

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CURITIBA / DIRGE-CT / DIRPPG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE  
MATERIAIS**

**MARCO AURÉLIO FELLER**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE TECNOLOGIAS  
ALTERNATIVAS NO SISTEMA BRT DO TRANSPORTE PÚBLICO DE  
CURITIBA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2016**

**MARCO AURÉLIO FELLER**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE TECNOLOGIAS  
ALTERNATIVAS NO SISTEMA BRT DO TRANSPORTE PÚBLICO DE  
CURITIBA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia” – Área de Concentração: Engenharia de Manufatura.

**Orientador:** Profa. Cássia Maria Lie Ugaya, Dr.

**CURITIBA**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

F318a Feller, Marco Aurélio  
2016 Avaliação do ciclo de vida de tecnologias alternativas no sistema BRT do transporte público de Curitiba / Marco Aurélio Feller -- 2016.  
154 f. : il. ; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2016.

Bibliografia: f. 122-135.

1. Transporte rápido por ônibus – Avaliação. 2. Transportes coletivos – Tecnologia apropriada. 3. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Ugaya, Maria Lie, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

---

CDD: Ed. 22 – 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
MARCO AURELIO FELLER

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS NO  
SISTEMA BRT DO TRANSPORTE PÚBLICO DE CURITIBA**

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

---

Prof. Paulo César Borges, Dr.  
Coordenador do Programa

**Banca Examinadora**

---

Prof. Cássia Maria Lie Ugaya, Dr.  
UTFPR - orientador

---

Prof. Semida Silveira, Dr.  
KTH

---

Prof. Keiko Verônica Ono Fonseca, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Paulo Henrique Dias dos Santos, Dr.  
UTFPR

Curitiba, 29 de Agosto de 2016

## AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial minha esposa Juliana e minhas filhas Liz e Mel pelo apoio incondicional, paciência e incentivo durante a realização do trabalho.

À professora Cássia Maria Lie Ugaya, pela paciência e oportunidade, e acima de tudo pelo conhecimento transmitido sem os quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

A Volvo Do Brasil pelo acesso aos dados assim como ao software GSP e a possibilidade de utilizá-los neste trabalho, em especial para Roberson Oliveira e Simon Andersson.

Aos professores das bancas de qualificação e defesa, professores Paulo Henrique Dias dos Santos, José Velásquez e professoras Keiko Verônica Ono Fonseca e Semida Silveira, pelas contribuições.

“Não fiz o melhor, mas fiz tudo para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas não sou o que era antes.” (Martin Luther King)

## RESUMO

Feller, Marco. Avaliação do ciclo de vida de tecnologias alternativas no Sistema BRT do transporte público de Curitiba. 2016. 153f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A qualidade de toda avaliação de ciclo de vida (ACV) depende intrinsecamente da qualidade do inventário utilizado. O levantamento do inventário é, todavia bastante trabalhoso de ser construído, pois consiste em descrever detalhadamente as fases de produção, utilização e descarte do produto ao longo do seu ciclo de vida. Este trabalho se propôs a avaliar uma parte do sistema de transporte público da cidade de Curitiba, mais especificamente os veículos biarticulados, modelo B340M, e compará-los a tecnologias alternativas operando em cinco corredores exclusivos BRT da cidade. Para este estudo foram considerados veículos homologados conforme as fases P5 e P7 do Proconve, assim como a utilização de misturas B7 e B100 nas configurações biarticulado, articulado e articulado híbrido. Os dados relacionados aos materiais utilizados na produção do B340M foram obtidos através da ferramenta de gerenciamento do produto (KOLA) do fabricante. Dos mais de 3000 componentes, 94% do peso do chassi foi possível de ser identificado. Para a carroceria, entretanto valores estimados tiveram de ser aplicados, pois não houve retorno dos encarregadores. O relatório de sustentabilidade da empresa forneceu os dados necessários para modelar as entradas e saídas da fase de produção da planta de Curitiba. Foram utilizados fatores de escala para as configurações articuladas e híbridas, para se criar os *datasets* utilizados nas comparações. Para a fase de uso, foi necessário levantar os ciclos de operação BRT, e, portanto uma série de aquisições de dados foi conduzida utilizando sensores de pressão atmosférica e GPS. Tais dados foram tratados de forma a descrever detalhadamente a topografia das rotas assim como a dinâmica da operação. Estes ciclos foram utilizados como dados de entrada para a simulação de consumo de combustível. Com o uso de fatores de emissões foi possível quantificar as emissões dos poluentes regulados durante a fase de uso. Já para a fase de descarte, dados doecoinvent foram utilizados, sendo que foi considerado 100% de reciclagem para os metais e para as baterias do veículo híbrido. Os métodos de avaliação do impacto no ciclo de vida utilizados foram o IMPACT2002+, CML 2000 e Eco-indicator 99 (H/A) sendo os dois últimos como análise de sensibilidade. A fase de utilização do produto continua desempenhando um papel bastante expressivo nos diferentes impactos ambientais frente às outras fases, em especial pelo consumo de combustível, seja fóssil ou biogênico. Entretanto, os avanços da indústria automotiva em relação ao controle de poluentes permitem mitigar tais impactos através do desenvolvimento e adoção de novas tecnologias. Dados os objetivos e escopo deste trabalho, pode-se concluir que o maior impacto está na saúde humana e que as soluções tecnologicamente mais avançadas como a utilização de veículos que cumprem a fase P7 e veículos híbridos trazem uma vantagem significativa frente a atual frota de ônibus curitibana.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV); Ônibus Biarticulado, BRT.

