold Line

Os combustíveis usados foram a gasolina modificada da Califórnia para o automóvel Sedan, o gás natural para os ônibus da Orange Line e a eletricidade para o VLT da Gold Line. Em todos esses sistemas, os três reais e os três hipotéticos, a emissão operacional é maior que a não operacional. A emissão não operacional variou de 42% a 91% da emissão operacional. O maior ganho obtido nos sistemas hipotéticos foi na Gold Line, proporcionado pela alteração na matriz energética que provê a eletricidade que alimenta o VLT. Essa matriz utiliza 70% de fontes térmicas (39% carvão e 31% gás), e é esperado que, até 2030, o carvão seja eliminado e as fontes térmicas diminuam para 50%, utilizando apenas gás. A operação dos trens e a operação da infraestrutura (iluminação, escadas rolantes etc.) são os componentes principais no ciclo de vida da Gold Line. As etapas do ciclo de vida foram modeladas com uso do *software* GREET, Ecoinvent, EPA Mobile V6 e o método de análise econômica de entrada/saída. No resultado geral, em 2009, o maior emissor foi o sedan, seguido do VLT da Gold Line e do ônibus da Orange Line. Porém para os veículos hipotéticos o maior emissor continuou sendo o sedan, mas o ônibus passou a ser o segundo e o VLT o terceiro. Isso ocorreu porque a mudança na matriz energética influenciou mais que as mudanças tecnológicas no sedan e no ônibus.

CHESTER *et al.* (2013) acrescentaram ao estudo do BRT e VLT de Los Angeles a emissão de CO₂e por viagem de passageiro, ou seja, a viagem porta a porta, considerando que muitos passageiros chegam ou saem de uma estação de BRT ou VLT de automóvel ou ônibus, complementando sua viagem.

CHANG e KENDALL (2011) analisaram o projeto de construção da infraestrutura de uma ferrovia ligando São Francisco a Anaheim. A infraestrutura considerada

compreende a construção dos assentamentos dos trilhos, dos túneis, das estruturas aéreas, da rede elétrica e da preparação do solo, ficando de fora do estudo a construção das estações e a manutenção. O resultado final apontou uma 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 construção dos equipamentos de operação por somente 4%. Os túneis e estruturas aéreas, embora representassem apenas 15% do comprimento da rota foram responsáveis por 60% das emissões. Foi estimado que essa ferrovia evitaria, por ano, a emissão de 1,15 milhões de tCO₂e pela migração de usuários de transportes mais poluentes, resultando em cerca de 2 anos para a recuperação dos efeitos da emissão de gases. Contudo, foi estimado que o tempo de recuperação é altamente dependente da quantidade de usuários da ferrovia. Uma queda de 75% na quantidade de usuários prevista aumentaria o tempo de recuperação para 20 anos.

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

Uma estrada na Suécia foi analisada por STRIPPLE (2001) para três métodos diferentes de construção: asfalto quente, asfalto frio e concreto. Para cada quilômetro construído, considerando 40 anos de operação, a emissão de GEE é praticamente igual nos dois métodos de asfalto (pouco menor para o asfalto frio) e cerca de 35% maior na construção de concreto. A etapa de construção, comparando com a manutenção e a operação da estrada, responde pela maior parte, mais de 80%. Nos 40 anos a emissão total acumulada, por km, esteve em torno de 2.000 tCO₂e para o asfalto e em torno de 2.700 tCO₂e para o concreto.

Estudo realizado para o ciclo de vida de túneis em uma estrada rodoviária na Suécia (MILIUTENKO, 2012), avaliou três tipos de túneis: o primeiro escavado na rocha e sem concreto, com 7,5 km; o segundo escavado na terra e concretado, com 2,5 km; e o terceiro escavado na rocha e concretado, com 10 km. O tempo coberto pelo estudo foi de 100 anos. O estudo não abrangeu os veículos e as emissões ao fim de vida não foram consideradas. Os túneis com utilização de concreto tiveram uma emissão por metro de construção muito maior do que o escavado na rocha sem concreto, indicando a grande importância do concreto nas emissões. Na média as emissões dos três túneis durante a construção revelou que 65% foram provenientes dos materiais utilizados, 22% da

construção no local, 3% do transporte de materiais e 10% da eliminação dos resíduos inertes. Durante todo o ciclo de vida as fases não operacionais responderam por 44% das emissões. Neste caso a operação da infraestrutura foi a responsável pelo maior impacto, devido ao sistema utilizado na iluminação e ventilação dos túneis.

MILIUTENKO (2013) realizou outro ACV para confrontar três métodos de pavimentação, sendo dois com asfalto reciclado (asfalto quente e asfalto frio) e o outro com reuso do asfalto. A conclusão foi que o uso do asfalto reciclado resulta em ganhos na emissão de CO₂, em torno de 20 kgCO₂e/t, tendo o asfalto quente ganho ligeiramente superior, porém o reuso do asfalto não resulta em nenhum ganho, aumentando a emissão em cerca de 4 kgCO₂e/t.

SVENSON e EKLUND (2007) estudaram uma ferrovia de 6,9 km da Suécia e procuraram determinar os materiais utilizados na construção da infraestrutura em termos de quantidade e de energia. Não consideraram pontes e túneis. Analisando os principais materiais encontrados nessa ferrovia, concluíram que o mais utilizado, por quilômetro construído, é a brita (13.695 t, representando quase 94% da massa total), seguida do concreto (210 t, representando 4% da massa total). Contudo a maior quantidade de energia (77% do total) é consumida na produção do aço utilizado, embora represente, em massa, apenas 2% do total. O sistema da via férrea (trilhos e sua colocação) é o mais importante na demanda de energia e consequente emissão de gases, utilizando aço, concreto e brita. A construção da estrutura elétrica e da sinalização tem pequena relevância, quando comparadas à construção da via permanente.

GROSSRIEDER (2011) desenvolveu um modelo para projetos de futuras ferrovias na Noruega, aplicando esse modelo no corredor Oslo-Trondheim, de 486 km, tendo 83% do trajeto em seções abertas de vias duplas, 15% em túneis de via simples e 2% em pontes de via simples. Os componentes do estudo foram: a infraestrutura, o material rodante e a operação. Os resultados, para um período de 60 anos, foram que a infraestrutura respondeu por 87,8% das emissões de carbono, enquanto a operação respondeu por 11,6% e o material rodante por 0,6%. Na construção da infraestrutura o cimento e o aço tiveram participação, respectivamente, de 21% e 26% (valor médio em função das diferenças de qualidade) das emissões de carbono. A emissão total por PKM atingiu 120 gCO₂e, divididos em 105 gCO₂e para a infraestrutura, 14 gCO₂e para a

operação e 0,81 gCO₂e para o material rodante. A baixa emissão da operação é justificada pela matriz elétrica da Noruega, que apresenta um baixo fator de emissão, de apenas 0,166 kgCO₂e/kWh.

Estudo realizado em 2008 por STRIPPLE e UPPENBERG (2010) para analisar o ciclo de vida de uma grande ferrovia da Suécia (Bothnia Line), projetada para trens de alta velocidade, com transporte de carga e passageiros, revelou uma importância ainda maior das fases não operacionais, respondendo por 99,4% das emissões contra apenas 0,6% da operação dos trens. Tal fato decorreu, entre outros fatores, da grandiosidade da ferrovia (183 km, 143 pontes e 25 km de túneis) e do desflorestamento da área por onde passam os trilhos. Por outro lado a matriz elétrica é constituída praticamente (99,2%) por hidrelétricas. O material usado na infraestrutura e o desflorestamento responderam pela maior parte das emissões (52,7% e 16,3%, respectivamente). Nesse levantamento constatou-se que o aço e o cimento, entre todos os materiais utilizados na construção da ferrovia, foram os maiores responsáveis pela emissão. O aço, utilizado principalmente nos trilhos, respondeu por 43% das emissões dos materiais usados na infraestrutura e o cimento, utilizado principalmente nos túneis e pontes, por 32%. O tempo de vida dos trens foi estimado em 30 anos e para a infraestrutura o tempo de avaliação foi fixado em 60 anos. Foi utilizado o *software* de análise do ciclo de vida KCL-ECO.

Um projeto de ferrovia de alta velocidade (Europabanan), para transporte de carga e passageiros, na Suécia, foi avaliado por AKERMAN (2011), abrangendo: a) A operação dos trens; b) A manufatura e manutenção dos trens; c) A construção, manutenção e operação da infraestrutura; e d) A produção e transporte de combustíveis. A ferrovia tem 740 km, com 44 km de túneis e 11 km de pontes. Na construção da infraestrutura o componente de maior emissão por quilômetro de construção são as pontes (12.870 tCO₂e) e túneis (7.119 tCO₂e). Em menor escala estão o sistema de trilhos da via férrea (2.954 tCO₂e), o desflorestamento (1.038 tCO₂e) e a eletrificação, sinalização e telecomunicações (460 tCO₂e). Considerando toda a ferrovia e um tempo de vida de 60 anos, a emissão total por ano é de 66.000 tCO₂e, sendo a operação responsável por 11.800 tCO₂e. Observa-se, então, que, considerando o ciclo de vida da ferrovia, as emissões crescem mais de cinco vezes em relação à operação. Porém, como a construção da ferrovia vai permitir o menor uso de carros, caminhões e aviões, as emissões totais seriam reduzidas, por volta de 2025-2030, em 550.000 tCO₂e por ano,

sendo 60% dessa redução devida ao deslocamento do transporte de carga de caminhões e 40% ao deslocamento do transporte de passageiros de carros e aviões.

Analisando projetos futuros, WESTIN e KAGESON (2012) afirmam que a construção de ferrovias de alta velocidade na Europa só pode ser compensada, em suas altas emissões de carbono, por um volume anual de mais de 10 milhões de viagens. Grande parte do deslocamento de tráfego deve vir da aviação e o projeto não deve fazer uso extensivo de túneis. O tamanho do benefício de carbono líquido de uma futura ferrovia de alta velocidade depende de alguns parâmetros, entre eles: a energia por PKM necessária para diferentes veículos; a emissão produzida por diferentes combustíveis; a origem da eletricidade; a taxa média de ocupação de diferentes modos de transporte; e o efeito de deslocamento de passageiros de outros modos de transporte. Um modelo paramétrico foi usado para calcular a mudança nas emissões de CO₂ por PKM quando uma pessoa se desloca de algum meio de transporte para o trem de alta velocidade. Devido à incerteza desse efeito, cinco cenários foram analisados, sendo aplicada a simulação de Monte Carlo. Na simulação aplicada, a alteração nas emissões por PKM e as emissões líquidas resultantes para os cinco cenários foram calculadas usando valores aleatórios para os parâmetros de distribuição. O processo foi repetido um milhão de vezes até que distribuições estáveis fossem obtidas.

Para a instalação da via férrea é necessário realizar escavações e preenchimento do solo, que é preparado para receber a via. O próprio solo escavado é usado no preenchimento de outras partes. Pode haver necessidade de trazer solo de outras regiões mais afastadas, aumentando o uso de transporte. STRIPPLE (2001) classificou as escavações em quatro tipos, do mais simples ao mais complexo, indicando, para o equipamento utilizado, o consumo de combustível por hora e permitindo a determinação da emissão produzida nessa tarefa.

KIANI *et al.* (2008) pesquisaram a emissão produzida durante o ciclo de vida por três tipos comuns de leitos de assentamento dos dormentes dos trens: a) Brita, que é o sistema convencional e mais antigo; b) *Slab tracks tipo embedded rail*; e c) *Slab tracks tipo cast-in-sleeper*. Esses dois últimos são sistemas mais modernos, baseados em concreto. A brita necessita de uma manutenção maior que o concreto e tem um custo e tempo de vida menor. As estruturas do tipo *slab track* têm um tempo de vida mínimo de

60 anos e máximo de 120 anos, enquanto a brita alcança 20 e 30 anos, respectivamente. O estudo, realizado para sistemas ferroviários do Reino Unido, abrangeu todas as fases do ciclo de vida dos assentamentos, incluindo os trilhos; extração da matéria prima; manufatura dos componentes; transporte até o local; construção dos assentamentos; manutenção; renovação; desmonte dos trilhos; e reciclagem/reuso. O estudo considerou o tempo de vida de componentes da via férrea, como trilhos e fixações, como sendo entre 20 e 30 anos. A emissão média produzida, em tCO₂e, para um tempo fixado em 120 anos com os componentes tendo tempo de vida útil de 30 anos, foi cerca de 70.000 para a brita, 60.000 para o *embedded rail* e 50.000 para o *cast-in-sleeper*. Assim, levando em conta o ciclo de vida, houve uma menor emissão das estruturas de concreto, quando comparada à estrutura convencional de brita, mostrando um resultado que não era esperado, por ser o concreto um grande emissor de carbono. A conclusão é que a utilização de estruturas de concreto resulta em menor emissão de carbono do que a utilização da brita.

Outro estudo (MILFORD e ALLWOOD, 2010) analisou os tipos de vias férreas usados no Reino Unido, comparando as vias tradicionais com as tecnologias mais recentes: dormentes de concreto dos tipos *embedded rail*, *embedded double-head rail* e *embedded quadruple-head rail*, concluindo que os elementos mais importantes para a emissão de carbono são: a carga de tráfego suportada; o tempo de vida útil dos componentes da via; e a tecnologia usada no projeto da via. Diminuindo a carga de tráfego aumenta o tempo de vida útil, acarretando menor emissão. Os assentamentos baseados em concreto são mais eficientes que os convencionais, que utilizam dormentes de madeira ou aço. Os trilhos *embedded double-head* têm tempo de vida útil maior que os convencionais, contribuindo para diminuir a emissão, enquanto os *quadruple-head* não se mostraram mais eficientes que os *double-head*. A implantação dessas tecnologias na rede ferroviária do Reino Unido contribuiria para uma redução de 40% na emissão de CO₂ em relação ao projeto convencional.

Em um levantamento das emissões de CO₂ dos trens de alta velocidade no Reino Unido foi calculado que teriam, em 2025, no tempo de vida de 30 anos, emissão de 18,5 gCO₂e/PKM, enquanto os trens convencionais teriam emissão de 22,7 gCO₂e/PKM. Acrescentando os efeitos de deslocamento de passageiros de outros modos de transporte e a nova demanda criada, os valores passariam a ser 15,1 e 19,7 gCO₂e/PKM,

respectivamente. Outro levantamento foi realizado, para determinação das emissões na construção da infraestrutura de ferrovias do Reino Unido. Considerando uma via com 10% do seu comprimento formado de túneis, as vias sem brita têm emissão inicial (sem considerar o ciclo de vida) maior, em tCO₂e/km (270,6), do que as vias com brita (236,5), por utilizarem mais concreto e aço. O componente de maior emissão foi a via permanente, com 68,2 tCO₂e/km. A abertura de túneis mostrou-se uma atividade de grande emissão, pelo uso intensivo de concreto e aço. Cada quilômetro de via permanente em seções de túneis emitiu quase seis vezes mais que em seções abertas. A construção das estações teve uma emissão muito pequena, de apenas 0,01 tCO₂e/km. (NETWORK RAIL, 2009).

Uma ponte ferroviária construída na Espanha para permitir a passagem de trens de alta velocidade entre a Espanha e a França foi objeto de análise do ciclo de vida. A avaliação do indicador de alterações climáticas (GWP) mostrou que os materiais utilizados foram responsáveis por 84% (a maior parte devido ao aço e concreto), a manutenção por 3% e o descarte no fim de vida por 12%. A construção respondeu por apenas 1%. Em termos de componentes a estrutura principal respondeu pela maior parte, 97%, enquanto os trilhos e o transporte responderam por apenas 3%. O destino assumido para o fim de vida foi, para a madeira, aterro, incineração ou reciclagem; para o aço, aterro ou reciclagem e para o concreto, aterro ou reuso. Foi levantado o consumo de diesel nos equipamentos e transportes utilizados (GARCIA, 2011).

Uma ACV para um novo trem de metrô de Oslo (figura 17), projetado para substituir o trem antigo, foi desenvolvida por STRUCKL e WIMMER (2007). A ACV se baseou em um levantamento feito pela Siemens, a fornecedora dos trens. O trem é considerado *light*, com três carros e uso extenso de alumínio, com massa total de 94 t. A ACV foi composta de quatro estágios: A aquisição de materiais, a manufatura/entrega, o uso/manutenção e o fim de vida. O resultado final considerou que a reciclagem e recuperação do trem em seu fim de vida resultam em um valor de crédito nas emissões de carbono.



Figura 17: Oslo Metro

Conforme figura 18 o uso do trem nos 30 anos de vida útil representa a maior parte das emissões, que tem valores considerados baixos, quando calculados em gCO₂ por tonelada-quilômetro: 1,6 gCO₂e/tkm para a operação (uso) e 2,6 gCO₂e/tkm para todo o ciclo de vida. Esses valores são consequência da tecnologia do trem, com o uso de materiais leves, do freio regenerativo, que recupera em até 46% a energia cinética na frenagem e do mix de fontes energéticas com alto índice de fontes renováveis.

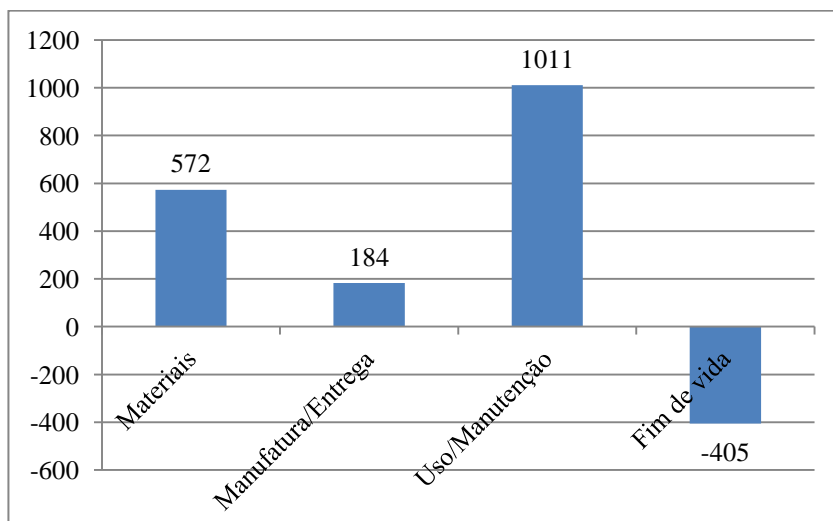


Figura 18: Emissões totais, em tCO₂e, no ciclo de vida de 30 anos do trem do metrô de Oslo. Fonte: STRUCKL e WIMMER (2007).

DEL PERO *et al.* (2014) realizaram ACV para um trem projetado para uso futuro no metrô de Roma. O trem é fabricado por ANSALDO BREDÁ, composto de 6 carros com massa total de 193 t, velocidade máxima de 90 km/h e tempo de vida estimado em 30 anos. A ACV foi dividida em aquisição de material, manufatura, uso e fim de vida. Uma análise da reciclabilidade / recuperabilidade ao fim de vida foi efetivada,

resultando em taxas de, respectivamente, 87,4% e 92,1%. Os resultados foram apresentados em veículo-km. A quantidade de veículo-km (VKM) representa a quilometragem percorrida pelos veículos em um determinado período, sem levar em conta a quantidade de passageiros transportada. Foi assumida uma taxa de ocupação de 80% dos lugares sentados e 3,2 passageiros/m², apenas para o cálculo da energia elétrica consumida. A emissão total no ciclo de vida foi de 10,4 kgCO₂e/VKM e a participação percentual de cada fase do ciclo de vida são mostradas na figura 19.

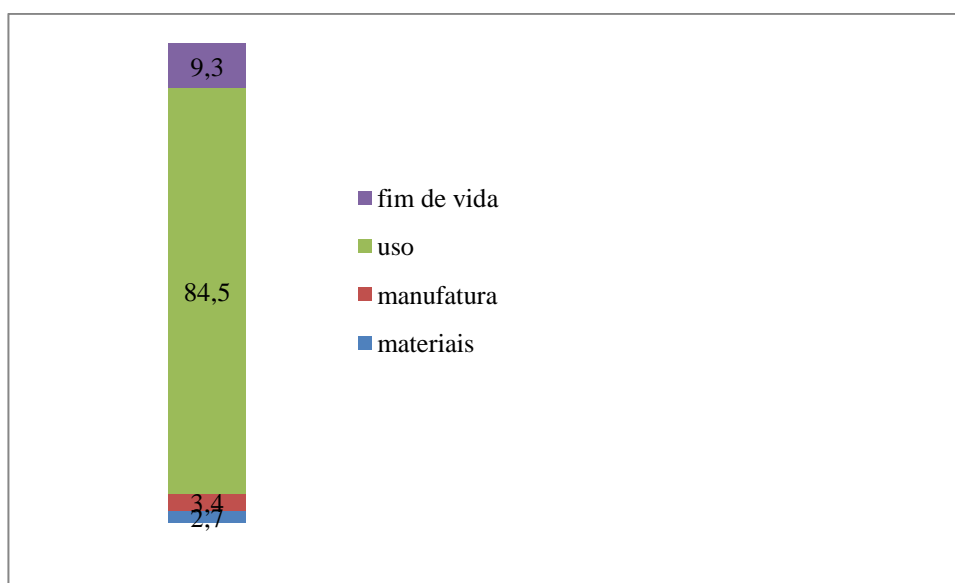


Figura 19: Participação percentual de cada fase na emissão de CO₂e no ciclo de vida do trem do metrô de Roma. Fonte: DEL PERO *et al.* (2014).

Uma análise de sensibilidade, conduzida no estudo, explora a influência da taxa de ocupação do trem na emissão de carbono. O autor define, para servir de referência, uma taxa de ocupação considerada “normal”, onde todos os assentos estão ocupados e a taxa de ocupação da área livre é 3,2 passageiros em pé/m². Se a taxa passar a ser “alta” (todos os assentos ocupados e 6,0 passageiros em pé/m²) a emissão de CO₂e por VKM aumenta 5,8%. Se a taxa for “baixa” (40% dos assentos ocupados e 0% de passageiros em pé/m²) a emissão diminui 7,9%, em função da variação no consumo de energia.

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

Um estudo de ciclo de vida foi aplicado a uma ferrovia de 35 km em Tóquio. Foi especificado um tempo de 50 anos para calcular a emissão acumulada. Após 22 anos a

emissão operacional acumulada passou a ser maior que a emissão não operacional. Ao final de 50 anos a emissão operacional acumulada representaria 64,6% do total, a manutenção 1,7 %, a manufatura e descarte dos veículos 2,2%, e a construção da infraestrutura 31,5%. Considerando também a redução na emissão proporcionada pelo deslocamento de usuários de outros meios de transporte, ao final de 50 anos haveria um saldo líquido positivo, ou seja, haveria uma redução na emissão. Outra comparação foi feita com um sistema imaginário de BRT no mesmo trajeto e que tivesse a mesma capacidade de transporte, de 270 mil passageiros por dia. Foi assumido que as fases não operacionais teriam a mesma emissão, pelo fato de serem construções semelhantes. Assim a fase operacional é que determinaria o valor da emissão. Ao final de 50 anos a emissão da ferrovia seria cerca de seis vezes menor que a do BRT, resultado provavelmente devido a uma matriz de geração de eletricidade de baixa emissão (MORITA *et al.*, 2011).

KATO *et al.* (2005) analisaram um projeto de implantação de MAGLEV no Japão, sob a abordagem de ciclo de vida. O projeto seria para um trecho de 500 km, de Tóquio a Osaka, com nove estações. Nesse trecho 80 km seriam na superfície enquanto a parte aérea teria uma ponte elevada de 120 km e a parte subterrânea um túnel de 300 km. A taxa de ocupação seria de 80% e o tempo de vida fixado em 20 anos para o veículo. O estudo foi feito para um tempo de 60 anos. Nesse tempo a operação dos trens consumiu 89% da emissão total, a construção, manutenção e fim de vida dos veículos 2% e a construção, manutenção e operação da infraestrutura 9%, resultando em 13 gCO₂/PKM.

- Para cada km de construção e manutenção foram emitidos, respectivamente:
Pontes = 3.680 t e 120 t; túnel = 5.310 t e 210 t e solo = 1.940 t e 90 t.
- Para cada trem foram emitidos: Manufatura=2.100 t, manutenção=1.300 t e descarte=8,7 t. Na operação a emissão por PKM foi de 1,7 gCO₂.

O projeto de MAGLEV foi comparado com a Tokaido Shinkansen, uma ferrovia de alta velocidade existente (270 km/h), de trajeto com distância similar (515 km). É a ferrovia de alta velocidade que carrega mais passageiros no mundo (391.000 passageiros por dia, em 2012). Também foi feita comparação com o uso de aeronave como meio de transporte substituto. Foi utilizado o conceito de “eficiência ambiental”, onde o tempo gasto no transporte também é considerado, além da quantidade de passageiros

transportados. Por isso, embora a MAGLEV tenha emissão duas vezes maior que a Shinkansen, apresenta um resultado final quase igual ao dela (9/10 do resultado da Shinkansen), por realizar o trajeto em menos da metade do tempo. O trajeto realizado por aeronaves teve o pior desempenho, menos de 1/3 do desempenho da Shinkansen.

INAMURA *et al.* (2000) aplicaram o método de análise econômica de entrada/saída à Rodovia Tohoku Expressway, de 680 km, onde o trânsito dominante é de carga. Compararam a rodovia com a Tohoku Shinkansen, ferrovia de cerca de 600 km. Foi considerado que, para atender a demanda em um tempo de vida estimado de 60 anos, a capacidade da rodovia teria que ser multiplicada por 2,67 e a da ferrovia por 1,6. Nessa simulação, após 10,8 anos a ferrovia passaria a ter emissão menor que a rodovia. A construção da ferrovia emite 2,6 vezes mais que a construção da rodovia, todavia a utilização da rodovia implica em emissão três vezes maior, por PKM, que a ferrovia. Assim, após 10,8 anos a ferrovia absorve a emissão maior de sua construção.

Um estudo conduzido por órgão do governo da Índia (TERI, 2012) avaliou o ciclo de vida de alguns sistemas de transporte de Delhi: um sistema de BRT, uma ferrovia de longa distância, uma autoestrada, o Metrô de Delhi e uma estrada típica da cidade. Não foi considerado o fim de vida. Foi feita uma estimativa para 30 anos e apresentados resultados de emissão de CO₂ por km de construção, por veículo e por PKM, considerando lotação máxima. O estudo foi justificado pelo reconhecimento da necessidade de um melhor conhecimento da utilização do ciclo de vida no levantamento de emissões de CO₂ e da ausência total de estudos nessa área na Índia. A tabela 15 mostra os resultados de emissão de CO₂ por PKM, para o BRT e o metrô.

Tabela 15: Emissões, em gCO₂/PKM, do BRT e Metrô de Delhi.

	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

Fonte: TERI (2012).

Um modelo para determinação das emissões de GEE em sistemas de BRT foi proposto por CUI *et al.* (2010) e aplicado no sistema BRT em operação na cidade de Xiamen, na China. O levantamento assumiu tempo de vida de 50 anos. A tabela 16 resume a ACV, com dados referentes à infraestrutura, ao combustível e aos veículos. A reciclagem foi considerada como crédito ao sistema.

Tabela 16: Emissões de CO₂ do BRT de Xiamen, China.

	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).

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

A tabela 17 resume dados quantitativos dos trabalhos pesquisados em sistemas metroferroviários.

Tabela 17: Trabalhos selecionados de ciclo de vida em sistemas metroferroviários.

Fonte: Autor/Ano	Local	Sistema	Objetivo	Técnica Utilizada	Tempo abrangido pelo estudo	Infraestrutura- (Construção/ Manutenção/ Operação)	Infraestrutura- Fim de vida	Veículos- (Construção/ Manutenção)	Veículos- Operação	Veículos- Fim de vida	Resultado – Unidade funcional
Sistemas metroferroviários completos											
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Califórnia	Metrô – BART	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	42,79%	NA	6,01%	51,20%	NA	77,34 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Califórnia	Trem alta velocidade – CAHSR	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	24,84%	NA	3,39%	71,78%	NA	81,24 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Chicago	Metrô	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	35,24%	NA	7,41%	57,35%	NA	175,52 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Chicago	Ferrovia	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	46,28%	NA	21,47%	32,25%	NA	94,04 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Nova Iorque	Metrô	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	38,65%	NA	9,84%	51,51%	NA	91,56 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Nova Iorque	Ferrovia	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	23,27%	NA	23,17%	53,56%	NA	77,14 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Nova Iorque- New Jersey	Metrô – NY NJ PATH	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	23,65%	NA	10,42%	65,93%	NA	92,80 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009a)	Newark	VLT	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	61,07%	NA	6,36%	32,57%	NA	87,03 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009b)	Califórnia	Ferrovia - CALTRAIN	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	30,13%	NA	18,82%	51,05%	NA	106,26 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009b)	Boston	VLT – GREEN LINE	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	37,93%	NA	2,41%	59,66%	NA	137,92 gCO ₂ e/PKM
CHESTER e HOVARTH (2009b)	Califórnia	VLT – MUNI	ICV	Software LCA EIO - LCA	30 anos	53,92%	NA	3,39%	42,69%	NA	106,74 gCO ₂ e/PKM
CHESTER <i>et al.</i> (2012)	Califórnia	VLT – GOLD LINE	ACV Comparação entre VLT – BRT - Automóvel	Software LCA EIO - LCA	30 anos	30,00%	NA	0,73%	69,27%	NA	111,25 gCO ₂ e/PKM

Fonte: Autor/Ano	Local	Sistema	Objetivo	Técnica Utilizada	Tempo abrangido pelo estudo	Infraestrutura- (Construção/ Manutenção/ Operação)	Infraestrutura- Fim de vida	Veículos- (Construção/ Manutenção)	Veículos- Operação	Veículos- Fim de vida	Resultado – Unidade funcional
Sistemas metroferroviários completos											
Grossrieder (2011)	Oslo	Projeto Ferrovia alta velocidade	ACV Avaliação de futuro projeto	Software LCA	60 anos	87,80%	NA	0,60%	11,60%	NA	120 gCO ₂ e/PKM
Stripple e Uppenberg (2010)	Suécia	Ferrovia	ACV	Software LCA	60 anos	93,31%	NA	6,31%	0,38%	NA	12,9 gCO ₂ e/PKM
NETWORK RAIL (2009)	Reino Unido	Ferrovia Trem de alta velocidade típico europeu	Não divulgado	Usa somente resultados de terceiros	Projeção para 2025-2055	73,08%	NA	3,84%	23,08%	NA	13 tCO ₂ e/km
NETWORK RAIL (2009)	Reino Unido	Ferrovia Trem convencional típico europeu	Não divulgado	Usa somente resultados de terceiros	Projeção para 2025-2055	74,29% (Construção do sistema de trilhos)	NA	2,85%	22,86%	NA	17,5 tCO ₂ e/km
MORITA	Tóquio	Ferrovia	ACV	Convencional	50 anos	31,50%	NA	3,90%	64,60%	NA	900.000 tCO ₂
KATO (2005)	Japão	Projeto de MAGLEV	ACV	Convencional	60 anos	9,00%	NA	1,74%	89,00%	0,26%	13 gCO ₂ /PKM
TERI (2012)	Índia	Metrô	ACV	Convencional	NA	62,76%	NA	2,78%	34,46%	NA	57 gCO ₂ /PKM
Componentes dos sistemas metroferroviários											
GARCIA (2011)	Espanha	Ponte ferroviária	ACV	Software LCA	100 anos	87,20%	12,80%	NA	NA	NA	2.503 tCO ₂ e
STRÜCKL e WIMMER (2007)	Oslo	Trem do metrô	ACV	Software LCA	30 anos	NA	NA	42,78%	57,22%	0	2,6 gCO ₂ e/tkm
DEL PERO <i>et al.</i> (2014)	Roma	Trem do metrô	ACV	Software LCA	30 anos	NA	NA	6,20%	84,50%	9,30%	10,4 kgCO ₂ e/VKM
KIANI (2008)	Reino Unido	Via permanente	ICV Comparação de tipos	Convencional	60 e 120 anos	NA	NA	NA	NA	NA	De 25.000 a 95.000 tCO ₂ e
MILFORD e ALWWOD (2010)	Reino Unido	Via permanente	ICV Comparação de tipos	Convencional	Componetes: de 22 a 198 anos	86%	14%	NA	NA	NA	De 12 a 30 kgCO ₂ /m-ano

Legenda: NA – Não aplicável ou não disponível

Analisando todos os estudos pesquisados e apresentados nos itens anteriores algumas conclusões podem ser tiradas:

✓ Os trabalhos dos Estados Unidos, liderados por Chester, foram feitos para sistemas já construídos e em operação, com exceção do trem de alta velocidade da Califórnia. Os dados foram obtidos em bases de dados, programas de ACV, mapeamento pelo *Google Earth* e estimativas. O método utilizado faz uso extensivo do método de análise econômica de entrada/saída. Não considera o fim de vida. Não considera a construção de túneis nos metrô. Os trabalhos abrangem uma grande variedade de meios de transporte privado e público, incluindo sistemas rodoviários e metroferroviários. Os trabalhos de Chester estão reunidos no sítio <http://www.transportationlca.org>.

✓ Os trabalhos da Europa são, em sua maioria (8 em um total de 15), para projetos de novos sistemas. Destacam-se os estudos para os trens do metrô de Oslo (STRUCKL e WIMMER, 2007) e do metrô de Roma (DEL PERO *et al.*, 2014), conduzidos em conformidade com a ISO 14040 e com dados fornecidos pelos fabricantes. Contudo, de um modo geral, os estudos são específicos, apenas para alguns componentes, como trens ou infraestrutura, não sendo identificado nenhum estudo abrangente que envolva ACV de um sistema metroferroviário.

✓ Os trabalhos do Japão contemplam projetos de sistemas de metrô e ferrovias, e introduzem um indicador de eficiência ambiental que considera o tempo de duração da viagem, em conjunto com a emissão de carbono.

✓ De um modo geral as emissões das fases de construção e outras fases não operacionais de metrô contribuem significativamente para as emissões totais do ciclo de vida (entre 62% e 93%). Para automóveis e ônibus a contribuição é menos significativa (em torno de 60%). Por outro lado para os sistemas metroferroviários, a matriz energética para geração da eletricidade é um fator de grande importância nessa relação e no valor total da emissão no ciclo de vida. Outro fator importante é a carga de lotação, possibilitando que os resultados sejam apresentados em gCO₂/PKM.

✓ Quando consideradas, as emissões de fim de vida são geralmente pouco significativas em relação ao total (menos que 1% em sistemas metroferroviários e menos que 10% quando se considera apenas o trem do metrô), podendo até ser negativas, quando considerado o crédito referente à reciclagem.

✓ Em relação às emissões não operacionais a construção da infraestrutura é a mais representativa, com a construção de pontes e túneis tendo a maior parcela das emissões (cerca de 6 vezes maior que a construção da via em trecho aberto), devido ao uso extensivo de cimento e aço.

✓ Nos sistemas metroferroviários a emissão não operacional dos trens (construção, manutenção e fim de vida dos trens) é geralmente muito pequena (entre 0,67% e 6,31%), quando comparada à emissão operacional e total do sistema.

Com base na análise dos métodos utilizados e resultados obtidos nesses trabalhos, será definido um procedimento para construção de um ICV de um sistema metroferroviário. O procedimento seguirá a abordagem da maioria dos trabalhos, determinando e agrupando as emissões pelas fases de construção da infraestrutura, fabricação dos trens, operação dos trens, operação da infraestrutura e manutenção. Não será abordada a fase de fim de vida, também de acordo com a maioria dos trabalhos. Não serão utilizados *softwares* e seus bancos de dados, por não refletirem a realidade brasileira.

4 MÉTODO DE TRABALHO

O método de trabalho consiste em estabelecer um procedimento de ICV para um sistema metroferroviário existente ou em fase de implantação, visando a estimativa do consumo energético e do potencial impacto no aquecimento global causado pelas emissões de CO₂. O procedimento se aplica também à ampliação de um sistema metroferroviário, com a construção de novas linhas, que poderiam ser tratadas como um novo sistema. Sistemas ainda em fase de projeto provavelmente não terão dados detalhados e a aplicação do procedimento irá requerer muitas estimativas e trará resultados com maior incerteza. Para auxiliar na criação desse procedimento foi realizada uma revisão bibliográfica para a obtenção de informações relevantes que irão subsidiar sua proposição e possibilitar comparações com trabalhos e pesquisas já realizadas. Os resultados do procedimento de ICV constituem entradas para outro procedimento criado para a determinação das emissões evitadas pelo sistema.

4.1 Procedimento de ICV para um sistema metroferroviário

A figura 20 apresenta uma visão global do procedimento, delimitando as fronteiras, ou seja, o que é abrangido pelo estudo. O procedimento proposto segue a norma ISO 14040. Os objetivos são: a) Quantificar o impacto ambiental da categoria aquecimento global (GWP) nas diversas fases do ciclo de vida de um sistema metroferroviário. O consumo energético nessas fases também será avaliado, b) Identificar as fases relevantes em termos de energia consumida e emissões produzidas e c) Produzir os dados necessários para serem usados como entradas para outro procedimento de determinação da emissão evitada.

O escopo inclui a construção da infraestrutura, a fabricação dos trens, a manutenção e a operação do sistema. A extensão geográfica inclui, além do Rio de Janeiro, China (trens), Luxemburgo (terceiro trilho) e Espanha (trilhos). Não foi considerado o fim de vida da infraestrutura e dos trens, seguindo a mesma regra utilizada em todos os trabalhos pesquisados, em relação à infraestrutura, e na maioria (94%) dos trabalhos pesquisados, em relação aos trens (CHESTER, 2008; CHESTER e HORVATH, 2009a, 2009b, 2010a; CHESTER *et al.*, 2010b, 2012, 2013; CHANG e KENDALL, 2011;

TERI, 2012; STRIPPLE e UPPENBERG, 2010; STRIPPLE, 2001; AKERMAN, 2011). A relevância dessa fase no ciclo de vida do trem é muito pequena. Nos EPDs mostrados na tabela 10 o maior valor de emissão de CO₂ para o fim de vida foi 0,4% do total da emissão do trem. Considerando ainda a avaliação total do sistema, incluindo a infraestrutura, além do trem, esse percentual tende a ser menor, uma vez que usualmente a construção da infraestrutura tem muito maior relevância que a fabricação dos trens. KATO (2005) encontrou, para o fim de vida dos trens, um valor de emissão menor que 0,3% do total.