## ABSTRACT

Feller, Marco. Life Cycle Assessment of alternative technologies for Curitiba's BRT system. 2016. 153 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The quality of every Lifecycle Assessment (LCA) depends intrinsically upon the quality of the inventory that is used. The inventory raising is a time-consuming task because it consists on describing in details the phases of production, utilization and discard of the product throughout its life cycle. This study intends to evaluate a part of the public transport system of Curitiba, the bi-articulated buses, model B340M, and compare them to alternative technologies operating in five of the city's BRT exclusive corridors. The objects of the study were vehicles homologated according to Proconve's P5 and P7 phases, as well as utilizing fuel mixes B7 and B100, in the configurations articulated, bi-articulated and hybrid articulated. The data related to the materials used for the production of B340M were extracted from the manufacturer's product management tool (Kola) that provided a list of components with over than 3000 part numbers and 94% of the chassis composition was identified. For the body, estimated values had to be used due to lack of response from the bodybuilders. The company's sustainability report provided the data needed to model the production inputs and outputs of the plant in Curitiba. The datasets of the articulated and hybrid configurations have been scaled according to scale-factors in order to be compared. For the use phase, it was necessary to rise the BRT operating cycle and therefore, a series of data acquisition sets was performed, using atmospheric pressure sensors and GPS. Such data were then treated in order to describe the routes' topography and operating dynamic. Those cycles were used as input data for the fuel consumption simulation. By using emissions factors, it was possible to quantify the emission of regulated pollutants during the use phase. For the discard phase,ecoinvent data were used, and 100% of the metals were considered to be recycled, as well as the batteries of the hybrid vehicle. The Impact Assessment Methods used were IMPACT 2002+, CML 2000 and Eco-indicator 99 whereof the last two were used for sensibility analysis. The utilization phase still plays a major role on the environmental impact related to bus usage in comparison with the other phases, mainly due to the fuel consumption, either fossil or biogenic Diesel. However, the enhancements of the automotive industry related to pollutants control allow the reduction of such impacts by developing and adopting new technologies. Based on the objectives and scope of this assessment, it was possible to conclude that the biggest impact is in Human Health and that solution technologically more evolved, complying with stricter emission legislations like Proconve P7 have an significant advantage compared to the current bus fleet operating at Curitiba.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Impact Assessment (LCIA), Biarticulated buses, BRT.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais Componentes no sistema híbrido .....	22
Tabela 2: Evolução da Legislação de emissões nos países Europeus para veículos a Diesel pesados – Ciclo Em Regime Constante .....	25
Tabela 3: Evolução da Legislação de emissões nos países Europeus para veículos a Diesel pesados - Ciclo Em Regime Constante .....	25
Tabela 4: Limites legais de emissões no Brasil. Fases I a IV.....	26
Tabela 5: Limites legais de emissões no Brasil. Fases V, VI e VII.....	27
Tabela 6: Os 13 modos de operação do Ciclo ESC .....	33
Tabela 7: Resumo das Principais Linhas BRT em Curitiba .....	40
Tabela 8: Especificação básica dos ônibus Biarticulados .....	41
Tabela 9: Estações de monitoramento da qualidade do ar da RMC.....	42
Tabela 10: Tabela resumo da literatura de ACVs de transporte utilizados.....	49
Tabela 11: Componentes dos veículos.....	57
Tabela 12: Fatores aplicados no método IMPACT 2002+ entre as categorias de impacto por dano.....	60
Tabela 13: Demanda das linhas BRT em Curitiba. Fonte URBS .....	69
Tabela 14: Dinâmica da demanda de passageiros no sistema .....	70
Tabela 15: Variáveis de esforço e fluxo em diferentes sistemas físicos.....	72
Tabela 16: Dados de entrada para simulação de consumo de combustível.....	77
Tabela 17 Considerações utilizadas para cálculo das emissões dos poluentes não regulados.....	78
Tabela 18: Massa dos materiais utilizados nos veículos (kg).....	82
Tabela 19: Consumo de Energia – Planta de Curitiba .....	84
Tabela 20: Emissão de Poluentes por unidade – Planta de Curitiba .....	85
Tabela 21: Parâmetros de qualidade para a geração de efluentes – Curitiba (PR).....	85
Tabela 22: Destinação dos resíduos – Planta de Curitiba.....	86
Tabela 23: Perfil Médio de Velocidade e Topográfico das rotas BRT em Curitiba ....	87
Tabela 24: Dados Cinemáticos das Rotas de Curitiba.....	89
Tabela 25: Mapas de Frequência (v,v.a) dos ciclos BRT 303 e 550.....	92
Tabela 26: Fatores de emissão de CO, NOx, NMHC e MPcomb* para motores Diesel, em gpoluente/kWh .....	93
Tabela 27: Consumo de combustível para as diferentes tecnologias e combustíveis .....	93
Tabela 28: Itens de manutenção adicionados .....	96
Tabela 29: Resultados por categoria de dano .....	98
Tabela 30: Proporção de contribuição entre as fase Ciclo de Vida do Produto (IMPACT2002+) .....	106
Tabela 31: ICV – Contribuição por substância para a Saúde Humana, IMPACT2002+ .....	108
Tabela 32: ICV – Contribuição por substância para as Mudanças Climáticas, IMPACT2002+ .....	109
Tabela 33: ICV – Contribuição por substância para os Recursos, IMPACT2002+ ..	109
Tabela 34: ICV – Contribuição por substância para a Qualidade Ecossistema, IMPACT2002+ .....	110
Tabela 35 Emissões resultantes da tecnologia Euro 6.....	112

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema híbrido da Volvo.....	22
Figura 2: Legislação de emissões nos Estados Unidos para veículos a Diesel pesados.....	24
Figura 3: Ciclo ETC.....	32
Figura 4: Pontos de Operação do ciclo ESC.....	33
Figura 5: Ciclo ELR.....	35
Figura 6: Ciclo WHTC.....	36
Figura 7: Rede Integrada de Transporte.....	39
Figura 8: Itinerário das Linhas BRT em Curitiba.....	40
Figura 9: Composição da Frota 2014.....	41
Figura 10: Localização das Estações de Monitoramento na RMC.....	44
Figura 11: Os dez bairros com maior densidade demográfica de Curitiba.....	45
Figura 12: Relação entre Categorias de Impacto e midpoint e as Áreas de Dano ....	59
Figura 13: Fluxograma simplificado do ciclo de Vida.....	63
Figura 14: Fluxograma das entradas e saídas para avaliação de emissões veiculares.....	66
Figura 15: Demanda dos Corredores BRT.....	69
Figura 16: Flutuação da demanda ao longo de um dia em Bogotá.....	71
Figura 17: Estrutura do modelo de trem de força da simulação.....	72
Figura 18: Resposta do motor por rotação.....	75
Figura 19: Rota 550: Saúde Humana.....	99
Figura 20: Rota 550: Qualidade do Ecosistema.....	100
Figura 21: Rota 550: Mudanças Climáticas.....	101
Figura 22: Rota 550: Recursos.....	101
Figura 23: Pontuação Única Linha 203 - Biarticulados.....	103
Figura 24: Pontuação Única Linha 550 - Biarticulados.....	104
Figura 25: A rede de processos envolvidos no ciclo de vida do produto. Corte: 0,1%.....	105
Figura 26: Destaque nos processos mais relevantes. Corte 0.1%.....	105
Figura 27: Resultado comparativo da análise de sensibilidade.....	111
Figura 28: Comparação entre tecnologias de emissões – Pontuação Única (IMPACT2002+).....	113
Figura 29: Fatores de Caracterização - CML.....	114
Figura 30: Normalização - CML.....	115
Figura 31: Saúde Humana – Pontuação Única - Eco-indicator.....	115
Figura 32: Qualidade do Ecosistema – Pontuação Única - Eco-indicator.....	116
Figura 33: Recursos – Pontuação Única - Eco-indicator.....	117

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	OBJETIVO GERAL .....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	18
2.1	TECNOLOGIAS AVALIADAS .....	18
2.2	LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES .....	24
2.2.1	POLUENTES REGULADOS .....	27
2.2.2	GASES DE EFEITO ESTUFA .....	29
2.3	CICLOS PADRÃO E CICLOS DE OPERAÇÃO .....	30
2.3.1	ETC (EUROPEAN TRANSIENT CYCLE) .....	31
2.3.2	ESC (EUROPEAN STATIONARY CYCLE) .....	32
2.3.3	ELR (EUROPEAN LOAD RESPONSE) .....	34
2.3.4	WHSC, WHTC, OCE E IN-SERVICE CONFORMITY TESTING .....	35
2.4	TRANSPORTE PÚBLICO DE CURITIBA .....	37
2.4.1	CARACTERIZAÇÃO DA FROTA .....	41
2.5	REDE DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR .....	42
2.5.1	DENSIDADE POPULACIONAL POR BAIRRO EM CURITIBA .....	45
2.6	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....	46
2.6.1	ESTUDOS DE ACV RELEVANTES AO TEMA .....	48
3	MÉTODO E DETALHES DO SISTEMA .....	55
3.1	ESCOPO .....	56
3.1.1	FRONTEIRAS DO SISTEMA .....	56
3.1.2	SISTEMA DO PRODUTO .....	58
3.1.3	CATEGORIAS DE IMPACTO E MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO .....	58
3.1.4	FLUXOGRAMA DO CICLO DE VIDA .....	62
3.1.5	LIMITAÇÕES .....	63
3.2	FASE DE PRODUÇÃO .....	64
3.3	FASE DE UTILIZAÇÃO .....	65
3.4	FASE DE DESCARTE .....	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	81
4.1	RESULTADOS DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	81
4.1.1	FASE DE PRODUÇÃO .....	81
4.1.2	FASE DE UTILIZAÇÃO .....	86
4.1.3	FASE DE DESCARTE .....	97
4.2	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA .....	97
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	110
4.3.1	BIODIESEL .....	111
4.3.2	ARTICULADO HÍBRIDO .....	112
4.3.3	MÉTODOS DE AICV .....	113
4.3.4	INCLUSÃO DOS DADOS NO SOFTWARE .....	117
5	CONCLUSÕES .....	118
6	ESTUDOS FUTUROS .....	121
	REFERÊNCIAS .....	122
	APÊNDICE A – ALTERAÇÕES DO DATASETS UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO - PRODUÇÃO .....	135
	APÊNDICE B - ALTERAÇÕES DO DATASETS UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – USO .....	138

APÊNDICE C - ALTERAÇÕES DO DATASETS UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – MANUTENÇÃO. ....	140
APÊNDICE D – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA AS CATEGORIAS MIDPOINT – IMPACT 2002+ V2.12. ....	141
APÊNDICE E – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – ARTIC HÍB B7 EU5 VERSUS EU6. ....	144
APÊNDICE F – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – BODIESEL. ....	146
APÊNDICE G – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – ECO-INDICATOR 99. ....	147
APÊNDICE H – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – CML. ....	151

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida  
AICV – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida  
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
AP – *Acidification Potential*, Potencial de Acidificação  
ARLA32 – Agente Redutor Líquido de Óxido de Nitrogênio Automotivo  
BEN – Balanço Energético Nacional  
BRT – *Bus Rapid Transit*, Transporte Rápido por Ônibus  
CO – Monóxido de Carbono  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
DALY – *Disability Adjusted Life Years*, Anos de vida ajustados por incapacidade  
ELR – *European Load Response*, Ciclo Europeu de Resposta em Carga  
ESC – *European Stationary Cycle* Ciclo Europeu em Regime Constante  
ETC – *European Transient Cycle* Ciclo Europeu em Regime Transiente  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
GSP – *Global Simulation Platform*, Plataforma Global de Simulação  
GWP – *Global Warming Potential*, Potencial de Aquecimento global  
HC – Hidrocarbonetos não-queimados  
HTP – *Human Toxicity Potential*, Potencial de Toxicidade Humana  
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
IAP – Instituto Ambiental do Paraná  
ICV – Inventário do Ciclo de Vida  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas  
IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba  
MME – Ministério de Minas e Energia  
MMA – Ministério de Meio Ambiente  
MCI – Motor a Combustão Interna  
MCTI – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação  
MP – Material Particulado  
NO<sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio  
PEMS – *Portable Emissions Measurement System*, Sistema Portátil de Medição de Emissões  
PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores  
RDP – *Resource Depletion Potential*, Potencial de Depleção de Recursos Abióticos  
RMC – Região Metropolitana de Curitiba  
RPA – *Relative Positive Acceleration*, Aceleração Positiva Relativa  
SAE – *Society of Automotive Engineers*, Sociedade dos Engenheiros Automotivos  
URBS – Urbanização de Curitiba S/A  
VEHs – Veículos Elétricos Híbridos

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de transportes contribuiu com mais de 29% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2010 no Brasil segundo as estimativas do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2013). Em outros países como os Estados Unidos e a Espanha, esse número ultrapassa um terço das emissões totais contabilizadas (GARCIA-SANCHEZ et al., 2013). É importante ressaltar que as emissões de poluentes assim como as de gases de efeito estufa (GEE) não são oriundas exclusivamente da queima dos combustíveis fósseis, mas também da extração, transporte, produção e distribuição do mesmo. Segundo a Agência Ambiental Internacional (EIA, 2009), o setor de transportes consome mais de 60% de todo óleo extraído do meio ambiente durante seu ciclo de vida.

O transporte urbano de pessoas é responsável por uma parcela significativa dessas emissões, em especial nos países em desenvolvimento, onde o consumo de energia do setor cresce a uma taxa muito mais rápida que outras áreas da sociedade (GREEN CITIES, 2010). Atualmente o Brasil é o país com maior número de ônibus no transporte público no mundo (ARAUJO, 2012). Possui uma frota estimada em cerca de 350 mil veículos em 2010, dos quais mais de 300 mil em aplicações urbanas, o que corresponde a 19% da frota a diesel atualmente circulante no país. Tal fato remonta aos idos dos anos 1950 quando houve o primeiro grande ciclo de desenvolvimento industrial brasileiro. O modal rodoviário era a alternativa mais viável economicamente, dada a necessidade imediata de mobilidade de bens e pessoas numa época de alto crescimento econômico do país. Este modal persiste até os dias atuais como o principal meio de transporte nacional.

E, como toda atividade humana, o transporte de passageiros traz consigo efeitos ambientais. A partir de 1972, com a Conferência de Estocolmo, a comunidade internacional reconheceu a necessidade da conciliação entre o desenvolvimento econômico e a proteção ambiental. A declaração resultante desta conferência pode ser considerada como o início de uma nova ciência integrada a qual visa salvaguardar os recursos naturais em benefício das gerações futuras sendo que a ferramenta fundamental para atingir tal finalidade é o planejamento e o consumo racional dos recursos ambientais (MMA, 2011). A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma das técnicas capazes de auxiliar nesse planejamento, pois

consiste em analisar e quantificar os impactos ambientais oriundos de um processo ou produto.

Casos relacionados à poluição do ar em grandes aglomerados urbanos vêm sendo relatados ao longo das últimas décadas de forma crescente. Casos como o da cidade de Donora na Pensilvânia, o de Londres (Névoa Negra) entre tantos outros trouxeram à tona a necessidade de controlar as emissões de poluentes. No Brasil não foi diferente, sendo que em 1981, foi criado o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), vinculado ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) com o intuito de normalizar o monitoramento e controle da poluição atmosférica (BRANCO et. al, 2001; Braga et al., 2005).

Os efeitos da poluição atmosférica em áreas urbanas são geralmente mais significativos dado o maior tempo de exposição e também a maior densidade populacional e podem levar a doenças respiratórias e impactos à saúde cardiovascular (KOREN, 1995).

O impacto ambiental do transporte público vem sendo intensamente estudado ao longo dos últimos anos sendo empregadas diferentes metodologias, dentre as quais o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se destaca. Tal método permite avaliar as cargas e impactos ambientais associadas a um produto, processo ou atividade, através da identificação e quantificação de energia e materiais usados e resíduos liberados (CONMETRO, 2010).

Com a proliferação de novas tecnologias motrizes e combustíveis alternativos para o transporte de passageiros torna-se necessário conhecer seus respectivos benefícios ambientais para que se possa optar por soluções mais sustentáveis. Kliucininkas et al. (2012) avaliaram, por exemplo, os impactos entre duas alternativas de transporte público na Lituânia: ônibus a combustão interna com três combustíveis alternativos (biogás, Diesel, gás natural), e um trólebus (movido por energia elétrica proveniente da queima de óleo bruto e de gás natural) e concluíram que mesmo dentre opções limitadas não existe uma única solução, mas sim uma combinação delas, pois tanto o ônibus a combustão interna quanto o trólebus trariam benefícios para a cidade de Kaunas na Lituânia.