Para conduzir o levantamento de dados é preciso definir o tempo a ser considerado para o ciclo de vida do sistema. Quando o objeto da análise é um componente do sistema de transporte, como os veículos, utiliza-se o tempo de vida útil desses veículos, usualmente entre 20 e 30 anos para os trens. Quando se analisa o sistema metroferroviário completo, há uma dificuldade em se estabelecer o tempo de vida útil da infraestrutura, que não é claramente definido, mas supostamente é bem maior que o tempo de vida dos veículos. Por esse motivo os trabalhos apresentados na revisão bibliográfica consideram um tempo que varia entre 50 e 100 anos. O tempo proposto neste trabalho é de 60 anos, o mesmo usado por GROSSRIEDER (2011), KATO *et al.* (2005) e STRIPPLE e UPPENBERG (2010). Esse tempo equivale ao maior tempo de vida de um componente individual da via permanente, o terceiro trilho, e duas vezes o tempo de vida dos trens utilizados.

Como regra geral, foram utilizados fatores de emissão com consistência geográfica (local da emissão), temporal (momento da emissão) e tecnológica (tecnologia disponível), sempre que possível.

Como o objetivo de um sistema de transporte metroferroviário é o transporte de passageiros, a unidade funcional escolhida é 1 passageiro-quilômetro (PKM).

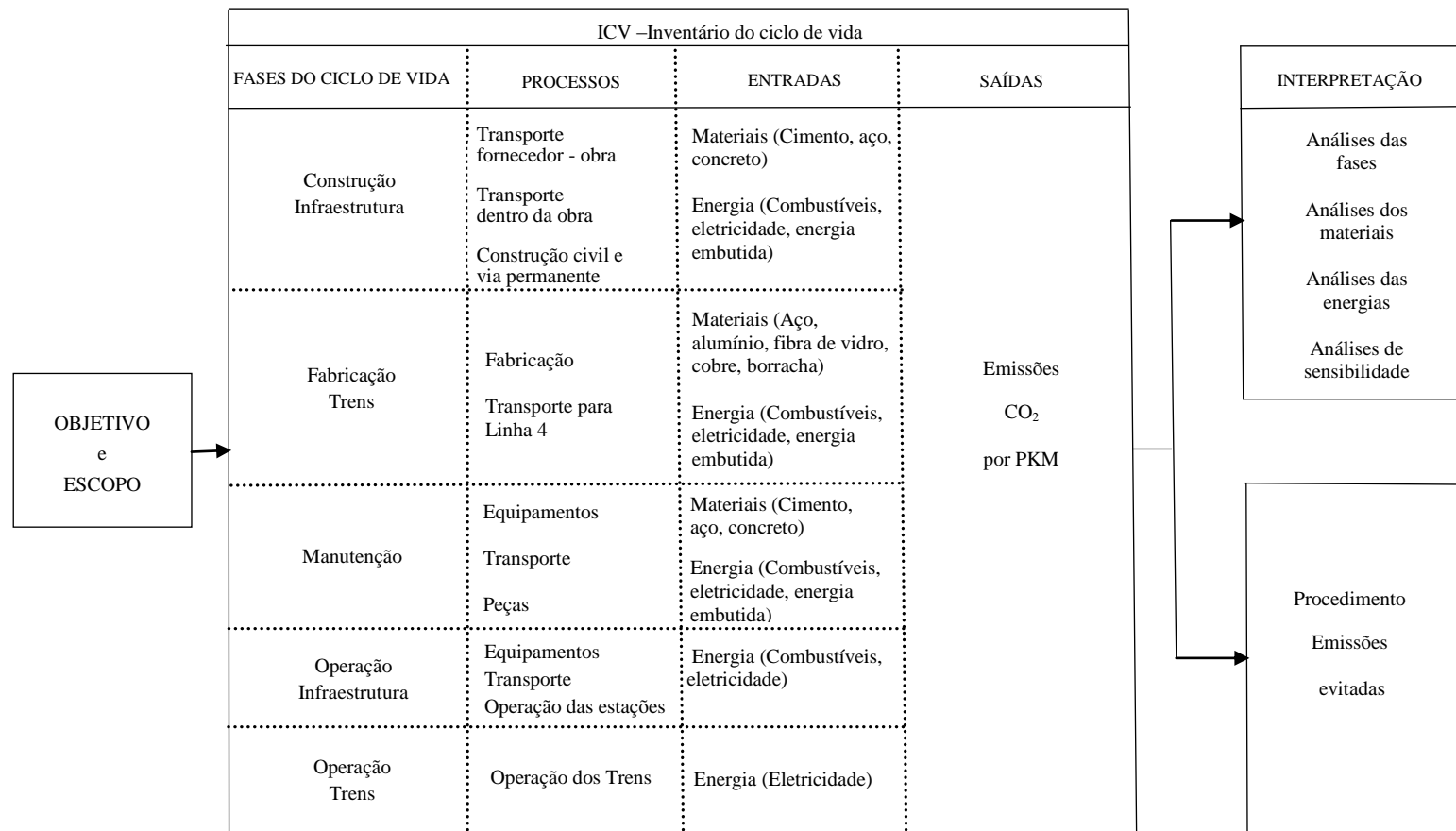


Figura 20: Procedimento de ICV para sistemas metroferroviários de passageiros.

4.1.1 Construção da infraestrutura

A construção da infraestrutura do sistema inclui etapas como a construção das fundações das vias, a construção de túneis, elevados e estações e a fabricação e instalação da via permanente. As atividades incluídas no procedimento são:

a) Transporte fornecedor – obra: refere-se à energia consumida e emissão produzida por todos os meios de transporte utilizados para a entrega dos materiais e combustíveis adquiridos para a obra. Essa entrega geralmente é feita para locais designados como “canteiros de obra”. São necessários dados de distância dos fornecedores até o ponto de entrega, dos veículos utilizados e das quantidades de viagens. A energia e emissão podem ser determinadas pelo somatório de seus valores no transporte de todos os materiais e combustíveis por todos os meios de transporte de todos os fornecedores. Como usualmente os fatores de emissão e densidade de energia são descritos em seus valores, respectivamente, por quantidade de combustível (litro) ou tonelada-quilômetro percorrida, pode ser aplicada a equação:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) \quad (1)$$

sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou energia em MJ), d_i - distância em km do fornecedor i até o ponto de entrega, $rv1$ - rendimento em km/l do veículo $v1$, $f1$ - fator de emissão do combustível em kgCO₂/l (ou densidade de energia em MJ/l), $tkmv2$ – quantidade de tonelada-quilômetro percorrida pelo veículo $v2$ e $f2$ – fator de emissão do combustível ou energia elétrica em kgCO₂/tkm (ou densidade de energia em MJ/tkm).

b) Transporte dentro da obra: refere-se à energia consumida e emissão produzida por todos os meios de transporte utilizados dentro da obra, como transporte de materiais do canteiro até outros locais, transporte de equipamentos, transporte das escavações e transporte de pessoas. São necessários dados dos tipos e quantidades de combustíveis consumidos ou dos veículos e quantidade de horas utilizadas ou quilômetros percorridos (utilizados para serviços terceirizados). A energia e emissão podem ser determinadas pelo somatório de seus valores relativos a todos os meios de transporte dentro da obra:

$$E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (hv1 \times rv1 \times f) + \left(\left(\frac{d_i}{rv2} \right) \times f \right) \quad (2)$$

sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou energia em MJ), q - quantidade, em litros, de combustível consumido, f - fator de emissão do combustível em kgCO₂/l (ou densidade

de energia em MJ/l), h_{v1} - quantidade de horas utilizadas no transporte pelo veículo $v1$, r_{v1} - rendimento do veículo $v1$ em l/h, r_{v2} - rendimento do veículo $v2$ em km/l e d_i - distância em km do fornecedor i até o ponto de entrega.

c) Construção civil e da via permanente: refere-se às atividades de construção propriamente dita. A energia e emissões associadas podem ser agrupadas em:

- Consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos: refere-se à energia/emissão relativas ao consumo de combustíveis fósseis de todos os equipamentos utilizados na obra, como guinchos, escavadeiras, geradores etc. São necessários dados da quantidade consumida de cada tipo de combustível ou da quantidade de horas (para serviços terceirizados). A energia/emissão podem ser determinadas pelo somatório de seus valores relativos ao consumo de todos os combustíveis de todos os equipamentos:

$$E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) \quad (3)$$

sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou energia em MJ), q - quantidade, em litros, de combustível consumido, f - fator de emissão do combustível em kgCO₂/l (ou densidade de energia em MJ/l), h_i - quantidade de horas utilizadas pelo equipamento i e r_i - rendimento do equipamento i em l/h.

Para os equipamentos alugados com controle de horas será utilizado para o rendimento um valor médio calculado para uma escavadeira de 160 hp. Essa potência representa um equipamento padrão alugado. Conforme JBS (2015) o consumo de um motor depende do combustível utilizado, da intensidade de uso do equipamento e da potência do motor. Em condições ideais o consumo é de 0,15l/hp-h. A equação $c = P \times i \times 0,15$ fornecerá o consumo horário “c” (em l/h) de um motor de potência “P” e intensidade de uso “i” (intensidade baixa = 40%, média = 55% e alta = 75%). Assim considerando-se uma intensidade média de um motor de 160 hp o consumo será de 13,2 l/h, valor que será utilizado para os equipamentos alugados.

- Consumo de energia elétrica pelos equipamentos: refere-se à energia/emissão relativas ao consumo de energia elétrica de todos os equipamentos utilizados na obra, como o TBM - *Tunnel Boring Machine*, sistema de iluminação etc. São necessários dados de consumo de energia elétrica. A emissão pode ser determinada por:

$$E = Ec \times f \quad (4)$$

sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou tCO₂), E_c – energia elétrica total consumida, em kWh (ou MWh) e f - fator de emissão da energia elétrica em kgCO₂/kWh ou tCO₂/MWh.

- Energia/carbono embutidos em materiais: refere-se à energia/carbono embutidos no processo de fabricação dos materiais de maior emissão utilizados na construção, ou seja, aço, cimento e concreto (CHESTER e HORVATH, 2010; GARCIA, 2011; GROSSRIEDER, 2011; NETWORK RAIL, 2009; STRIPPLE e UPPENBERG, 2010). São necessários dados de consumo desses materiais. A utilização da energia/carbono embutidos em um determinado material, como uma chapa de aço, substitui as etapas do ciclo de vida da fabricação desse material. A grande diversidade de fornecedores e de especificações dos materiais utilizados em construção praticamente inviabiliza um levantamento de cada combinação produto-fornecedor, tornando recomendável a utilização da alternativa de uso da energia/carbono embutidos. A energia/emissão podem ser determinadas pelo somatório da energia e emissão associadas ao uso de todos os materiais:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) \quad (5)$$

sendo E – emissão em kgCO₂ ou tCO₂ (ou energia em MJ), m_i – massa do material i , em kg ou t e f - fator de emissão do material em kgCO₂/kg ou tCO₂/t (ou densidade de energia em MJ/kg).

Os dados necessários devem ser estimados ou, preferencialmente, devem ser coletados, para que se utilizem dados mais próximos da realidade. As atividades descritas neste procedimento podem ser conduzidas mais facilmente em um sistema em fase de implantação, onde os dados necessários podem ser coletados durante a obra, ou em sistemas implantados há pouco tempo, aumentando a possibilidade de que os dados necessários ainda estejam disponíveis. Sistemas em fase de projeto dificilmente permitirão que os dados sejam levantados com o nível de detalhe mostrado no procedimento da Figura 20. Sistemas muito antigos dificultarão a coleta dos dados, pois as informações podem já não estar mais disponíveis ou não atenderem as limitações de abrangência temporal e tecnológica.

4.1.2 Fabricação dos trens

A fabricação dos trens inclui, além da fabricação propriamente dita, o seu transporte até a obra. As atividades do procedimento são:

a) Fabricação dos trens: refere-se à energia/emissão associadas ao processo de fabricação, podendo ser agrupada em:

- Consumo de combustível fóssil na fabricação: refere-se à energia/emissão associadas ao consumo de todo combustível fóssil utilizado pelos equipamentos nos processos de fabricação. Devem ser coletados dados de quantidade utilizada de cada tipo de combustível. A energia/emissão podem ser determinadas pela equação (3).

- Consumo de energia elétrica na fabricação: refere-se à emissão produzida pelo consumo de energia elétrica de todos os equipamentos utilizados na fabricação, como máquinas industriais, sistema de iluminação etc. Devem ser coletados dados de consumo. A emissão pode ser determinada pela equação (4).

- Energia/carbono embutidos em materiais: refere-se à energia/carbono embutidos nos materiais de maior emissão utilizados, como metais, polímeros, elastômeros etc. Devem ser coletados os dados de consumo desses materiais. A energia/emissão podem ser determinadas pela equação (5).

b) Transporte fábrica – obra: refere-se à energia/emissão associadas ao consumo de combustíveis de todos os meios de transporte utilizados para a entrega dos trens adquiridos para a obra. Devem ser coletados dados dos veículos utilizados, das massas transportadas, das quantidades de viagens e, quando utilizado transporte marítimo, das distâncias da fábrica até o porto de embarque, do porto de embarque ao porto de desembarque e do porto de desembarque ao local final de entrega. A energia/emissão podem ser determinadas pela equação (1).

4.1.3 Manutenção dos trens e da infraestrutura

A necessidade de manutenção é sempre feita por estimativa e inclui itens como reposição de peças e substituição de componentes defeituosos ou em final de sua vida útil. Os planos de manutenção entregues pelos fornecedores constituem elementos para estimativas de emissão. Sistemas metroferroviários já implantados e em operação podem ter dados históricos de manutenção, que são úteis para estimativas de manutenção futura. A manutenção foi considerada de forma agregada, para os trens e para a infraestrutura, uma vez que foi baseada nos dados históricos disponíveis de manutenção das Linhas 1 e 2 do Metrô Rio. Esses dados consideram a energia elétrica e o combustível consumidos pelos equipamentos e veículos que fazem a manutenção tanto dos trens quanto da infraestrutura e também dados sobre substituição, parcial ou completa, de trilhos, dormentes, terceiro trilho e rodas. Foi feita uma estimativa da futura manutenção da Linha 4 a partir desses dados, considerando uma proporcionalidade entre as extensões das linhas. Esse tipo de levantamento, que aproveita a experiência do operador do sistema, não é encontrado nos trabalhos pesquisados, que usualmente estimam a manutenção como um percentual da construção (CHESTER, 2009), utilizam somente informações dos fornecedores ou aplicam modelos encontrados em *softwares* de ACV. É aqui considerado por ser uma oportunidade de projetar dados a partir de uma situação real que ocorre em um sistema já em operação. Pode-se supor, com conservadorismo, que a manutenção da Linha 4 será conduzida em bases semelhantes à manutenção das Linhas 1 e 2. A rede das Linhas 1 e 2 compõe 160 km (aproximadamente 40 km de via dupla, que totalizam $40 \times 4 = 160$ km). A rede da Linha 4 compõe 60 km (aproximadamente 15 km de via dupla, totalizando $15 \times 4 = 60$ km). Assim a relação entre elas é de $60/160 = 0,375$. Os recursos consumidos na manutenção da Linha 4, R_{L4} , serão, em relação aos recursos consumidos na manutenção das Linhas 1 e 2, R_{L1-2} , determinados pela equação:

$$R_{L4} = 0,375 \times R_{L1-2} \quad (6)$$

Na realidade nos anos iniciais de operação a manutenção tenderá a ser menor, pelo fato dos componentes instalados serem novos.

Também foram consideradas informações dos fornecedores, principalmente as relacionadas ao tempo de vida dos componentes. As atividades do procedimento são:

a) Equipamentos: utilizam combustíveis fósseis e eletricidade. A energia e emissões foram agrupadas em:

- Consumo de combustíveis fósseis: refere-se à energia/emissão relativas ao consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos utilizados nas atividades de manutenção. Esse consumo deve ser estimado através da equação (6) e a energia/emissão podem ser determinadas pela equação (3).

- Consumo de energia elétrica: refere-se à emissão produzida pelo consumo de energia elétrica pelos equipamentos utilizados nas atividades de manutenção. Esse consumo deve ser estimado pela equação (6) e a emissão pode ser determinada pela equação (4).

b) Transporte: refere-se à energia/emissão relativas ao transporte de componentes importantes utilizados na manutenção, como componentes da via permanente e rodas dos trens. Pode incluir também, no caso de sistemas que já estão em operação, o transporte das equipes de manutenção, caso haja dados históricos armazenados. Para o transporte das equipes de manutenção o consumo de combustíveis pode ser determinado pela equação (6) e a energia/emissão podem ser determinadas pela equação (1). Para o transporte dos componentes substituídos a energia/emissão podem ser determinadas proporcionalmente à energia/emissão do transporte desses componentes durante a construção inicial, de acordo com a equação:

$$E = E_c \times p \quad (7)$$

sendo: E - emissão em kgCO₂ (ou energia em MJ), E_c - emissão na construção em kgCO₂ (ou energia em MJ) e p - fator de proporcionalidade (relação entre a quantidade de componentes substituídos e a quantidade de componentes na construção inicial).

c) Peças: refere-se à energia/carbono embutidos em materiais substituídos parcial ou totalmente, como peças e componentes da infraestrutura (via permanente) e dos trens (rodas). A energia/emissão podem ser determinadas pela equação (5).

4.1.4 Operação da infraestrutura

A operação da infraestrutura inclui itens como a iluminação das estações, o funcionamento das escadas rolantes e demais equipamentos das estações e locais de apoio à operação, assim como as atividades relacionadas à segurança. Da mesma maneira como foi feito em relação à manutenção procurou-se aproveitar a experiência do operador do sistema. A partir de dados históricos levantados nas Linhas 1 e 2 foi feita uma estimativa da operação da infraestrutura da Linha 4, considerando uma proporcionalidade entre a quantidade de estações. Pode-se supor, com razoabilidade, que a operação da infraestrutura da Linha 4 será conduzida em bases semelhantes às das Linhas 1 e 2, e, como essa operação ocorre principalmente nas estações, que há uma relação direta entre as emissões da operação da infraestrutura e a quantidade de estações. A quantidade de estações da Linha 4 é 1/6 da quantidade de estações das Linhas 1 e 2. Os recursos consumidos na operação da infraestrutura da Linha 4, R_{L4} , serão, em relação aos recursos consumidos na operação da infraestrutura das Linhas 1 e 2, R_{L1-2} , obtidos pela equação:

$$R_{L4} = (1/6) \times R_{L1-2} \quad (8)$$

As atividades do procedimento são:

- a) Transporte: refere-se à energia/emissão relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis no transporte das equipes de apoio e segurança.
- b) Equipamentos: refere-se à energia/emissão de todo o consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos utilizados nas estações e locais de apoio à operação.
- b) Operação da infraestrutura: refere-se à energia/emissão relacionadas ao consumo de energia elétrica da iluminação e demais equipamentos utilizados nas estações e locais de apoio à operação.

O consumo dos itens acima deve ser estimado, podendo-se aplicar a equação (8) e a energia/emissão podem ser determinadas, para os itens “a”, “b” e “c”, respectivamente pelas equações (2), (3) e (4).

4.1.5 Operação dos trens

A operação dos trens foi tratada em separado da operação da infraestrutura. Embora ambas façam parte da fase operacional, a operação dos trens tem uma importância maior e por isso, neste trabalho, sempre que for usado o termo “operação” será subentendido que se refere aos trens, a menos que seja explicitado em contrário. A operação dos trens é o objetivo final do sistema metroferroviário, a fase do ciclo de vida responsável pelo transporte dos passageiros. Neste trabalho serão abordados sistemas movidos a energia elétrica. Sendo assim a emissão produzida será devida ao consumo de energia elétrica da força de tração que movimenta os trens e da energia elétrica consumida em outras utilidades porventura disponíveis aos passageiros, como ventilação e refrigeração nos trens. A emissão pode ser determinada pela equação (4).

Esses dados de consumo podem ser coletados para sistemas já implantados, ou estimados para sistemas em fase de implantação. Para a estimativa da energia necessária à operação dos trens é necessário estimar-se a carga do sistema, ou seja, a quantidade de PKM da demanda. Conhecida essa demanda procede-se a um plano de oferta, a quantidade de lugar-km (LKM) oferecido, que possa atendê-la. Essa oferta é caracterizada por certa quantidade de partidas de trens, usualmente contabilizada pela quantidade de carro-km resultante. Essa quantidade de carro-km pode ser calculada pela equação:

$$c = p \times d \times n \quad (9)$$

sendo c - quantidade de carro-km, p - quantidade de partidas de trens em um determinado período, d - distância percorrida em cada partida de trem e n - número de carros em cada trem.

Estabelecida a demanda e a oferta, resultará que os trens circulando com passageiros terão um determinado peso que influenciará na energia necessária ao deslocamento. Essa energia pode ser calculada pela equação:

$$En = c \times E_{ckm} \quad (10)$$

sendo En - energia consumida total, c - quantidade de carro-km e E_{ckm} - energia consumida por carro-km.

Os fabricantes de trens consideram o peso adicional dos passageiros em suas especificações. Uma classificação tradicional é dada pela APTA (2013) como:

AW0 = trem vazio ($AW = added\ weight$)

AW1= passageiros ocupando todos os assentos

AW2= passageiros ocupando todos os assentos + 3 passageiros em pé por m^2 nas áreas livres

AW3= passageiros ocupando todos os assentos + 6 passageiros em pé por m^2 nas áreas livres

AW4= passageiros ocupando todos os assentos + 8 passageiros em pé por m^2 nas áreas livres

Essa classificação, estabelecida na América, pode ser alterada para outras regiões, conforme seus padrões culturais e de pesos dos passageiros. AW2 é considerada uma lotação média para o período de pico e AW3 uma lotação para os horários mais carregados dentro do período de pico. Na Ásia AW3 pode estar associada a 8 passageiros/ m^2 (TRB, 2015). A classificação também não indica uma lotação máxima. De um modo geral AW3 é considerado um limite, que, se ultrapassado, indica superlotação. Neste estudo a classificação AW3 será utilizada como referência, isto é, como estando associada a uma carga de 100%. Assim uma carga de 50% significa que a quantidade de passageiros transportada é a metade da carga AW3. Os trens da Linha 4 têm uma lotação AW3 de 1.820 passageiros (METRÔ RIO, 2014a). Idealmente, nesses trens, a carga de lotação seria a quantidade de passageiros dividida por 1.820. Contudo esse cálculo só poderia ser feito entre duas estações consecutivas, uma vez que na próxima estação alguns passageiros podem desembarcar e novos passageiros podem embarcar, alterando a carga do trecho seguinte. Para calcular a carga média no trajeto analisado será utilizada a fórmula

$$carga = PKM / LKM AW3 \quad (11)$$

onde $LKM AW3$ é a quantidade de LKM ofertada no trajeto analisado na classificação AW3 e PKM é a demanda real. Ressalte-se que essa carga média pode não refletir a realidade dentro do trem entre duas estações consecutivas, isto é, pode-se ter uma carga média no trajeto total baixa, porém com superlotação em determinados trechos.

A FGV – Fundação Getúlio Vargas realizou estudo de previsão da demanda da Linha 4, com uma abordagem metodológica que utilizou técnicas de pesquisas de preferências reveladas e preferências declaradas, juntamente com a especificação de modelos matemáticos de escolha modal Logit, comumente utilizados em planejamento de transportes para estimar participações de mercado, ou seja, transferências modais entre ônibus e metrô, automóveis e metrô, etc. sendo, portanto, perfeitamente adequados para modelar a introdução de uma linha metroviária em um mercado. Com o objetivo de prever a demanda atraída pela Linha 4, um sistema de modelos matemáticos de escolha modal discretos foi construído, optando-se pela utilização de dados obtidos por preferência declarada (FGV, 2011).

Modelagem de escolhas discretas utilizando dados de preferências declaradas envolve a apresentação ao consumidor de cenários hipotéticos, nos quais o produto ou serviço em questão é descrito como uma combinação de atributos (por exemplo, tempo de viagem, custo, número de transbordos, probabilidade de lugar sentado etc.). O consumidor, em cada cenário, escolhe a alternativa que melhor atende as suas necessidades, dado o contexto de escolha proposto. As escolhas feitas nesses cenários hipotéticos, assim como dados específicos de cada consumidor, são utilizadas para estimar um modelo econométrico que permite ao analista determinar, entre outros fatores, o valor ofertado a cada atributo do produto ou serviço e o impacto que mudanças na configuração dos atributos têm na demanda pelo produto ou serviço (FGV, 2011).

A coleta de dados para esta pesquisa foi realizada junto aos usuários dos sistemas de transportes durante viagens que estavam sendo realizadas de automóvel ou ônibus entre um par origem/destino localizado na área de captação do metrô. As projeções futuras foram baseadas em dados levantados de crescimento urbano e sócio econômico (FGV, 2011).

O levantamento abordou apenas as 3 horas de pico matutino dos dias úteis, a hora mais carregada dentro desse pico e as entradas diárias por estação nos dias úteis. Assim a FGV construiu matrizes origem-destino para as 3 horas de pico matutino (6:30h a 9:30h) dos dias úteis dos anos de 2016, 2026, 2036 e 2040. A matriz origem-destino fornece a quantidade de passageiros que embarcaram numa estação qualquer “A” e desembarcaram numa estação qualquer “B”, permitindo, a partir da distância entre A e

B, o cálculo do PKM do sistema. As matrizes foram construídas com o objetivo de separar totalmente a carga da Linha 4. A estação terminal General Osório é também terminal da Linha 1. Assim um usuário que embarca na Linha 1 e desembarca na estação General Osório, não é contabilizado na carga da Linha 4, porém se ele continua a viagem e desembarca em qualquer estação posterior, sua carga na Linha 4 será o trecho entre a estação General Osório e a estação na qual desembarcou. Da mesma maneira um usuário que embarca numa estação da Linha 4 e desembarca em qualquer estação das Linhas 1 ou 2, será computado na carga da Linha 4 apenas no trecho entre a estação de embarque e a estação General Osório. A FGV estimou, também, a quantidade de entradas diárias (dias úteis) por estação da Linha 4 e os transbordos entre a Linha 4 e as Linhas 1 e 2 (FGV, 2011).

A FGV constatou que, a partir de 2036, conforme os dados sócio econômicos levantados, houve uma estabilização na demanda do sistema da Linha 4. Decidiu, contudo, aplicar o crescimento observado de 2026 a 2036 nos 4 anos seguintes, até 2040, último ano considerado no estudo.

O levantamento da quantidade de PKM no ciclo de vida é essencial para o ICV, uma vez que seus resultados devem ser expressos na unidade funcional escolhida, ou seja, por PKM. A quantidade de PKM será o somatório dos PKM de todos os pares O-D:

$$PKM = \sum_{j=1}^n (p_{ij} \times d_{ij}) \quad (12)$$

sendo p_{ij} - quantidade de passageiros que viajam da origem i ao destino j e d_{ij} - distância entre a origem i e o destino j .

4.2 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 podem-se utilizar fatores padrões listados pelo IPCC (nível 1) ou encontrados em outras fontes. Seguindo essa recomendação foram utilizados fatores de emissão brasileiros para combustíveis, cimento 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. Para os componentes fabricados no exterior e seu transporte (trens, trilhos e terceiro trilho)

procurou-se utilizar os fatores do país de fabricação, quando disponíveis, ou fatores IPCC/globais. Para o concreto pronto, adquirido e utilizado no Brasil, como não foi encontrado fator de emissão nacional ou no IPCC, foi utilizado o fator do ICE da Universidade de Bath.

Procedimento análogo foi utilizado em relação aos valores de densidade de energia. Os combustíveis diesel e gasolina, no Brasil, tiveram a parcela adicionada de biodiesel e etanol anidro, respectivamente, retiradas 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 2012 e 2013, 5,67% em 2014 e 7% em 2015. Para o etanol anidro os percentuais médios foram de 20% em 2012, 23% em 2013, 25% em 2014 e 26,58% em 2015. 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.

A emissão de CO₂ foi calculada através da fórmula:

$$(ECO_2)_c = PCI_c \times EC_c \times FO_c \times (44/12)$$

onde, em relação ao combustível “c”, ECO_2 é a emissão de CO₂; PCI é o seu poder calorífico inferior; EC é o seu fator de emissão de carbono; FO é o seu fator de oxidação e $44/12$ é o 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). O fator de emissão para o diesel é:

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

e para a gasolina A é:

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

Os fatores de emissão e densidades de energia utilizados neste trabalho estão reunidos na tabela 18:

Tabela 18: Fator de emissão de CO₂ e densidade de energia.

	Fator de emissão deCO ₂	Fonte	Densidade de energia	Fonte
Diesel (Brasil)	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 (Brasil)	2,22 kgCO ₂ /l	Calculado a partir de ANP (2014) e IPCC (2006)	10.400 kcal/kg = 32,29 MJ/l	ANP (2014)
Cimento (Brasil)	0,566 tCO ₂ /t	WBCSD (2015)	4,5 MJ/kg	ICE (2011)
Aço (Brasil)	1,060 tCO ₂ /t	IPCC (2006)	20,1 MJ/kg	ICE (2011)
Concreto (Brasil)	0,100 tCO ₂ /t	ICE (2011)	0,75 MJ/kg	ICE (2011)
Eletricidade (Brasil)	Variável ^a	MCTI (2015)	-----	-----
Biodiesel (Brasil)	-----	-----	9.000 kcal/kg = 33,14 MJ/l	ANP (2014)
Etanol (Brasil)	-----	-----	6.750 kcal/kg = 22,34 MJ/l	ANP (2014)
Etanol anidro (Brasil)	-----	-----	6.300 kcal/kg = 21,32 MJ/l	ANP (2014)
Diesel (China)	3,096 tCO ₂ /t	Guo <i>et al.</i> (2014)	42,65 MJ/kg	Guo <i>et al.</i> (2014)
Gasolina (China)	2,925 tCO ₂ /t	Guo <i>et al.</i> (2014)	43,07 MJ/kg	Guo <i>et al.</i> (2014)
Querosene (China)	3,033 tCO ₂ /t	Guo <i>et al.</i> (2014)	43,07 MJ/kg	Guo <i>et al.</i> (2014)
Carvão (China)	1,981 tCO ₂ /t	Guo <i>et al.</i> (2014)	20,91 MJ/kg	Guo <i>et al.</i> (2014)
Gás natural (China)	0,002162 tCO ₂ /m ³	Guo <i>et al.</i> (2014)	38,93 MJ/m ³	Guo <i>et al.</i> (2014)
Aço (China)	1,959 tCO ₂ /t	Jing <i>et al.</i> (2014)	20,1 MJ/kg	ICE (2011)
Alumínio (China)	10,990 tCO ₂ /t	Zhang <i>et al.</i> (2014)	155 MJ/kg	ICE (2011)
Cobre (China)	3,290 tCO ₂ /t	Kuckshinrichs <i>et al.</i> (2007)	42 MJ/kg	ICE (2011)
Fibra de vidro (China)	1,540 tCO ₂ /t	ICE (2011)	28 MJ/kg	ICE (2011)
Borracha (China)	2,660 tCO ₂ /t	ICE (2011)	91 MJ/kg	ICE (2011)
Eletricidade (China)	297,688 gCO ₂ /MJ	Ou <i>et al.</i> (2011)	-----	-----
Diesel (Europa)	2,65 kgCO ₂ /l	DEFRA (2015)	42,91 MJ/l	DEFRA (2015)
Trem de carga (Europa)	18 gCO ₂ /t-km	IEA (2012)	0,19 MJ/t-km	IEA (2012)
Navio Container (Global)	10 gCO ₂ /t-km	WSC (2014)	0,13 MJ/t-km	Mattila and Antikainen (2011)

^a Fator de emissão em kgCO₂/kWh: 0,0653 em 2012; 0,096 em 2013; 0,1355 em 2014 e assumido com igual valor em 2015.

4.3 Análise do ICV

A construção do ICV possibilita a identificação das fases do ciclo de vida de maior relevância em termos de recursos de materiais e energia consumidos e emissões produzidas. Os resultados obtidos nas emissões das diferentes fases do ciclo de vida permitem uma comparação com estudos semelhantes feitos em outros trabalhos. Análises de sensibilidade permitem conhecer o efeito da variação dos principais parâmetros nos resultados do ICV e devem ser conduzidas como forma de melhorar o entendimento dos resultados obtidos, sujeitos a incertezas inerentes ao procedimento, principalmente em função da necessidade de se fazer estimativas futuras.

As emissões das fases não operacionais poderão ser confrontadas com a estimativa da emissão evitada pela transferência para o sistema metroferroviário de uma parcela de usuários que utilizavam automóveis e ônibus nos seus trajetos. Para essa estimativa será criado um modelo e utilizados dados de previsão de demanda levantados pela FGV (2011). 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 aos meios de transporte substituídos.

4.4 Procedimento para estimar a emissão evitada pela implantação de um sistema metroferroviário

A determinação da emissão de CO₂ evitada pelo sistema metroferroviário será realizada utilizando-se um procedimento especificamente criado, representado pela figura 21, que considera o fator *mode shift* com as seguintes etapas:

Etapa 1: Determinação das escolhas dos usuários por outros modos de transporte a serem utilizados em caso da não implantação do sistema, utilizando dados da FGV (2011).

Etapa 2: Determinação da quantidade de passageiro-km de cada modo de transporte escolhido, utilizando dados do DETRAN (2015).

Etapa 3: Determinação da quantidade adicional de veículo-km correspondentes a cada modo de transporte e a cada tipo de combustível utilizado, com as correspondentes quantidades de cada tipo de combustível.

Etapa 4: Determinação da emissão adicional produzida por cada modo de transporte e combustível.

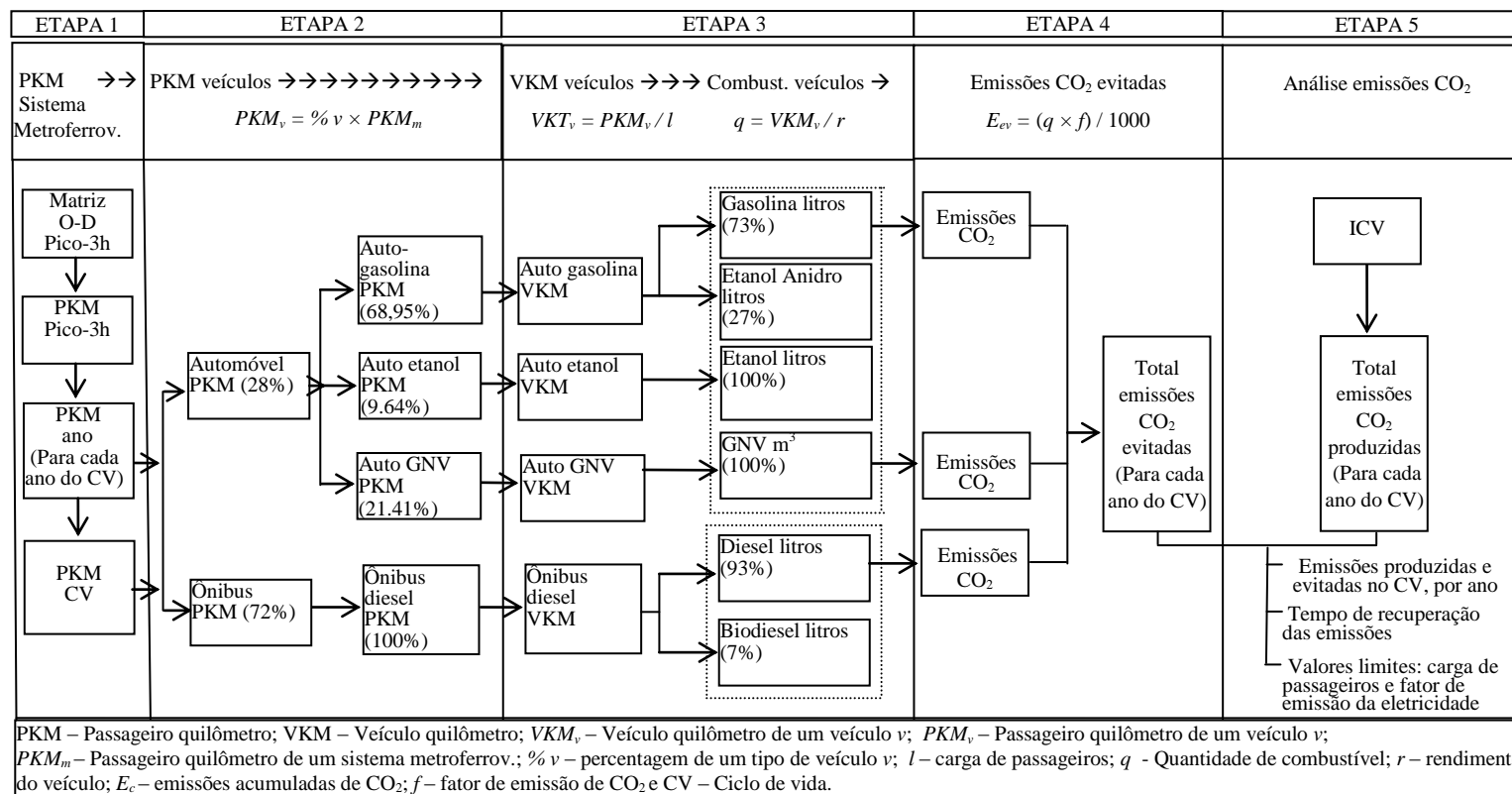


Figura 21: Procedimento de emissões evitadas para sistemas metroferroviários de passageiros.