Já Garcia-Sanchez et al. (2013) conduziram um estudo mais amplo em Madrid comparando as emissões e o consumo de energia entre veículos elétricos, híbridos Diesel-Elétrico, híbrido com célula de carga a hidrogênio e ônibus

convencional a Diesel. Dentre os resultados mais interessantes, foi possível notar que a delimitação da fronteira do estudo determinará qual tecnologia trará o maior impacto. Ou seja, caso a avaliação seja feita do “tanque até a roda” o motor a combustão interna causa o maior impacto, agora se a avaliação for do “meio ambiente até a roda”, existe uma inversão mostrando que para o caso espanhol, as tecnologias com fontes elétricas causariam maior impacto devido ao *mix* de fontes de produção de energia elétrica naquele país.

Nos Estados Unidos, Cooney (2011) fez uma extensa revisão bibliográfica antes da comparação entre ônibus elétricos e a Diesel. Ao comparar as informações presentes entre os diversos trabalhos percebeu que a definição de escopo e delimitação das fronteiras do trabalho trazem diferenças significativas que muitas vezes acabam por impossibilitar a comparação entre estudos em diferentes localidades. Outro ponto importante ressaltado pelo autor é a sensibilidade dos resultados frente à combinação das fontes de energia para geração de eletricidade e também sobre a tecnologia atual das baterias de Li-Íon. Na comparação de Cooney, o motor a combustão interna apresenta menores impactos para o aquecimento global quando comparado à versão elétrica.

Apesar de muitos estudos estarem sendo realizados mundo afora, seus resultados precisam ser interpretados dentro do contexto local, não podendo ser simplesmente estendidos para a realidade brasileira sem maiores análises. Fica evidente, portanto, a necessidade de uma abordagem por localidade para que seja possível avaliar os reais impactos causados por um processo que possui suas especificidades regionais, tecnológicas e temporais.

Os diferentes resultados obtidos em estudos internacionais trazem à tona a necessidade de estudos locais. Nesse contexto a cidade de Curitiba mostra-se como a mais adequada, pois além de possuir um papel de destaque no que tange ao assunto de transporte público no país, foi pioneira na implantação de sistemas *Bus Rapid Transit* (BRTs). Desde 1974, a cidade tem constantemente adotado medidas de mitigação de emissão poluentes atmosféricos por passageiro ao introduzir veículos articulados em 1980 e biarticulados em 1991. Além disso, a utilização de 100% de Biodiesel a partir de 1999 em algumas linhas urbanas e a adoção de veículos híbridos Diesel-Elétrico em sua frota atual corrobora com essa identidade inovadora da capital paranaense (URBS, 2014).



Em 2014, a prefeitura de Curitiba informou que testará ônibus biarticulados híbridos Diesel-Elétrico *Plug-In*, veículos estes capazes de rodar tanto em modo elétrico, modo convencional (combustão interna) ou modo híbrido. A tecnologia *Plug-In* permitirá recargas rápidas das baterias durante as paradas auferindo uma redução ainda maior no consumo de combustíveis fósseis e consequentemente na emissão de poluentes (PREFEITURA DE CURITIBA, 2014).

Apesar das melhorias tecnológicas dos novos veículos, os impactos ambientais totais não estão diminuindo com o passar dos anos, pois tais melhorias estão sendo sobrepujadas pelo aumento ainda maior na quantidade de veículos nas ruas. A poluição veicular representa hoje 97% da poluição atmosférica em São Paulo, por exemplo, (MMA, 2013; CLEVER, 2007 e CETESB, 2006). Tal fato pode induzir a falsas conclusões, como as de que inovações sequenciais ou evolutivas (mudança nas normas de emissões, por exemplo) não são suficientes para mudar o cenário no curto prazo. Seria então necessário agregar à frota, veículos com tecnologias realmente disruptivas, que tragam benefícios ainda maiores e mais significativos? A completa substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis seria a solução? A introdução de veículos elétrico-híbridos em larga escala poderia resolver os impactos ambientais provenientes de uma frota de ônibus urbanos? Este trabalho tem a ambiciosa intenção de contribuir na construção das respostas a essas perguntas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Dentro deste contexto, o objetivo geral deste trabalho consiste em identificar o desempenho ambiental dos ônibus biarticulado e articulado com motor a combustão interna convencional (B340M B12M) e o ônibus articulado com propulsão híbrida (7900 B5LHA) operando nos principais corredores BRT de Curitiba.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir tal objetivo geral torna-se necessário desdobrá-lo nos seguintes objetivos específicos:

- Levantar e descrever as tecnologias veiculares disponíveis no mercado, provendo detalhes de seu funcionamento e detalhamentos técnicos;
- Definir a abordagem de avaliação de ciclo de vida a ser utilizada para comparar tais tecnologias nas respectivas rotas;
- Caracterizar as emissões veiculares e suas respectivas metodologias de cálculo, definindo quais gases serão avaliados;
- Identificar quais são os fatores relevantes para o consumo de combustível e emissões por tecnologia;
- Efetuar Estudo de Caso para a cidade de Curitiba.
  - Caracterizar a frota utilizada nos BRTs de Curitiba.
  - Identificar e caracterizar os Ciclos de Operação.
- Compilar os dados de inventário de ciclo de vida (ICV).
- Comparar o impacto ambiental dos produtos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura irá abordar cinco temas principais. O primeiro deles é uma descrição das tecnologias de propulsão veicular disponíveis comercialmente no mercado e que serão objetos de avaliação ao longo desta dissertação. As legislações de emissões e os respectivos ciclos padrão de testes utilizados serão apresentados na sequência. Uma breve explanação sobre o sistema BRT em Curitiba e a rede de monitoramento da qualidade do ar da região metropolitana servirá de base para contextualizar os resultados deste trabalho com a realidade da cidade. Por último uma explicação sobre a ferramenta ACV e estudos realizados no Brasil e no mundo serão detalhados para melhor compreensão dos resultados obtidos.

### 2.1 TECNOLOGIAS AVALIADAS

A compreensão das diferentes tecnologias de propulsão veiculares existentes atualmente é o ponto de partida para o entendimento dos objetivos deste trabalho.

Bravo et al. (2014) apresentaram uma divisão entre os diferentes sistemas de propulsão que será utilizada como referência neste trabalho. As principais características de cada sistema serão descritas abaixo.

#### 2.1.1 Propulsão Convencional

A propulsão convencional é a mais difundida no transporte urbano e consiste de um motor a combustão interna (MCI) acoplado a uma transmissão, que por sua vez transmite o torque do motor por um eixo *cardam* passando pelo diferencial até

as rodas do veículo. As relações de transmissão, sejam da caixa ou do eixo, visam manter o operação do MCI na sua região de máxima eficiência. Apesar disso veículos convencionais são bastante ineficientes energeticamente. Grande parte da energia consumida é perdida na forma de calor causada principalmente pelo atrito entre as partes móveis. Estima-se que apenas que apenas 15% da energia potencial de um combustível é utilizada para movimentar um veículo (CASTRO, 2010). Além disso, não existe nenhum sistema de recuperação da energia despendida durante as frenagens, por exemplo, sendo que toda a energia necessária para desacelerar o veículo é perdida na forma de calor para os componentes do sistema de freio.

Veículos com propulsão convencional contam com um ou mais tanques de combustível para armazenar energia e sistemas de tratamento dos gases provenientes da combustão. Dependendo da lei de emissões na qual o veículo se enquadra, o sistema de exaustão pode contar com um conversor catalítico, o qual utiliza ARLA32 para a conversão dos óxidos de nitrogênio. Com a entrada em vigor da fase CONAMA P7 no Brasil, a indústria automotiva adotou duas rotas tecnológicas principais: o EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) e o SCR (*Selective Catalyst Reduction*). A maioria dos veículos pesados no Brasil adotou a tecnologia SCR, a qual otimiza o consumo de combustível (através de uma combustão otimizada) em detrimento da alta formação de NOx, o qual precisa ser tratado posteriormente no catalisador. Para enquadrar as emissões deste poluente dentro dos limites legais, a injeção de uma solução de ureia (32,5%) e água desmineralizada (67,5%) chamada ARLA 32 é realizada, neutralizando-o em N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (MELO et al, 2015).

Além disso, filtros de material particulado e abafadores de ruído também podem ser encontrados.

### 2.1.2 Propulsão Elétrica

Os veículos movidos única e exclusivamente por eletricidade vêm ganhando espaço no mercado dos ônibus para transporte urbano. A energia necessária para o

movimento dos veículos nesse caso é proveniente de baterias, células combustíveis ou pela própria rede elétrica, como no caso dos trólebus.

O sistema propulsor é composto basicamente por um ou mais motores elétricos, gerador necessário para recuperar a energia da frenagem e uma caixa de transmissão bastante simplificada se comparada à dos veículos convencionais. Dependendo da arquitetura do veículo pode até dispensar a utilização de eixos com redução no diferencial, pois o motor pode ser montado diretamente no eixo trativo. Além disso, não necessitam de tanques de combustível e de sistemas de pós-tratamento dos gases de escape (BRAVO, 2014).

As tecnologias de bateria mais difundidas nesse segmento são as de chumbo-ácido, as de níquel Cádmio (NiCd), as de níquel-metal hidreto (NiMH), as de sódio (NaNiCl) e as de íon-lítio (LiFePO<sub>4</sub>) (YOUNG, 2013). Atualmente as baterias de íon-lítio apresentam melhores resultados para implementação de veículos e vem ganhando espaço no mercado.

### 2.1.3 Propulsão Híbrida

Segundo a portaria 549 do INMETRO um veículo elétrico híbrido (VEH) é definido como:

*“... um veículo rodoviário que possa usar energia de propulsão de ambas as fontes de energia armazenada: (1) um combustível consumível e (2) um sistema recarregável de armazenamento de energia (RESS) que seja recarregado pelo sistema de propulsão híbrida a bordo, uma fonte de energia elétrica externa ou ambos.”* Ou seja, um VEH é a combinação dos dois tipos de propulsão mencionados anteriormente.

Há uma grande diversidade nas arquiteturas existentes, entretanto o objetivo final é sempre o mesmo: aumentar a eficiência do MCI e, conseqüentemente, melhorar a eficiência total do veículo.

Os VEHs podem ser classificados, segundo a SAE J1715 de acordo com a configuração dos seus componentes em híbridos em série, híbridos em paralelo e híbridos mistos (série-paralelo).

Na configuração série, a força de tração que chega as rodas não é obtida através do MCI. Em vez disso, ele está acoplado a um gerador que por sua vez fornece energia para a bateria ou para um ou mais motores elétricos. Neste tipo de configuração pode-se manter o MCI operando em regime estacionário, buscando o torque e rotação na condição de máxima eficiência.

Na configuração paralela, tanto o MCI quanto o(s) motor(es) elétrico(s) podem transferir energia mecânica para as rodas, de modo concorrente. Nessa configuração, o controle entre os modos de operação alterna de acordo com a conveniência, ou seja, em modo elétrico a baixas velocidades e a combustão em regimes constantes em velocidades maiores. O motor elétrico neste caso funciona também como gerador para recarregar as baterias.

A configuração mista é na verdade uma derivação da paralela com a diferença de que cada um dos eixos do veículo é alimentado através de uma fonte de energia diferente.

Nos veículos híbridos tradicionais, as baterias são carregadas apenas por meio do MCI e/ou pela energia proveniente da frenagem regenerativa. Uma melhoria incremental a essa forma de carregamento foi o advento do carregamento diretamente da rede elétrica externa. A essa capacidade de utilizar energia elétrica não embarcada, em um sistema de armazenamento de energia recarregável dá-se o nome de veículos híbrido Plug-In (SAE J1715).

Essa característica faz com que eles possam operar com quantidades significativamente menores de combustíveis, em contrapartida utilizando baterias maiores e com grande capacidade de armazenamento de energia. Desta forma, os veículos híbridos conseguem aliar a eficiência dos veículos elétricos com a elevada autonomia dos veículos convencionais, conquistando bons resultados em ambos os quesitos.




A Figura 1 traz o sistema híbrido da Volvo utilizado em seus veículos comercialmente disponíveis. Nela pode se observar o motor a combustão interna, o motor elétrico, demais componentes eletrônicos assim como a bateria e os cabos de alta tensão.





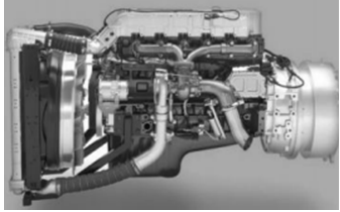



Figura 1: Sistema híbrido da Volvo.  
Fonte: VOLVO BUS CORPORATION (2015b).

Laudon et al. (2012) fizeram um levantamento detalhado dos componentes utilizados pela fabricante VOLVO em dois tipos de veículos híbridos capazes de realizar tal tipo de carregamento. A Tabela 1 apresenta o seguinte resumo:

Tabela 1: Principais Componentes no sistema híbrido

Componente	Especificação	Descrição	Figura
Bateria de Li-Ion com circuito impresso (Energy Storage System - ESS).	LiFePO <sub>4</sub> , 120kW, bateria de 600V. Capacidade energética de 14 kWh.	Armazena e entrega/recebe energia do trem de força. Descarrega até 60% do total de energia armazenada.	
Carregador Onboard	Converte 230VAC para 600 VDC, potência máxima 2.1kW	Conversor AC/DC desenvolvido para carregar a bateria pela rede tradicional de energia (tempo de recarga 4h)	
Aquecedor da Bateria	24V e potência de 2.5kW	Aquece a bateria para aumentar a vida e a performance	

Unidade de Controle Híbrida / Unidade de Gerenciamento de Potência	-	Unidade faz o controle entre o motor a combustão e o elétrico para otimizar o consumo de energia.	
Inversor (DC/AC)	Converte 600 V DC para 400V AC. Cabo de alta tensão integrado.	Converte corrente contínua para alternada para suprir os acessórios do veículo.	
Caixa de Junção	-	Uma caixa para as conexões elétricas de alta tensão que provê integridade para o circuito e faz a distribuição da potência para diferentes partes do veículo.	
Conversor DC/DC	600V para 24V	Converte a tensão para sistemas auxiliares do veículo.	
Motor Elétrico	Motor magnético síncrono. 150kW	Trabalha tanto como motor quanto como gerador	 (motor elétrico integrado ao MCI)
Conversor Eletrônico Potência	Potência máxima de 120kW.	Unidade utilizada para converter corrente alternada para contínua e vice versa entre bateria e motor elétrico.	

Fonte: Adaptado e traduzido de LAUDON et al.(2012).



## 2.2 LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES

A partir da década de 1950, com a percepção de que a qualidade do ar era afetada pelos meios de transporte surgiram os primeiros órgãos governamentais nos Estados Unidos, os quais eram encarregados de controlar e determinar limites para a poluição. Na década de 70, a *United States Environmental Protection Agency* (EPA), órgão federal americano passou a regular questões relacionadas às emissões automotivas. Similarmente, surgiram agências ou órgãos na Europa e Japão (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2014).

Desde 1990, os poluentes NO<sub>x</sub>, HC, CO, material particulado (PM) e fumaça são regulamentados nos Estados Unidos. Com o passar dos anos novas regulamentações entraram em vigor e os níveis permitidos foram sendo gradualmente reduzidos. A Figura 2 apresenta essa evolução para dois desses poluentes.