Desenvolvimento da Etapa 1: Os dados da captação de usuários de outros meios de transporte serão obtidos a partir de pesquisas com os usuários, de modo que sejam construídas matrizes origem-destino (O-D), permitindo a apuração da quantidade de PKM do sistema, conforme a equação (12) da seção 4.1.5.

Desenvolvimento da Etapa 2: Será apurada a quantidade de PKM retirada de cada meio de transporte privado e público (automóveis e ônibus):

$$PKM_v = \% v \times PKM_m \quad (13)$$

sendo PKM_v - quantidade de PKM de um tipo de veículo v , $\% v$ - percentual de utilização de um tipo de veículo v e PKM_m - PKM do sistema metroferroviário.

Desenvolvimento da Etapa 3: Com base nos dados levantados, será determinada a quantidade adicional de veículo-km correspondente a cada modo de transporte e a cada tipo de combustível utilizado, com as correspondentes quantidades em litros ou metros cúbicos:

$$VKM_v = PKM_v / l \quad (14)$$

sendo VKM_v - quantidade de VKM de um tipo de veículo v , PKM_v - quantidade de PKM de um tipo de veículo v , e l - carga de passageiros do veículo v .

$$q = VKM_v / r \quad (15)$$

sendo q - quantidade de combustível consumida pelo veículo v , VKM_v - quantidade de VKM de um tipo de veículo v e r - rendimento do veículo v .

Desenvolvimento da Etapa 4: A partir da quantidade de combustível consumida em cada meio de transporte substituído pelo sistema será estimada a emissão evitada, utilizando-se os fatores de emissão de cada combustível:

$$E_{ev} = (q \times f) / 1000 \quad (16)$$

sendo E_{ev} - emissão total evitada, em tCO₂, q - quantidade de combustível consumida pelo tipo de veículo v , em litros e f - fator de emissão do combustível C, em kgCO₂/l.

O capítulo seguinte mostra a aplicação do método de trabalho exposto.

5 APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ICV E EMISSÃO EVITADA NA LINHA 4 DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO

O procedimento apresentado na figura 20 foi aplicado na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Esta linha do sistema metroviário do Rio de Janeiro está, no momento da conclusão deste trabalho, em fase final de construção, com inauguração prevista para o segundo semestre de 2016. Os dados relativos à construção da infraestrutura foram coletados junto à RioTrilhos - Companhia de Transportes sobre Trilhos do Estado do Rio de Janeiro, órgão responsável pelos projetos de transporte sobre trilhos do Estado do Rio de Janeiro. A RioTrilhos obtém os dados em seus arquivos próprios e nos arquivos dos consórcios construtores. Os dados relativos à fabricação dos trens, manutenção e operação da infraestrutura foram fornecidos pela Concessionária Metrô Rio. A operação dos trens foi projetada a partir do estudo de previsão de demanda da FGV e de informações operacionais da Concessionária.

Foi constatado pela FGV que o tráfego rodoviário que liga os bairros da Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro com a Zona Oeste atingiu o ponto de saturação de sua capacidade, deixando de oferecer condições adequadas tanto para a circulação de automóveis quanto para ônibus e vans, resultando frequentemente em longos congestionamentos de trânsito. O projeto de construção da Linha 4 visa aumentar as áreas atendidas da zona sul e passar a atender a zona oeste, integrando com a malha metroviária já existente (Linhas 1 e 2 - figura 22).



Figura 22: Linhas 1 e 2 do Metrô do Rio de Janeiro. Fonte: METRÔ RIO (2014a).

O traçado da Linha 4 (figura 23), para quem embarca na estação terminal da Barra, começa na estação Jardim Oceânico, em frente ao *Shopping Barra Point*. Segue por trecho elevado até encontrar uma ponte estaiada (ponte suspensa por cabos de sustentação que partem diretamente de um mastro e vão até o tabuleiro da ponte) sobre o canal da Barra. O trajeto da estação Jardim Oceânico ao final da ponte tem cerca de 400 m. Ao final da ponte há dois túneis paralelos de 5 km, escavados na mesma rocha, até chegar à estação São Conrado, constituindo esse sistema de bitúneis entre duas estações, no mais longo do mundo. Dali segue através de túneis, chegando às estações da Zona Sul: Antero de Quental, Jardim de Alah, Nossa Senhora da Paz e General Osório, que é a estação terminal da Linha 1.

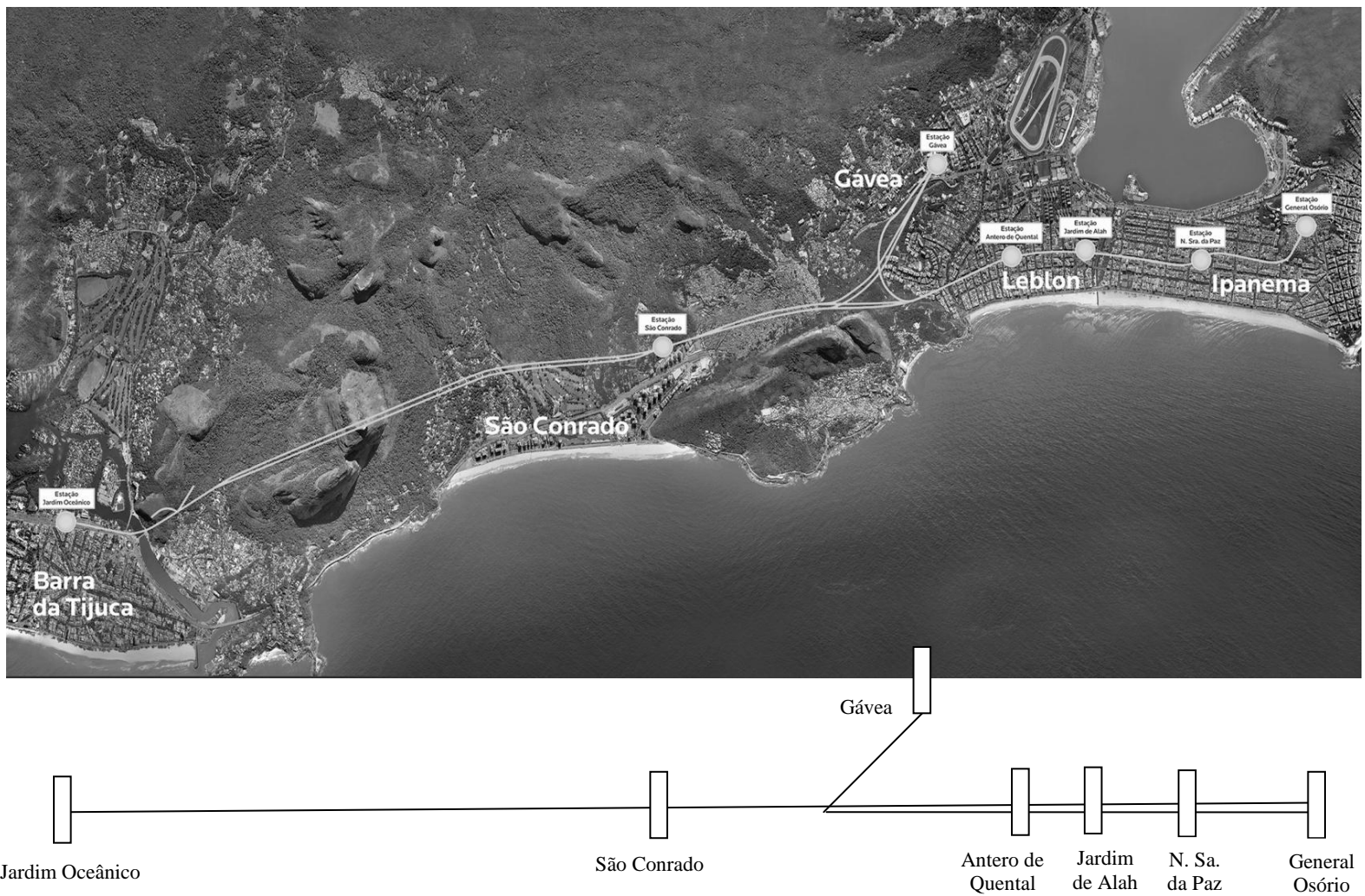


Figura 23: Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Fonte: METRÔ LINHA 4 (2014).

Haverá também uma ligação com a Gávea. O usuário que, partindo da Barra ou São Conrado, quiser ir à Gávea poderá desembarcar em Antero de Quental e lá embarcar em outro trem. Da Gávea se pode ir direto à Zona Sul ou para a Barra, fazendo a transferência em Antero de Quental. Da Zona Sul se pode ir direto à Barra ou à Gávea. A Linha 4 tem no seu total 14,643 km, compreendendo 2 trechos: Jardim Oceânico-General Osório (ida e volta) e Gávea-General Osório (ida e volta). A via permanente entre o ponto de bifurcação com a Gávea e a estação General Osório é compartilhada por esses 2 trechos. Os trechos subterrâneos compõem 97% do trajeto. Somente o trecho entre a saída da Barra e o final da ponte estaiada não é subterrâneo.

5.1 Construção da infraestrutura

A Linha 4 tem, do ponto de vista geológico, trechos de características diferentes. Os trechos da Barra até o ponto de bifurcação com a Gávea (a cerca de 500 m da estação Antero de Quental) e desse ponto até a Gávea têm grande parte de sua extensão incrustada na rocha e uma baixa densidade demográfica. Esses trechos foram executados no sistema convencional conhecido como NATM – *New Austrian Tunnelling Method*. O NATM, segundo PRAZERES *et al.* (2012), é conhecido por ser um eficiente método de construção de túneis, que tem grande flexibilidade de adaptação a variados tipos e condições de solo. É executado por meio de um complexo processo de escavação sequencial e instalação de suportes. A existência de um solo rochoso, como o desse trecho, implica na utilização da técnica de escavação *drill and blast*. Nessa técnica os túneis são abertos com ajuda de explosivos e britadeiras manipuladas por operários. Os explosivos utilizados são dinamite do tipo amônia (constituída de 20-60% de nitroglicerina / nitrato de amônia / nitrato de sódio / polpa de madeira / carbonato de cálcio). Esses explosivos não emitem CO₂, segundo US-EPA (1990).

O trecho do referido ponto de bifurcação com a Gávea até a estação General Osório está situado numa área de grande densidade demográfica e, portanto, havia necessidade de causar o menor impacto possível à vida rotineira das pessoas. Foi então usado o método denominado *tunnel boring*, que, com a utilização de um equipamento modelador de túneis, dispensa o uso de explosivos e britadeiras convencionais.

O equipamento modelador de túneis é o TBM (figura 24), que a população do Rio de Janeiro denominou de “tatuzão”. Com 2,7 mil toneladas e mais de 120 metros de comprimento por 11,5 metros de diâmetro (o equivalente a um prédio de quatro andares), o equipamento constrói os túneis subterrâneos do metrô, minimizando o impacto das obras para a população. Ao mesmo tempo em que escava, o equipamento instala as aduelas, anéis de concreto que revestem o túnel.



Figura 24: TBM – *Tunnel Boring Machine*, utilizado nos trechos de maior densidade demográfica da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Fonte: RAILWAY GAZETTE (2015).

As estações também requerem diferentes métodos de construção, de acordo com o tipo de solo. Para a construção das estações Nossa Senhora da Paz, Jardim de Alah, Antero de Quental e Jardim Oceânico, na Barra, o método projetado foi o *cut and cover*, em que a superfície é escavada para a construção das paredes e da laje de concreto. Ao final desta etapa, a superfície é recomposta e as escavações continuam por baixo da laje, com menor impacto na superfície. Já a Estação Gávea necessita de poços executados com tela metálica, concreto projetado e *jet grouting* (injeções de calda de cimento no solo), enquanto para a Estação São Conrado foi projetada a escavação em rocha utilizando detonações controladas.

As emissões da construção da infraestrutura foram levantadas desde o início da obra até o fim do primeiro semestre de 2015, correspondendo a 75% da totalidade da conclusão

da obra, conforme declaração oficial do governo do estado (AGÊNCIA BRASIL, 2015). Os cálculos detalhados de consumo de energia e emissão produzida encontram-se no Apêndice 1, sendo aqui apresentados os resultados finais. Como os cálculos foram feitos através de planilhas Excel os resultados apresentados neste estudo podem ter pequenas diferenças, ocasionadas por arredondamentos. A energia renovável considerada refere-se aos combustíveis utilizados no Brasil etanol anidro (adicionado à gasolina), etanol hidratado e biodiesel (adicionado ao diesel) e também à participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, de 79,30% (EPE, 2014). Os resultados apresentados nos itens seguintes representam os valores efetivamente levantados durante a execução da obra até o primeiro semestre de 2015. Posteriormente será apresentada a consolidação final incluindo a estimativa do restante da obra.

5.1.1 Transporte Fornecedor - Obra

Os principais materiais em termos de quantidade e de emissão de carbono utilizados na construção da infraestrutura são o aço, cimento e concreto. Há muitos fornecedores. Como exemplos, pode-se citar a Holcim e a Supermix, para o cimento e concreto e a Arcelor Mittal e a Cia. Siderúrgica Nacional, para o aço. O transporte desses materiais, dos fornecedores ao canteiro de obras da Linha 4, foi realizado por meio de caminhões, cujo rendimento foi estimado. As distâncias do embarque ao desembarque são conhecidas para todos os fornecedores. O transporte de combustíveis é realizado pelo fornecedor Ipiranga, sendo também estimado o rendimento dos caminhões tanque. Foi utilizado fator nacional de emissão do diesel. Aplicando a equação (1) e retirando a parcela de biodiesel a cada ano, o transporte de materiais resultou em:

a) Emissões = 764,09 tCO₂.

b) Energia = 11.036.074,47 MJ, sendo a energia renovável igual a 603.279,85 MJ.

E para o transporte de combustíveis:

a) Emissões = 2,24 tCO₂.

b) Energia = 32.252,27 MJ, sendo a energia renovável igual a 1.676,40 MJ.

Resultados resumidos são mostrados na tabela 19.

Tabela 19: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Materiais e Combustíveis.

	Distância percorrida (km)	Rendimento veículo (km/l)	Quantidade consumida (l)	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Transporte de Materiais Fornecedor – Linha 4	814.543,20 ⁽¹⁾	2,61 ⁽²⁾	312.085,52	11.036.074,47	764,09
Transporte de Combustíveis Fornecedor – Linha 4	2.380,00 ⁽¹⁾	2,61 ⁽²⁾	911,88	32.252,27	2,24
			Total	11.068.326,74	766,33

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015), ⁽²⁾ COPPETEC (2011).

Nota: Para o cálculo da emissão foi retirada a parcela de biodiesel em cada ano. Fator de emissão e densidade de energia do diesel de acordo com tabela 18.

Pela sua importância a via permanente foi tratada em separado dos demais componentes da construção da infraestrutura. Os trilhos utilizados são do tipo AREMA 115 RE, que na ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas recebem a denominação TR-57 (57 kg por metro de trilho). Esses trilhos, construídos com aço, foram produzidos pela Arcelor Mittal, em Gijon, na Espanha. Foram compradas 4.400 t, que foram transportados em 2 viagens de trem de carga da fábrica ao Porto de Gijon, em trajeto de 5 km. Do Porto de Gijon foram embarcados para o Porto do Rio de Janeiro, em 2 viagens, sendo de 9.000 km a distância entre os portos. No Rio de Janeiro foram 145 viagens de caminhão trator e semirreboque cobrindo um percurso de 35 km. Essas compras de trilhos representam a totalidade dos trilhos necessários ao funcionamento da Linha 4 e as entregas ocorreram ao longo de 2012. Foi utilizado fator europeu de emissão de trem de carga no transporte terrestre na Espanha, obtido na IEA – *International Energy Agency*, fator global de emissão de transporte marítimo no transporte da Espanha ao Brasil, disponível na WSC – *World Shipping Council*, associação com 28 membros, que representam 90% do transporte de carga mundial, e fator nacional de emissão de transporte rodoviário no Rio de Janeiro. Aplicando a equação (1):

Emissão = 401,20 tCO₂.

Energia = 5.220.978,33 MJ, sendo a energia renovável igual a 3.221,94 MJ, calculada apenas no transporte no Rio de Janeiro.

A tabela 20 apresenta os detalhes de cada trecho do transporte.

Tabela 20: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Via permanente – trilhos.

	Distância ⁽¹⁾	Rendimento	Tonelada-km	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Viagem fábrica - Porto Gijon	2 viagens de trem de 5 km com 2.200 t cada	-	22.000	4.180,00	0,40
Viagem Porto Gijon - Porto Rio de Janeiro	2 viagens de navio de 9.000 km com 2.200 t cada	-	39.600.000	5.148.000,00	396,00
Viagem Porto Rio de Janeiro - Obra Linha 4	145 viagens de caminhão de 35 km	2,61 km/l ⁽²⁾	-	68.798,33	4,80
Totais				5.220.978,33	401,20

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015), ⁽²⁾ COPPETEC (2011).

Nota: Para o cálculo da emissão no transporte no Rio de Janeiro foi retirada a parcela de biodiesel. Fatores de emissão e densidade de energia dos combustíveis de acordo com tabela 18.

Os dormentes utilizados são do tipo LVT – *Light Vibration Track*, tecnologia desenvolvida pela empresa suíça Sonneville, que no Brasil tem como representante a CONPREM, que fabrica e comercializa os dormentes. Cada dormente tem massa de 104 kg, sendo 10,88% de aço e 89,12% de concreto. Para a Linha 4 são necessários cerca de 150.502 dormentes, transportados em 495 viagens de caminhão da fábrica na cidade de Campanha ao Rio de Janeiro, em trajeto de 349 km. Foi estimado o rendimento e utilizado fator nacional de emissão para o transporte rodoviário. A aplicação da equação (1), resulta em:

Emissão = 163,49 tCO₂.

Energia = 1.395.691,11 MJ, sendo a energia renovável igual a 109.676,26 MJ.

A energia e emissões do transporte dos dormentes aparecem na tabela 21.

Tabela 21: Emissão e energia em transportes fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Via permanente – dormentes.

	Distância ⁽¹⁾	Rendimento	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Viagem fábrica em Campanha – MG – Obra Linha 4	495 viagens de 349 km com 31,61 t cada	2,61 km/l ⁽²⁾	1.395.691,11	163,49

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015), ⁽²⁾ COPPETEC (2011).

Nota: Para o cálculo da emissão foi retirada a parcela de biodiesel. Fator de emissão e densidade de energia do diesel de acordo com tabela 18.

O sistema de energização é fornecido pelo terceiro trilho, disposto lateralmente acima do nível do solo. O terceiro trilho é do tipo 150NMC (TR75) fabricado com tecnologia da empresa canadense *Wirth Rail*. Para a Linha 4 são necessários cerca de 56,6 km de terceiro trilho, constituídos de aço. Cada peça de terceiro trilho tem 12 metros e massa de 74 kg/m. As peças utilizadas na Linha 4 foram produzidas pela Arcelor Mittal, em Luxemburgo, sendo necessário o transporte em caminhão de 4.188 toneladas pela distância de 256 km, da fábrica ao Porto de Antuérpia, na Bélgica, onde foram embarcados ao Porto do Rio de Janeiro em 2 viagens, cada uma de 10.106 km. No Rio de Janeiro foram 145 viagens de caminhão trator e semirreboque cobrindo um percurso de 35 km, sendo estimado o rendimento desses veículos. Foi utilizado o fator europeu de emissão de trem de carga da IEA, fator de emissão de transporte marítimo da WSC e fator nacional de emissão de transporte rodoviário no Rio de Janeiro. Aplicando a equação (1):

Emissão = 465,73 tCO₂.

Energia = 6.181.184,53 MJ sendo a energia renovável igual a 3.221,94 MJ, calculada apenas no transporte no Rio de Janeiro.

Um resumo, por trecho de transporte do terceiro trilho, aparece na tabela 22.

Tabela 22: Emissão e energia em transporte fornecedor – obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro – Via permanente – terceiro trilho.

	Distância ⁽¹⁾	Rendimento	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Viagem fábrica Luxemburgo - Porto Antuérpia	145 viagens de 256 km	2,61 km/l ⁽²⁾	610.275,56	37,69
Viagem Porto Antuérpia - Porto Rio de Janeiro	2 viagens de 10.106 km		5.502.110,64	423,24
Viagem Porto Rio de Janeiro - Obra Linha 4	145 viagens de 35 km	2,61 km/l ⁽²⁾	68.798,33	4,80
	Total		6.181.184,53	465,73

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015), ⁽²⁾ COPPETEC (2011).

Nota: Para o cálculo da emissão no transporte no Rio de Janeiro foi retirada a parcela de biodiesel. Fatores de emissão e densidade de energia dos combustíveis de acordo com tabela 18.

A figura 25 mostra os elementos da via permanente da Linha 4: Os trilhos montados sobre os dormentes e o terceiro trilho à esquerda.



Figura 25: Via Permanente em processo de montagem na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Fonte: VIATROLEBUS (2015).

5.1.2 Transporte dentro da obra

O transporte dentro da obra é realizado por caminhões a diesel e automóveis a gasolina. Para a frota própria é realizado controle sobre o combustível consumido. Para a frota de terceiros, alugada, o controle é sobre a distância percorrida ou horas de transporte, requerendo uma estimativa do rendimento dos veículos. Foram utilizados fatores locais de emissão. Aplicando a equação (2):

Emissão = 25.728,63 tCO₂.

Energia = 377.599.424,22 MJ, sendo 24.416.082,70 MJ a energia renovável.

Os dados relativos a transporte dentro da obra são mostrados na tabela 23.

Tabela 23: Emissão e energia em transporte dentro da obra, na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Distância ou horas percorridas (km ou h)	Rendimento veículo (km/l ou l/h)	Quantidade consumida (l)	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Dentro da obra Caminhões (diesel) Frota alugada (horas)	57.510,90 h ⁽¹⁾	13,16 l/h ⁽²⁾	756.843,44	26.774.337,44	1.864,67
Dentro da obra Caminhões (diesel) Frota alugada (km)	23.613.357,73 km ⁽¹⁾	3,04 km/l ⁽³⁾	7.767.551,88	274.719.185,01	19.062,09
Dentro da obra Caminhões (diesel) Frota própria	-	-	1.088.564,45 ⁽¹⁾	38.510.095,85	2.682,70
Dentro da obra Automóveis (gasolina) Frota própria	-	-	1.257.732,78 ⁽¹⁾	37.595.805,91	2.119,16
Totais				377.599.424,22	25.728,63

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015). Quantidade total consumida, da qual foram retiradas, na apuração da emissão, as parcelas de biodiesel/etanol anidro; ⁽²⁾ Calculado a partir de um veículo com velocidade média de 40 km/h e rendimento de 3,04 km/h; ⁽³⁾ COPPETEC (2011).

Nota: Fatores de emissão e densidade de energia dos combustíveis de acordo com tabela 18.

5.1.3 Construção civil e via permanente - consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos

O combustível fóssil é consumido por diversos equipamentos e geradores utilizados na obra. Nos equipamentos próprios o controle é feito sobre a quantidade de combustível consumida e nos equipamentos alugados é feito um controle sobre as horas trabalhadas.

Aplicando a equação (3):

Emissão = 41.471,58 tCO₂.

Energia = 600.777.575,46 MJ, sendo a energia renovável igual a 34.528.764,88 MJ.

A tabela 24 resume as emissões do consumo de combustíveis fósseis dos equipamentos.

Tabela 24: Emissão e energia do consumo de combustíveis fósseis pelos equipamentos utilizados na obra da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Equipamento	Quantidade consumida	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Próprio – Diesel	9.750.264,24 l ⁽¹⁾	344.824.850,94	23.907,98
Alugado – Diesel	548.566,44 h ⁽¹⁾⁽²⁾ = 7.241.077,01 l	255.909.320,98	17.561,05
Próprio – Gasolina	1.432,46 l ⁽¹⁾	43.403,54	2,54
Totais		600.777.575,46	41.471,58

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015). Quantidade total consumida, da qual foram retiradas, na apuração da emissão, as parcelas de biodiesel/etanol anidro; ⁽²⁾ Rendimento de 13,2 l/h (JBS, 2015).

Nota: Fatores de emissão e densidade de energia dos combustíveis de acordo com tabela 18.

5.1.4 Construção civil e via permanente - consumo de energia elétrica pelos equipamentos

A energia elétrica é consumida por diversos equipamentos, incluindo o TBM, e também na iluminação, como mostrado na tabela 25. Foi considerado que há 4% de perdas técnicas de transmissão na rede do SIN – Sistema Interligado Nacional (ANEEL, 2015) e 8% na distribuição (LIGHT, 2015), totalizando perdas de transmissão e distribuição (T&D) de 12%. Foi utilizado o fator brasileiro de emissão do SIN, divulgado anualmente pelo Governo. A energia elétrica total, com perdas, acumulou 121.955.181 kWh ou 439.038.651,60 MJ. A emissão, detalhada na tabela 25, pode ser calculada pela equação (4):

Emissão = 14.365,31 tCO₂.

Energia = 439.038.651,60 MJ, sendo a energia renovável igual a 348.157.650,72 MJ.

Tabela 25: Emissão e energia do consumo de energia elétrica pelos equipamentos utilizados na obra da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Ano	Quantidade consumida ⁽¹⁾ (MWh)	Fator emissão ⁽²⁾ (tCO ₂ /MWh)	Emissão (tCO ₂)	Energia (MJ)
2012	13.355,024	0,0653	872,08	48.078.086,40
2013	30.939,010	0,0960	2.970,14	111.380.436,00
2014	51.463,244	0,1355	6.973,27	185.267.678,40
2015	26.197,903	0,1355	3.549,82	94.312.450,80
TOTAIS	121.955,181		14.365,31	439.038.651,60

Fontes: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015), ⁽²⁾ MCTI (2015). O fator de emissão em 2015 foi considerado igual ao de 2014.

5.1.5 Construção civil e via permanente – energia e carbono embutido em materiais

Os materiais considerados são, conforme seção 4.1.1, o cimento, o concreto e o aço. O concreto pronto, adquirido de fornecedores, consiste numa mistura de cimento, areia e brita. Foram utilizados fatores de emissão locais para o cimento, fator de emissão padrão do IPCC para o aço e fator do Inventário de Carbono e Energia da Universidade de Bath. A energia/carbono embutidos em materiais são mostrados na tabela 26, e podem ser calculados pela equação (5) totalizando:

Emissão da construção civil = 361.032,48 tCO₂.

Emissão da via permanente = 12.303,34 tCO₂.

Energia da construção civil = 3.788.146.054,50 MJ.

Energia da via permanente = 217.310.236,46 MJ.

Tabela 26: Energia e carbono embutido em materiais utilizados na construção do Metrô do Rio de Janeiro.

Materiais	Quantidade ⁽¹⁾	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Cimento	389.747.890,91 kg	1.753.865.509,07	220.597,31
Concreto	548.485.245,00 kg	411.363.933,75	54.848,52
Aço	80.742.119,98 kg	1.622.916.611,68	85.586,65
Total construção civil		3.788.146.054,50	361.032,48
Trilhos de aço	4.400.000,00 kg	88.440.000,00	4.664,00
Dormentes - concreto	13.949.247,77 kg	10.461.935,83	1.394,92
Dormentes – aço	1.702.960,23 kg	34.229.500,63	1.805,14
Terceiro trilho	4.188.000,00 kg	84.178.800,00	4.439,28
Total via permanente		217.310.236,46	12.303,34
Total		4.005.456.290,96	373.335,82

Fonte: ⁽¹⁾ RIOTRILHOS (2015). Fatores de emissão e densidade de energia conforme tabela 18.

5.1.6 Consolidação das emissões de construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

A construção da Linha 4 foi iniciada em 2011, mas somente a partir de 2012 as atividades de maior impacto ambiental, como a escavação dos túneis, começaram a ser

executadas. A inauguração, no segundo semestre de 2016, será feita sem a ligação da estação Gávea com a estação Antero de Quental. As obras referentes a esse trecho prosseguirão por mais alguns meses após a inauguração.

Para estimar a energia consumida e a emissão de CO₂ produzida no final de obra será considerada a declaração oficial que, no início do segundo semestre de 2015, 75% da obra estava concluída. Portanto os 25% restantes da obra, considerando uma proporcionalidade, corresponderão a $25/75 = 34\%$ dos recursos já efetivamente utilizados (combustíveis, materiais e energia). Essa estimativa se aplica apenas à construção da infraestrutura, uma vez que os dados referentes à fabricação dos trens, operação da infraestrutura, manutenção e operação dos trens já estão totalmente contabilizados. Na construção da infraestrutura os dados referentes à via permanente (trilhos, dormentes e terceiro trilho) também já estão totalmente computados e, portanto, a estimativa refere-se tão somente aos materiais, combustíveis e eletricidade a serem consumidos no restante da obra civil.

A energia/emissão da construção da infraestrutura da Linha 4, já contabilizadas e mostradas nos itens anteriores e no Apêndice 1, perfazem, respectivamente, os totais de 5.446.738.122,95 MJ para a energia total, 407.823.574,69 MJ para a energia renovável e 456.698,09 tCO₂ para a emissão. Os dados consolidados, já com a estimativa projetada para a finalização da obra, estão apresentados nas tabelas 27 e 28. Os cálculos da estimativa projetada são mostrados no Apêndice 1.

Tabela 27: Energia na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Energia (MJ)	Energia – Total parcial (MJ)	Percentual do total
Transporte fornecedor - obra	Materiais e Combustíveis	14.828.625	
	Trilhos	5.220.978	
	Dormentes	1.395.691	
	Terceiro Trilho	6.181.185	
Total - Transporte fornecedor - obra		27.626.479	0,38%
Transporte dentro da obra	505.747.227		
Total - Transporte dentro da obra		505.747.227	7,00%
Total - Transporte		533.373.706	7,39%
Consumo combustível fóssil – equipamentos	804.923.113		
Total – Combustíveis - equipamentos		804.923.113	11,15%
Consumo de energia elétrica - equipamentos	588.311.793		
Total – Energia elétrica - equipamentos		588.311.793	8,15%
Energia embutida em materiais	Aço	2.174.708.260	
	Cimento	2.350.179.782	
	Concreto	551.227.671	
	Trilhos-aço	88.440.000	
	Dormentes-concreto	10.461.936	
	Dormentes-aço	34.229.501	
	Terceiro Trilho-aço	84.178.800	
Total – Energia embutida - materiais		5.293.425.949	73,32%
TOTAL		7.220.034.562	100,00%
TOTAL DA ENERGIA RENOVÁVEL		550.010.022	7,62%

Tabela 28: Emissões na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

		Emissão (tCO ₂)	Emissão - Total parcial (tCO ₂)	Percentual do Total
Transporte fornecedor - obra	Materiais e combustíveis	1.024		
	Trilhos	401		
	Dormentes	163		
	Terceiro Trilho	466		
Total - Transporte fornecedor - obra			2.054	0,34%
Transporte dentro da obra		34.325		
Total - Transporte dentro da obra			34.325	5,65%
Total transporte			36.379	5,98%
Consumo combustível fóssil – equipamentos		55.441		
Total – Combustíveis - equipamentos			55.441	9,12%
Consumo de energia elétrica - equipamentos		19.984		
Total – Energia elétrica - equipamentos			19.984	3,29%
Carbono embutido em materiais	Aço	114.686		
	Cimento	295.600		
	Concreto	73.497		
	Trilhos-aço	4.664		
	Dormentes-concreto	1.395		
	Dormentes-aço	1.805		
	Terceiro Trilho-aço	4.439		
Total – Carbono embutido - materiais			496.087	81,61%
TOTAL		607.891		100,00%

5.2 Fabricação dos trens

Os trens que serão utilizados na Linha 4 foram encomendados à CRC – *Changchun Railway Vehicles Corporation*, empresa do grupo *China CNR Corporation*. A fábrica está localizada em Pequim. O trem é composto de 6 carros, sendo 2 carros tipo A, 2 carros tipo B (um deles é denominado B1, por ter um arranjo ligeiramente diferente, para permitir a passagem de fiação) e 2 carros tipo C, conforme figura 26. Dos 49 trens

em operação nas Linhas 1 e 2, 19 deles são iguais aos que vão operar na Linha 4, portanto o Metrô Rio já tem experiência com esse tipo de trem.

O carro A é um carro sem motor (reboque) com cabine de condução que possui ar condicionado frente e ré, ventiladores lineares e 4 sapatas que são responsáveis por captar do 3º trilho a alimentação de 750 Vcc. O Carro C é um carro com 4 motores e um compressor de ar comprimido, possuindo em suas extremidades interiores ventiladores lineares além de ar condicionado. O carro B também possui 4 motores, ventiladores lineares nas extremidades, ar condicionado frente e ré. A massa de cada carro A e B é de 40.500 kg e de cada carro C de 40.900 kg, resultando em massa total do trem de 243.800 kg.

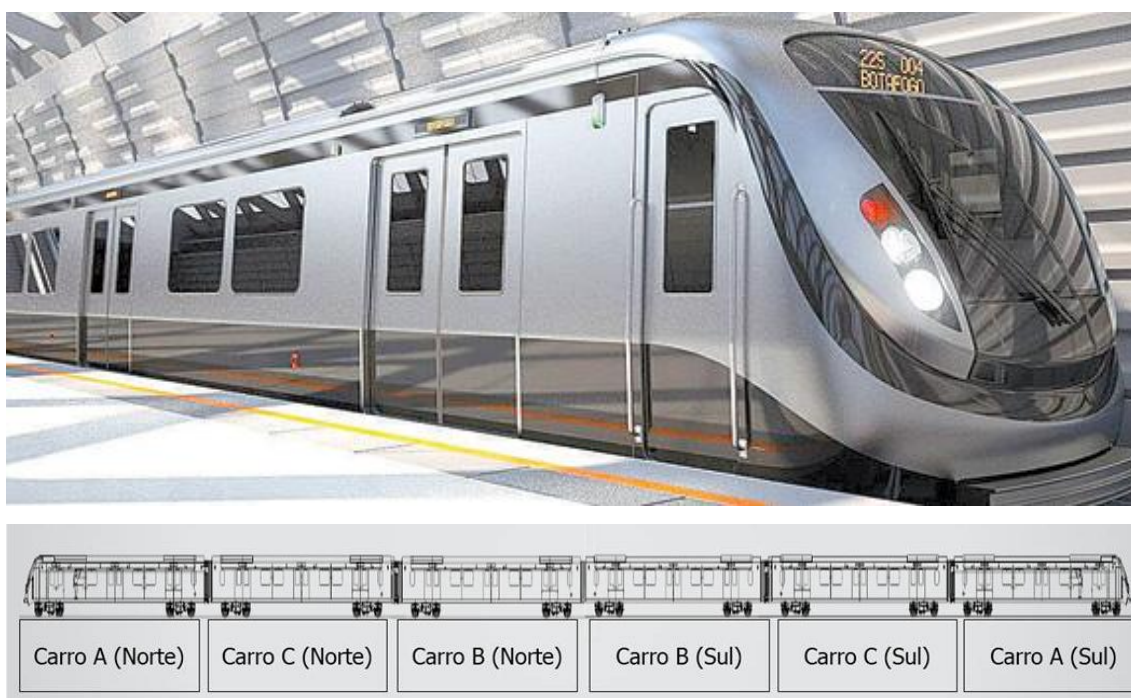


Figura 26: Composição do trem da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.
Fonte: METRÔ RIO (2014a).

Todos os carros têm capacidade de 36 passageiros sentados. Considerando que todos os assentos estejam ocupados e na área livre a taxa de ocupação seja de 6 passageiros/m² a capacidade do trem é de 1.820 passageiros. A velocidade máxima operacional é de 80 km/h. O consumo de energia é de 2,97 kWh/carro-km com o trem vazio (METRÔ RIO, 2014a). Foram encomendados 15 trens para atender à Linha 4. A fabricação dos trens chineses da Linha 4 é realizada conforme a figura 27.

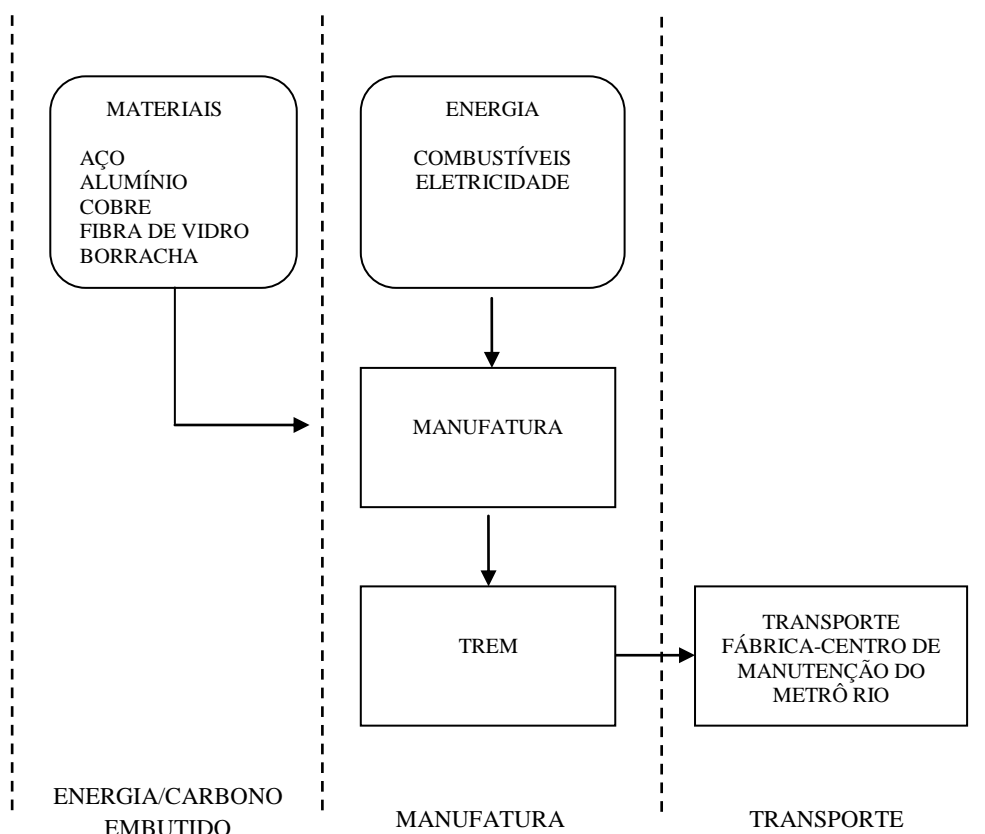


Figura 27: Energia e emissões na fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Fonte: Elaboração própria a partir de METRÔ RIO (2014a).