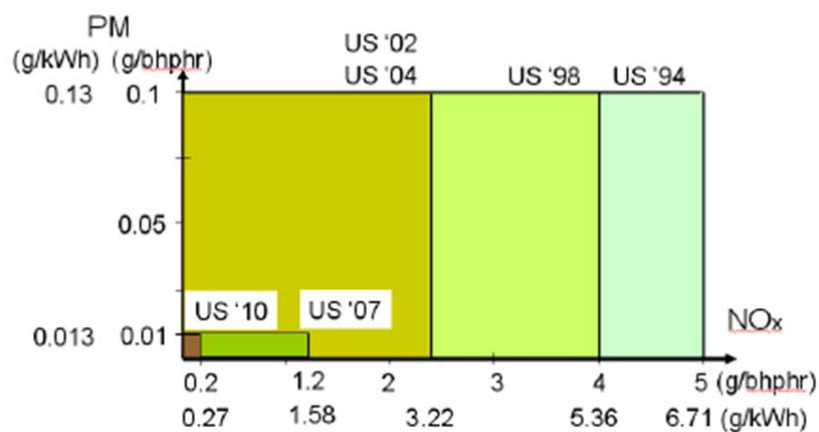


Figura 2: Legislação de emissões nos Estados Unidos para veículos a Diesel pesados  
Fonte: *California Environmental Protection Agency, 2014*.

O início da era de proteção da qualidade do ar na Europa foi marcado pela publicação, em 1970, da diretiva intitulada “*Measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles*” (Medidas a serem tomadas contra a poluição do ar pelas emissões de veículos motores). E, em 1992, foi introduzida a

chamada legislação Euro I, a qual delimitava as emissões de CO, HC, NOx e de material particulado (PM). As Tabela 2 e Tabela 3 abaixo relacionam as datas de introdução das novas legislações e seus respectivos limites legais de acordo os ciclos de teste.

Tabela 2: Evolução da Legislação de emissões nos países Europeus para veículos a Diesel pesados – Ciclo Em Regime Constante

Legislação Europeia de Emissões para Motores Diesel Pesados: Teste em Regime Constante								
Fase	Data	Ciclo	CO	HC	NOx	PM	PN	Fumaça
			g/kWh				1/kWh	m <sup>-1</sup>
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25		
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15		
Euro III	1999.10	ESC & ELR EEV apenas	1.5	0.25	2.0	0.02		0.15
	2000.10		2.1	0.66	5.0	0.10 <sup>a</sup>		0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02		0.5
Euro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10 <sup>11</sup>	

a - PM = 0.13 g/kWh Para motores de cilindrada unitária inferior a 0.75 dm<sup>3</sup> e rotação a potência nominal superior a 3000 rpm

Tabela 3: Evolução da Legislação de emissões nos países Europeus para veículos a Diesel pesados - Ciclo Em Regime Constante

Legislação Europeia de Emissões para Motores Diesel Pesados: Teste em Regime Transiente								
Fase	Data	Ciclo	CO	NMHC	CH <sub>4</sub> <sup>a</sup>	NOx	PM <sup>b</sup>	PN <sup>e</sup>
			g/kWh				1/kWh	
Euro III	1999.10	ETC EEV apenas	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02	
	2000.10		5.45	0.78	1.6	5.0	0.16 <sup>c</sup>	
Euro IV	2005.10		4.0	0.55	1.1	3.5	0.03	
Euro V	2008.10		4.0	0.55	1.1	2.0	0.03	
Euro VI	2013.01	WHTC	4.0	0.16 <sup>d</sup>	0.5	0.46	0.01	6.0×10 <sup>11</sup>

a – somente para motores a gás (Euro III-V: Gás Natural; Euro VI: Gás Natural + LPG)  
b – não é válido para motores a gás nas fases III e IV  
c - PM = 0.21 g/kWh Para motores de cilindrada unitária inferior a 0.75 dm<sup>3</sup> e rotação a potência nominal superior a 3000 rpm  
d - THC para motores Diesel  
e – para motores Diesel;

A legislação ambiental brasileira atribui ao Estado a tarefa de promover políticas para melhorar a qualidade do ar dentro de um contexto de desenvolvimento sustentável. O Estado, dentro de suas atribuições normativas e regulamentadoras, criou em Maio de 1986, através da Resolução CONAMA n.º18, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, com a finalidade de controlar tais poluentes. A emissão de gases poluentes é geralmente dividida em duas categorias: gases de efeito estufa (principalmente CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) e poluentes regulados (CO, NOx, hidrocarbonetos não-queimados (HC), aldeídos e material particulado). Em 1993, os limites máximos de emissão para os poluentes regulados foram efetivamente publicados dando assim início às diferentes fases do programa, que atualmente, está em sua sétima etapa (P-VII) (PROCONVE, 2004). A Tabela 4 abaixo apresenta os limites máximos de emissões por fase e ano de introdução.

Tabela 4: Limites legais de emissões no Brasil. Fases I a IV.

Limites legais de emissões no Brasil - Fases I a IV.							
Fase	Ano		CO	HC	NOx	PM	Metodologia de Referência
	Ônibus Urbanos	Todos					
P-I	1990†		14	3.50	18.0	-	-
P-II	1993		11.2	2.45	14.4	-	Euro 0
P-III	1994	1996	4.9	1.23	9.0	0.4 <sup>a</sup>	Euro I*
P-IV	1998	2000	4.0	1.1	7.0	0.15 <sup>b</sup>	Euro II

† - não mandatório  
 \* - limite de conformidade de produção  
 a - multiplicar por 1.7 para motores abaixo de 85 kW  
 b - 0.25 g/kWh para motores até 0.7 litros, e rotação a potência nominal superior a 3000 rpm.

A partir da introdução fase P5 pela Resolução CONAMA n.º 315 de 2002, tornou-se necessário definir ciclos padrão para servir de base para medição e verificação do cumprimento da norma. Como a legislação europeia foi utilizada como referência para a metodologia de medição de CO, HC, NOx e MP assim também o foi para os ciclos padrão de testes.

Os três ciclos padrão europeus utilizados são: 1) ESC – Ciclo Europeu em Regime Constante, 2) ELR – Ciclo Europeu de Resposta em Carga e 3) ETC – Ciclo Europeu em Regime Transiente. Todos foram descritos na Diretiva 1999/96 de 13 de

dezembro de 1999 e devem ser empregados durante os testes de emissões em bancada. Uma descrição dos ciclos ESC, ELR e ETC será apresentada no capítulo 2.3 Ciclos Padrão e Ciclos de Operação (PROCONVE, 2004).

A Tabela 5 apresenta os valores regulamentados para as fases V, VI e VII.

Tabela 5: Limites legais de emissões no Brasil. Fases V, VI e VII.

Limites legais de emissões no Brasil - Fases V a VII.									
Fase	Data	Ciclo Padrão	CO	THC	NMHC	NOx	PM†	Fumaça	Metodologia de Referência
			g/kWh					m-1	
P-V	2006 <sup>1,2,3</sup>	ESC/ELR	2.1	0.66	-	5.0	0.10/ 0.135	0.8	Euro III
		ETC <sup>4</sup>	5.45	-	0.78	5.0	0.16/ 0.21 <sup>5</sup>	-	
P-VI	2009 <sup>6</sup>	ESC/ELR	1.5	0.46	-	3.5	0.02	0.5	Euro IV
		ETC	4.0	-	0.55	3.5	0.03	-	
P-VII	2012	ESC/ELR	1.5	0.46	-	2.0	0.02	0.5	Euro V
		ETC	4.0	-	0.55	2.0	0.03	-	

† somente para motores a Diesel

(1) 2004 para ônibus urbanos ou 60% da produção de ônibus urbanos (100% em 2005); Nesse caso as montadoras precisam produzir pelo menos 60% da produção anual total de ônibus pesados rodoviários de acordo com PROCONVE P-5.