5.2.1 Fabricação dos trens - consumo de combustíveis fósseis

O processo de manufatura dos trens utiliza combustíveis fósseis conforme tabela 29. Os dados de quantidade foram fornecidos pelo Metrô Rio, conforme informações recebidas do fabricante. Os dados de fatores de emissão utilizados são dados locais (da China), onde os trens são fabricados. Aqui serão apresentados os resultados. Os cálculos detalhados são mostrados no Apêndice 1. Por falta de dados a energia renovável será considerada nula. A aplicação da equação (3) permite calcular a energia/emissão na fabricação de um trem:

Emissão = 641,49 tCO₂.

Energia = 6.872.485,94 MJ.

Tabela 29: Consumo de combustíveis fósseis na fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Quantidade em 1 trem ⁽¹⁾	Energia de 1 trem (MJ)	Emissão de 1 trem (tCO ₂)
Carvão	316,50 t	6.618.015,00	626,99
Gasolina	0,39 t	16.797,30	1,14
Querosene	0,0405 t	1.744,34	0,12
Diesel	0,192 t	8.188,80	0,59
Gás natural	5.850 m ³	227.740,50	12,65
Totais 1 trem		6.872.485,94	641,49 tCO ₂
Totais 15 trens		103.087.289,03	9.622,38 tCO ₂

Fontes: ⁽¹⁾METRÔ RIO (2014a). Fatores de emissão e densidade de energia conforme tabela 18.

5.2.2 Fabricação dos trens - consumo de energia elétrica

O processo de manufatura dos trens utiliza energia elétrica conforme tabela 30. A quantidade de energia elétrica foi fornecida pelo Metrô Rio, conforme informação recebida do fabricante. Foi utilizado o fator de emissão de eletricidade da China. De acordo com a equação (4) a emissão da energia elétrica na fabricação de um trem tem o valor de 244,14 tCO₂. O consumo de energia é de 820.116,00 MJ.

Tabela 30: Consumo de energia elétrica e emissões de CO₂ na fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Consumo 1 trem (MWh) ⁽¹⁾	Consumo 1 trem (MJ)	Emissão 1 trem (tCO ₂)	Emissão 15 trens (tCO ₂)	Consumo 15 trens (MJ)
Eletricidade	227,81	820.116,00	244,14	3.662,08	12.301.740,00

Fonte: ⁽¹⁾METRÔ RIO (2014a). Fatores de emissão e densidade de energia conforme tabela 18.

5.2.3 Fabricação dos trens – energia e carbono embutido nos materiais

Os materiais utilizados na manufatura dos trens e sua energia e carbono embutidos são mostrados na tabela 31. Os dados dos materiais e suas quantidades foram disponibilizados pelo Metrô Rio, baseado em informações do fabricante. Os fatores de emissão dos dois principais materiais, o aço e o alumínio, são da China, enquanto dos

demais materiais são fatores globais. Aplicando a equação (5) a emissão/energia embutida nos materiais de um trem têm os valores de:

Emissão = 550,37 tCO₂.

Energia = 6.955.696,00 MJ.

Tabela 31: Energia e carbono embutido em materiais de 1 trem da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Material	Peso em Toneladas	Energia (MJ)	Emissão (tCO ₂)
Aço	170,66 ⁽¹⁾	3.430.266,00	334,32
Alumínio	9,75 ⁽¹⁾	1.511.250,00	107,15
Cobre	9,75 ⁽¹⁾	409.500,00	32,08
Fibra de vidro	41,45 ⁽¹⁾	1.160.600,00	63,83
Borracha	4,88 ⁽¹⁾	444.080,00	12,98
Total		6.955.696,00	550,37
Total de 15 trens		104.335.440,00	8.255,50

Fontes: ⁽¹⁾ METRÔ RIO (2014a). Fatores de emissão e densidade de energia conforme tabela 18.

5.2.4 Transporte Fabricante - Obra

Os trens manufaturados foram enviados ao Rio de Janeiro em um longo trajeto. Da fábrica até o porto de Dalian, na China, o transporte foi realizado por caminhão de transporte de carga em um percurso de 760 km. Do Porto de Dalian seguiu por mar ao Porto do Rio de Janeiro, a uma distância de cerca de 22.000 km. No transporte terrestre dentro da China cada viagem transporta 1 carro e os dados de consumo e fator de emissão de combustível foram obtidos pelo METRÔ RIO (2014a) junto ao fabricante dos trens. No transporte marítimo, para os dados de emissão do combustível foram utilizados aqueles disponíveis na WSC. No transporte terrestre no Rio de Janeiro foi estimado o rendimento dos veículos e utilizado fator de emissão nacional.

Os trens foram entregues ao Metrô Rio em 3 etapas: na primeira etapa foi realizado o embarque de 1 trem, na segunda etapa foram 4 embarques, cada um com 2 trens e na terceira etapa foram utilizados 2 embarques com 3 trens. Todos esses embarques ocorreram ao longo de 2014/2015, permitindo que os trens estejam operacionais em

2016. A energia/emissão do transporte dos 15 trens, da China até o Rio de Janeiro, detalhadas na tabela 32, podem ser calculadas pela equação (1):

Emissão = 907,58 tCO₂.

Energia = 12.110.834,40 MJ.

Tabela 32: Energia / Emissão do Transporte dos 15 trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Distância Terrestre Fábrica China – Porto China - 760 km ⁽¹⁾		
1ª. Etapa ⁽¹⁾	2ª. Etapa ⁽¹⁾	3ª. Etapa ⁽¹⁾
6 viagens com 1 carro	48 viagens com 1 carro	36 viagens com 1 carro
Total de 90 viagens com 1 carro - Energia = 1.607.410,26 MJ - Emissões = 99,47 tCO ₂		
Fonte: ⁽¹⁾ METRÔ RIO (2014a).		
Nota: rendimento do caminhão = 0,551 l diesel/km. Fonte: METRÔ RIO (2014a).		
Fatores de emissão e densidade de energia de acordo com tabela 18.		
Distância Marítima Porto China – Porto Rio de Janeiro - 22.078 km ⁽¹⁾		
1ª. Etapa ⁽¹⁾	2ª. Etapa ⁽¹⁾	3ª. Etapa ⁽¹⁾
1 viagem com 1 trem Massa = 243,8 t	4 viagens com 2 trens Massa = 487,6 t	2 viagens com 3 trens Massa = 731,4 t
53,83 tCO ₂	430,61 tCO ₂	322,96 tCO ₂
Total de 3.657,00 t e 22.078 km - Energia = 10.496.101,98 MJ - Emissões = 807,39 tCO ₂		
Fonte: ⁽¹⁾ METRÔ RIO (2014a).		
Nota: Fatores de emissão e densidade de energia de acordo com tabela 18.		
Distância Porto Rio de Janeiro – Obra Linha 4 – 8,4 km ⁽¹⁾		
1ª. Etapa ⁽¹⁾	2ª. Etapa ⁽¹⁾	3ª. Etapa ⁽¹⁾
6 viagens com 1 carro	48 viagens com 1 carro	36 viagens com 1 carro
0,05 tCO ₂	0,38 tCO ₂	0,28 tCO ₂
Total de 90 viagens com 1 carro - Energia = 10.239,42 MJ - Emissões = 0,71 tCO ₂		
Fonte: ⁽¹⁾ METRÔ RIO (2014a).		
Nota: Retirada a parcela de biodiesel no transporte no Rio de Janeiro pela média de 2014 e 2015.		
Rendimento do caminhão = 2,61 km/l - Fonte: COPPETEC (2011).		
Fatores de emissão e densidade de energia de acordo com tabela 18.		
Total do transporte (15 trens) - Energia = 12.113.751,66 MJ - Emissões = 907,57 tCO ₂		

5.2.5 Consolidação da energia e emissões na fabricação dos trens

A tabela 33 apresenta o resultado consolidado da energia/emissão dos 15 trens da Linha 4 e também no ciclo de vida do estudo. Como o tempo de vida do trem é assumido como de 30 anos, trabalha-se com a premissa de que todos os trens serão substituídos ao fim desse período e a emissão gerada pelos novos 15 trens será a mesma, ou seja, a

emissão total associada aos trens no tempo de 60 anos fixado para o estudo será o dobro da emissão total calculada para os 15 trens iniciais. Essa premissa é conservadora, uma vez que a evolução tecnológica e os esforços de redução de emissões poderão fazer com que as emissões dos 15 trens substitutos sejam na realidade de menor valor.

Tabela 33: Consolidação da energia/emissão da fabricação dos trens da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Energia 15 trens (MJ)	Energia renovável 15 trens (MJ)	Emissão 15 trens (tCO ₂)
Consumo Combustível fóssil na manufatura	103.087.289		9.622
Consumo Energia elétrica na manufatura	12.301.740		3.662
Carbono embutido em materiais	104.335.440		8.256
Transporte	12.113.752	609	908
TOTAL	231.838.221	609	22.448
TOTAL NO CICLO DE VIDA DE 60 ANOS (30 trens)	Energia 463.676.441	Energia renovável 1.217	Emissões 44.895

5.3 Manutenção dos trens e da infraestrutura

Foi considerada, na via permanente, a troca de parte dos trilhos de aço gastos, feita pela equipe de manutenção. Os dados históricos nas Linhas 1 e 2 (METRÔ RIO, 2014a) indicam uma média anual de 2,4 km de trilhos substituídos, representando, conforme equação (6): $2,4 \times 0,375 = 0,9$ km anuais.

Há também dados que apontam uma troca de 2.000 dormentes de concreto por ano, tendo cada um deles a massa de 104 kg. A taxa anual de substituição dos dormentes é, conforme equação (6): $2.000 \times 0,375 = 750$ dormentes anuais.

Para o terceiro trilho, 100 metros são trocados, em média, a cada ano representando, conforme equação (6): $0,1 \times 0,375 = 0,0375$ km anuais.

A vida útil estimada dos trilhos é de 20 anos, dos dormentes 30 anos e do terceiro trilho 60 anos (METRÔ RIO, 2014a) e, portanto, será assumido que no ciclo de vida do

estudo haverá duas substituições completas dos trilhos e uma substituição completa dos dormentes.

As rodas, por sofrerem desgaste maior, necessitam serem substituídas a cada 10 anos, em média, por questões de segurança. Cada carro tem 8 rodas e cada trem $6 \times 8 = 48$ rodas. Nos 15 trens iniciais haverá duas substituições das rodas e nos 15 trens que substituirão os iniciais também outras duas. Assim no ciclo de 60 anos haverá 4 substituições completas das rodas. Cada roda contém 326 kg de aço, o que representará $48 \times 4 \times 15 \times (326/1000) = 938,88$ t de aço.

5.3.1 Equipamentos - consumo de combustíveis fósseis

Foram considerados os dados agrupados dos combustíveis consumidos nos geradores a diesel das subestações de energia e nos veículos de manutenção da via permanente, que são veículos sobre trilhos, alimentados por diesel, especialmente construídos para auxiliar na manutenção da via permanente. Esses dados foram levantados nas Linhas 1 e 2, para o ano de 2013 (totalizando 84.942,61 l de diesel), e considerados proporcionalmente ao tamanho das linhas, conforme equação (6), resultando em:

$84.942,61 \times 0,375 = 31.853,48$ l de diesel. A energia/emissão correspondentes, de acordo com a equação (3), serão, anualmente:

$$\text{Emissão: } E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = 31.853,48 \times 0,93 \times 2,60 = 77,02 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia: } E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = 31.853,48 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) = 1.125.536,35 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 31.853,48 \times (0,07 \times 33,14) = 73.893,70 \text{ MJ.}$$

E no ciclo de vida: Emissão = $77,02 \times 60 = 4.621,30$ tCO₂, Energia = $1.125.536,35 \times 60 = 67.532.180,71$ MJ, para uma quantidade de $60 \times 31.853,48 = 1.911.208,80$ l de diesel, sendo a energia renovável = $73.893,70 \times 60 = 4.433.622,17$ MJ.

5.3.2 Equipamentos - consumo de energia elétrica

Foram considerados os dados agrupados da energia elétrica consumida no centro de manutenção. Esses dados foram levantados nas Linhas 1 e 2, para o ano de 2013,

atingindo 628.185 kWh. Considerando as perdas de T&D de 12 % e aplicando a equação (6):

Energia = $628.185 \times 0,375/0,88 = 267.692,47$ kWh = 963.692,90 MJ anualmente e, no ciclo de vida, $60 \times 963.692,90 = 57.821.573,86$ MJ, sendo a energia renovável = $79,30\% \times 57.821.573,86 = 45.852.508,07$ MJ.

A emissão, calculada pela equação (4), assume o valor:

Emissão: $267.692,47 \times 0,1355/1000 = 36,27$ tCO₂ anualmente e, no ciclo de vida, $60 \times 36,27 = 2.176,34$ tCO₂.

5.3.3 Transporte - manutenção anual, substituição parcial de peças e componentes

O transporte da manutenção anual de trilhos, dormentes e terceiro trilho também produzirá emissão por consumo de combustível fóssil. Como a aquisição desse material é incerta em termos de momentos de aquisição e quantidade adquirida em cada aquisição, será presumida uma proporcionalidade entre as quantidades e as emissões no ciclo de vida para a estimativa da emissão por transporte.

Conforme tabela 20 o transporte de 4.400 t de trilhos produziu emissão de 401,20 tCO₂. Assim para a quantidade de $0,9 \text{ km} \times 60 \times 57 \text{ kg/m} = 3.078$ t a emissão será, aplicando a equação (7): $E = E_c \times p = 401,20 \times (3.078/4.400) = 280,66$ tCO₂. Para os dormentes, conforme tabela 21, a quantidade de 150.502 dormentes produziu emissão de 163,49 tCO₂ e, portanto, para $750 \times 60 = 45.000$ dormentes a emissão será, pela equação (7): $E = E_c \times p = 163,49 \times (45.000/150.502) = 48,88$ tCO₂. Conforme tabela 22 o transporte de 4.188 t de terceiro trilho produziu 465,82 tCO₂. Para $0,0375 \text{ km} \times 60 \times 74 \text{ kg/m} = 166,5$ t a emissão será, pela equação (7): $E = E_c \times p = 465,82 \times (166,5/4.188) = 18,52$ tCO₂.

O mesmo procedimento foi utilizado para a energia, resultando em $5.220.978,33 \times (3.078/4.400) = 3.652.311,66$ MJ para os trilhos, $1.395.691,11 \times (45.000/150.502) = 417.310,73$ MJ para os dormentes e $6.181.184,53 \times (166,5/4.188) = 245.741,94$ MJ para o terceiro trilho. A energia renovável, considerada apenas no transporte dentro do Brasil, resultou em $3.221,94 \times (3.078/4.400) = 2.253,90$ MJ para os trilhos, 109.676,26

$\times (45.000/150.502) = 32.793,13$ MJ para os dormentes e $3.221,94 \times (166,5/4.188) = 128,09$ MJ para o terceiro trilho.

5.3.4 Transporte – substituição completa de peças e componentes

Conforme tabela 20 os trilhos a serem substituídos completamente têm massa de 4.400 t de aço, com emissão de 401,20 tCO₂ e energia de 5.220.978,33 MJ sendo 3.221,94 MJ a energia renovável. Com duas substituições esses valores dobrarão (emissão de 802,40 tCO₂, energia de 10.441.956,66 MJ e energia renovável de 6.443,89 MJ). Para uma substituição completa dos dormentes, conforme tabela 21, a emissão no transporte é de 163,49 tCO₂, com energia de 1.395.691,11 MJ, sendo 109.676,26 MJ a energia renovável.

As rodas são transportadas do fornecedor MWL Brasil Rodas e Eixos, em Caçapava-SP (distância 325 km), e são estimadas 32 viagens (4 trocas \times 8 viagens/troca) no ciclo de vida, totalizando $32 \times 325 = 10.400$ km. Conforme equação (1) a emissão/energia será:

Emissão:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (10.400/2,61) \times 0,93 \times 2,60/1000 = 9,63 \text{ tCO}_2.$$

Energia:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (10.400/2,61) \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) \\ = 140.797,67 \text{ MJ}.$$

$$\text{Energia renovável} = (10.400/2,61) \times (0,07 \times 33,14) = 9.243,65 \text{ MJ}.$$

5.3.5 Transporte – deslocamento das equipes de manutenção

Viaturas são utilizadas no deslocamento das equipes de manutenção, em vias urbanas, nas situações de emergência e manutenção rotineira. As viaturas são automóveis e caminhonetes, que consomem diesel, gasolina ou etanol. O consumo das Linhas 1 e 2 foi, em 2013, de 9.944,45 l de diesel, 13.527,74 l de gasolina e 60.900,00 l de etanol. Aplicando a equação (6) o consumo anual da Linha 4 será de:

$9.944,45 \times 0,375 = 3.729,17$ l de diesel, $13.527,74 \times 0,375 = 5.072,90$ l de gasolina e $60.900,00 \times 0,375 = 22.837,50$ l de etanol. O consumo no ciclo de vida será de: $60 \times$

$3.729,17 = 223.750,13$ l de diesel, $60 \times 5.072,90 = 304.374,15$ l de gasolina e $60 \times 22.837,50 = 1.370.250,00$ l de etanol.

A equação (3) permite determinar a energia e a emissão associadas a essas quantidades de combustíveis:

$$\begin{aligned} \text{Emissão anual: } E &= \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = (3.729,17 \times 0,93 \times 2,60 + 5.072,90 \\ &\times 0,73 \times 2,22)/1000 \\ &= 17,24 \text{ tCO}_2. \end{aligned}$$

$$\text{Emissão no ciclo de vida: } 60 \times 17,22 = 1.034,30 \text{ tCO}_2.$$

$$\begin{aligned} \text{Energia anual: } E &= \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = 3.729,17 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times \\ &33,14) + 5.072,90 \times (0,73 \times 32,29 + 0,27 \times 22,34) + 23.837,50 \times 21,32 = 768.840,53 \\ &\text{MJ.} \end{aligned}$$

$$\text{Energia no ciclo de vida: } 60 \times 768.840,53 = 46.130.431,63 \text{ MJ.}$$

$$\begin{aligned} \text{Energia renovável} &= 3.729,17 \times (0,07 \times 33,14) + 5.072,90 \times (0,27 \times 22,34) + 23.837,50 \\ &\times 21,32 = 526.145,14 \text{ MJ. No ciclo de vida: } 60 \times 526.145,14 = 31.568.708,63 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

5.3.6 Peças – energia e carbono embutido em materiais

Aplicando a taxa de substituição dos trilhos, de 0,9 km anuais de trilhos substituídos, a massa será $0,9 \text{ km} \times 57 \text{ kg/m} = 51,3 \text{ t}$, implicando, de acordo com a equação (5), em:

$$\text{Emissão: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = 51,3 \times 1,06 = 54,38 \text{ tCO}_2 \text{ anual.}$$

$$\text{No ciclo de vida: } 60 \times 54,38 = 3.262,68 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = 51,3 \times 1000 \times 20,1 = 1.031.130,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{No ciclo de vida: } 60 \times 1.031.130,00 = 61.867.800,00 \text{ MJ.}$$

A energia renovável foi considerada igual a zero para todos os materiais.

A aplicação da taxa de substituição dos dormentes, de 750 dormentes anuais, resultará em massa total de 69,51 t de concreto e 8,49 t de aço. Aplicando a equação (5):

$$\text{Emissão: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (69,51 \times 0,1) + (8,49 \times 1,06) = 15,95 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{No ciclo de vida: } 60 \times 15,95 = 957,02 \text{ tCO}_2.$$

$$\begin{aligned} \text{Energia: } E &= \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (69,51 \times 1000 \times 0,75) + (8,49 \times 1000 \times 20,1) \\ &= 222.781,50 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

$$\text{No ciclo de vida: } 60 \times 222.781,50 = 13.366.890,00 \text{ MJ.}$$

Para o terceiro trilho serão 0,0375 km substituídos anualmente com massa total de 2,78 t. Aplicando a equação (5):

$$\text{Emissão: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = 2,78 \times 1,06 = 2,95 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{No ciclo de vida: } 60 \times 2,95 = 176,81 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = 2,78 \times 1000 \times 20,1 = 55.878,00 \text{ MJ}.$$

$$\text{No ciclo de vida: } 60 \times 55.878,00 = 3.352.680,00 \text{ tCO}_2.$$

Conforme tabela 26 os trilhos a serem substituídos completamente têm massa de 4.400 t, com 4.664 tCO₂ de carbono embutido e 88.440.000,00 MJ de energia embutida. Com duas substituições esses valores dobrarão (emissão de 9.328 tCO₂ e energia de 176.880.000,00 MJ). Para os dormentes, conforme tabela 26 a massa é de 13.949,25 t de concreto (emissão de 1.394,92 tCO₂ e energia de 10.461.935,83 MJ) e 1.702,96 t de aço (emissão de 1.805,14 tCO₂ e energia de 34.229.500,62 MJ). As rodas substituídas no ciclo de vida têm, conforme item 5.3, massa de 938,88 t de aço, acarretando, de acordo com a equação (5) emissão/energia de:

$$\text{Emissão: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = 938,88 \times 1,06 = 995,21 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia: } E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = 938,88 \times 1000 \times 20,1 = 18.871.488,00 \text{ MJ}.$$

A tabela 34 resume os dados de energia e emissão na manutenção acumulados ao longo de 60 anos.

Tabela 34: Consolidação da emissão e energia estimada na Manutenção dos trens e da infraestrutura da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

		Quantidade no ciclo de vida ⁽¹⁾	Energia no ciclo de vida (MJ)	Energia renovável no ciclo de vida (MJ)	Emissão no ciclo de vida (tCO ₂)
Equipamentos - Consumo combustíveis fósseis	Geradores e Veículos de Manutenção Diesel	1.911.208,80 t	67.532.180,71	4.433.622,17	4.621,30
Equipamentos - Consumo de energia elétrica	Energia Elétrica do Centro de Manutenção	267.692,47 kWh	57.821.573,86	45.852.508,07	2.176,34
Transporte - Substituições parciais	Trilhos	3.078 t	3.652.311,66	2.253,90	280,66
	Dormentes	45.000 dormentes	417.310,73	32.793,13	48,88
	Terceiro trilho	166,5 t	245.741,94	128,09	18,52

		Quantidade no ciclo de vida ⁽¹⁾	Energia no ciclo de vida (MJ)	Energia renovável no ciclo de vida (MJ)	Emissão no ciclo de vida (tCO ₂)
Transporte - Substituições completas	4 substituições de Rodas	938,88 t	140.797,67	9.243,65	9,63
	2 substituições de Trilhos	8.800 t	10.441.956,67	6.443,89	802,40
	1 substituição de Dormentes	150.502 dormentes	1.395.691,11	109.676,26	163,49
Transporte - Viaturas de Manutenção	Viaturas de Manutenção Diesel	223.750,13 l	7.906.165,92	519.055,54	541,03
	Viaturas de Manutenção Gasolina	304.374,15 l	9.010.535,71	1.835.923,09	493,27
	Viaturas de Manutenção Etanol	1.370.250,00 l	29.213.730,00	29.213.730,00	-
Totais viaturas de manutenção			46.130.431,63	31.568.708,63	1.034,30
Total do transporte			64.424.241,41	31.729.247,55	2.357,88
Energia/carbono embutidos em materiais - Substituições parciais	Via permanente Trilhos-aço	-	61.867.800,00		3.262,68
	Via permanente Dormentes- concreto	-	3.127.950,00		417,06
	Via permanente Dormentes- aço	-	10.238.940,00		539,96
	Via permanente Terceiro trilho-aço	-	3.352.680,00		176,81
Energia/carbono embutidos em materiais - Substituições completas	4 substituições de Rodas-aço	938.880,00 kg ⁽⁴⁾	18.871.488,00		995,21
	2 substituições de Trilhos- aço	8.800.000,00 kg ⁽⁴⁾	176.880.000,00		9.328,00
	1 substituição de Dormentes- aço	1.702.960,23 kg ⁽⁴⁾	34.229.500,62		1.805,14
	1 substituição de Dormentes- concreto	13.949.247,77 kg ⁽⁵⁾	10.461.935,83		1.394,92
Total energia/carbono embutidos			319.030.294,45		17.919,78
Total			506.808.290	82.015.378	27.075

Fontes: ⁽¹⁾ METRÔ RIO (2014a). Fatores de emissão e densidade de energia de acordo com tabela 18.

5.4 Operação da infraestrutura

Foram considerados os combustíveis dos equipamentos e veículos de transporte utilizados na operação da infraestrutura, bem como a energia elétrica consumida na iluminação das estações.

5.4.1 Equipamentos e transporte - consumo de combustíveis fósseis

Foi avaliado o consumo de combustíveis fósseis consumidos nos equipamentos das subestações retificadoras de energia nas estações, resultando em 7.084 l de diesel, em 2013, nas linhas 1 e 2. Aplicando a equação (8) o total anual de diesel estimado para a Linha 4 será $(1/6) \times 7.084 = 1.180,67$ l. No ciclo de vida serão $60 \times 1.180,67 = 70.840,00$ l. A energia/emissão correspondentes, conforme equação (3) são:

Emissão: $E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = 70.840,00 \times 0,93 \times 2,60/1000 = 171,29$ tCO₂.

Energia: $E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = 70.840,00 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) = 2.503.117,23$ MJ.

Energia renovável = $70.840,00 \times (0,07 \times 33,14) = 164.334,63$ MJ.

Foram também considerados os combustíveis das viaturas responsáveis pelo deslocamento das equipes de segurança e apoio à operação das estações, atingindo nas Linhas 1 e 2, em 2013, os valores de: 2.086,82 l de diesel, 2.898,80 l de gasolina e 12.923,73 l de etanol. Aplicando a equação (8) o total anual para a Linha 4 será de: 347,80 l de diesel, 483,13 l de gasolina e 2.153,96 l de etanol. No ciclo de vida: 20.868,18 l de diesel, 28.988,01 l de gasolina e 129.237,31 l de etanol. A energia/emissão correspondente a esses combustíveis serão, aplicando a equação (2):

Emissão no ciclo de vida: $E = \sum_{i=1}^n (q \times f) + (hv1 \times rv1 \times f) + \left(\frac{d_i}{rv2}\right) \times f = 20.868,18 \times 0,93 \times 2,60/1000 + 28.988,01 \times 0,73 \times 2,22/1000 = 97,44$ tCO₂.

Energia no ciclo de vida: $E = \sum(q \times f) = 20.868,18 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) + 28.988,01 \times (0,73 \times 32,29 + 0,27 \times 22,34) + 129.237,31 \times 21,32 = 4.350.858,97$ MJ.

Energia renovável = $20.868,18 \times (0,07 \times 33,14) + 28.988,01 \times (0,27 \times 22,34) + 129.237,31 \times 21,32 = 2.978.599,33$ MJ.

5.4.2 Operação das estações - consumo de energia elétrica

Foram considerados os dados da energia elétrica consumida na iluminação das estações e outros serviços, como escadas rolantes etc. Em 2013, nas Linhas 1 e 2, o consumo foi de 44.032 MWh. O consumo estimado para a Linha 4, conforme equação (8), e considerando as perdas de 12% de transmissão e distribuição, é de: $(1/6) \times 44.032/0,88 = 8.339.393,94 \text{ kWh} = 30.021.818,18 \text{ MJ}$. Aplicando a equação (4):

Emissão anual: $E = Ec \times f = 8.339.393,94 \times 0,1355/1000 = 1.129,99 \text{ tCO}_2$.

Emissão no ciclo de vida = $1.129,99 \times 60 = 67.799,27 \text{ tCO}_2$ e energia de $60 \times 30.021.818,18 = 1.801.309.090,91 \text{ MJ}$, sendo a energia renovável = $79,30\% \times 1.801.309.090,91 = 1.428.438.109,09 \text{ MJ}$.

A tabela 35 resume os dados de emissão e energia de combustíveis fósseis e energia elétrica consumidos na operação da infraestrutura, sendo usados fatores nacionais de emissão.

Tabela 35: Emissões e energia na operação da infraestrutura da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Quantidade no ciclo de vida ⁽¹⁾	Energia no ciclo de vida (MJ)	Energia renovável no ciclo de vida (MJ)	Emissão no ciclo de vida (tCO ₂)
Equipamentos das subestações de energia (Diesel)	70.840,00 l	2.503.117,23	164.334,63	171,29
Transporte - Viaturas da operação (Diesel)	20.868,18 l	737.372,97	48.410,00	50,46
Transporte - Viaturas da operação (Gasolina)	28.988,01 l	858.146,55	174.849,88	46,98
Viaturas da operação (Etanol)	129.237,31 l	2.755.339,45	2.755.339,45	-
Total de transporte		4.350.858,97	2.978.599,33	97,44
Operação das estações - Energia elétrica	8.339.393,94 kWh	1.801.309.090,91	1.428.438.109,09	67.799,27
TOTAL CICLO VIDA		1.808.163.067	1.431.581.043	68.068

Fontes: ⁽¹⁾ METRÔ RIO (2014a). Fatores de emissão e densidade de energia de acordo com tabela 18.

5.5 Operação dos trens

A operação dos trens da Linha 4 utiliza somente energia elétrica.

Neste trabalho será aplicado o resultado do levantamento da FGV até 2040. Para os anos seguintes até 2076, fim do ciclo de vida de 60 anos, será considerado o mesmo valor de 2040. Devido à estabilização da demanda, constatada pela FGV, e à ausência de informações para os anos seguintes, esse procedimento é o mais razoável. Nenhum dos trabalhos pesquisados na revisão bibliográfica do capítulo 3 considerou um crescimento da demanda durante o ciclo de vida. De um modo geral foi estabelecida uma carga de lotação que serviu de base para os cálculos. Conforme STRIPPLE e UPPENBERG (2010), como o objetivo em um trabalho de ciclo de vida em transportes metroferroviários é apresentar uma visão balanceada da influência de cada fase, os dados do presente podem ser utilizados. Neste trabalho, contudo, devido à existência de um estudo detalhado e oficial do Governo do Estado do Rio de Janeiro, ou seja, o estudo de previsão de demanda da FGV, optou-se pela sua utilização.

5.5.1 Quantidade de PKM no ciclo de vida

A partir dos dados da FGV o procedimento desenvolvido pelo autor para a determinação da quantidade de PKM foi:

- 1- Estimar a quantidade de PKM nas 3 horas de pico matutino dos dias úteis do ano de 2016. Para isso foi utilizada a matriz origem-destino (O-D) da FGV e a matriz das distâncias entre as estações.

As tabelas 36, 37 e 38 apresentam, respectivamente, as matrizes de distâncias entre as estações, de O-D e de PKM. Esta última é o resultado do produto das duas primeiras, ou seja, foi obtida através da utilização da equação (12), permitindo a visualização dos PKM de todos os trajetos percorridos pelos passageiros.

Tabela 36: Matriz de distâncias, em km, entre as estações da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2
JOC	-----	6,108	9,428	10,2	11,265	12,339	11,732	12,339
SCO	6,108	-----	3,32	4,092	5,157	6,231	5,624	6,231
ATQ	9,428	3,32	-----	0,772	1,837	2,911	2,304	2,911
JAL	10,2	4,092	0,772	-----	1,065	2,139	3,076	2,139
NSP	11,265	5,157	1,837	1,065	-----	1,074	4,141	1,074
GOS	12,339	6,231	2,911	2,139	1,074	-----	5,215	-----
GAV	11,732	5,624	2,304	3,076	4,141	5,215	-----	5,215
L1-L2	12,339	6,231	2,911	2,139	1,074	-----	5,215	-----

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.
 NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.
 Fonte: METRÔRIO (2014a).

Tabela 37: Matriz O-D de passageiros – 2016 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-----	2.635	1.933	966	2.459	1.050	1.846	19.654	30.543
SCO	2.748	-----	2.205	910	558	1.195	979	6.093	14.688
ATQ	924	2.386	-----	235	538	270	138	1.988	6.479
JAL	418	839	90	-----	160	202	52	1.633	3.394
NSP	410	480	515	129	-----	1.119	38	2.819	5.510
GOS	504	1.067	514	387	4.495	-----	123	-----	7.090
GAV	929	712	179	51	701	277	-----	601	3.450
L1-L2	4.523	4.745	3.908	2.817	6.546	-----	1.978	-----	24.517
TOTAL	10.456	12.864	9.344	5.495	15.457	4.113	5.154	32.788	95.671

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.
 NSP = N. Sa. da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.
 Fonte: Adaptado de FGV (2011).

Na matriz O-D o cruzamento da linha com a coluna representa a quantidade de passageiros cuja viagem começou na estação designada pela linha e terminou na estação designada pela coluna. Por exemplo: 2.635 passageiros embarcaram em JOC e desembarcaram em SCO.

Tabela 38: Matriz PKM – 2016 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-----	16.095	18.224	9.853	27.701	12.956	21.657	242.511	348.997
SCO	16.785	-----	7.321	3.724	2.878	7.446	5.506	37.965	81.624
ATQ	8.711	7.922	-----	181	988	786	318	5.787	24.694
JAL	4.264	3.433	69	-----	170	432	160	3.493	12.022
NSP	4.619	2.475	946	137	-----	1.202	157	3.028	12.564
GOS	6.219	6.648	1.496	828	4.828	-----	641	-----	20.660
GAV	10.899	4.004	412	157	2.903	1.445	-----	3.134	22.954
L1-L2	55.809	29.566	11.376	6.026	7.030	-----	10.315	-----	120.123
TOTAL	107.306	70.144	39.845	20.906	46.498	24.266	38.755	295.918	643.638

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

O resultado final em 2016 é de 643.638 PKM nas 3 horas de pico matutino dos dias úteis.

- 2- Estimar a quantidade de PKM das 3 horas de pico vespertino e das demais horas dos dias úteis. Para isso foi utilizada a mesma proporção entre essas faixas de horário observadas nas Linhas 1 e 2. Assim obtém-se o total de PKM de um dia útil.

As proporções observadas nas Linhas 1 e 2 foram: pico matutino = 20,70% do dia, pico vespertino = 25,80% do dia e demais horários fora dos picos = 53,50% do dia (METRÔ RIO, 2014a). Assim chega-se ao valor de 3.109.362 PKM para todo o dia útil.

- 3- Estimar a quantidade de PKM dos sábados, domingos e feriados, utilizando-se a mesma proporção existente entre esses tipos de dias, em relação aos dias úteis, nas Linhas 1 e 2.

As proporções observadas nas Linhas 1 e 2 foram: sábados = 39% do dia útil, domingos = 21% do dia útil e feriados = 23% do dia útil (METRÔ RIO, 2014a). Assim chega-se ao valor de 1.200.846 PKM aos sábados, 663.460 PKM aos domingos e 709.021 PKM aos feriados.

- 4- Estimar a quantidade de PKM anual considerando os valores de dias úteis, sábados, domingos e feriados em 2016. Obtém-se então o valor de 886.884.302 PKM em 2016. Contudo, como o funcionamento da Linha 4 começará no segundo semestre de 2016, será utilizado a metade desse valor, 443.442.151 PKM.
- 5- Repetir os procedimentos de 1 a 4 para os anos de 2026, 2036 e 2040.
- 6- Calcular o crescimento médio de PKM entre 2016 e 2026 e aplicá-lo aos anos intermediários de 2017 a 2025.
- 7- Calcular o crescimento médio de PKM entre 2026 e 2036 e aplicá-lo aos anos intermediários de 2027 a 2035.
- 8- Calcular o crescimento médio de PKM entre 2036 e 2040 e aplicá-lo aos anos intermediários de 2037 a 2039.
- 9- Aplicar o PKM de 2040 aos anos seguintes até o fim do ciclo de vida.

A tabela 39 mostra alguns resultados do levantamento de PKM no ciclo de vida. O detalhamento completo está no Apêndice 2.

Tabela 39: Total de PKM da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

2º sem. 2016	2026	2036	2040	-----	1º sem. 2076	TOTAL Ciclo de Vida
PKM						
443.503.829	1.187.767.243	1.470.812.762	1.608.928.623	-----	804.464.311	87.747.683.773

Fonte: Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

5.5.2 Energia consumida e emissões produzidas na operação de trens

A Concessão Metroviária do Rio de Janeiro, operadora das Linhas 1 e 2, será também a operadora da Linha 4. A programação da grade de partidas da operação dos trens já foi estabelecida para os trechos Barra – Ipanema e Gávea – Ipanema, de acordo com as cargas dentro das faixas horárias. Com isso a quantidade de carro-km pôde ser calculada com a finalidade de se estimar a quantidade de energia elétrica que será consumida na

operação dos trens. Considerando os valores anuais estabelecidos de partidas de trens para os dois trechos e suas respectivas distâncias a aplicação da equação (9) resulta em:

$$c = p \times d \times n = (149.220 \times 12,339 + 97.812 \times 5,215) \times 6 = 14.107.891 \text{ carro-km.}$$

A tabela 40 resume, por tipo de dia e por trecho, essa estimativa.

Tabela 40: Total anual de carro-km na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Dia útil	Sábados	Domingos/Feriados
Trecho Barra – General Osório	35.536	20.433	16.880
Trecho Gávea – General Osório	8.636	8.636	7.134
Totais parciais no ano	11.131.435	1.511.610	1.464.846
Total anual de carro-km Barra-Gen Osório = 11.047.354			
Total anual de carro-km Gávea-Gen Osório = 3.060.537			
Total anual de carro-km da Linha 4 = 14.107.891			

Fonte: Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

A grade horário estabelecida e a conseqüente quantidade de carro-km dela derivada serão analisadas em conjunto com as projeções feitas a partir do levantamento da FGV para a verificação da carga de lotação do sistema.

Para calcular o valor anual de LKM AW3 (oferta de lugares) pode-se partir da quantidade de carro-km de cada trecho (Barra - Gen. Osório e Gávea - Gen. Osório, conforme tabela 40) e multiplicar por 1.820/6 (lotação AW3 de cada carro).

Barra - Gen. Osório: $11.047.354 \times 1820/6 = 3.351.030.556$ LKM AW3.

Gávea - Gen. Osório: $3.060.537 \times 1820/6 = 928.363.036$ LKM AW3.

Total LKM AW3 = 4.279.393.591.

No ciclo de vida o total de LKM AW3 será de $60 \times 4.279.393.591 = 256.763.615.472$.

A carga de lotação é calculada pela equação (11), sendo, no ciclo vida, de:

$$PKM / LKM AW3 = 87.747.683.773 / 256.763.615.472 = 34,17\%.$$

A tabela 41 mostra a carga de lotação em alguns anos do ciclo de vida e a carga média em todo o ciclo de vida.

Tabela 41: Evolução da carga de lotação no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Demanda – PKM real	Oferta – LKM AW3	Carga de lotação
2.sem. 2016	443.503.829	2.139.696.796	20,73%
2026	1.187.767.243	4.279.393.591	27,76%
2036	1.470.812.762	4.279.393.591	34,37%
2040	1.608.928.623	4.279.393.591	37,60%
2046	1.608.928.623	4.279.393.591	37,60%
2056	1.608.928.623	4.279.393.591	37,60%
2066	1.608.928.623	4.279.393.591	37,60%
1º sem. 2076	804.464.311	2.139.696.796	37,60%
TOTAL CICLO VIDA	87.747.683.773	256.763.615.472	34,17%

Fonte: Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

Testes de campo realizados no Metrô do Rio de Janeiro em 2014 (METRÔ RIO, 2014a) indicaram que o consumo de cada carro da CRC varia de 2,97 a 4,82 kWh por quilômetro percorrido, sendo o primeiro valor para o carro vazio e o segundo valor para o carro em horário superlotado, com 357 passageiros. Valores intermediários estão associados à carga de passageiros. O valor correspondente à carga de lotação média no ciclo de vida, de 34,17%, é 3,62 kWh (METRÔ RIO, 2014a).

A utilização desse valor, 3,62 kWh por carro-km percorrido, acarretará um consumo de energia total no ciclo de vida de 60 anos, aplicando a equação (10) e considerando as perdas de T&D de 12%, de:

$$En = c \times E_{ckm} = (60 \times 14.107.891 \times 3,62/0,88) = 3.482.084.006 \text{ kWh} = 3.482.084.006 \times 3,6 = 12.535.502.421 \text{ MJ}, \text{ sendo a energia renovável} = 79,30\% \times 12.535.502.421,27 = 9.940.653.420 \text{ MJ}.$$

Aplicando o fator de emissão da eletricidade em 2014 (0,1355 tCO₂/MWh) a emissão operacional em decorrência do uso da eletricidade projetada para o ciclo de vida atingirá o valor total, aplicando a equação (4), de:

$$E = Ec \times f = 3.482.084.086 \times 0,1355/1000 = 471.822 \text{ tCO}_2.$$

Cada ano do ciclo de vida terá uma emissão de $471.822/60 = 7.864 \text{ tCO}_2$.

5.6 Consolidação do consumo de energia e emissões produzidas no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

Os dados calculados para a energia consumida e emissões produzidas no ciclo de vida da Linha 4 estão resumidos, por fases do ciclo de vida, na tabela 42.

Tabela 42: Energia e emissão no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Construção da Infraestrutura	Fabricação dos trens	Manutenção	Operação da Infraestrutura	Operação dos trens	Total Ciclo de vida
Energia Renovável (MJ)	550.010.022	1.217	82.015.378	1.431.581.043	9.940.653.420	12.004.261.080
Energia não Renovável (MJ)	6.670.024.540	463.675.224	424.792.913	376.582.024	2.594.849.001	10.529.923.702
Energia Total (MJ)	7.220.034.562	463.676.441	506.808.290	1.808.163.067	12.535.502.421	22.534.184.782
Emissões produzidas de CO ₂ (tCO ₂)	607.891	44.895	27.075	68.068	471.822	1.219.751

5.7 Resultado do Inventário do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

Os resultados do ICV na unidade funcional escolhida (1 PKM) e apresentados por fases do ciclo de vida estão na Tabela 43. Os detalhes dos cálculos encontram-se no Apêndice 3.

Tabela 43: Resultados do ICV por PKM e por fase do ciclo de vida.

Resultados do ICV	Construção Infraestrutura	Fabricação Trens	Manutenção	Operação Infraestrutura	Operação Trens	Total Ciclo Vida
Consumo de materiais (kg)	1,58E-02	8,09E-05	3,80E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,63E-02
Consumo de energia Energia total renovável (kJ)	6,27	0,00	0,93	16,31	113,29	136,80
Consumo de energia Energia total não renovável (kJ)	76,01	5,28	4,84	4,29	29,57	120,00
Consumo de energia Energia total (kJ)	82,28	5,28	5,78	20,61	142,86	256,81
Consumo de energia Combustíveis - equipamentos (kJ)	9,17	2,35	0,77	0,03	0,00	12,32
Consumo de energia Combustíveis - transporte (kJ)	6,08	0,28	0,71	0,05	0,00	7,12
Consumo de energia Eletricidade (kJ)	6,70	0,28	0,66	20,53	142,86	171,03
Consumo de energia embutida - Materiais (kJ)	60,33	2,38	3,64	0,00	0,00	66,34
Emissões Totais de CO ₂ (gCO ₂)	6,93	0,51	0,31	0,78	5,38	13,90
Emissões de CO ₂ Combustíveis – equipamentos (gCO ₂)	0,63	0,22	0,05	0,00	0,00	0,91
Emissões de CO ₂ Combustíveis – transporte (gCO ₂)	0,41	0,02	0,03	0,00	0,00	0,46
Emissões de CO ₂ Eletricidade (gCO ₂)	0,23	0,08	0,02	0,77	5,38	6,49
Emissões de CO ₂ Materiais (gCO ₂)	5,65	0,19	0,20	0,00	0,00	6,05

5.8 Interpretação dos resultados do ICV

Como mostrado na tabela 44, a fase com maior participação nas emissões de CO₂ do ciclo de vida é a construção (49,84%), seguida da operação dos trens (38,68%), tendo as demais fases pouca participação.

Tabela 44: Emissões de CO₂ e uso de energia por PKM por fases do ciclo de vida da Linha 4.

Emissões	Infraestrutura		Trens		Manutenção	Total
	Construção	Operação	Manufatura	Operação		
CO ₂ (gCO ₂ /PKM)	6,93	0,78	0,51	5,38	0,31	13,90
Emissões CO ₂ (% do ciclo de vida)	49,84%	5,58%	3,68%	38,68%	2,22%	100,00%
Energia (kJ/PKM)	82,28	20,61	5,28	142,86	5,78	256,81
Energia (% do ciclo de vida)	32,04%	8,02%	2,06%	55,63%	2,25%	100,00%
Energia Renovável (% do ciclo de vida)	2,44%	6,35%	0,00%	44,11%	0,36%	53,27%
Energia Renovável (% da fase do ciclo de vida)	7,62%	79,17%	0,00%	79,30%	16,18%	53,27%

A fase com maior consumo de energia é a operação dos trens (55,63%), seguida da construção da infraestrutura (32,04%). Este resultado é da mesma ordem de magnitude daquele encontrado por STRIPPLE e UPPENBERG (2010) na LCA da Bothnia Line na Suécia (52,6% e 23,36%, respectivamente). As fases onde há um maior uso de fontes renováveis são as da operação da infraestrutura e dos trens, que utilizam cerca de 79% destas fontes. Através do ciclo de vida completo, pelo menos 53,27% da energia usada provém de fontes renováveis. Este cálculo refere-se aos combustíveis renováveis brasileiros (etanol e biodiesel) e à participação de fontes renováveis na produção de eletricidade no Brasil. A participação da energia renovável na energia embutida nos materiais não foi considerada, devido a falta de dados.

A Figura 28 mostra, nas emissões produzidas, a participação dos recursos consumidos na Linha 4, em cada fase do ciclo de vida e no ciclo de vida completo.

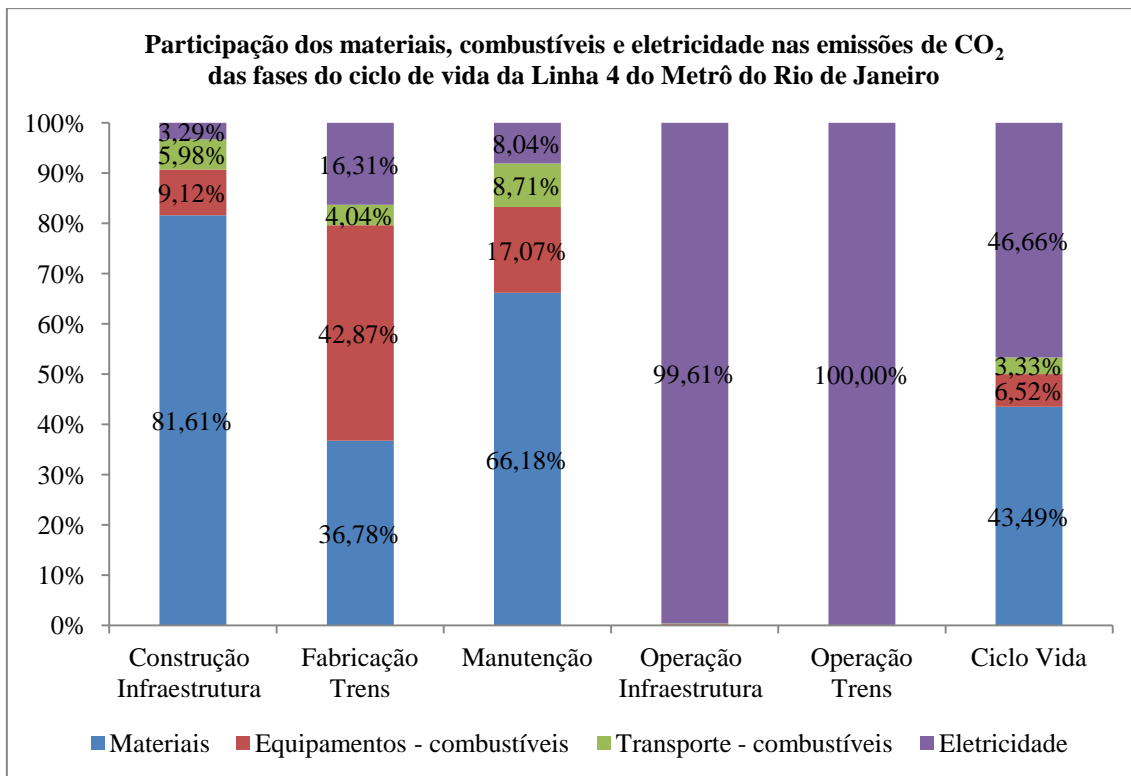


Figura 28: Emissões produzidas na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

As emissões do carbono embutido nos materiais são predominantes durante a construção da infraestrutura (81,61%) e manutenção (66,18%). Durante a fabricação dos trens, o mais alto nível de emissões é devido ao combustível utilizado no processo (42,87%), enquanto a eletricidade é predominante durante a operação da infraestrutura (99,61%) e dos trens (100%). Durante o ciclo de vida completo a eletricidade (46,66%) e os materiais (43,49%) são responsáveis pela maior parte das emissões.

A Figura 29 mostra a participação dos materiais, combustíveis e eletricidade no uso de energia de cada fase do ciclo de vida.

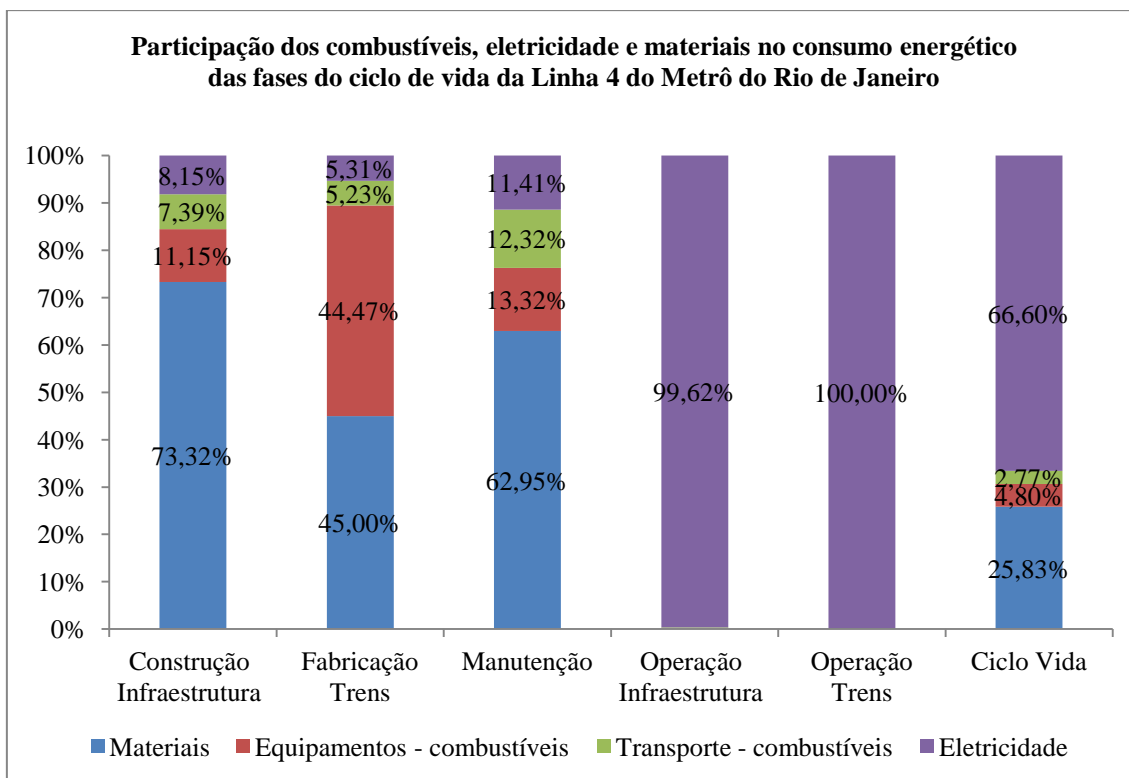


Figura 29: Energia consumida na construção da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Durante a fase de construção, a fonte predominante de consumo de energia é o conjunto dos materiais usados (73,32%). Durante a fabricação dos trens, o maior uso de energia provém dos materiais usados (45,00%), seguido do consumo de combustíveis (44,47%). O transporte representa uma pequena participação do uso da energia (5,23%), apesar de requerer longas viagens de navio. Durante a manutenção, a maior participação é dos materiais (62,95%). A operação da infraestrutura é altamente dependente da eletricidade (99,62%), muito utilizada nas estações, sendo as emissões dos demais componentes irrelevantes. A operação dos trens é totalmente dependente da eletricidade. Examinando o ciclo de vida completo, pode ser observado que a fonte predominante de energia consumida é a eletricidade (66,60%), com participação 2,5 vezes maior que a energia embutida dos materiais (25,83%), enquanto no que diz respeito às emissões, a participação da eletricidade (46,66%) e dos materiais (43,49%) são similares. Este resultado reflete a grande participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. O Plano Decenal de Energia do governo brasileiro (PDE2023, 2015) estabelece que, até 2023, a matriz energética brasileira deve aumentar a participação das fontes renováveis. Outros estudos (ANDRADE GUERRA *et al.*, 2015; PEREIRA JR. *et al.*, 2013) sugerem o mesmo resultado, contudo, utilizando uma abordagem mais conservadora, foi considerado o fator de emissão constante e igual ao de 2014.

As fases não operacionais causaram um acréscimo nas emissões, sobre a fase operacional, de $(13,90 - 5,38) / 5,38 = 158\%$. Esse resultado é compatível com os encontrados por CHESTER (2008) nos sistemas metroviários de São Francisco (acréscimos sobre a fase operacional em BART de 118% e em MUNI de 146%). A tabela 45 possibilita a visualização da relevância do valor de emissão por PKM nos seus componentes: materiais, combustíveis fósseis e eletricidade, considerados ao longo do ciclo de vida.

Tabela 45: Participação da emissão em gCO₂/PKM dos recursos materiais e energéticos do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Cimento	Concreto	Aço	Outros materiais	Combustíveis fósseis	Eletricidade	TOTAL
gCO ₂ /PKM	3,37	0,87	1,73	0,07	1,37	6,49	13,90
Participação %	24,23%	6,29%	12,44%	0,53%	9,85%	46,66%	100,00%

Esse resultado mostra que o que mais influencia a emissão por PKM é a eletricidade, e, em menor escala, a utilização do cimento e do aço.

A tabela 46 possibilita a visualização da relevância do valor de energia por PKM nos seus componentes: materiais, combustíveis fósseis e eletricidade, considerados em todo o ciclo de vida.

Tabela 46: Participação da energia em kJ/PKM dos recursos materiais e energéticos do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Cimento	Concreto	Aço	Outros materiais	Combustíveis fósseis	Eletricidade	TOTAL
kJ/PKM	26,78	6,56	31,79	1,21	19,44	171,03	256,81
Participação %	10,43%	2,55%	12,38%	0,47%	7,57%	66,60%	100,00%

A eletricidade tem a maior relevância, assim como na emissão, mas agora o aço passa a ser o segundo e o cimento o terceiro em importância, enquanto na emissão de CO₂ o cimento era o segundo e o aço o terceiro.

5.9 Análise de Sensibilidade

Construído o sistema metroferroviário e colocado em operação, as variáveis que influenciam o consumo de energia e a emissão produzida e evitada na operação do sistema são a carga de lotação, ou seja, a ocupação do veículo, e a matriz elétrica.

5.9.1 Sensibilidade em relação à carga de lotação

Conforme seção 5.5.2 o valor de consumo energético por carro-km correspondente à carga média no ciclo de vida da Linha 4 é 3,62 kWh/carro-km. Esse valor pode aumentar ou diminuir de acordo com a carga de passageiros. Consequentemente o consumo energético e as emissões de CO₂ decorrentes da operação dos trens irão variar de acordo com a carga. A influência da carga de lotação nos resultados de emissão de CO₂ e energia, por PKM, é mostrada nas figuras 30 e 31. O Apêndice 4 mostra o detalhamento dos valores que originaram os gráficos dessas figuras.

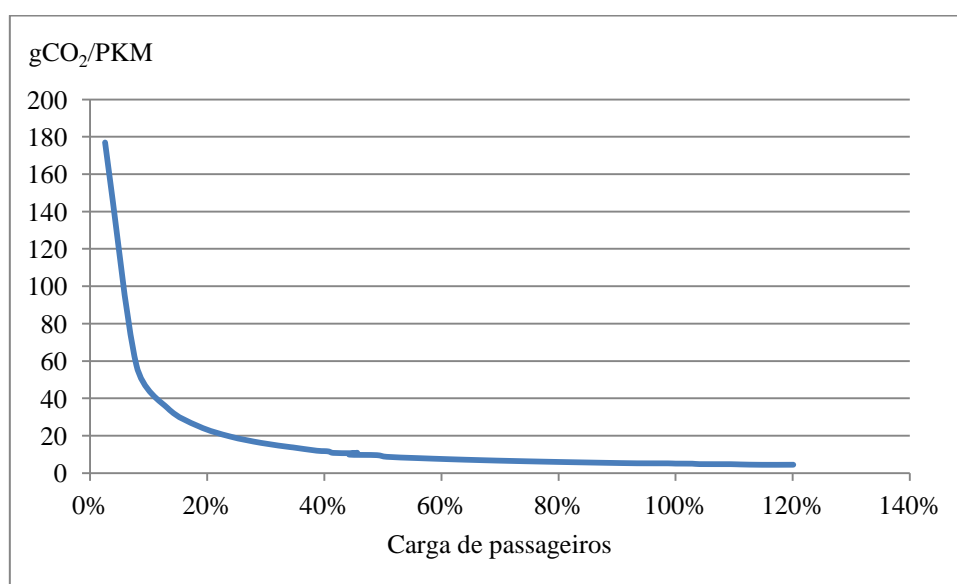


Figura 30: Emissão no ciclo de vida em função da carga de lotação da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

A influência da carga de lotação é maior para cargas pequenas. A redução da carga de lotação para valores abaixo de 10% aumenta significativamente a emissão por PKM, enquanto a superlotação não reduz significativamente a emissão.

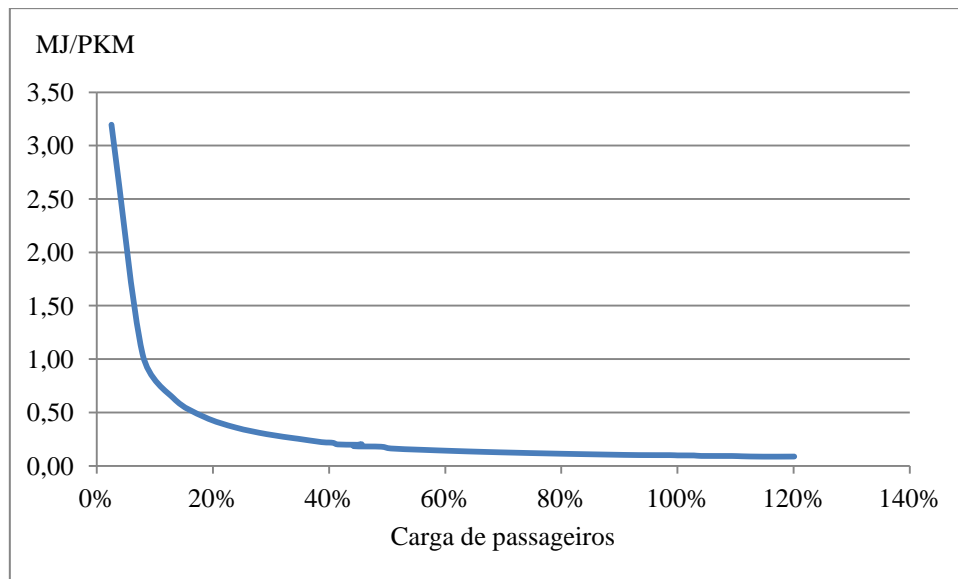


Figura 31: Energia no ciclo de vida em função da carga de lotação da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Da mesma maneira que nas emissões a influência da carga de lotação na energia é maior para cargas pequenas.

5.9.2 Sensibilidade em relação à matriz elétrica

A variação do fator de emissão da eletricidade do SIN só produzirá efeito na emissão de CO₂, não afetando o consumo de energia. A sensibilidade da emissão de CO₂ no ciclo de vida em relação ao fator de emissão da eletricidade está representada no gráfico da figura 32.

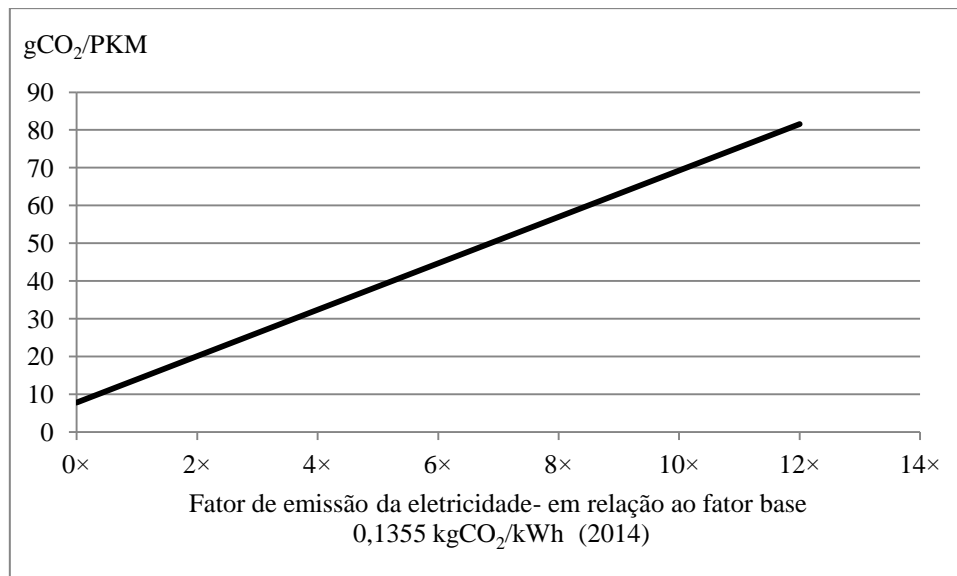


Figura 32: Sensibilidade da emissão no ciclo de vida em relação ao fator de emissão da eletricidade.

O fator de emissão base, tomado como referência, é o fator de 2014. Para esse fator (0,1355 kgCO₂/kWh) a emissão é de 13,90 gCO₂/PKM, como apurado no item 5.7. Se o fator diminuir a emissão diminuirá, se o fator aumentar a emissão aumentará, como visualizado no gráfico. Assim, por exemplo, se o fator se tornar 12 vezes maior a emissão ficará em torno de 80 gCO₂/PKM. Porém ainda que o fator fique nulo, o que corresponderia a uma matriz totalmente “limpa”, ainda assim haveria emissão ao longo do ciclo de vida. Conforme o fator tende a zero a emissão tende a um valor mínimo de 7,75 gCO₂/PKM, valor que corresponde a soma de todas as emissões não operacionais (Ver tabela 44).

5.10 Emissão evitada no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

A partir do estudo de previsão de demanda realizado pela FGV foi determinada a quantidade de PKM da Linha 4 em cada ano do ciclo de vida, conforme item 5.5.1. De acordo com esse estudo uma grande proporção de usuários que utilizam ônibus e automóveis nos deslocamentos cobertos pela Linha 4 migrariam para o sistema metroviário, sendo essa proporção de 48% de usuários de ônibus e 40% de usuários de automóveis. Os usuários atraídos pela Linha 4 seriam então 28% provenientes de automóveis e 72% provenientes de ônibus (figura 33).

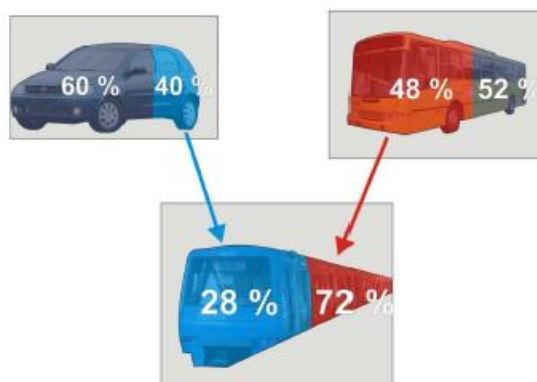


Figura 33: Atração de usuários pela disponibilidade da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Fonte: FGV (2011).

A partir desses dados o procedimento desenvolvido pelo autor, conforme método mostrado na seção 4.4 e figura 21, foi:

1- Calcular a quantidade, no ciclo de vida, da quantidade de PKM correspondente a cada meio de transporte substituído, ou seja, ônibus e automóveis. Foi considerado uma lotação de 80 passageiros nos ônibus nos horários de pico e 40 passageiros nos demais horários e 1 passageiro nos automóveis. A proporção de cada tipo de automóvel e seu combustível foi levantada no cadastro do DETRAN (2015) referente ao Município do Rio de Janeiro. Foram retirados da quantidade de combustível o etanol anidro presente na gasolina e o biodiesel presente no diesel, conforme as proporções vigentes em 2015 (27% de etanol anidro e 7% de biodiesel), considerando-se que essas emissões são neutras, porque já foram ou serão absorvidas no plantio das suas fontes vegetais. Da mesma maneira não foram computadas as emissões de etanol hidratado. Para os veículos que também utilizam GNV foi assumido que utilizarão esse combustível. Também foi considerado o fato da existência de automóveis *flex* (31,55% da frota), sendo estimada a utilização da gasolina ou etanol hidratado pelos automóveis *flex*. Para essa estimativa foi utilizada a equação:

$$\% \text{ etanol} = - 3,6945 \times (\text{preço etanol} / \text{preço gasolina}) + 3,0219 \quad (17)$$

desenvolvida por COPPETEC (2011) e válida para uma relação de preços entre o etanol e a gasolina entre 60% e 80%. Conforme ANP (2014) os preços desses combustíveis no município do Rio de Janeiro em todos os anos apurados sempre se mantiveram nessa faixa. Foi utilizado o valor apurado em 2014 (0,7833), resultando a aplicação da

equação (17) em 12,81% para o uso de etanol nos carros flex. Assim o uso de etanol na frota é de $31,55\% \times 12,81\% = 4,04\%$. Como 5,60% da frota usa apenas etanol ao final o uso de etanol representa 9,64%. O uso de gasolina representa 68,95% da frota ($31,55\% \times 87,19\% = 27,51\%$ proveniente de carros flex + 41,44% proveniente de carros a gasolina). O uso de GNV representa 21,41% da frota. Assim a aplicação da equação (13) resulta em:

Auto gasolina: $PKM_v = \% v \times PKM_r = 68,95\% \times 28\% \times 87.747.683.773 = 16.940.567.829$.

Auto etanol: $PKM_v = \% v \times PKM_r = 9,64\% \times 28\% \times 87.747.683.773 = 2.368.485.480$.

Auto GNV: $PKM_v = \% v \times PKM_r = 21,41\% \times 28\% \times 87.747.683.773 = 5.260.298.147$.

Ônibus diesel: $PKM_v = \% v \times PKM_r = 72\% \times 87.747.683.773 = 63.178.332.317$.

2- Determinar os VKM de cada tipo de transporte substituído no ciclo de vida e a quantidade de cada combustível que seria consumido. Aplicando a equação (14) os VKM de cada tipo de transporte substituído serão:

Auto gasolina: $VKM_v = PKM_v / l = 16.940.567.829 / 1 = 16.940.567.829$.

Auto etanol: $VKM_v = PKM_v / l = 2.368.485.480 / 1 = 2.368.485.480$.

Auto GNV: $VKM_v = PKM_v / l = 5.260.298.147 / 1 = 5.260.298.147$.

Ônibus diesel: $VKM_v = PKM_v / l = (63.178.332.317 \times 46,50\%) / 80) + (63.178.332.317 \times 53,50\%) / 40) = 1.212.234.251$ (Foram utilizadas as mesmas proporções de PKM das horas de pico e fora de pico das Linhas 1 e 2).

As quantidades de combustíveis são calculadas pela equação (15):

Gasolina C: $q = VKM_v / r = 16.940.567.829 / 10 = 1.694.056.783$ l.

Gasolina A = $73\% \times 1.694.056.783 = 1.236.661.452$ l.

Etanol anidro = $27\% \times 1.694.056.783 = 457.395.331$ l.

Etanol hidratado: $q = VKM_v / r = 2.368.485.480 / 8,65 = 273.813.350$ l.

GNV: $q = VKM_v / r = 5.260.298.147 / 12 = 438.358.179$ m³.

Diesel - mistura: $q = VKM_v / r = 1.212.234.251 / 2,3 = 527.058.370$ l.

Diesel = $93\% \times 527.058.370 = 490.164.284$ l.

Biodiesel = $7\% \times 527.058.370 = 36.894.086$ l.

3- Determinar a consequente emissão que seria evitada.

Aplicando a equação (16) a emissão evitada de cada combustível e a emissão total são iguais a:

$$E_{ev} = (q \times f) / 1000$$

$$\text{Gasolina} = (1.236.661.452 \times 2,22) / 1000 = 2.745.388 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{GNV} = (438.358.179 \times 2,06) / 1000 = 903.018 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Diesel} = (490.164.284 \times 2,60) / 1000 = 1.274.427 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Total: } 4.922.833 \text{ tCO}_2.$$

A aplicação das fórmulas foi feita considerando todo o ciclo de vida e os resultados obtidos se referem ao período total de 60 anos. Para a obtenção de resultados anuais a equação (13), aplicada na etapa 1, deveria utilizar o PKM anual, que foi desenvolvido na seção 5.5.1 e cujos valores estão no Apêndice 2.

Um resumo dos resultados obtidos durante os 60 anos do ciclo de vida são mostrados na tabela 47. O detalhamento completo, ano a ano, está no Apêndice 5.

Tabela 47: Emissão evitada na operação dos trens durante o ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Emissão evitada (tCO ₂)						
2º sem. 2016	2026	2036	2046	2056	2066	1º sem. 2076
24.882	66.636	82.516	90.264	90.264	90.264	45.132
EMIÇÃO EVITADA TOTAL NO CICLO DE VIDA: 4.922.833						

Na realidade a emissão evitada é maior devido que não está sendo considerado o fato de que a matriz origem-destino da FGV constatou que muitas viagens que começam ou terminam na Linha 4 têm como destino ou origem uma estação das Linhas 1 ou 2, ou seja, essas viagens terão um valor de PKM e VKM maior que o designado nos cálculos, onde só foi considerado o trecho percorrido dentro da Linha 4. Outro fator que não foi considerado e que aumentaria o valor da emissão evitada foi o efeito do congestionamento (fator *congestion relief*). O percurso da Linha 4 é um trecho de grande nível de congestionamento, aumentando a queima de combustível.

5.11 Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

Comparando-se as emissões acumuladas ao longo do ciclo de vida, tanto as produzidas quanto as evitadas, constata-se um ganho líquido de emissão evitada, conforme tabela 48.

Tabela 48: Emissões evitadas líquidas no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Produzida	Evitada	Evitada Líquida
Emissão (tCO ₂)	1.219.751	4.922.833	3.703.082

Todavia essa informação não indica a partir de que ano as emissões evitadas acumuladas compensam as emissões produzidas acumuladas. Para determinar esse instante, denominado “ponto de recuperação”, foram acumuladas, ano a ano, as emissões produzidas e as emissões evitadas. As emissões da construção da infraestrutura e da fabricação dos 15 trens já terão ocorrido antes do início da operação do sistema. As emissões dos 15 trens substitutos, da manutenção e da operação da infraestrutura ocorrerão ao longo do ciclo de vida, mas foram acumuladas no início do ciclo de vida, por terem menor representatividade e para permitir que a operação dos trens seja analisada em separado. A esse valor inicial de emissão produzida (construção da infraestrutura, fabricação dos trens, manutenção e operação da infraestrutura = 747.929 tCO₂, conforme tabela 42) foi acumulada anualmente a emissão produzida pela operação dos trens (no valor aproximado de 7.864 tCO₂, conforme item 5.5.2). Da mesma maneira a emissão evitada foi acumulada, ano a ano. Quando a emissão evitada acumulada ultrapassa a emissão produzida acumulada terá sido atingido o ponto de recuperação, ou seja, as emissões produzidas foram compensadas pelas emissões evitadas e, a partir daquele ano, haverá um ganho líquido de emissão evitada. A tabela 49 mostra o ano em que foi atingido o ponto de recuperação. O Apêndice 6 mostra os dados de emissões produzidas e evitadas ao longo de todo o ciclo de vida.

Tabela 49: Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	Emissão Produzida na operação dos trens	Emissão Evitada	Emissão total Produzida Acumulada	Emissão Evitada Acumulada
2º Semestre 2016	3.932	24.882	751.861	24.882
2017	7.864	51.450	759.725	76.332
2018	7.864	53.138	767.588	129.470
2019	7.864	54.825	775.452	184.295
2020	7.864	56.512	783.316	240.807
2021	7.864	58.200	791.179	299.007
2022	7.864	59.887	799.043	358.894
2023	7.864	61.574	806.907	420.468
2024	7.864	63.262	814.770	483.730
2025	7.864	64.949	822.634	548.678
2026	7.864	66.636	830.498	615.315
2027	7.864	68.224	838.361	683.539
2028	7.864	69.812	846.225	753.351
2029	7.864	71.400	854.089	824.751
2030	7.864	72.988	861.953	897.739

O resultado obtido foi que seriam necessários 14 anos para se atingir o ponto de recuperação. A figura 34 mostra uma representação gráfica do ponto de recuperação. O Apêndice 6 mostra os valores, em cada ano do ciclo de vida, das emissões acumuladas, produzidas e evitadas, utilizadas para a criação desse gráfico.

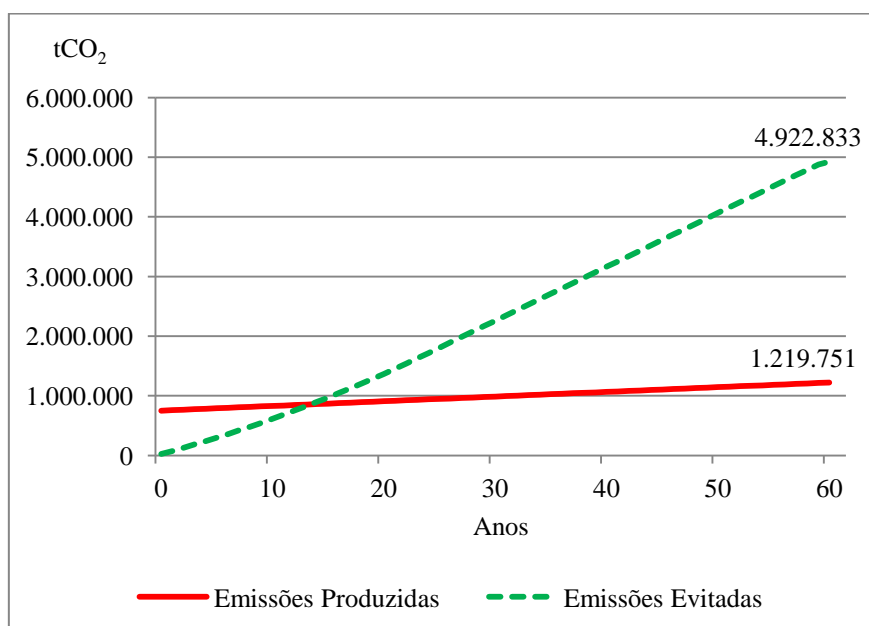


Figura 34: Ponto de recuperação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

5.11.1 Valores limites do fator de emissão da eletricidade e da carga de lotação

Conforme aumenta o valor do fator de emissão da eletricidade maior será o tempo necessário para se atingir o ponto de recuperação das emissões produzidas. O valor limite máximo do fator para o qual o ponto de recuperação só será atingido ao final do ciclo de vida de 60 anos, conforme mostrado na figura 35, será:

$$F_l = (E_{eva} - E_{pno}) \times 1000 / kWh_a$$

sendo: F_l - Fator limite de emissão da eletricidade, E_{eva} - Emissão evitada acumulada, E_{pno} - Emissão produzida não operacional e kWh_a - kWh acumulado.