(2) 2005 para micro-ônibus

(3) 2005 40% da produção anual de pesados (exceto urbanos e micro-ônibus) por montadora.

(4) veículos diesel sem catalisador ou filtro de particulados podem ser testados apenas com o ciclo ESC.

(5) Para motores de cilindrada unitária inferior a 0.75 dm<sup>3</sup> e rotação a potência nominal superior a 3000 rpm

(6) PROCONVE P-6 nunca entrou efetivamente em vigor.

Todas as normas apresentadas aqui são aplicáveis para veículos pesados a Diesel. Atualmente existem discussões a respeito da regulamentação de veículos elétricos híbridos pesados no Brasil, entretanto não há nenhuma normativa nacional oficial. O Inmetro regulamentou em 2012, a Portaria n.º 549 que trata sobre medição de emissões e consumo em veículos elétricos híbridos leves.

### 2.2.1 Poluentes Regulados

Os poluentes regulados, dentro do contexto da legislação brasileira atual são os seguintes: Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NOx),

hidrocarbonetos não-queimados (HC) e material particulado (MP). Os aldeídos, já controlados em motores ciclo Otto, vem sendo estudados no ciclo Diesel dado suas características prejudiciais à saúde, porém ainda não são regulados (PROCONVE, 2004).

O monóxido de carbono inibe a capacidade do sangue de transportar oxigênio pelo corpo e é particularmente danoso a fumantes, pessoas com histórico de doenças cardíacas além de poder causar danos permanentes ao sistema nervoso. O CO é um produto intermediário da combustão de hidrocarbonetos. Ocorre especialmente em regiões com excesso de combustível (mistura rica) na câmara de combustão ou por falta de tempo ou temperatura insuficientes para que a combustão seja completa. Ao longo do processo de combustão, o CO gerado se combina com o oxigênio em excesso (característico do ciclo Diesel) formando CO<sub>2</sub>. Dessa forma a quantidade final de CO é baixa se comparada com motores do ciclo Otto (MAGDI et al., 2011; LARMINIE, 2003).

Os óxidos de nitrogênio (NOx) sejam eles monóxidos (NO) ou dióxidos (NO<sub>2</sub>), afetam os pulmões, potencializam casos de asma e aumentam a suscetibilidade a infecções respiratórias. Além disso, na presença de Compostos Orgânicos Voláteis (COV's, como por exemplo, o benzeno) e luz solar, os óxidos reagem e geram ozônio o qual por sua vez pode causar irritação nos olhos e danos ao sistema respiratório.

A formação de NOx durante a combustão é intrínseca ao próprio processo. O nitrogênio presente no ar (cerca de 78%) sob o efeito das altas temperaturas (acima de 1600 graus Celsius) dentro da câmara de combustão, combina-se com o oxigênio formando o poluente (CHEVRON, 2007; LARMINIE, 2003).

Hidrocarbonetos não queimados (HC) durante a combustão são expelidos pelo escapamento formando uma fumaça branca, característica deste tipo de evento onde não houve a queima mesmo que parcial do combustível injetado. Uma série de fatores explicam esse fenômeno, como regiões muito pobres na câmara (excesso de ar), partida a frio onde parte do combustível injetado não foi vaporizado, entre outros. Os HCs podem causar dores de cabeça, vertigem, irritação nos olhos, sendo que alguns como os benzopirenos são considerados agentes cancerígenos. Outros tipos podem reagir na atmosfera promovendo a formação do SMOG fotoquímico ("smoke+fog" ou fumaça + neblina) (CHEVRON, 2007; LARMINIE, 2003).

O material particulado (MP) está entre os poluentes que apresentam o maior risco ao meio ambiente, pois é capaz de transportar poluentes tóxicos para o aparelho respiratório (TADANO, 2007). A maior parte do material particulado tem diâmetro variando entre 0,1 e 10µm, o que significa dizer que essas partículas não se depositam no solo, permanecendo na atmosfera durante longos períodos de tempo.

Dependendo do tamanho das partículas, elas podem se depositar na região superior do aparelho respiratório ou mesmo diretamente nos alvéolos pulmonares sendo impossível de serem expelidas por tosse, por exemplo. O MP pode, portanto, causar problemas no pulmão incluindo dificuldade em respirar e danos aos tecidos do órgão, e também agravar doenças cardíacas pré-existentes. Além disso, é considerado cancerígeno por muitos autores (LARMINIE, 2003; TADANO 2007).

### 2.2.2 Gases de Efeito Estufa

Os gases de efeito estufa são todos aqueles que tem a propriedade de bloquear a radiação infravermelha que seria devolvida ao espaço pela Terra, originalmente recebida através da energia solar (IPCC, 2006).

O dióxido carbônico ( $\text{CO}_2$ ) é o gás de efeito estufa antrópico, ou seja, gerado pelo homem, mais relevante. Entretanto não é o único, o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o ozônio ( $\text{O}_3$ ), os clorofluorcarbonos (CFC), os hidrofluorcarbonos (HFC), os hidrofluorclorocarbonos (HCFC), perfluorcarbonos (PFC) e o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) compõe a lista dos gases inventariados conforme diretrizes do IPCC. Além destes gases existem outros considerados como gases de efeito estufa indiretos, mas que não vêm ao caso dentro do contexto desta dissertação (IPCC 2006; BRASIL, 2010).

Segundo o IPCC 2006, as concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram consideravelmente em decorrência das atividades humanas desde os valores de referência pré-industriais (ano 1750). Os aumentos globais da concentração de  $\text{CO}_2$  são oriundos principalmente da utilização de combustíveis fósseis e da mudança no uso da terra. Enquanto que os

aumentos da concentração de CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub> são decorrentes principalmente da agricultura.

A legislação brasileira atual não regula a quantidade máxima de CO<sub>2</sub> emitida, entretanto, tais gases de efeito estufa serão considerados neste inventário assim como seus danos e impactos avaliados.

### 2.3 CICLOS PADRÃO E CICLOS DE OPERAÇÃO

Existem centenas, senão milhares, de ciclos de testes utilizados na avaliação das emissões de poluentes por todo o mundo. Notavelmente, e por razões óbvias, os ciclos definidos nas legislações de emissões são os mais utilizados (BARLOW, 2009).

As emissões resultantes são dependentes de uma série de fatores, dentre eles os relativos ao veículo em questão (tamanho, modelo, tipo de combustível, tecnologia aplicada e quilometragem) e também os relacionados ao ciclo (velocidade, aceleração, marcha e gradiente de inclinação).

Os ciclos de teste representam a operação de um veículo durante certo período de tempo. Ao utilizar ciclos padronizados é possível reproduzir um teste de emissões sob condições controladas, seja num dinamômetro de chassi ou de motor. Eles são geralmente caracterizados em termos de velocidade do veículo em função do tempo.

Dependendo das características de rotação e carga do motor resultantes, pode-se classificar os ciclos em regime constante e regime transiente. Como a própria nomenclatura ressalta, suas diferenças são relacionadas à taxa variação do regime de operação e resultam em valores de emissões significativamente diferentes.