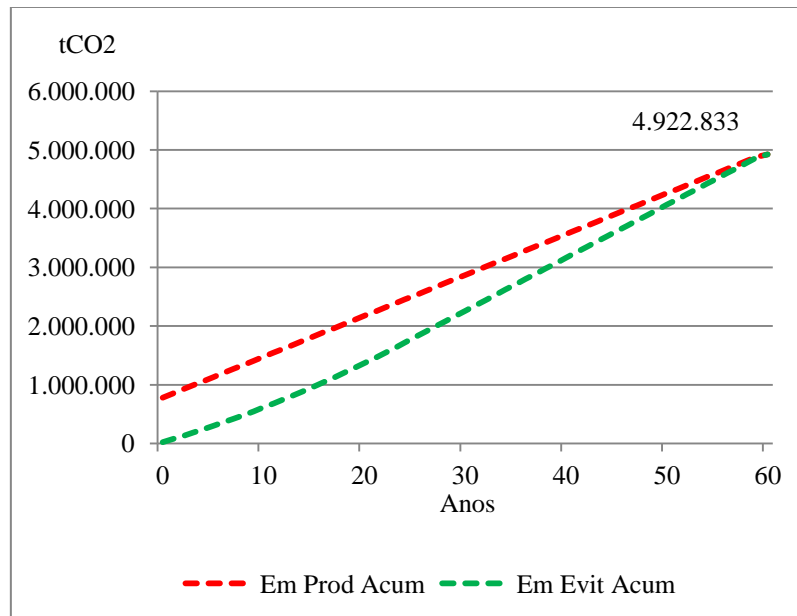


Figura 35: Ponto de recuperação das emissões ao final do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, correspondente ao fator máximo de emissão da eletricidade.

O valor de kWh_a , considerando perdas de T&D de 12%, é dado por $14.107.891 \text{ carro-km} \times 3,62 \text{ kWh/carro-km} \times 60 \text{ anos}/0,88 = 3.482.084.006 \text{ kWh}$. O valor de E_{pno} é de 747.929 tCO_2 e o de E_{eva} é $4.922.833 \text{ tCO}_2$. O fator limite calculado é de $(4.922.833 - 747.929) \times 1000 / 3.482.084.006 = 1,1989 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$. Esse valor representa um aumento de 784,80% em relação ao fator base de 2014. Se o aumento médio do fator de emissão da eletricidade for maior que esse valor a compensação das emissões produzidas não será atingida no ciclo de vida de 60 anos. Contudo esse valor limite do fator parece improvável de ser atingido. Como referência, na Austrália, país onde o carvão é abundante e onde as fontes de combustíveis fósseis representam 87% da matriz

elétrica (sendo 64% carvão) (EIA, 2015), o fator de emissão médio histórico flutua anualmente em torno de 0,8 kgCO₂/kWh (CCA, 2013). Ainda que possa haver, para Brasil e Austrália, diferenças metodológicas na apuração do fator e diferenças de rendimentos das usinas, há uma evidência que o fator limite calculado só seria atingido numa situação de extrema degradação da matriz elétrica brasileira.

A carga de lotação, por sua vez, influi na emissão evitada. Diminuindo a carga diminui a quantidade de PKM e consequentemente diminui a emissão evitada. O valor limite mínimo da emissão evitada no ciclo de vida para que o ponto de recuperação seja atingido ao seu final, conforme figura 36, é o valor da emissão total produzida. Assim a carga mínima limite correspondente é:

$$Carga_{lim} = (E_{prod} \times Carga_{base}) / E_{evit}$$

sendo E_{prod} - Emissão produzida, E_{evit} - Emissão evitada e $Carga_{base}$ - Carga de referência.

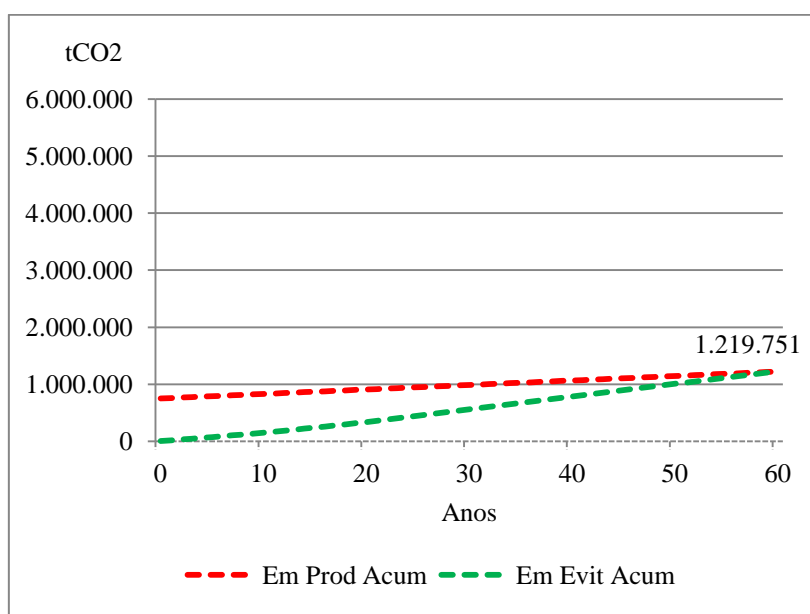


Figura 36: Ponto de recuperação das emissões ao final do ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, correspondente à carga de lotação mínima.

Como a carga calculada para a Linha 4 é 34,17%, a emissão evitada 4.922.833 tCO₂ e a emissão produzida 1.219.751 tCO₂, a carga correspondente a uma emissão evitada que iguale a produzida é:

$$Carga_{lim} = (34,17\% \times 1.219.751) / 4.922.833 = 8,47\%$$

Valores de carga médios, no ciclo de vida, menores que 8,47%, não conseguirão atingir a compensação das emissões produzidas.

5.12 Possibilidades de mitigação das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro

As maiores contribuições para o resultado final de 13,90 gCO₂/PKM no ciclo de vida de 60 anos devem-se, conforme tabela 45, ao cimento (24,23%), ao aço (12,44%) e, principalmente, à eletricidade (46,66%). Esses são, portanto, os elementos que mais podem contribuir para a redução das emissões, através de aperfeiçoamentos nos processos de fabricação (cimento e aço) e geração de energia (eletricidade).

5.12.1 Mitigação no cimento

O cimento é um aglomerante hidráulico composto predominantemente por silicatos de cálcio, aluminato de cálcio e ferroaluminato de cálcio, sendo obtido pela moagem do clínquer, que é um material sinterizado granular cuja fabricação envolve mineração das matérias primas, preparação para inserção no forno (britagem, pré-homogeneização e moagem) e produção do clínquer em forno rotativo a aproximadamente 1.450 °C. As principais matérias-primas utilizadas são o calcário e a argila. No ciclo de vida do cimento 95% das emissões de CO₂ ocorrem na produção do clínquer, compostas de uso da energia (38%) e descarbonatação (57%) (LIMA, 2010). Há vários tipos de cimento, classificados conforme a quantidade de clínquer utilizada na sua produção. O cimento *Portland* contém 93-97% de clínquer. Os padrões americanos e europeus relacionam 27 diferentes tipos (FEIZ, *et al.*, 2015). Os fatores-chave que influenciam a emissão de CO₂ e que podem, portanto, ser objeto de aperfeiçoamento para uma produção mais “limpa” de cimento são, conforme FEIZ *et al.* (2015):

- 1- A participação de produtos de menor emissão substitutos do clínquer.
- 2- O processo de descarbonatação, com o uso de tecnologias mais avançadas.
- 3- Os combustíveis utilizados na geração da energia térmica, com maior participação de combustíveis renováveis.
- 4- A matriz elétrica, aumentando a participação de fontes renováveis de eletricidade.

A indústria brasileira de cimento já apresenta um bom desempenho em termos de emissão de CO₂. O programa “*Getting the Numbers Right*” do *Cement Sustainability Initiative* do WBCSD apresenta como média do Brasil em 2013 o valor de 0,566 tCO₂/t e média mundial 0,610 tCO₂/t (WBCSD, 2015). A margem para futuras melhorias é, portanto, pequena.

O concreto é uma mistura de cimento, areia e brita. A quantidade de cimento e o processo de fabricação do cimento utilizado determinam a emissão de CO₂. A mitigação das emissões do concreto recai, portanto, na mitigação das emissões do cimento.

5.12.2 Mitigação no aço

O aço é produzido a partir de minério de ferro, carvão e cal, em 4 etapas (AÇO BRASIL, 2016):

- 1-Preparo da carga: O carvão é processado na coqueria transformando-se em “coque”. O minério de ferro é aglomerado utilizando-se cal e coque. Esse aglomerado é conhecido como “sinter”.
- 2-Redução: O coque e o sinter são aquecidos no alto forno, formando o ferro-gusa, liga de ferro e carbono com alto teor de carbono.
- 3-Refino: Aciarias a oxigênio ou elétricas transformam o ferro-gusa e sucatas de ferro e aço adicionadas em aço líquido, que são solidificados formando semiacabados, lingotes e blocos.
- 4-Laminação: Transforma os produtos do refino em uma variada gama de produtos siderúrgicos.

O aço é o material mais reciclado do mundo (AISI, 2015). Sua utilização como sucata no processo de fabricação do aço diminui a emissão, segundo metodologia desenvolvida pela WORLDSTEEL (2014a e 2015). A utilização de carvão vegetal também pode contribuir para a diminuição da emissão. A Arcelor Mittal, maior siderúrgica do Brasil, tem metas para diminuir a emissão de CO₂ no processo de fabricação do aço (LINKE, 2015), através dos seguintes projetos:

- 1-Cogeração de energia elétrica pelo processo *Heat Recovery*
- 2-Cogeração de energia elétrica pela recuperação de gases de aciaria
- 3-Transporte de bobinas por barcaças oceânicas
- 4-Redução das Emissões de Metano nas Unidades de Produção de Carvão
- 5-Injeção de Finos de Carvão Vegetal no Alto Forno
- 6-Uso de Gás de Alto Forno no Forno de Reaquecimento de Tarugo
- 7-Uso de biomassa renovável em altos fornos a carvão vegetal
- 8-Programa Produtor Florestal

5.12.3 Mitigação na eletricidade

A melhor alternativa de mitigação das emissões da geração de eletricidade é o aumento da participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. Esse objetivo foi estabelecido pelo governo brasileiro dentro do PDE 2023, com projetos de desenvolvimento de energia eólica, entre outros.

5.13 Comparações das emissões no ciclo de vida da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro com outros estudos de ciclos de vida

A emissão durante a construção da infraestrutura da Linha 4, de 607.891 toneladas de CO₂, resultando em 41.514 tCO₂/km é um valor significativo. Isso é consequência do seu projeto, praticamente todo subterrâneo (mais de 97% do trajeto) e utilizando uma ponte. Como comparação, na construção da ferrovia Bothnia Line, na Suécia, com túneis e pontes compondo menos de 20% do trajeto, a emissão foi de 3.900 tCO₂e/km.

Os estudos de ciclo de vida em sistemas metroferroviários abordados no capítulo 3 mostram que as emissões das fases não operacionais podem ou não serem maiores que as da operação do sistema, dependendo de fatores como a matriz elétrica, a carga do sistema e o uso extensivo ou não de túneis, pontes e viadutos. O menor valor observado naqueles estudos para a participação da operação no ciclo de vida foi de 0,38%, correspondendo a uma ferrovia na Suécia, onde a matriz elétrica é constituída por 99,2% de fontes renováveis - hidrelétricas (STRIPPLE e UPPENBERG, 2010). Já o maior valor foi de 89%, resultado encontrado na operação do sistema MAGLEV

ligando Tokyo a Osaka, projetado para atingir velocidade de 500 km/h. Nesse caso há um uso intenso de energia, conjugado a uma matriz cujas fontes fósseis representam mais de 50% da matriz (FEPC, 2015).

Os resultados encontrados para a emissão total por PKM também apresentam grande variação, de 13,00 gCO₂/PKM a 175,52 gCO₂e/PKM, e são influenciados por diversos fatores, entre os quais a abrangência do levantamento, o projeto, a matriz elétrica e a carga do sistema. Por isso não é possível afirmar, com base nos valores encontrados, que um sistema tem desempenho melhor que outro, em termos de emissão de CO₂. Contudo, é possível fazer algumas considerações. Para colocar em perspectiva os resultados da emissão da Linha 4 com outros sistemas de transporte, foram selecionados os sistemas de metrô, BRT e VLT de São Francisco (respectivamente o BART, a Orange Line e a Golden Line), já descritos no capítulo 3. Também comporá a análise o automóvel sedan movido a gasolina, com um modelo semelhante ao Toyota Camry. Esses sistemas foram levantados por CHESTER (2009a e 2012). O sistema BART foi analisado com uma matriz elétrica composta de 20% de fontes renováveis. Os sistemas BRT e automóvel sedan foram analisados com a tecnologia atual e com inovações esperadas para os anos futuros, que melhorariam o rendimento e diminuiriam as emissões. No caso do automóvel sedan essa melhoria consiste em diminuir o peso de 3.300 libras para 2.000 libras aumentando o rendimento de 35.000 para 55.000 milhas por galão. Foi considerada carga média de 1,58 passageiros no sedan e 38 passageiros no BRT (para uma lotação de 57 assentos). O sistema VLT foi analisado com a matriz elétrica atual e com a nova matriz projetada para 2030, com diminuição das fontes fósseis de 70% para 50%. A ocupação média foi de 43 passageiros. A tabela 50 apresenta os resultados.

Tabela 50: Emissões da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro e sistemas de metrô, VLT, BRT e automóvel.

	OPERAÇÃO ⁽¹⁾	FABRICAÇÃO VEÍCULOS/ MANUTENÇÃO ⁽¹⁾	CONSTRUÇÃO/OPERAÇÃO INFRAESTRUTURA ⁽¹⁾	TOTAL ⁽¹⁾
<u>Linha 4</u>	5,38	0,82	7,70	13,90
<u>BART</u>				
Atual	21,58	4,52	53,26	79,36
<u>São Francisco Orange</u>				
<u>Line-BRT</u>				
Atual	33,5	11,86	12,33	57,69
Futuro-longo prazo (inovações tecnológicas)	18,29	4,52	8,74	31,55
<u>São Francisco Golden</u>				
<u>Line-VLT</u>				
Atual	75,02	0,81	33,08	108,91
Futuro-longo prazo (reduzir combustíveis fósseis na matriz elétrica: 70% para 50%)	14,98	0,01	9,35	24,34
<u>Automóvel Sedan</u>				
Atual	89,83	28,66	9,39	127,88
Futuro-longo prazo (inovações tecnológicas)	60,03	21,67	9,39	91,09

Fontes: CHESTER (2009a e 2012).

⁽¹⁾ Emissão da Linha 4 em gCO₂/PKM e dos demais sistemas em gCO₂e/PKM.

Embora os valores da Linha 4 e de BART sejam diferentes, possuem o mesmo perfil, ou seja, a maior participação é da construção/operação da infraestrutura, vindo em seguida a operação dos trens e, mais distanciada, a fabricação/manutenção dos trens. No BRT, VLT e automóvel a maior participação é da operação dos veículos, pois a construção da infraestrutura não é tão complexa quanto no metrô. Com as melhorias projetadas para o futuro esses sistemas diminuem a emissão, sendo maior a diminuição da emissão do VLT. Isso ressalta a importância da matriz elétrica, pois a diminuição de 70% para 50% das fontes fósseis na matriz impactou mais que as inovações tecnológicas dos ônibus e automóveis. Observe-se que, mesmo com essa melhoria projetada para 2030 na matriz elétrica da Califórnia, a matriz elétrica brasileira atual já é mais “limpa” (a participação de combustíveis fósseis é menor que 50%), o que ajuda a explicar o baixo valor de emissão da Linha 4. Em qualquer situação o automóvel sedan tem os piores resultados.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Uma abordagem de ciclo de vida em sistemas de transportes possibilita um melhor entendimento da energia e das emissões de CO₂ associadas ao sistema, observado em toda sua amplitude, e não apenas na operação do sistema, como é tradicionalmente feito. O melhor entendimento de todo o processo contribui para a identificação dos pontos relevantes, aqueles que podem ser objeto de um maior esforço no sentido da redução da energia e das emissões de CO₂. Quando aplicado a diferentes sistemas de transportes poderia contribuir para o planejamento de transporte, identificando as melhores soluções para uma região. Como a comunidade internacional reconhece a importância da redução das emissões de CO₂, tendo já vários países assumido compromissos nesse sentido, as pesquisas de ciclo de vida assumem grande importância, por permitir uma visão mais completa do problema.

Este trabalho concentrou-se nos sistemas de transporte de passageiros metroferroviários, propondo um procedimento de Inventário de Ciclo de Vida genérico que cobrisse os principais elementos do ciclo de vida. O procedimento foi utilizado na nova Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro sob uma abordagem diferente da maioria dos trabalhos pesquisados. Esses trabalhos geralmente utilizam *softwares* ou bancos de dados, existentes no mercado, de avaliação de ciclo de vida, que ainda não estão adequados à realidade brasileira. A abordagem adotada foi a coleta de dados durante a construção da infraestrutura, buscando conseguir informações mais precisas dos recursos, energia, combustíveis consumidos, etc. diminuindo conseqüentemente a necessidade de estimativas. Para as atividades futuras de manutenção e operação da infraestrutura foi aproveitada a experiência da operadora com as Linhas 1 e 2, já operando desde 1979. Para a projeção da programação de partidas e intervalos de trens que possam atender à demanda futura no ciclo de vida de 60 anos foi utilizado o estudo de previsão de demanda da Fundação Getúlio Vargas. Foi possível determinar, através de matrizes origem-destino, a carga de passageiro-km da Linha 4.

A construção da Linha 4 acarretou uma grande emissão de CO₂, da ordem de 607 mil toneladas. Isso representa cerca de 41 mil toneladas de CO₂ por quilômetro construído. Esse é um alto valor, justificado porque praticamente toda a Linha 4 é subterrânea. Conforme os resultados encontrados, o uso de cimento, concreto e aço durante a

construção é responsável por 73,32% da energia e 81,61% da emissão de CO₂. Nos túneis construídos há uma intensa utilização de cimento e concreto, e na via permanente e na ponte estaiada, de aço. A mitigação das emissões desses materiais envolve, entre outros, um esforço de melhorias no processo de fabricação, maior uso de fontes renováveis na geração da energia elétrica, maior uso de substitutos de menor emissão (na fabricação do cimento), e maior uso de reciclagem (na fabricação do aço). Pretende-se que esse trabalho seja mais um elemento de conscientização da importância de pesquisas e ações que visem a produção mais “limpa” desses materiais.

No ciclo de vida de 60 anos a construção da infraestrutura foi a fase de maior relevância para a emissão de CO₂, com 49,84%. Em termos de energia a fase de maior participação foi a operação dos trens, com 55,63%. As fases de construção da infraestrutura e operação dos trens foram as mais relevantes, tanto no aspecto de energia quanto de emissão de CO₂. As demais fases, fabricação dos trens, manutenção e operação da infraestrutura têm relevância acentuadamente menor.

A eletricidade é o fator que mais influencia os resultados de energia e emissão por passageiro-quilômetro (66,60% e 46,66%, respectivamente), vindo a seguir, para a emissão, o uso de cimento (24,23%) e aço (12,44%) e para a energia o uso de aço (12,38%) e cimento (10,43%). A maior participação de fontes renováveis na matriz elétrica da geração de energia para a operação dos trens é extremamente importante na obtenção de baixos valores de emissão. A matriz elétrica brasileira, apesar da escassez de chuvas dos últimos anos, ainda é, numa comparação mundial, bastante competitiva em termos de emissão de CO₂. Contudo é necessário que os projetos do governo para o crescimento de fontes renováveis sejam mantidos para assegurar que a posição brasileira nesse *ranking* seja, pelo menos, mantida.

Outro fator importante para o resultado de emissão por passageiro-quilômetro é a carga de lotação. Pelos resultados projetados na Linha 4 ela terá uma carga adequada, de 34,17% na média do ciclo de vida, que possibilitará o resultado final de 13,90 gCO₂/PKM. A previsão de demanda foi baseada em estudo conduzido pela Fundação Getúlio Vargas.

Um procedimento de determinação da emissão evitada por um sistema metroferroviário considerando apenas o fator *mode shift* foi desenvolvido e aplicado na Linha 4, com o objetivo de quantificar a emissão operacional que deixou de ser produzida por veículos de maior emissão que deixaram de circular em função de seus usuários terem optado pelo uso do metrô. Acumulando-se, ano a ano, a emissão produzida e a emissão evitada encontrou-se um ponto onde a emissão evitada acumulada compensa a emissão produzida acumulada. Esse ponto ocorre 14 anos após a implantação do sistema, o que significa que após esse prazo haverá um ganho líquido de emissão evitada. A análise de sensibilidade em relação ao fator de emissão da eletricidade revelou uma grande margem para a degradação desse fator sem que o ganho líquido de emissão evitada seja prejudicado. Apenas na situação limite em que o fator médio no ciclo de vida seja maior que 1,1989 (mais de 8 vezes maior que o fator atual), situação que parece ser improvável, o ponto de recuperação não seria alcançado no ciclo de vida de 60 anos.

Para a carga de lotação o ponto limite corresponde a uma carga média de 8,47%, situação também aparentemente improvável para um metrô numa região de alta densidade populacional. Para cargas abaixo desse valor o ponto de recuperação das emissões só ocorreria após o ciclo de vida de 60 anos.

Os valores obtidos foram colocados em perspectiva com outros estudos de ciclo de vida observando-se o mesmo perfil de participação de cada fase e coerência de valores, embora não possa haver, rigorosamente, uma comparação, uma vez que cada estudo segue uma metodologia e escopo diferente.

O desenvolvimento deste trabalho foi dificultado por ser um trabalho pioneiro em ciclo de vida de sistemas metroferroviários brasileiros, abordando as fases de construção da infraestrutura, fabricação dos trens, manutenção, operação da infraestrutura e operação dos trens, e não haver, no país, uma estrutura facilitadora desse tipo de pesquisa. Este é um trabalho altamente dependente de uma integração universidade – governo – empresa. Essa integração, para projetos de ciclo de vida, ainda é incipiente, e precisa ser aperfeiçoada. Seria desejável que os governos, com apoio dos centros de pesquisa, como a COPPE/PET, estabelecessem diretrizes no sentido de que sejam criadas condições que favoreçam as pesquisas. Uma integração mais completa permitiria que novos projetos de ciclo de vida em sistemas de transporte pudessem ser desenvolvidos,

o que daria condições de um melhor conhecimento do tema e contribuiria para os esforços de redução de emissão de CO₂.

Novos projetos poderiam incluir no escopo o ciclo de vida de combustíveis, a reciclabilidade e o fim de vida. Outros gases do efeito estufa poderiam ser incluídos. Os gases poluentes não relacionados ao efeito estufa também poderiam ser incluídos. Ciclo de vida de projetos de BRT, VLT e outros sistemas de transporte poderiam também ser abordados. Em relação à emissão evitada pelo sistema metroferroviário o efeito do congestionamento (fator *congestion relief*) e da ocupação da terra (fator *land use*) são também outros elementos a serem explorados. Trabalhos futuros podem criar novos cenários, alterando as premissas utilizadas, como, por exemplo, a carga de passageiros nos automóveis e ônibus no procedimento de emissões evitadas.

Pretende-se que este trabalho possa contribuir, em nosso país, para uma expansão de pesquisas de ciclo de vida em transportes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÇO BRASIL (2016) Instituto Aço Brasil. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>. Acesso em 20/05/2016.
- ADEPORTO (2010) *Plano de Acção para a energia sustentável da cidade do Porto*. Agência de Energia do Porto. Disponível em http://www.adeporto.eu/fotos/editor2/plano_acciao_alterado.pdf. Acesso em 20/05/2016.
- AGÊNCIA BRASIL (2015) Obras da Linha 4 do metrô do Rio estão 75% concluídas, diz secretário. Disponível em <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-08/linha-do-metro-que-ligara-zonas-sul-e-oeste-do-rio-esta-75-concluida>. Acesso em 20/05/2016.
- AGENEAL (2005) *Estratégia local para as alterações climáticas*. Agência municipal de energia de Almada. Disponível em http://www.ageneal.pt/DirEscrita/upload/docs/ELAC_3.pdf. Acesso em 20/05/2016.
- AISI (2015) Steel is the world most recyclable material. American Iron and Steel Institute. Disponível em <https://www.steel.org/Sustainability/Steel%20Recycling.aspx>. Acesso em 20/05/2016.
- AKERMAN, J. (2011) The role of high-speed rail in mitigating climate change – The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective. *Transportation Research Part D*, v. 16, pp. 208–217. DOI: 10.1016/j.trd.2010.12.004.
- ALSTOM (2014) Environmental Product Declaration for DT5. Reg. no. S-P-00084.
- ANDRADE GUERRA, J. B. S. O. D.; DUTRA, L.; SCHWINDEN, N. B. C.; ANDRADE, S. F. (2015) Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and mitigation forecasts. *Journal of Cleaner Production*, v. 103, pp.197-210. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.082.
- ANEEL (2015) Perdas de energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>. Acesso em 20/05/2016.
- ANP (2014) *Anuário estatístico de 2014*. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em <http://www.anp.gov.br/?pg=71976>. Acesso em 20/05/2016.

- ANSALDO BREDA (2014a) Environmental Product Declaration for MLC Metrobus Brescia. Reg. no. S-P-00208.
- ANSALDO BREDA (2014b) Environmental Product Declaration for ETR 1000. Reg. no. S-P-00453.
- APTA (2009) *Recommended practices for quantifying greenhouse gas emissions from transit*. American Public Transportation Association. Disponível em <<http://www.apta.com/resources/hottopics/sustainability/Documents/Quantifying-Greenhouse-Gas-Emissions-APTA-Recommended-Practices.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- APTA (2013) *Changes in Rider Anthropometrics & The effects on Rail Car Design*. American Public Transportation Association. Disponível em <http://www.apta.com/mc/rail/previous/2013/papers/Papers/SmithS_SchroederM-Changes-in-Rider-Anthropometrics-and-the-Effect-on-Rail-Car-Design.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- APTA (2014) *Fact book glossary*. American Public Transportation Association. Disponível em <<http://www.apta.com/resources/statistics/Pages/glossary.aspx#7>>. Acesso em 20/05/2016.
- 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, pp. 142–161. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- BOMBARDIER (2014 a) Environmental Product Declaration for SPACIUM. Reg. no. S-P-00189.
- BOMBARDIER (2014 b) Environmental Product Declaration for INNOVIA ART 200. Reg. no. S-P-00188.
- BOMBARDIER (2014 c) Environmental Product Declaration for INNOVIA APM 300. Reg. no. S-P-00193.
- BOMBARDIER (2014 d) Environmental Product Declaration for Flexity Outlook. Reg. no. S-P-00192.
- BOTNIABANAN AB (2010) Environmental Product Declaration for passenger transport on the Bothnia line. Reg. no. S-P-00194, UN CPC 6421.
- BRASIL (2013) Carvão mineral. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/carvao-mineral-e-derivados>>. Acesso em 20/05/2016.

- CCA (2013) *Analysis of electricity consumption, electricity generation emissions intensity and economy wide emissions – Final report*. Climate change authority. Disponível em <<http://climatechangeauthority.gov.au/files/files/Target-Progress-Review/Analysis-of-electricity-consumption-electricity-generation-emissions-intensity-and-economy-wide-emissions/Australia%20electricity%20and%20emissions%20final%20report%202013%2010%2018.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- CHANG, B.; KENDALL, A. (2011) Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system. *Transportation Research Part D*, v. 16, pp. 429-434. DOI: 10.1016/j.trd.2011.04.004.
- CHESTER, M. (2008) *Life-cycle environmental inventory of passenger transportation in the United States*. Tese de doutorado na Universidade da Califórnia, Berkeley, 2008. Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/7n29n303>>. Acesso em 20/05/2016.
- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2009a) *Life-cycle energy and emissions inventory for motorcycles, diesel, automobiles, school buses and metropolitan rails*. Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/6z37f2jr.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2009b) Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, v. 4 no. 2. DOI: 10.1088/1748-9.
- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2010a) Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California. *Environmental Research Letters*, 2010, v. 5. DOI:10.1088/1748-9326/5/1/01400310.
- CHESTER, M.; HORVATH, A.; MADANAT, S. (2010b) Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions. *Atmospheric Environment*, v. 44, pp. 1071-1079. DOI:10.1016/j.atmosenv.2009.12.012.
- CHESTER, M.; EISENSTEIN, W.; PINCETL, S.; ELIZABETH, Z.; MATUTE, J.; 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. Disponível em <<http://repository.asu.edu/attachments/94226/content/chester-ASU-SSEBE-CESEM-2012-WPS-003.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- CHESTER, M.; EISENSTEIN, W.; PINCETL, S.; ELIZABETH, Z.; MATUTE, J. (2013) Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. *Environmental Research Letters*, v. 8. DOI:10.1088/1748-9326/8/1/015041.

- COPPETEC (2011) *Inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores do Estado do Rio de Janeiro*. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. Disponível em <http://download.rj.gov.br/documentos/10112/975111/DLFE-51272.pdf/Inventario_2011.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- CPTM (2014) Qual a diferença entre trem e metrô? Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. Disponível em <<http://cptmemfoco.blogspot.com.br/2011/04/qual-diferenca-entre-trem-e-metro.html>>. Acesso em 20/05/2016.
- 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*, v. 17, No. 4, pp.329–337. DOI: 10.1080/13504509.2010.490657.
- D'AGOSTO, M. A. (2004) *Análise da eficiência da cadeia energética para as principais fontes de energia utilizadas em veículos rodoviários no Brasil*. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro.
- DEFRA (2015) Greenhouse Gas Conversion Factor Repository. Disponível em <<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2015>>. Acesso em 20/05/2016.
- DEL PERO, F.; DELOGU, M.; PIERINI, M.; BONAFINNI, D. (2014) Life Cycle Assessment of a heavy metro train. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, pp. 787-799. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.023.
- DETRAN (2015) Dados Sobre Veículos Cadastrados No Rio de Janeiro. Disponível em <www.detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/07.asp>. Acesso em 20/05/2016.
- EIA (2015) *Australia – International energy data and analysis*. US Energy Information Administration. Disponível em <www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=AUS>. Acesso em 20/05/2016.
- EPD (2014) Environmental product declaration. International EPD System. Disponível em <www.environdec.com>. Acesso em 20/05/2016.
- EPE (2013) *Balanço energético nacional de 2012*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf> Acesso em 20/05/2016.
- EPE (2014) *Balanço energético nacional de 2013*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em

<https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

FDT (2008) Conserve by transit: Analysis of the energy consumption and climate change benefits of transit. Florida Department of Transportation. Disponível em <<http://planfortransit.com/wp-content//ConservebyTransitFinalReport.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

FEIZ, R, AMMEMBERG, J., BAAS, L., EKLUND, M., HELGSTRAND, A., MARSHALL, R. (2015) Improving the CO2 performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 98, pp. 272–281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.083.

FEPC (2015) *Power generation composition. Federation of electric power companies of Japan*. Disponível em <http://www.fepc.or.jp/english/energy_electricity/optimal_combination/sw_index_02/index.html>. Acesso em 20/05/2016.

FGV (2011) *Previsão de Demanda Linha 4*. Fundação Getúlio Vargas, 2011. Disponível em <<http://www.metrolinha4.com.br/wp-content/uploads/2012/03/Relat%C3%B3rio-Final.pdf>>.

FTA (2010) Public Transportation's Role in Responding to Climate Change. Federal Transit Administration. Disponível em <<https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/PublicTransportationsRoleInRespondingToClimateChange2010.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

GARCIA, L. (2011) *Life Cycle Assessment of Railway Bridges. Developing a LCA tool for evaluating Railway Bridges*. Master Thesis – Estocolmo 2011. Disponível em <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:441553/FULLTEXT01>>. Acesso em 20/05/2016.

GROSSRIEDER, C. (2011) *Life-Cycle assessment of future High speed Rail in Norway*. Disponível em <<http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:441342/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

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 Policy*, v. 74, pp. 134-146. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.005.

HANSON, C.; NOLAND, R. B.; 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.*, pp. 174–181. DOI: 10.3141/2287-21.

- HELMREICH, S.; KELLER, H. FREIGHTVISION - *Sustainable European Freight Transport 2050*. SPRINGER 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-13371-8.
- HUPPES, G.; OERS, L. V. (2011) Evaluation of Weighting Methods for Measuring the EU-27 Overall Environmental Impact. Disponível em <<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/LCIA-Evaluation-of-weighting-methods-in-EU27.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- ICE (2011) *Inventory of carbon and energy*. University of Bath, Inglaterra. Disponível em <www.carbonsolutions.com/Resources/ICE%20V2.0%20-%20Jan%202011.xls>. Acesso em 20/05/2016.
- IEA (2007) *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions*. International Energy Agency. Disponível em <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- IEA (2009) *Transport, energy and CO2*. International Energy Agency. Disponível em <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- IEA (2012) *Railway Handbook 2012 Energy Consumption and CO2 Emissions*. International Energy Agency. Disponível em <http://www.uic.org/com/IMG/pdf/iea-uic_2012final-lr.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- INAMURA, H.; PIANTANAKULCHAI, M.; 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. *13th International Conference on Input-Output Techniques, University of Macerata, Italy, 2000*. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/252032139_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>. Acesso em 20/05/2016.
- IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>>. Acesso em 20/05/2016.
- IPCC (2014a) *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014 – Synthesis Report*. Intergovernmental panel on climate change, 2014. Disponível em <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- IPCC (2014b) *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. Intergovernmental panel on

climate change, 2014. Disponível em <<https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter2.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

ISO (2009) ISO 14040:2009 *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*.

JBS (2015) Como calcular combustível para máquinas. JBS Construtora e Serviços. Disponível em <<http://www.construplena.com.br/noticia.php?id=13>>. Acesso em 20/05/2016.

JING, R.; CHENG, J. C. P.; GAN, V. J. L.; WOON, K. S. (2014) Comparison of greenhouse gas emission accounting methods for steel production in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 83, pp. 165-172. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.016.

KATO, H.; OSADA, M.; SHIBAHARA, N.; HAYASHI, Y. (2005) A Life Cycle Assessment for evaluating environmental impacts of inter-regional high-speed mass transit projects. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v.6, pp. 3211 - 3224.

KIANI, M.; PARRY, T.; CENEY, H. (2008) Environmental life-cycle assessment of railway track beds. *Engineering Sustainability*, v. 161, pp. 135–142. DOI: 10.1680/ensu.2008.161.2.135.

KUCKSHINRICH, W.; ZAPP, P.; POGANIETZ, W. R. (2007) CO2 emissions of global metal-industries: The case of copper. *Applied Energy*, v. 84, pp.842–852. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.01.014.

LIGHT (2015) *Relatório de sustentabilidade 2014*. Disponível em <http://www.light.com.br/Repositorio/Sustentabilidade/relatorio_sustentabilidade_2014.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

LIMA, J. A. R. (2010) *Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as condições climáticas*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

LINKE, P. P. (2015) Controle de Emissões de CO2 na Siderurgia: Estratégias empresariais da Arcelor Mittal Tubarão. Disponível em: <<http://www.usp.br/mudarfuturo/cms/wp-content/uploads/08-ArcelorMittal-Controlde-de-Emissao%CC%83es-de-CO2-na-Siderurgia.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

LISBOA e-NOVA (2010) *Uma estratégia energético ambiental para a cidade de Lisboa*. Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa. Disponível em

<http://www.cfn.ist.utl.pt/conf_energia/files/21_11_Apresentacao.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

LISBOA e-NOVA (2014) *Plano de Acção para a Sustentabilidade Energética de Lisboa*. Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa. Disponível em <http://mycovenant.eumayors.eu/docs/seap/300_1316002099.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

LU (2009) *London Underground carbon footprint*. London Underground. Disponível em <<https://tfl.gov.uk/cdn/static/cms/documents/london-underground-carbon-footprint-2008.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

MA (2015) Mistura carburante automotiva (Etanol anidro/Gasolina) – Cronologia. Ministério da Agricultura. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/acompanhamento%20producao%20sucroalcooleira/CRONOLOGIA.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

MCTI (2009) *Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases do efeito estufa*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <<http://pagina22.com.br/wp-content/uploads/2009/11/inventario1.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

MCTI (2010) Relatório de Referência “Emissões de Dióxido de Carbono por Queima de Combustíveis Fósseis: Abordagem Top-down”. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0209/209644.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

MCTI (2015) Fatores médios mensais de emissão. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ BILBAO (2012) *Huella de carbono*. Disponível em <<https://www.metrobilbao.eus/noticias/noticias/421-certificado-aenor-de-la-huella-de-carbono>>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ LINHA 4 (2014) Site oficial da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Disponível em <www.metrolinha4.com.br>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ LISBOA (2011) *Relatório de Sustentabilidade de 2010*. Disponível em <<http://www.metrolisboa.pt/wp-content/uploads/Relat%C3%B3rio-de-sustentabilidade2010.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ LOS ANGELES (2014) 2013 *Metro Energy and Resource Report*. Metro Los Angeles. Disponível em:

<http://media.metro.net/projects_studies/sustainability/images/Sustainability_Report_2013.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ PORTO (2011) *Relatório de Sustentabilidade de 2010*. Disponível em <http://www.metroporto.pt/uploads/document/file/47/Relat_rio_de_Sustentabilidade_2010.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ PORTO (2013) *Relatório de Sustentabilidade de 2011-2012*. Disponível em <<http://www.metroporto.pt/uploads/document/file/48/2012.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ RIO (2012) *Inventário de emissões de GEE – 2011 do Metrô do Rio de Janeiro*.

METRÔ RIO (2014a) Informações disponibilizadas por Joubert Fortes Flores, Diretor de Engenharia do Metrô do Rio de Janeiro.

METRÔ RIO (2014b) *Inventário de emissões de GEE – 2013 do Metrô do Rio de Janeiro*.

METRÔ SÃO PAULO (2014a) Site do Metrô de São Paulo. Disponível em <<http://www.metro.sp.gov.br>>. Acesso em 20/05/2016.

METRÔ SÃO PAULO (2014b) *Relatório de sustentabilidade do Metrô de São Paulo - 2013*. Disponível em <<http://www.metro.sp.gov.br/relatoriodesustentabilidade-2013/>>. Acesso em 20/05/2016.

MILFORD, R.; ALLWOOD, J. (2010) Assessing the CO₂ impact of current and future rail track in the UK. *Transportation Research Part D*, v.15, pp. 61–72. DOI: 10.1016/j.trd.2009.09.003.

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>>. Acesso em 20/05/2016.

MILIUTENKO, S. (2013) Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. *Journal of Cleaner Production*. v. 43, pp. 156–165. Acesso em 20/11/2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.040.

MORITA, Y.; YAMASAKI, T.; SHIMIZU, K.; KATO, H.; 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 (2008) *Renewable energy task report*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <http://web.mta.info/sustainability/pdf/MTA%20Renewable%20Energy%20Report%2010%2029%2008.pdf> >. Acesso em 20/05/2016.
- MTA (2009) *Impact of public transportation on GHG in the MTA area*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <http://web.mta.info/sustainability/pdf/MTA%20Carbon%20Model%20Report%20&%20Presentation.pdf> >. Acesso em 20/05/2016.
- MTA (2012) *Sustainability report*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <http://web.mta.info/sustainability/pdf/2012Report.pdf> >. Acesso em 20/05/2016.
- MTR (2013) *Sustainability report 2012*. Mass Transit Railway System – Hong Kong. Disponível em <http://www.mtr.com.hk/eng/sustainability/2012rpt/files/sustainabilityreport2012.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- NETWORK RAIL (2009) *Comparing environmental impact of conventional and high speed rail*. Network Rail, London. Disponível em https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjjarL_uHMAhUGkpAKHdGmCvIQFggiMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.networkrail.co.uk%2F5878_Comparingenvironmentalimpactofconventionalandhighspeedrail.pdf&usg=AFQjCNHVI-hlyJs5Defh0vt49RJYS94P7A>. Acesso em 20/05/2016.
- NYC (2011) *Inventory of New York City greenhouse gas emissions*. City of New York. http://www.nyc.gov/html/om/pdf/2011/pr331-11_report.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- OECD (2010) *Reducing transport greenhouse gas emissions – Trends & Data*. Organization for Economic Co-operation and Development. Disponível em <http://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/10ghgtrends.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- OU, X.; XIAOYU, Y.; ZHANG, X. (2011) Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China. *Applied Energy*, v. 88, pp. 289–297. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.05.010.
- PEREIRA JR., A. O.; COSTA, R. C. D.; VALE COSTA, C.D.; MARRECO, J. M.; ROVERE, E. L. (2013) Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, pp. 49–59. DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.020
- PDE 2023 (2015) *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*. Ministério de Minas e Energia. Disponível em

<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432059/PDE+2023+%28PDF%29/f63b46f4-c9a0-4294-974e-ff2def8d67c8?version=1.1>>. Acesso em 20/05/2016.

PlaNYC (2007) A greener, greater New York. New York City Plan Reducing Greenhouse Gas Emissions. Disponível em: <http://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/planyc_2011_planyc_full_report.pdf>. Acesso em 20/05/2016.

PRAZERES, P. G. C.; THOENI, K.; BEER, G. (2012) Nonlinear analysis of NATM tunnel construction with the boundary element method. *Computers and Geotechnics*, v. 40, pp.160–173. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.10.005.

RAILWAY GAZETTE (2014) TBM arrives for Rio Line 4. Disponível em <<http://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/tbm-arrives-for-rio-line-4.html>>. Acesso em 20/05/2016.

RIOTRILHOS (2015) Informações disponibilizadas por Eduardo D'Aguiar, Gerente de Engenharia da Rio Trilhos – Companhia de Transportes sobre trilhos do Estado do Rio de Janeiro.

SOARES, S. R.; TOFFOLETTO, L.; DESCHENES, L. (2006) Development of weighting factors in the context of LCIA. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, pp. 649-660. DOI:10.1016/j.jclepro.2005.07.018.

STRIPPLE, H. (2001) *Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis*. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. Disponível em <<http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b734e/1445515385608/B1210E.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

STRIPPLE, H.; UPPENBERG, S. (2010) *Life cycle assessment of railways and rail transports*. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. Disponível em <<http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b75d4/1445517456715/B1943.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

STRUCKL, W.; WIMMER, W. (2007) Green Line - Strategies for environmentally improved railway vehicles. *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, pp. 77-82. DOI: 10.1007/978-1-84628-935-4_14.

SVENSSON, N.; EKLUND, M. (2007) Screening of environmental pressure from products in the Swedish railway infrastructure: Implications for strategic environmental management. *Resources, conservation and recycling*, v. 52, pp. 248-265. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.03.006.

- TERI (2012) *Life cycle analysis of transport modes New Delhi*. The Energy and Resources Institute. New Delhi, 2012. Disponível em <<http://www.teriin.org/upfiles/projects/ES/ES2011UD02.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- TFL (2010) *Environment Report 2010*. Transport for London. Disponível em <<http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/environment-report-2010.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- TRB (2001) This is Light Rail. Transportation Research Board. E-circular NUMBER E-C033, July 2001, 8th Joint Conference on Light Rail Transit, Dallas.
- TRB (2015) *Transit Capacity and Quality of Service Manual – 2nd Edition*. Transportation Research Board. Disponível em <<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp100/part%208.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- US-EPA (1990) Supplement C to compilation of air pollutant emission factors volume I. United States Environmental Protection Agency. Disponível em <<http://nepis.epa.gov>>. Acesso em 20/05/2016.
- VIATROLEBUS (2015) Disponível em <<http://viatrolebus.com.br/2015/05/tuneis-da-linha-4-do-metro-rio-recebem-trilhos/>>. Acesso em 20/05/2016.
- WBCSD (2015) *GNR Project Reporting CO2. Net CO2 emissions - Weighted average excluding CO2 from on-site power generation - Grey and white cementitious*. Disponível em <<http://www.wbcscement.org/GNR-2013/index.html>>. Acesso em 20/05/2016.
- WESTIN, J.; KAGESON, P. (2012) Can high speed rail offset its embedded emissions? *Transportation Research Part D*, v.17, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.trd.2011.09.006.
- WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B. (2014) A critical evaluation of Brazilian life cycle assessment studies. *International Journal Life Cycle Assessment*, v.19 pp. 144-152. DOI: 10.1007/s11367-013-0608-y
- WMO (2014) *No. 1002 - Record Greenhouse Gas Levels Impact Atmosphere and Oceans*. World Meteorological Organization. Disponível em <<http://public.wmo.int/en/media/press-release/no-1002-record-greenhouse-gas-levels-impact-atmosphere-and-oceans>>. Acesso em 20/05/2016.
- WORLDSTEEL (2014a) *Life Cycle assessment methodology report*. Disponível em <<https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA%20Methodology%20Report.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.

- WORLDSTEEL (2014b) Steel's contribution to a low carbon future. Worldsteel Association. Disponível em <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/Steel-s-contribution-to-a-Low-Carbon-Future-2014/document/Steel_s%20contribution%20to%20a%20Low%20Carbon%20Future%202014.pdf>. Acesso em 20/05/2016.
- WORLDSTEEL (2015) *The carbon footprint of steel*. Disponível em <<http://www.sthelens.gov.uk/media/253726/ex063.pdf>>. Acesso em 20/05/2016.
- WORREL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N. (2001) Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, v. 26, pp. 303-329. DOI: 10.1146/annurev.energy.26.1.303.
- WRI (2014) *GHG Protocol*. World Resources Institute. Disponível em <<http://www.ghgprotocol.org/>>. Acesso em 20/05/2016.
- WSC (2014) World Shipping Council. Disponível em <<http://www.worldshipping.org/industry-issues/environment/air-emissions/carbon-emissions>>. Acesso em 20/05/2016.
- ZHANG, W.; LI, H.; CHEN, B.; LI, Q.; HOU, X.; ZHANG, H. (2014) CO2 emission and mitigation potential estimations of China's primary aluminum industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 103 pp. 863-872. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.066.

APÊNDICE 1 – CÁLCULOS DAS ENERGIAS E EMISSÕES NA CONSTRUÇÃO DA INFRAESTRUTURA E FABRICAÇÃO DOS TRENS DA LINHA 4

A) Construção da infraestrutura

1) Transporte Fornecedor – Obra: transporte de materiais e combustíveis. Cálculos até o primeiro semestre de 2015. Aplicação da equação (1):

a) Transporte de materiais - Emissões:

$$\text{Em 2012: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (47.864,00/2,61) \times 0,95 \times 2,60/1000 = 45,30 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Em 2013: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (207.916,00/2,61) \times 0,95 \times 2,60/1000 = 196,76 \text{ tCO}_2.$$

$$\begin{aligned} \text{Em 2014: } E &= \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (330.078,20/2,61) \times 0,9433 \times 2,60/1000 \\ &= 310,17 \text{ tCO}_2. \end{aligned}$$

$$\text{Em 2015: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (228.685,00/2,61) \times 0,93 \times 2,60/1000 = 211,86 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Total} = 764,09 \text{ tCO}_2.$$

Obs: A distância total percorrida foi de: $47.864,00 + 207.916,00 + 330.078,20 + 228.685,00 = 814.543,20$ km e a quantidade de diesel consumida foi de: $814.543,20/2,61 = 312.085,52$ l.

b) Transporte de materiais - Energia:

$$\begin{aligned} \text{Em 2012: } E &= \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (47.864,00/2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) \\ &= 648.859,79 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Em 2013: } E &= \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (207.916,00/2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) \\ &= 2.818.576,21 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Em 2014: } E &= \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (330.078,20/2,61) \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14) \\ &= 4.472.646,62 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Em 2015: } E &= \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (228.865,00/2,61) \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) \\ &= 3.095.991,85 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

Total = 11.036.074,47 MJ, sendo a energia renovável = $(47.864,00/2,61) \times (0,05 \times 33,14)$
 $+ (207.916,00/2,61) \times (0,05 \times 33,14) + (330.078,20/2,61) \times (0,0567 \times 33,14) +$
 $(228.865,00/2,61) \times (0,07 \times 33,14) = 603.279,85 \text{ MJ}.$

c) Transporte de combustíveis - Emissões:

$$\text{Em 2012: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (452,00/2,61) \times 0,95 \times 2,60/1000 = 0,43 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Em 2013: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (728,00/2,61) \times 0,95 \times 2,60/1000 = 0,69 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Em 2014: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (825,00/2,61) \times 0,9433 \times 2,60/1000 = 0,78 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Em 2015: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (375,00/2,61) \times 0,93 \times 2,60/1000 = 0,35 \text{ tCO}_2.$$

Total = 2,24 tCO₂.

Obs: A distância total percorrida foi de: $452,00 + 728,00 + 825,00 + 375,00 = 2.380,00$
 km e a quantidade de diesel consumida foi de: $2.380,00 / 2,61 = 911,88 \text{ l}.$

d) Transporte de combustíveis - Energia:

$$\text{Em 2012: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (452,00/2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)$$

$$= 6.127,46 \text{ MJ}.$$

$$\text{Em 2013: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (728,00/2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)$$

$$= 9.869,00 \text{ MJ}.$$

$$\text{Em 2014: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (825,00/2,61) \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14)$$

$$= 11.178,97 \text{ MJ}.$$

$$\text{Em 2015: } E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) = (375,00/2,61) \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14)$$

$$= 5.076,84 \text{ MJ}.$$

Total: 32.252,27 MJ, sendo a energia renovável = $(452,00/2,61) \times (0,05 \times 33,14) +$
 $(728,00/2,61) \times (0,05 \times 33,14) + (825,00/2,61) \times (0,0567 \times 33,14) +$
 $(375,00/2,61) \times (0,07 \times 33,14) = 1.676,40 \text{ MJ}.$

2) Transporte da via permanente. Cálculos completos (etapa concluída). Aplicação da equação (1):

a) Transporte de trilhos - Emissão:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) = (2 \times 5 \times 2.200 \times 18 + 2 \times 9.000 \times 2.200 \times 10) / 1000000 + ((145 \times 35) / 2,61) \times 0,95 \times 2,60 / 1000 = 401,20 \text{ tCO}_2.$$

b) Transporte de trilhos - Energia:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) = 2 \times 5 \times 2.200 \times 0,19 + 2 \times 9.000 \times 2.200 \times 0,13 + ((145 \times 35) / 2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) = 5.220.978,33 \text{ MJ, sendo a energia renovável} = ((145 \times 35) / 2,61) \times (0,05 \times 33,14) = 3.221,94 \text{ MJ, calculada apenas no transporte no Rio de Janeiro.}$$

c) Transporte de dormentes - Emissão:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) = ((349 \times 495) / 2,61) \times 0,95 \times 2,60 / 1000 = 163,49 \text{ tCO}_2.$$

d) Transporte de dormentes - Energia:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) = ((349 \times 495) / 2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) = 1.395.691,11 \text{ MJ, sendo a energia renovável} = ((349 \times 495) / 2,61) \times (0,05 \times 33,14) = 109.676,26 \text{ MJ, calculada apenas no transporte no Rio de Janeiro.}$$

e) Transporte de terceiro trilho - Emissão:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) = ((145 \times 256 / 2,61) \times 2,65 / 1000) + (10.106 \times 4.188 \times 10 / 1000000) + ((145 \times 35) / 2,61) \times 0,95 \times 2,60 / 1000 = 465,73 \text{ tCO}_2.$$

f) Transporte de terceiro trilho - Energia:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) = ((145 \times 256 / 2,61) \times 42,91) + (10.106 \times 4.188 \times 0,13) + ((145 \times 35) / 2,61) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) = 6.181.184,53 \text{ MJ, sendo a energia renovável} = ((145 \times 35) / 2,61) \times (0,05 \times 33,14) = 3.221,94 \text{ MJ, calculada apenas no transporte no Rio de Janeiro.}$$

3) Transporte dentro da obra. Cálculos até o primeiro semestre de 2015. Composto de frota própria (diesel e gasolina), frota alugada com controle de horas e frota alugada com controle de quilometragem. A frota própria consumiu diesel nas seguintes quantidades:

2012 - 35.536,00 l; 2013 - 705.727,55 l e 2014 - 347.300,90 l, totalizando 1.088.564,45 l.

O consumo de gasolina pela frota própria foi de:

2012 - 112.225,61 l; 2013 - 438.067,68 l; 2014 - 511.631,49 l e 2015 - 195.808,00 l, totalizando 1.257.732,78 l.

A frota alugada com controle de horas totalizou:

2013 - 36.851,99 h e 2014 - 20.658,91 h, totalizando 57.510,90 h, o que equivale a um consumo de diesel de $57.510,90 \times 13,16 = 756.843,44$ l.

A frota alugada com controle de quilometragem totalizou:

2012 - 3.528.275,00 km; 2013 - 6.599.097,80 km; 2014 - 9.399.698,33 km e 2015 - 4.086.286,60 km, totalizando 23.613.357,73 km, o que equivale a um consumo de diesel de $23.613.357,73/3,04 = 7.767.551,88$ l.

Aplicando a equação (2):

a) Emissão:

$$\begin{aligned}
 E &= \sum_{i=1}^n (q \times f) + (hv1 \times rv1 \times f) + \left(\frac{d_i}{rv2}\right) \times f = \\
 &= ((35.536,00 \times 0,95 \times 2,60) + (705.727,55 \times 0,95 \times 2,60) + \\
 &+ (347.300,90 \times 0,9433 \times 2,60))/1000 + ((112.225,61 \times 0,80 \times 2,22) + \\
 &+ (438.067,68 \times 0,77 \times 2,22) + (511.631,49 \times 0,75 \times 2,22) + \\
 &+ (195.808,00 \times 0,7342 \times 2,22))/1000 + \\
 &+ ((36.851,99 \times 13,16 \times 0,95 \times 2,60) + (20.658,91 \times 13,16 \times 0,9433 \times 2,60))/1000 + \\
 &+ (((3.528.275,00/3,04) \times 0,95 \times 2,60) + (6.599.097,80/3,04) \times 0,95 \times 2,60)/1000 + \\
 &+ (((9.399.698,33/3,04) \times 0,9433 \times 2,60) + ((4.086.286,60/3,04) \times 0,93 \times 2,60))/1000 \\
 &= 25.728,63 \text{ tCO}_2.
 \end{aligned}$$

b) Energia:

$$\begin{aligned}
 E &= \sum_{i=1}^n (q \times f) + (hv1 \times rv1 \times f) + \left(\frac{d_i}{rv2}\right) \times f = \\
 &= (35.536,00 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)) + (705.727,55 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (347.300,90 \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14)) + \\
& (112.225,61 \times (0,80 \times 32,29 + 0,20 \times 22,34)) + (438.067,68 \times (0,77 \times 32,29 + 0,23 \times 22,34)) + \\
& (511.631,49 \times (0,75 \times 32,29 + 0,25 \times 22,34)) + \\
& (195.808,00 \times (0,7342 \times 32,29 + 0,2658 \times 22,34)) + \\
& (36.851,99 \times 13,16 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)) + \\
& (20.658,9133 \times 13,16 \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14)) + \\
& (3.528.275,00/3,04) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) + \\
& (6.599.097,80/3,04) \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) + \\
& (9.399.698,33/3,04) \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14) + \\
& (4.086.286,60/3,04) \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) \\
& = 377.599.424,22 \text{ MJ, sendo a energia renovável} = (35.536,00 \times (0,05 \times 33,14)) + \\
& (705.727,55 \times (0,05 \times 33,14)) + (347.300,90 \times (0,0567 \times 33,14)) + \\
& (112.225,61 \times (0,20 \times 22,34)) + (438.067,68 \times (0,23 \times 22,34)) + \\
& (511.631,49 \times (0,25 \times 22,34)) + (195.808,00 \times (0,2658 \times 22,34)) + \\
& (36.851,99 \times 13,16 \times (0,05 \times 33,14)) + (20.658,9133 \times 13,16 \times (0,0567 \times 33,14)) + \\
& (3.528.275,00/3,04) \times (0,05 \times 33,14) + (6.599.097,80/3,04) \times (0,05 \times 33,14) + \\
& (9.399.698,33/3,04) \times (0,0567 \times 33,14) + (4.086.286,60/3,04) \times (0,07 \times 33,14) \\
& = 24.416.082,70 \text{ MJ.}
\end{aligned}$$

4) Construção civil e via permanente – consumo de combustíveis. Cálculos até o primeiro semestre de 2015. Nos equipamentos próprios o consumo de diesel foi de: 2012 - 985.467,90 l; 2013 - 2.407.660,04 l; 2014 - 4.494.024,30 l e 2015 - 1.863.112,00 l, totalizando 9.750.264,24 l. O consumo de gasolina foi apenas em 2012 no valor de 1.432,46 l. Nos equipamentos alugados o tempo de uso totalizou: 2012 - 6.352,50 h; 2013 - 57.997,00 h; 2014 - 17.428,02 h e 2015 - 466.788,92 h, totalizando 548.566,44 h, o que corresponde a $548.566,44 \times 13,20 = 7.241.077,01$ l de diesel.

Aplicando a equação (3):

a) Emissão:

$$\begin{aligned}
E &= \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = (985.467,90 \times 0,95 \times 2,60)/1000 + \\
& (2.407.660,04 \times 0,95 \times 2,60)/1000 + (4.494.024,30 \times 0,9433 \times 2,60)/1000 + \\
& (1.863.112,00 \times 0,93 \times 2,60)/1000 + (1.432,46 \times 0,80 \times 2,22)/1000 + \\
& (6.352,50 \times 13,2 \times 0,95 \times 2,60)/1000 + (57.997,00 \times 13,2 \times 0,95 \times 2,60)/1000 + \\
& (17.428,02 \times 13,2 \times 0,9433 \times 2,60)/1000 + (466.788,92 \times 13,2 \times 0,93 \times 2,60)/1000
\end{aligned}$$

$$= 41.471,58 \text{ tCO}_2.$$

b) Energia:

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^n (q \times f) + (h_i \times r_i \times f) = (985.467,90 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)) + \\ &(2.407.660,04 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14)) + \\ &(4.494.024,30 \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14)) + \\ &(1.863.112,00 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14)) + (1.432,46 \times (0,80 \times 32,29 + 0,20 \times 22,34)) + \\ &6.352,50 \times 13,2 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) + 57.997,00 \times 13,2 \times (0,95 \times 35,50 + 0,05 \times 33,14) \\ &+ 17.428,02 \times 13,2 \times (0,9433 \times 35,50 + 0,0567 \times 33,14) + \\ &466.788,92 \times 13,2 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) \\ &= 600.777.575,46 \text{ MJ, sendo a energia renovável} = (985.467,90 \times (0,05 \times 33,14)) + \\ &(2.407.660,04 \times (0,05 \times 33,14)) + (4.494.024,30 \times (0,0567 \times 33,14)) + \\ &(1.863.112,00 \times (0,07 \times 33,14)) + (1.432,46 \times (0,20 \times 22,34)) + 6.352,50 \times 13,2 \times (0,05 \times 33,14) \\ &+ 57.997,00 \times 13,2 \times (0,05 \times 33,14) + 17.428,02 \times 13,2 \times (0,0567 \times 33,14) + \\ &466.788,92 \times 13,2 \times (0,07 \times 33,14) \\ &= 34.528.764,88 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

5) Construção civil e via permanente – consumo de energia elétrica. Cálculos até o primeiro semestre de 2015. Aplicação da equação (4):

a) Emissão:

$$E = E_c \times f = 13.355,024 \times 0,0653 + 30.939,010 \times 0,0960 + 51.463,244 \times 0,1355 + 26.197,903 \times 0,1355 = 14.365,31 \text{ tCO}_2.$$

b) Energia:

$$\begin{aligned} E &= E_c \times f = (13.355,024 + 30.939,010 + 51.463,244 + 26.197,903) \times 1000 \times 3,6 \\ &= 439.038.651,60 \text{ MJ, sendo a energia renovável} = 79,30\% \times 439.038.651,60 \\ &= 348.157.650,72 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

6) Construção civil e via permanente – energia e carbono embutido em materiais. Cálculos até o primeiro semestre de 2015. Aplicação da equação (5):

a) Emissão da construção civil:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (389.747,89091 \times 0,566) + (548.485,245 \times 0,1) + (80.742,11998 \times 1,06) = 361.032,48 \text{ tCO}_2.$$

b) Energia da construção civil:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (389.747.890,91 \times 4,5) + (548.485.245,00 \times 0,75) + (80.742.119,98 \times 20,1) = 3.788.146.054,50 \text{ MJ}, \text{ sendo a energia renovável considerada igual a zero, por falta de dados.}$$

c) Emissão da via permanente:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (4.400 \times 1,06) + (13.949,24777 \times 0,1) + (1.702,96023 \times 1,06) + (4.188 \times 1,06) = 12.303,34 \text{ tCO}_2.$$

d) Energia da via permanente:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (4.400.000,00 \times 20,1) + (13.949.247,77 \times 0,75) + (1.702.960,23 \times 20,1) + (4.188.000,00 \times 20,1) = 217.310.236,46 \text{ MJ}, \text{ sendo a energia renovável considerada igual a zero, por falta de dados.}$$

e) Total da emissão- carbono embutido em materiais:

$$361.032,48 + 12.303,34 = 373.335,82 \text{ tCO}_2.$$

f) Total da energia- energia embutida em materiais:

$$3.788.146.054,50 + 217.310.236,46 = 4.005.456.290,96 \text{ MJ}.$$

7) Totalização da fase de construção da infraestrutura:

$$\text{a) Emissões} = 764,09 + 2,24 + 401,20 + 163,49 + 465,73 + 25.728,63 + 41.471,58 + 14.365,31 + 361.032,48 + 12.303,34 = 456.698,09 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{b) Energia} = 11.036.074,47 + 32.252,27 + 5.220.978,33 + 1.395.691,11 + 6.181.184,53 + 377.599.424,22 + 600.777.575,46 + 439.038.651,60 + 3.788.146.054,50 + 217.310.236,46 = 5.446.738.122,95 \text{ MJ}.$$

$$\text{c) Energia renovável} = 603.279,85 + 1.676,40 + 3.221,94 + 109.676,26 + 3.221,94 + 24.416.082,70 + 34.528.764,88 + 348.157.650,72 + 0 + 0 = 407.823.574,69 \text{ MJ}.$$

8) Projeção até o final da obra: Foi aplicado um acréscimo de 34% dos recursos utilizados na obra (correspondentes á finalização da obra), calculadas a energia e emissão associadas a esse acréscimo e acrescentada a energia /emissão já determinadas nos itens de 1 a 6.

a) Transporte fornecedor – obra.

Quantidade de diesel estimada para a finalização da obra (considerado apenas o transporte de materiais e combustíveis, pois o transporte da via permanente já foi finalizado):

$$0,34 \times ((47.864,00/2,61) + (207.916,00/2,61) + (330.078,20/2,61) + (228.685,00/2,61) + (452,00/2,61) + (728,00/2,61) + (825,00/2,61) + (375,00/2,61)) = 106.419,11 \text{ l.}$$

Aplicando a equação (1) ao valor estimado para a finalização da obra e somando aos valores já calculados para a obra já realizada:

$$\text{Emissão (Materiais e combustíveis)} = (106.419,11 \times 0,93 \times 2,6) / 1000 + 764,09 + 2,24 = 1.023,65 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Emissão (Total, incluindo via permanente)} = 1.023,65 + 401,20 + 163,49 + 465,73 = 2.054,07 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia (Materiais e combustíveis)} = (106.419,11 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14)) + 11.036.074,47 + 32.252,27 = 14.828.624,85 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável (Materiais e combustíveis)} = 106.419,11 \times (0,07 \times 33,14) + 603.279,85 + 1.676,40 = 851.827,30 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia (Total, incluindo via permanente)} = 14.828.624,85 + 5.220.978,33 + 1.395.691,11 + 6.181.184,53 = 27.626.478,83 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável (Total, incluindo via permanente)} = 851.827,30 + 3.221,94 + 109.676,26 + 3.221,94 = 967.947,45 \text{ MJ.}$$

b) Transporte dentro da obra.

Quantidade de diesel estimada para a finalização da obra:

$$0,34 \times ((35.536,00) + (705.727,55) + (347.300,90) + (36.851,99 \times 13,16) + (20.658,91 \times 13,16) + (3.528.275,00/3,04) + (6.599.097,80/3,04) + (9.399.698,33/3,04) + (4.086.286,60/3,04)) = 3.268.406,32 \text{ l.}$$

Quantidade de gasolina estimada para a finalização da obra:

$$0,34 \times ((112.225,61) + (438.067,68) + (511.631,49) + (195.808,00)) = 427.629,15 \text{ l.}$$

Aplicando a equação (2) ao valor estimado para a finalização da obra e somando aos valores já calculados para a obra já realizada:

$$\text{Emissão} = ((3.268.406,32 \times 0,93 \times 2,6) + (427.629,15 \times 0,73 \times 2,22)) / 1000 + 25.728,63 \\ = 34.324,65 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia} = 3.268.406,32 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) + \\ 427.629,15 \times (0,73 \times 32,29 + 0,27 \times 22,34) + 377.599.424,22 = 505.747.227,42 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 3.268.406,32 \times (0,07 \times 33,14) + 427.629,15 \times (0,27 \times 22,34) + \\ 24.416.082,70 = 34.577.505,17 \text{ MJ.}$$

c) Construção civil e via permanente.

Quantidade de diesel estimada para a finalização da obra:

$$0,34 \times ((985.467,90 + 2.407.660,04 + 4.494.024,30 + 1.863.112,00 + (6.352,50 \times 13,2) + \\ (57.997,00 \times 13,2) + (17.428,02 \times 13,2) + (466.788,92 \times 13,2)) \\ = 5.777.056,02 \text{ l.}$$

Quantidade de gasolina estimada para a finalização da obra:

$$0,34 \times 1.432,46 = 487,04 \text{ l.}$$

Aplicando a equação (3) ao valor estimado para a finalização da obra e somando aos valores já calculados para a obra já realizada:

$$\text{Emissão} = (5.777.056,02 \times 0,93 \times 2,6 + 487,04 \times 0,73 \times 2,22) / 1000 + 41.471,58 \\ = 55.441,29 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia} = 5.777.543,06 \times (0,93 \times 35,50 + 0,07 \times 33,14) + \\ 487,04 \times (0,73 \times 32,29 + 0,27 \times 22,34) + 600.777.575,46 = 804.923.112,65 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 5.777.543,06 \times (0,07 \times 33,14) + \\ 487,04 \times (0,27 \times 21,32) + 34.528.764,88 = 47.933.317,16 \text{ MJ.}$$

d) Consumo de energia elétrica.

Quantidade estimada para a finalização da obra:

$$0,34 \times (13.355,024 + 30.939,010 + 51.463,244 + 26.197,903) = 41.464,76 \text{ MWh.}$$

Aplicando a equação (4) ao valor estimado para a finalização da obra e somando aos valores já calculados para a obra já realizada:

$$\text{Emissão} = 41.464,76 \times 0,1355 + 14.365,31 = 19.983,79 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Energia} = 41.464,76 \times 1000 \times 3,6 + 439.038.651,60 = 588.311.793,14 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 79,30\% \times (41.464,76 \times 1000 \times 3,6) + 348.157.650,72$$

$$= 466.531.251,96 \text{ MJ.}$$

e) Energia e carbono embutido em materiais.

Quantidade estimada para a finalização da obra:

$$\text{Cimento} = 0,34 \times 389.747.890,91 \text{ t} = 132.514,28 \text{ t ou } 132.514.282,91 \text{ kg.}$$

$$\text{Concreto} = 0,34 \times 548.485,245 \text{ t} = 186.484,98 \text{ t ou } 186.484.983,30 \text{ kg.}$$

$$\text{Aço} = 0,34 \times 80.742.119,98 \text{ t} = 27.452,32 \text{ t ou } 27.452.320,79 \text{ kg.}$$

Aplicando a equação (5) ao valor estimado para a finalização da obra e somando aos valores já calculados para a obra já realizada:

$$\begin{aligned} \text{Emissão:} &= (132.514,28 \times 0,566 + 186.484,98 \times 0,1 + 27.452,32 \times 1,06) + 373.335,82 \\ &= 496.086,86 \text{ tCO}_2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energia} &= (132.514.282,91 \times 4,5 + 186.484.983,30 \times 0,75 + 27.452.320,79 \times 20,1) \\ &+ 4.005.456.290,96 = 5.293.425.949,49 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

$$\text{Energia renovável} = 0.$$

9) Totalização final:

$$\begin{aligned} \text{Emissões} &= 55.441,29 + 19.983,79 + 2.054,07 + 34.324,65 + 496.086,86 \\ &= 607.890,66 \text{ tCO}_2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energia} &= 804.923.112,65 + 588.311.793,14 + 27.626.478,83 + 505.747.227,42 + \\ &5.293.425.949,49 = 7.220.034.561,54 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energia renovável} &= 967.947,45 + 34.577.505,17 + 47.933.317,15 + \\ &466.531.251,96 + 0 = 550.010.021,74 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

B) Fabricação dos trens

1) Fabricação – consumo de combustíveis. Aplicação da equação 3:

Emissão para 1 trem:

$$\begin{aligned} E &= (316,50 \times 1,981) + (0,39 \times 2,925) + (0,0405 \times 3,033) + (0,192 \times 3,096) + \\ &(5.850 \times 0,002162) = 641,49 \text{ tCO}_2. \end{aligned}$$

$$\text{Emissão para 15 trens} = 15 \times 641,49 = 9.622,38 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Emissão no ciclo de vida (30 trens)} = 30 \times 641,49 = 19.244,77 \text{ tCO}_2.$$

Energia para 1 trem:

$$E = (316.500 \times 20,91) + (390 \times 43,07) + (40,5 \times 43,07) + (192 \times 42,65) + (5.850 \times 38,93) = 6.872.485,94 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia para 15 trens} = 15 \times 6.872.485,94 = 103.087.289,03 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia no ciclo de vida (30 trens)} = 30 \times 6.872.485,94 = 206.174.578,05 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 0.$$

2) Fabricação – consumo de energia elétrica. Aplicação da equação (4):

Emissão para 1 trem:

$$E = E_c \times f = 227,81 \times 1000 \times 3,6 \times 297,688 / 1000000 = 244,14 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Emissão para 15 trens} = 15 \times 244,14 = 3.662,08 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Emissão no ciclo de vida (30 trens)} = 30 \times 244,14 = 7.324,16 \text{ tCO}_2.$$

Energia para 1 trem:

$$E_c = 227,81 \times 1000 \times 3,6 = 820.116,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia para 15 trens} = 15 \times 820.116,00 = 12.301.740,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia no ciclo de vida (30 trens)} = 30 \times 820.116,00 = 24.603.480,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 0.$$

3) Energia/carbono embutidos. Aplicação da equação (5):

Emissão para 1 trem:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (170,66 \times 1,959) + (9,75 \times 10,990) + (9,75 \times 3,290) + (41,45 \times 1,540) + (4,88 \times 2,660) = 550,37 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Emissão para 15 trens} = 15 \times 550,37 = 8.255,50 \text{ tCO}_2.$$

$$\text{Emissão no ciclo de vida (30 trens)} = 30 \times 550,37 = 16.511,00 \text{ MJ.}$$

Energia para 1 trem:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times f) = (170,66 \times 1000 \times 20,1) + (9,75 \times 1000 \times 155) + (9,75 \times 1000 \times 42) + (41,45 \times 1000 \times 28) + (4,88 \times 1000 \times 91) = 6.955.696,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia para 15 trens} = 15 \times 6.955.696,00 = 104.335.440,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia no ciclo de vida (30 trens)} = 30 \times 6.955.696,00 = 208.670.880,00 \text{ MJ.}$$

$$\text{Energia renovável} = 0.$$

4) Transporte. Aplicação da equação 1:

Emissão para 15 trens:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) =$$
$$((90 \text{ viagens} \times 760 \text{ km/viagem} / (1/0,551)) \times 2,6394) / 1000 +$$
$$(15 \text{ trens} \times 22.078 \text{ km} \times 243,8 \times 0,01) / 1000 +$$
$$((90 \text{ viagens} \times 8,4 \text{ km/viagem}) / 2,61) \times 0,9366 \times 2,60 / 1000 = 907,57 \text{ tCO}_2.$$

Emissão no ciclo de vida (30 trens) = $2 \times 907,57 = 1.815,15 \text{ tCO}_2.$

Energia para 15 trens:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{d_i}{rv1} \right) \times f1 \right) + (tkmv2 \times f2) =$$
$$((90 \text{ viagens} \times 760 \text{ km/viagem} / (1/0,551)) \times 42,65) +$$
$$(15 \text{ trens} \times 22.078 \text{ km} \times 243,8 \times 0,13) +$$
$$((90 \text{ viagens} \times 8,4 \text{ km/viagem}) / 2,61) \times (0,9366 \times 35,50 + 0,0634 \times 33,14)$$
$$= 12.113.751,66 \text{ MJ.}$$

Energia no ciclo de vida (30 trens) = $2 \times 12.113.751,66 = 24.227.503,32 \text{ MJ.}$

Energia renovável = $2 \times ((90 \text{ viagens} \times 8,4 \text{ km/viagem}) / 2,61) \times (0,0634 \times 33,14)$
= $1.217,18 \text{ MJ.}$

5) Total da fase Fabricação de trens:

Emissão para 15 trens = $9.622,38 + 3.662,08 + 8.255,50 + 907,57 = 22.447,53 \text{ tCO}_2.$

Emissão no ciclo de vida (30 trens) = $2 \times 22.447,53 = 44.895,07 \text{ tCO}_2.$

Energia para 15 trens = $103.087.289,03 + 12.301.740,00 + 104.335.440,00 +$
 $12.113.751,66 = 231.838.220,69 \text{ MJ.}$

Energia no ciclo de vida (30 trens) = $2 \times 231.838.220,69 = 463.676.441,37 \text{ MJ.}$

Energia renovável = $1.217,18 \text{ MJ.}$

APÊNDICE 2 - CÁLCULO DE PKM NO CICLO DE VIDA DA LINHA 4

a) Matriz de distâncias, em km, entre as estações da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2
JOC	-	6.108	9.428	10.2	11.265	12.339	11.732	12.339
SCO	6.108	-	3.32	4.092	5.157	6.231	5.624	6.31
ATQ	9.428	3.32	-	0.772	1.837	2.911	2.304	2.911
JAL	10.2	4.092	0.772	-	1.065	2.139	3.076	2.139
NSP	11.265	5.157	1.837	1.065	-	1.074	4.141	1.074
GOS	12.339	6.231	2.911	2.139	1.074	-	5.215	-
GAV	11.732	5.624	2.304	3.076	4.141	5.215	-	5.215
L1-L2	12.339	6.231	2.911	2.139	1.074	-	5.215	-

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.
 NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.
 Fonte: METRÔRIO (2014a).

b) Matriz O-D de passageiros – 2016 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-----	2.635	1.933	966	2.459	1.050	1.846	19.654	30.543
SCO	2.748	-----	2.205	910	558	1.195	979	6.093	14.688
ATQ	924	2.386	-----	235	538	270	138	1.988	6.479
JAL	418	839	90	-----	160	202	52	1.633	3.394
NSP	410	480	515	129	-----	1.119	38	2.819	5.510
GOS	504	1.067	514	387	4.495	-----	123	-----	7.090
GAV	929	712	179	51	701	277	-----	601	3.450
L1-L2	4.523	4.745	3.908	2.817	6.546	-----	1.978	-----	24.517
TOTAL	10.456	12.864	9.344	5.495	15.457	4.113	5.154	32.788	95.671

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.
 NSP = N. Sa. da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.
 Fonte: Adaptado de FGV (2011).
 Ex: 30.543 passageiros embarcaram em JOC; 2.459 desses passageiros desembarcaram em NSP.

c) Matriz PKM – 2016 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-----	16.095	18.224	9.853	27.701	12.956	21.657	242.511	348.997
SCO	16.785	-----	7.321	3.724	2.878	7.446	5.506	37.965	81.624
ATQ	8.711	7.922	-----	181	988	786	318	5.787	24.694
JAL	4.264	3.433	69	-----	170	432	160	3.493	12.022
NSP	4.619	2.475	946	137	-----	1.202	157	3.028	12.564
GOS	6.219	6.648	1.496	828	4.828	-----	641	-----	20.660
GAV	10.899	4.004	412	157	2.903	1.445	-----	3.134	22.954
L1-L2	55.809	29.566	11.376	6.026	7.030	-----	10.315	-----	120.123
TOTAL	107.306	70.144	39.845	20.906	46.498	24.266	38.755	295.918	643.638

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

Ex. : os passageiros que embarcaram em JOC e desembarcaram em NSP produziram:

11,265 km × 2.459 passageiros = 27.701 PKM.

O PKM total para as três horas do pico matutino em 2016 é 643,638.

d) Matriz O-D de passageiros – 2026 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-	4.044	2.915	1.427	3.651	1.583	2.564	29.018	45.202
SCO	4.186	-	3.359	1.382	844	1.810	1.353	9.243	22.177
LEB	921	2.408	-	234	536	269	125	1.980	6.473
JDA	415	843	89	-	159	201	47	1.628	3.382
NSP	494	580	623	156	-	1.361	42	3.397	6.653
IGO	589	1246	604	449	5.451	-	131	-	8.470
GAV	863	665	167	47	654	258	-	557	3.211
L1-L2	4.983	4.730	4.132	2.906	6.655	-	1.791	-	25.197
TOTAL	12.451	14.516	11.889	6.601	17.950	5.482	6.053	45.823	120.765

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. Sa. da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Fonte: Adaptado de FGV (2011).

e) Matriz PKM – 2026 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-	24.701	27.483	14.555	41.129	19.533	30.081	358.053	515.534
SCO	25.568	-	11.152	5.655	4.353	11.278	7.609	57.593	123.208
LEB	8.683	7.995	-	181	985	783	288	5.764	24.678
JDA	4.233	3.450	69	-	169	430	145	3.482	11.977
NSP	5.565	2.991	1.144	166	-	1.462	174	3.648	15.151
IGO	7.268	7.764	1.758	960	5.854	-	683	-	24.288
GAV	10.125	3.740	385	145	2.708	1.345	-	2.905	21.352
L1-L2	61.485	29.473	12.028	6.216	7.147	-	9.340	-	125.690
TOTAL	122.927	80.112	54.019	27.878	62.345	34.831	48.320	431.445	861.878

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

f) Matriz O-D de passageiros – 2036 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-	3.360	2.997	1.225	3.077	1.332	2.607	41.353	55.951
SCO	5.973	-	3.535	1.321	779	1.645	1.440	9.864	24.557
LEB	1.505	2.381	-	208	535	263	144	2.696	7.732
JDA	664	807	87	-	160	186	53	2.202	4.159
NSP	692	452	622	154	-	1.154	42	4.287	7.403
IGO	1.015	1.223	716	473	5.908	-	166	-	9.501
GAV	1.209	547	173	47	580	223	-	669	3.448
L1-L2	7.117	4.910	4.453	2.671	7.253	-	2.147	-	28.551
TOTAL	18.175	13.680	12.583	6.099	18.292	4.803	6.599	61.071	141.302

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. Sa. da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Fonte: Adaptado de FGV (2011).

g) Matriz PKM – 2036 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-	20.523	28.256	12.495	34.662	16.436	30.585	510.255	653.212
SCO	36.483	-	11.736	5.406	4.017	10.250	8.099	61.463	137.453
LEB	14.189	7.905	-	161	983	766	332	7.848	32.183
JDA	6.773	3.302	67	-	170	398	163	4.710	15.584
NSP	7.795	2.331	1.143	164	0	1.239	174	4.604	17.451
IGO	12.524	7.621	2.084	1.012	6.345	-	866	-	30.452
GAV	14.184	3.076	399	145	2.402	1.163	-	3.489	24.857
L1-L2	87.817	30.594	12.963	5.713	7.790	-	11.197	-	156.073
TOTAL	179.765	75.352	56.647	25.095	56.370	30.251	51.415	592.368	1.067.263

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

h) Matriz O-D de passageiros – 2040 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	ATQ	JAL	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-	3.025	3.018	1.147	2.861	1.230	2.613	47.462	61.356
SCO	6.571	-	3.681	1.323	780	1.604	1.513	9.944	25.416
LEB	1.831	2.340	-	198	534	259	152	3.079	8.393
JDA	801	783	86	-	160	179	56	2.486	4.551
NSP	791	405	622	153	-	1.073	42	4.755	7.841
IGO	1.253	1.190	761	480	6.059	-	181	-	9.924
GAV	1.384	499	175	47	553	209	-	727	3.594
L1-L2	8.194	4.867	4.552	2.563	7.447	-	2.292	-	29.915
TOTAL	20.825	13.109	12.895	5.911	18.394	4.554	6.849	68.453	150.990

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. Sa. da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Fonte: Adaptado de FGV (2011).

i) Matriz PKM – 2040 – pico matutino – dia útil da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

	JOC	SCO	LEB	JDA	NSP	GOS	GAV	L1-L2	TOTAL
JOC	-	18.477	28.454	11.699	32.229	15.177	30.656	585.634	722.325
SCO	40.136	0	12.221	5.414	4.022	9.995	8.509	61.961	142.257
LEB	17.263	7.769	-	153	981	754	350	8.963	36.232
JDA	8.170	3.204	66	0	170	383	172	5.318	17.484
NSP	8.911	2.089	1.143	163	-	1.152	174	5.107	18.738
IGO	15.461	7.415	2.215	1.027	6.507	0	944	-	33.569
GAV	16.237	2.806	403	145	2.290	1.090	-	3.791	26.762
L1-L2	101.106	30.326	13.251	5.482	7.998	-	11.953	-	170.116
TOTAL	207.283	72.086	57.753	24.082	54.198	28.551	52.758	670.773	1.167.484

JOC = Jardim Oceânico; SCO = São Conrado; ATQ = Antero de Quental; JAL = Jardim de Alah.

NSP = N. As. Da Paz; GOS = General Osório; GAV = Gávea e L1-L2 = Linhas 1 ou 2.

Elaboração própria a partir de FGV (2011) e METRÔ RIO (2014a).

j) PKM dos dias úteis.

PKM do pico matutino nos dias úteis = 20,70% do PKM total dos dias úteis, como observado nas Linhas 1 e 2.

PKM dos dias úteis será:

$$2016: 643.638/20,70\% = 3.109.362.$$

$$2026: 861.878/20,70\% = 4.163.660.$$

$$2036: 1.067.263/20,70\% = 5.155.862.$$

$$2040: 1.167.484/20,70\% = 5.640.020.$$

k) PKM dos Sábados, Domingos e Feriados

Como observado nas Linhas 1 e 2, o PKM dos Sábados, Domingos e Feriados serão, respectivamente, 39%, 21% e 23% do PKM dos dias úteis.

PKM dos Sábados será:

$$2016: 3.109.362 \times 39\% = 1.212.651.$$

$$2026: 4.163.660 \times 39\% = 1.623.827.$$

$$2036: 5.155.862 \times 39\% = 2.010.786.$$

$$2040: 5.640.020 \times 39\% = 2.199.608.$$

PKM dos Domingos será:

$$2016: 3.109.362 \times 21\% = 652.966.$$

$$2026: 4.163.660 \times 21\% = 874.369.$$

$$2036: 5.155.862 \times 21\% = 1.082.731.$$

$$2040: 5.640.020 \times 21\% = 1.184.404.$$

PKM dos Feriados será:

$$2016: 3.109.362 \times 23\% = 715.153.$$

$$2026: 4.163.660 \times 23\% = 957.642.$$

$$2036: 5.155.862 \times 23\% = 1.185.848.$$

$$2040: 5.640.020 \times 23\% = 1.297.205.$$

l) PKM por Ano.

Considerando o calendário de 2016 há 252 dias úteis, 52 sábados, 52 domingos e nove feriados. O PKM total por ano será:

$$2016: 252 \times 3.109.362 + 52 \times 1.212.651 + 52 \times 652.966 + 9 \times 715.153 = 887.007.658 \text{ (Foi considerado metade deste valor — 443,503,829 — porque a Linha 4 inicia a operação no segundo semestre de 2016).}$$

$$2026: 252 \times 4.163.660 + 52 \times 1.623.827 + 52 \times 874.369 + 9 \times 957.642 = 1.187.767.243.$$

$$2036: 252 \times 5.155.862 + 52 \times 2.010.786 + 52 \times 1.082.731 + 9 \times 1.185.848 = 1.470.812.762.$$

$$2040: 252 \times 5.640.020 + 52 \times 2.199.608 + 52 \times 1.184.404 + 9 \times 1.297.205 = 1.608.928.623.$$

Crescimento médio anual:

$$\text{Entre 2016 e 2026: } (1.187.767.243 - 887.007.658) / 10 = 30.075.958.$$

$$\text{Entre 2026 e 2036: } (1.470.812.762 - 1.187.767.243) / 10 = 28.304.552.$$

$$\text{Entre 2036 e 2040: } (1.608.928.623 - 1.470.812.762) / 4 = 34.528.965.$$

Considerando esses valores de crescimento entre 2016-2026, 2026-2036 e 2036-2040 e aplicando aos anos intermediários (A previsão de demanda da FGV considera estabilização a partir de 2040):

Ano	PKM	Ano	PKM
Segundo semestre de			
2016	443.503.829	2046	1.608.928.623
2017	917.083.616	2047	1.608.928.623
2018	947.159.575	2048	1.608.928.623
2019	977.235.533	2049	1.608.928.623
2020	1.007.311.492	2050	1.608.928.623
2021	1.037.387.450	2051	1.608.928.623
2022	1.067.463.409	2052	1.608.928.623
2023	1.097.539.367	2053	1.608.928.623
2024	1.127.615.326	2054	1.608.928.623
2025	1.157.691.284	2055	1.608.928.623
2026	1.187.767.243	2056	1.608.928.623
2027	1.216.067.859	2057	1.608.928.623
2028	1.244.376.347	2058	1.608.928.623
2029	1.272.680.899	2059	1.608.928.623
2030	1.300.985.451	2060	1.608.928.623
2031	1.329.290.003	2061	1.608.928.623
2032	1.357.594.555	2062	1.608.928.623
2033	1.385.899.106	2063	1.608.928.623
2034	1.414.203.658	2064	1.608.928.623
2035	1.442.508.210	2065	1.608.928.623
2036	1.470.812.762	2066	1.608.928.623
2037	1.505.341.727	2067	1.608.928.623
2038	1.539.870.692	2068	1.608.928.623
2039	1.574.399.658	2069	1.608.928.623
2040	1.608.928.623	2070	1.608.928.623
2041	1.608.928.623	2071	1.608.928.623
2042	1.608.928.623	2072	1.608.928.623
2043	1.608.928.623	2073	1.608.928.623
2044	1.608.928.623	2074	1.608.928.623
2045	1.608.928.623	2075	1.608.928.623
Primeiro semestre de 2076			804.464.311
PKM Total no Ciclo de vida			87.747.683.773

APÊNDICE 3 – MATERIAIS, EMISSÕES E ENERGIA NO CICLO DE VIDA DA LINHA 4 – RESULTADOS DO ICV

PKM NO CICLO DE VIDA = 87.747.683.773

a) Materiais na Construção da infraestrutura

	Massa (kg)
Cimento	522.262.173,81
Concreto	734.970.228,30
Aço	108.194.440,78
Via permanente - aço	4.400.000,00
Via permanente - concreto	13.949.247,77
Via permanente - aço	1.702.960,23
Via permanente – aço	4.188.000,00
Total	1.389.667.050,89
kg/PKM	1,58E-02

b) Materiais na Manutenção

	Massa (kg)
Rodas-aço: Substituição completa	938.880,00
Trilhos-aço: Substituição completa	8.800.000,00
Dormentes-aço: Substituição completa	1.702.960,23
Dormentes-concreto: Substituição completa	13.949.247,77
Trilhos-aço Substituição parcial	3.078.000,00
Dormentes-aço Substituição parcial	509.400,00
Dormentes-concreto Substituição parcial	4.170.600,00
Terceiro trilho-aço Substituição parcial	166.800,00
Total	33.315.888,00
kg/PKM	3,80E-04

c) Materiais na Fabricação dos trens

	Massa (kg)
AÇO	5.119.800,00
ALUMÍNIO	292.500,00
COBRE	292.500,00
FIBRA DE VIDRO	1.243.500,00
BORRACHA	146.400,00
TOTAL	7.094.700,00
kg/PKM	8,09E-05

Total no ciclo de vida = $1,58E-02 + 3,80E-04 + 8,09E-05 = 1,63E-02$ kg/PKM.

d) Energia total, renovável e não renovável

PKM = 87.747.683.773

	CONSTRUÇÃO INFRAESTRUTURA	FABRICAÇÃO TRENS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO INFRAESTRUTURA	OPERAÇÃO TRENS	CICLO DE VIDA
Energia (MJ)	7.220.034.562	463.676.441	506.808.290	1.808.163.067	12.535.502.421	22.534.184.782
Energia Renovável (MJ)	550.010.022	1.217	82.015.378	1.431.581.043	9.940.653.420	12.004.261.080
Energia Não Renovável (MJ)	6.670.024.540	463.675.224	424.792.913	376.582.024	2.594.849.001	10.529.923.702
Energia/PKM (kJ)	82,28	5,28	5,78	20,61	142,86	256,81
Energia Renovável/PKM (kJ)	6,27	0,00	0,93	16,31	113,29	136,80
Energia Não Renovável/PKM (kJ)	76,01	5,28	4,84	4,29	29,57	120,00

e) Energia agrupada por materiais, equipamentos, transporte e eletricidade

PKM = 87.747.683.773

	CONSTRUÇÃO INFRAESTRUTURA	FABRICAÇÃO TRENS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO INFRAESTRUTURA	OPERAÇÃO TRENS	CICLO DE VIDA
Energia materiais (MJ)	5.293.425.949	208.670.880	319.030.294			5.821.127.124
Energia equipamentos (MJ)	804.923.113	206.174.578	67.532.181	2.503.117		1.081.132.989
Energia transporte (MJ)	533.373.706	24.227.503	62.424.241	4.350.859		624.376.310
Energia elétrica (MJ)	588.311.793	24.603.480	57.821.574	1.801.309.091	12.535.502.421	15.007.548.359
Energia materiais/PKM (kJ)	60,33	2,38	3,64	0,00	0,00	66,34
Energia equipamentos/PKM (kJ)	9,17	2,35	0,77	0,03	0,00	12,32
Energia transporte/PKM (kJ)	6,08	0,28	0,71	0,05	0,00	7,12
Energia elétrica/PKM (kJ)	6,70	0,28	0,66	20,53	142,86	171,03
Energia total/PKM (kJ)	82,28	5,28	5,78	20,61	142,86	256,81

f) Emissões agrupadas por materiais, equipamentos, transporte e eletricidade

PKM = 87.747.683.773

	CONSTRUÇÃO INFRAESTRUTURA	FABRICAÇÃO TRENS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO INFRAESTRUTURA	OPERAÇÃO TRENS	CICLO DE VIDA
Emissões materiais (tCO ₂)	496.087	16.511	17.920			530.518
Emissões equipamentos (tCO ₂)	55.441	19.245	4.621	171		79.479
Emissões transporte (tCO ₂)	36.379	1.815	2.358	97		40.649
Emissões eletricidade (tCO ₂)	19.984	7.324	2.176	67.799	471.822	569.106
Emissões materiais/PKM (gCO ₂)	5,65	0,19	0,20	0,00	0,00	6,05
Emissões equipamentos/PKM (gCO ₂)	0,63	0,22	0,05	0,00	0,00	0,91
Emissões transporte/PKM (gCO ₂)	0,41	0,02	0,03	0,00	0,00	0,46
Emissões eletricidade/PKM (gCO ₂)	0,23	0,08	0,02	0,77	5,38	6,49
Emissões totais/PKM (gCO ₂)	6,93	0,51	0,31	0,78	5,38	13,90

APÊNDICE 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

a) Emissões em função da carga

Carga	Consumo kWh/carro-km	kWh	Emissões operação trens (tCO ₂)	Emissões totais (tCO ₂)	PKM	Carga	gCO ₂ /PKM
2,56%	3,19	3.067.771.893	415.683	1.163.612	6.574.014.354	2,56%	177,00
7,91%	3,26	3.138.079.881	425.210	1.173.139	20.304.530.656	7,91%	57,78
13,25%	3,34	3.208.387.869	434.737	1.182.666	34.023.808.126	13,25%	34,76
18,59%	3,41	3.278.695.858	444.263	1.192.192	47.738.643.294	18,59%	24,97
23,93%	3,48	3.349.003.846	453.790	1.201.719	61.462.363.066	23,93%	19,55
29,28%	3,55	3.419.311.834	463.317	1.211.246	75.181.640.536	29,28%	16,11
34,17%	3,62	3.482.084.006	471.822	1.219.751	87.747.683.773	34,17%	13,90
34,62%	3,63	3.489.619.823	472.843	1.220.773	88.900.918.006	34,62%	13,73
38,71%	3,68	3.543.457.307	480.138	1.228.068	102.620.195.476	38,71%	11,97
39,96%	3,70	3.559.927.811	482.370	1.230.299	104.678.087.096	39,96%	11,75
40,76%	3,71	3.570.474.009	483.799	1.231.728	106.598.785.942	40,76%	11,55
41,51%	3,72	3.580.317.128	485.133	1.233.062	114.281.581.326	41,51%	10,79
44,50%	3,74	3.600.003.365	487.800	1.235.730	116.339.472.946	44,50%	10,62
45,30%	3,76	3.619.689.601	490.468	1.238.397	117.162.629.594	45,30%	10,57
45,62%	3,77	3.630.235.800	491.897	1.239.826	113.812.623.495	45,62%	10,89
44,32%	3,78	3.634.454.279	492.469	1.240.398	125.805.774.400	44,32%	9,86
48,99%	3,82	3.678.748.312	498.470	1.246.399	130.067.901.174	48,99%	9,58
50,65%	3,85	3.700.543.788	501.424	1.249.353	143.778.027.886	50,65%	8,69
55,99%	3,92	3.770.851.776	510.950	1.258.879	157.497.305.356	55,99%	7,99
61,33%	3,99	3.841.159.765	520.477	1.268.406	171.216.582.826	61,33%	7,41
66,67%	4,07	3.911.467.753	530.004	1.277.933	184.935.860.296	66,67%	6,91

Carga	Consumo kWh/carro-km	kWh	Emissões operação trens (tCO ₂)	Emissões totais (tCO ₂)	PKM	Carga	gCO ₂ /PKM
72,02%	4,14	3.981.775.741	539.531	1.287.460	198.655.137.766	72,02%	6,48
77,36%	4,21	4.052.083.730	549.057	1.296.986	212.374.415.236	77,36%	6,11
82,70%	4,29	4.122.391.718	558.584	1.306.513	226.093.692.706	82,70%	5,78
88,04%	4,36	4.192.699.707	568.111	1.316.040	239.812.970.176	88,04%	5,49
93,39%	4,43	4.263.007.695	577.638	1.325.567	253.532.247.647	93,39%	5,23
98,73%	4,50	4.333.315.683	587.164	1.335.093	256.797.435.684	98,73%	5,20
100,00%	4,52	4.350.048.985	589.432	1.337.361	264.096.091.298	100,00%	5,06
102,84%	4,56	4.387.452.834	594.500	1.342.429	267.251.525.117	102,84%	5,02
104,07%	4,58	4.403.623.672	596.691	1.344.620	280.970.802.587	104,07%	4,79
109,41%	4,65	4.473.931.660	606.218	1.354.147	285.223.778.602	109,41%	4,75
111,07%	4,67	4.495.727.136	609.171	1.357.100	294.690.080.057	111,07%	4,61
114,76%	4,72	4.544.239.648	615.744	1.363.674	308.409.357.527	114,76%	4,42
120,10%	4,80	4.614.547.637	625.271	1.373.200	308.366.481.186	120,10%	4,45

As colunas “Carga” e “Consumo em kWh por carro-km” foram obtidas em testes realizados no Metrô Rio. A linha em negrito representa os dados obtidos neste trabalho. A partir da quantidade de carro-km, que é conhecida e constante no ciclo de vida ($60 \times 14.107.891$), basta multiplicar pelo consumo em kWh por carro-km para obter-se o valor de kWh para cada carga (coluna “kWh”). A coluna “Emissões da operação dos trens” é obtida multiplicando-se a coluna “kWh” pelo fator de emissão da eletricidade considerado ($0,1355 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$) e dividindo-se por 1000 para converter o resultado em tCO₂. Somando as emissões das demais fases à emissão da operação dos trens obtém-se a coluna “Emissões totais”. A coluna “PKM” é obtida por proporcionalidade entre a carga e o PKM. Finalmente dividindo a coluna “Emissões totais” pela coluna “PKM” chega-se ao resultado da coluna “gCO₂/PKM”. As duas últimas colunas foram utilizadas para fazer o gráfico da figura 30.

b) Energia em função da carga da Linha 4

Carga	Consumo em kWh /carro-km	kWh	Energia operação dos trens (MJ)	Energia total ciclo de vida (MJ)	PKM		Carga	MJ/PKM
2,56%	3,19	3.067.771.893	11.043.978.813	21.042.661.174	6.574.014.354		2,56%	3,20
7,91%	3,26	3.138.079.881	11.297.087.572	21.295.769.932	20.304.530.656		7,91%	1,05
13,25%	3,34	3.208.387.869	11.550.196.330	21.548.878.690	34.023.808.126		13,25%	0,63
18,59%	3,41	3.278.695.858	11.803.305.088	21.801.987.448	47.738.643.294		18,59%	0,46
23,93%	3,48	3.349.003.846	12.056.413.846	22.055.096.206	61.462.363.066		23,93%	0,36
29,28%	3,55	3.419.311.834	12.309.522.604	22.308.204.965	75.181.640.536		29,28%	0,30
34,17%	3,62	3.482.084.006	12.535.502.421	22.534.184.782	87.747.683.773		34,17%	0,26
34,62%	3,63	3.489.619.823	12.562.631.362	22.561.313.723	88.900.918.006		34,62%	0,25
38,71%	3,68	3.543.457.307	12.756.446.306	22.755.128.666	102.620.195.476		38,71%	0,22
39,96%	3,70	3.559.927.811	12.815.740.120	22.814.422.481	104.678.087.096		39,96%	0,22
40,76%	3,71	3.570.474.009	12.853.706.434	22.852.388.795	106.598.785.942		40,76%	0,21
41,51%	3,72	3.580.317.128	12.889.141.660	22.887.824.021	114.281.581.326		41,51%	0,20
44,50%	3,74	3.600.003.365	12.960.012.113	22.958.694.473	116.339.472.946		44,50%	0,20
45,30%	3,76	3.619.689.601	13.030.882.565	23.029.564.925	117.162.629.594		45,30%	0,20
45,62%	3,77	3.630.235.800	13.068.848.879	23.067.531.239	113.812.623.495		45,62%	0,20
44,32%	3,78	3.634.454.279	13.084.035.404	23.082.717.764	125.805.774.400		44,32%	0,18
48,99%	3,82	3.678.748.312	13.243.493.922	23.242.176.282	130.067.901.174		48,99%	0,18
50,65%	3,85	3.700.543.788	13.321.957.637	23.320.639.997	143.778.027.886		50,65%	0,16
55,99%	3,92	3.770.851.776	13.575.066.395	23.573.748.755	157.497.305.356		55,99%	0,15
61,33%	3,99	3.841.159.765	13.828.175.153	23.826.857.513	171.216.582.826		61,33%	0,14
66,67%	4,07	3.911.467.753	14.081.283.911	24.079.966.272	184.935.860.296		66,67%	0,13
72,02%	4,14	3.981.775.741	14.334.392.669	24.333.075.030	198.655.137.766		72,02%	0,12
77,36%	4,21	4.052.083.730	14.587.501.427	24.586.183.788	212.374.415.236		77,36%	0,12
82,70%	4,29	4.122.391.718	14.840.610.185	24.839.292.546	226.093.692.706		82,70%	0,11

Carga	Consumo em kWh /carro-km	kWh	Energia operação dos trens (MJ)	Energia total ciclo de vida (MJ)	PKM		Carga	MJ/PKM
88,04%	4,36	4.192.699.707	15.093.718.944	25.092.401.304	239.812.970.176		88,04%	0,10
93,39%	4,43	4.263.007.695	15.346.827.702	25.345.510.062	253.532.247.647		93,39%	0,10
98,73%	4,50	4.333.315.683	15.599.936.460	25.598.618.820	256.797.435.684		98,73%	0,10
100,00%	4,52	4.350.048.985	15.660.176.344	25.658.858.705	264.096.091.298		100,00%	0,10
102,84%	4,56	4.387.452.834	15.794.830.204	25.793.512.564	267.251.525.117		102,84%	0,10
104,07%	4,58	4.403.623.672	15.853.045.218	25.851.727.578	280.970.802.587		104,07%	0,09
109,41%	4,65	4.473.931.660	16.106.153.976	26.104.836.337	285.223.778.602		109,41%	0,09
111,07%	4,67	4.495.727.136	16.184.617.691	26.183.300.052	294.690.080.057		111,07%	0,09
114,76%	4,72	4.544.239.648	16.359.262.734	26.357.945.095	308.409.357.527		114,76%	0,09
120,10%	4,80	4.614.547.637	16.612.371.492	26.611.053.853	308.366.481.186		120,10%	0,09

As colunas “Carga” e “Consumo em kWh por carro-km” foram obtidas em testes realizados no Metrô Rio. A linha em negrito representa os dados obtidos neste trabalho. A partir da quantidade de carro-km, que é conhecida e constante no ciclo de vida ($60 \times 14.107.891$), basta multiplicar pelo consumo em kWh por carro-km para obter-se o valor de kWh para cada carga (coluna kWh). Multiplicando a coluna “kWh” por 3,6 obtém-se a coluna “Energia da operação dos trens (MJ)”. Somando o consumo de energia das demais fases do ciclo de vida obtém-se a coluna “Energia total no ciclo de vida (MJ)”. A coluna “PKM” é obtida por proporcionalidade entre a carga e o PKM. A coluna “MJ/PKM” é o resultado da divisão da coluna “Energia total” pela coluna “PKM”. As duas últimas colunas foram utilizadas para fazer o gráfico da figura 31.

c) Emissões em função do fator de emissão da eletricidade

Emissões totais (tCO ₂)	PKM total		Multiplicador	gCO ₂ /PKM
680.127	87.747.683.773		0,000001	7,75
680.666	87.747.683.773		0,001	7,76
721.636	87.747.683.773		0,07692308	8,22
725.095	87.747.683.773		0,08333333	8,26
729.183	87.747.683.773		0,09090909	8,31
734.089	87.747.683.773		0,1	8,37
740.085	87.747.683.773		0,11111111	8,43
747.580	87.747.683.773		0,125	8,52
757.216	87.747.683.773		0,14285714	8,63
770.064	87.747.683.773		0,16666667	8,78
788.051	87.747.683.773		0,2	8,98
815.033	87.747.683.773		0,25	9,29
860.001	87.747.683.773		0,33333333	9,80
949.939	87.747.683.773		0,5	10,83
1.219.751	87.747.683.773		1	13,90
1.759.376	87.747.683.773		2	20,05
2.299.001	87.747.683.773		3	26,20
2.838.626	87.747.683.773		4	32,35
3.378.251	87.747.683.773		5	38,50
3.917.876	87.747.683.773		6	44,65
4.457.501	87.747.683.773		7	50,80
4.997.126	87.747.683.773		8	56,95
5.536.751	87.747.683.773		9	63,10
6.076.376	87.747.683.773		10	69,25

Emissões totais (tCO ₂)	PKM total		Multiplicador	gCO ₂ /PKM
6.616.001	87.747.683.773		11	75,40
7.155.626	87.747.683.773		12	81,55
7.695.250	87.747.683.773		13	87,70
8.234.875	87.747.683.773		14	93,85
8.774.500	87.747.683.773		15	100,00
9.314.125	87.747.683.773		16	106,15
9.853.750	87.747.683.773		17	112,30
10.393.375	87.747.683.773		18	118,45
10.933.000	87.747.683.773		19	124,60
11.472.625	87.747.683.773		20	130,75

A linha em negrito representa os dados obtidos neste trabalho. As variações do fator de emissão da eletricidade impactarão as fases futuras de operação dos trens e operação da infraestrutura, altamente dependentes da eletricidade. O objetivo é aplicar um multiplicador (coluna “Multiplicador”) ao fator de emissão, calcular o novo valor das emissões operacionais dos trens e da infraestrutura, devidas ao uso da eletricidade, e, conseqüentemente, o novo valor das emissões totais (coluna “Emissões totais”). Em cada situação o PKM total mantém-se o mesmo, pois é o PKM total do ciclo de vida (coluna “PKM total”). A coluna “gCO₂/PKM” é o resultado da divisão da coluna “Emissões totais” pela coluna “PKM total”. As duas últimas colunas foram utilizadas para fazer o gráfico da figura 32.

APÊNDICE 5 – COMBUSTÍVEIS E EMISSÕES EVITADAS NO CICLO DE VIDA DA LINHA 4

Ano	PKM	Gasolina (l)	GNV (m ³)	Diesel (l)	Total por ano (tCO ₂)
Segundo semestre de					
2016	443.503.829	13.876	4.564	6.441	24.882
2017	917.083.616	28.693	9.438	13.320	51.450
2018	947.159.575	29.634	9.747	13.756	53.138
2019	977.235.533	30.575	10.057	14.193	54.825
2020	1.007.311.492	31.516	10.366	14.630	56.512
2021	1.037.387.450	32.457	10.676	15.067	58.200
2022	1.067.463.409	33.398	10.985	15.504	59.887
2023	1.097.539.367	34.339	11.295	15.940	61.574
2024	1.127.615.326	35.280	11.604	16.377	63.262
2025	1.157.691.284	36.221	11.914	16.814	64.949
2026	1.187.767.243	37.162	12.223	17.251	66.636
2027	1.216.067.859	38.047	12.515	17.662	68.224
2028	1.244.376.347	38.933	12.806	18.073	69.812
2029	1.272.680.899	39.819	13.097	18.484	71.400
2030	1.300.985.451	40.704	13.389	18.895	72.988
2031	1.329.290.003	41.590	13.680	19.306	74.576
2032	1.357.594.555	42.475	13.971	19.717	76.164
2033	1.385.899.106	43.361	14.262	20.128	77.752
2034	1.414.203.658	44.247	14.554	20.540	79.340
2035	1.442.508.210	45.132	14.845	20.951	80.928
2036	1.470.812.762	46.018	15.136	21.362	82.516
2037	1.505.341.727	47.098	15.492	21.863	84.453
2038	1.539.870.692	48.178	15.847	22.365	86.390
2039	1.574.399.658	49.259	16.202	22.866	88.327
2040	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2041	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2042	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2043	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2044	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2045	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2046	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2047	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2048	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2049	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2050	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2051	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2052	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2053	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2054	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2055	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2056	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264

Ano	PKM	Gasolina (l)	GNV (m ³)	Diesel (l)	Total por ano (tCO ₂)
2057	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2058	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2059	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2060	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2061	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2062	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2063	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2064	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2065	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2066	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2067	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2068	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2069	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2070	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2071	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2072	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2073	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2074	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
2075	1.608.928.623	50.339	16.558	23.368	90.264
Primeiro semestre de					
2076	804.464.311	25.170	8.279	11.684	45.132
Total	87.747.683.773	2.745.388	903.018	1.274.427	4.922.833

A coluna PKM teve seus valores retirados do Apêndice 2. As quantidades de gasolina, GNV e diesel evitadas, em cada ano, foram calculadas aplicando-se as mesmas equações descritas no texto do trabalho e indicadas abaixo. Observe-se que no texto do trabalho as fórmulas foram aplicadas de uma só vez aos dados totais do ciclo de vida. Aqui elas foram aplicadas para cada ano do ciclo de vida. A soma dos resultados de cada ano do ciclo de vida produz obviamente o mesmo total do ciclo de vida calculado no trabalho.

Etapa 1: Cálculo de PKM de cada veículo.

Auto - gasolina: $PKM_v = \% v \times PKM_m = 68,95\% \times 28\% \times PKM_m$

Auto - etanol: $PKM_v = \% v \times PKM_m = 9,64\% \times 28\% \times PKM_m$

Auto - GNV: $PKM_v = \% v \times PKM_m = 21,41\% \times 28\% \times PKM_m$

Ônibus - diesel: $PKM_v = \% v \times PKM_m = 72\% \times PKM_m$

Nota: Os percentuais utilizados estão calculados e apresentados no texto do trabalho.

Etapa 2: Cálculo de VKM e quantidade de combustível de cada veículo.

$$\text{Auto - gasolina: } VKM_v = PKM_v / l = PKM_v / 1$$

$$\text{Auto - etanol: } VKM_v = PKM_v / l = PKM_v / 1$$

$$\text{Auto - GNV: } VKM_v = PKM_v / l = PKM_v / 1$$

$$\hat{\text{Ônibus - diesel: }} VKM_v = PKM_v / l = ((PKM_v \text{ pico} \times 46,50\%) / 80) + ((PKM_v \text{ fora de pico} \times 53,50\%) / 40)$$

Nota: Para os ônibus: horas de pico = 46,50% da carga total e horas fora de pico = 53,50% da carga total, conforme dados históricos do Metrô do Rio de Janeiro. Carga de automóvel igual a 1 passageiro.

$$\text{Gasolina C: } q = VKT_v / r = VKT_v / 10$$

$$\text{Gasolina A} = 73\% \times q$$

$$\text{Etanol anidro} = 27\% \times q$$

$$\text{Etanol hidratado: } q = VKT_v / r = VKT_v / 8,65$$

$$\text{GNV: } q = VKT_v / r = VKT_v / 12$$

$$\text{Diesel B5: } q = VKT_v / e = VKT_v / 2,3$$

$$\text{Diesel} = 93\% \times q$$

$$\text{Biodiesel} = 7\% \times q$$

Etapa 3: Cálculo da emissão evitada

$$E_{ev} = (q \times f) / 1000$$

$$\text{Gasolina A} = (q \times 2,22) / 1000$$

$$\text{GNV} = (q \times 2,06) / 1000$$

$$\text{Diesel} = (q \times 2,60) / 1000$$

APÊNDICE 6 – EMISSÕES ACUMULADAS, PRODUZIDAS E EVITADAS, ANO A ANO

Ano	Ano	Emissões produzidas acumuladas (tCO ₂)	Emissões evitadas acumuladas (tCO ₂)
2016	0	751.861	24.882
2017	1	759.725	76.332
2018	2	767.588	129.470
2019	3	775.452	184.295
2020	4	783.316	240.807
2021	5	791.179	299.007
2022	6	799.043	358.894
2023	7	806.907	420.468
2024	8	814.771	483.730
2025	9	822.634	548.678
2026	10	830.498	615.315
2027	11	838.362	683.539
2028	12	846.225	753.351
2029	13	854.089	824.751
2030	14	861.953	897.739
2031	15	869.816	972.315
2032	16	877.680	1.048.479
2033	17	885.544	1.126.231
2034	18	893.408	1.205.571
2035	19	901.271	1.286.499
2036	20	909.135	1.369.015
2037	21	916.999	1.453.467
2038	22	924.862	1.539.857
2039	23	932.726	1.628.185
2040	24	940.590	1.718.449
2041	25	948.454	1.808.713
2042	26	956.317	1.898.978
2043	27	964.181	1.989.242
2044	28	972.045	2.079.506
2045	29	979.908	2.169.771
2046	30	987.772	2.260.035
2047	31	995.636	2.350.299
2048	32	1.003.500	2.440.564
2049	33	1.011.363	2.530.828
2050	34	1.019.227	2.621.093
2051	35	1.027.091	2.711.357
2052	36	1.034.954	2.801.621
2053	37	1.042.818	2.891.886
2054	38	1.050.682	2.982.150
2055	39	1.058.545	3.072.414
2056	40	1.066.409	3.162.679

Ano	Ano	Emissões produzidas acumuladas (tCO ₂)	Emissões evitadas acumuladas (tCO ₂)
2057	41	1.074.273	3.252.943
2058	42	1.082.137	3.343.207
2059	43	1.090.000	3.433.472
2060	44	1.097.864	3.523.736
2061	45	1.105.728	3.614.000
2062	46	1.113.591	3.704.265
2063	47	1.121.455	3.794.529
2064	48	1.129.319	3.884.793
2065	49	1.137.183	3.975.058
2066	50	1.145.046	4.065.322
2067	51	1.152.910	4.155.586
2068	52	1.160.774	4.245.851
2069	53	1.168.637	4.336.115
2070	54	1.176.501	4.426.379
2071	55	1.184.365	4.516.644
2072	56	1.192.228	4.606.908
2073	57	1.200.092	4.697.173
2074	58	1.207.956	4.787.437
2075	59	1.215.820	4.877.701
2076	60	1.219.751	4.922.833

As emissões produzidas são acumuladas a partir das emissões não operacionais (fixas) somadas com a emissão da operação dos trens (variável conforme o ano). A cada ano o valor acumulado é somado com a emissão operacional daquele ano.

As emissões evitadas acumuladas são calculadas acumulando-se, ano a ano, os valores mostrados no Apêndice 5. As três últimas colunas foram utilizadas na criação do gráfico da figura 34.