Conforme dito anteriormente, o Brasil segue a metodologia europeia no que tange a regulamentação de veículos pesados a Diesel e por isso os três principais ciclos de teste da fase P-VII são o ELR, o ESC e o ETC. A fase Euro 6, atualmente vigente na Europa, introduziu uma série de mudanças na forma de avaliar as emissões, incluindo novos ciclos como WHSC, WHTC, OCE e também o chamado

*In-Service Conformity Testing*, o qual envolve a medição em campo utilizando analisadores portáteis de emissões. Nos próximos capítulos, uma breve descrição dos principais deles será feita, com foco principal nos testes relevantes para esta dissertação.

### 2.3.1 ETC (*European Transient Cycle*)

Como visto na Tabela 5, a partir da fase P-V o ciclo ETC tornou-se mandatório para a homologação de motores no Brasil. O ciclo ETC foi introduzido conjuntamente com o ciclo ESC, em substituição do ciclo R-49 (ciclo somente estacionário ou permanente).

Este ciclo foi originalmente desenvolvido pelo instituto alemão FIGE, baseado em medições reais de veículos pesados em operação. A versão atual possui pequenas alterações com relação à proposta do FIGE e consiste em três partes, com 600s de duração cada, englobando condições de operação urbana, rural e rodoviária (UNECE, 2001).

A parte urbana apresenta velocidade máxima de 50km/h, frequentes paradas e arrancadas e marcha lenta. A segunda parte é caracterizada por uma velocidade média maior e por acelerações bruscas. Já o trecho rodoviário é bastante constante com uma velocidade média de 88km/h. A Figura 3 traz o perfil de velocidade do ciclo ETC.



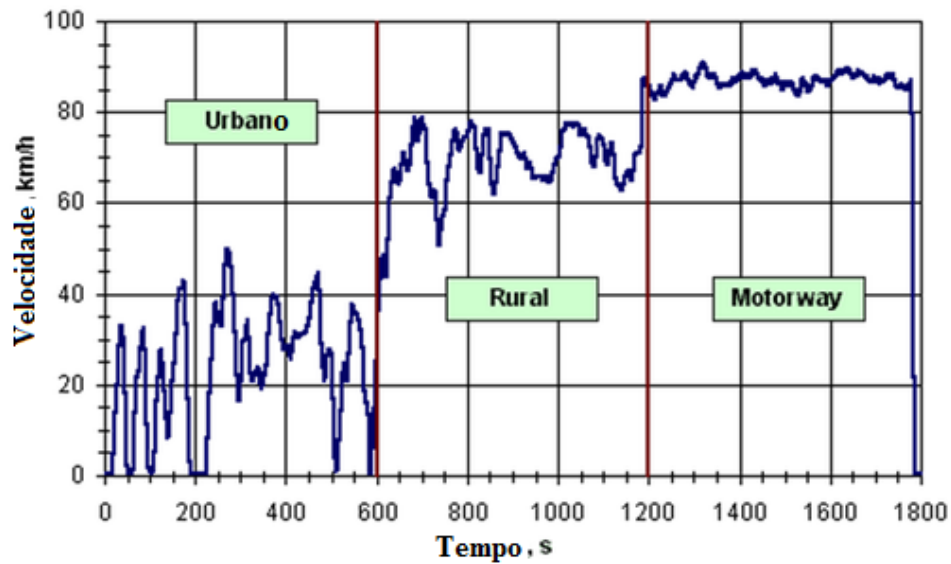


Figura 3: Ciclo ETC.  
Fonte: PROCONVE 2004

Para testes em dinamômetro de chassi, o perfil acima seria suficiente para a realização do teste. Já para dinamômetros de motor, é necessário conhecer os valores de rotação e de torque no tempo, os quais estão disponíveis na norma específica (FREDRIKSSON, 2011).

### 2.3.2 ESC (*European Stationary Cycle*)

O ciclo ESC consiste em um ensaio em dinamômetro de motor com treze modos de operação em regime constante, que devem ser realizados durante 4 ou 2 minutos de tempo, alcançando rotação e carga pré-determinadas em 20 segundos (UNECE, 2001).

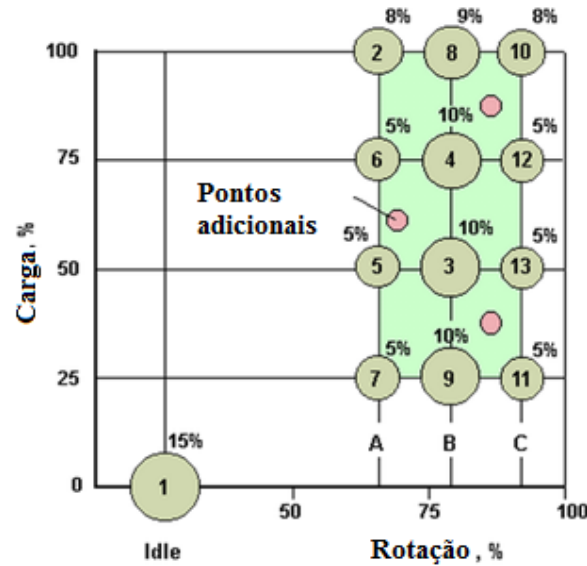


Figura 4: Pontos de Operação do ciclo ESC  
 Fonte: UNECE, 2001.

As rotações A, B e C apresentadas na Figura 4 são calculadas de acordo com as seguintes expressões:

$$A = n_{lo} + 0,25(n_{hi} - n_{lo})$$

$$B = n_{lo} + 0,50(n_{hi} - n_{lo})$$

$$C = n_{lo} + 0,75(n_{hi} - n_{lo})$$

sendo que  $n_{hi}$  é determinada como a rotação mais alta onde 70% do valor da potência útil máxima declarada acontece. Da mesma forma,  $n_{lo}$  é determinada através do cálculo de 50% da potência útil máxima declarada: é a rotação mais baixa em que essa potência ocorre (ou seja, abaixo da rotação nominal) (UNECE, 2001).

Pode-se visualizar os 13 modos de operação na Tabela 6.

Tabela 6: Os 13 modos de operação do Ciclo ESC

Modo	Rotação do Motor	% Carga	Fator de Ponderação, %	Duração
1	Marcha Lenta	0	15	4 minutos
2	A	100	8	2 minutos
3	B	50	10	2 minutos
4	B	75	10	2 minutos
5	A	50	5	2 minutos
6	A	75	5	2 minutos

7	A	25	5	2 minutos
8	B	100	9	2 minutos
9	B	25	10	2 minutos
10	C	100	8	2 minutos
11	C	25	5	2 minutos
12	C	75	5	2 minutos
13	C	50	5	2 minutos

Durante cada um dos treze modos, as emissões do motor são medidas e posteriormente, utilizando-se de fatores de ponderação, é calculada a média para o ciclo. Amostras do material particulado são colhidas após os 13 modos. Os resultados são então expressos em g/kWh.

As rotações do motor deverão ser mantidas dentro de uma tolerância de +/- 50 rpm e o torque especificado, dentro de +/- 2% do torque máximo.

### 2.3.3 ELR (*European Load Response*)

O teste ELR tem por finalidade medir a opacidade da fumaça gerada pela combustão. A opacidade é um parâmetro importante que indica a absorção sofrida pela luz ao atravessar uma coluna de fumaça e pode ser indicativo do estado de regulagem do motor (MF-583. R-0, 2002).

O Ciclo E.L.R. é um ciclo de ensaio que consiste numa sequência de quatro patamares a rotações constantes, definidas durante o ciclo ESC, e carga variando de 10 a 100%. A rotação referente ao quarto ciclo é definida pelo avaliador do órgão de certificação.

Durante o teste, valores de medição de fumaça são registrados, com frequência mínima de 20Hz. Uma análise matemático/estatística desses valores, com diferentes pesos para as velocidades A, B, C e D determina o valor final. A Figura 5 apresenta a sequência esquemática do teste.

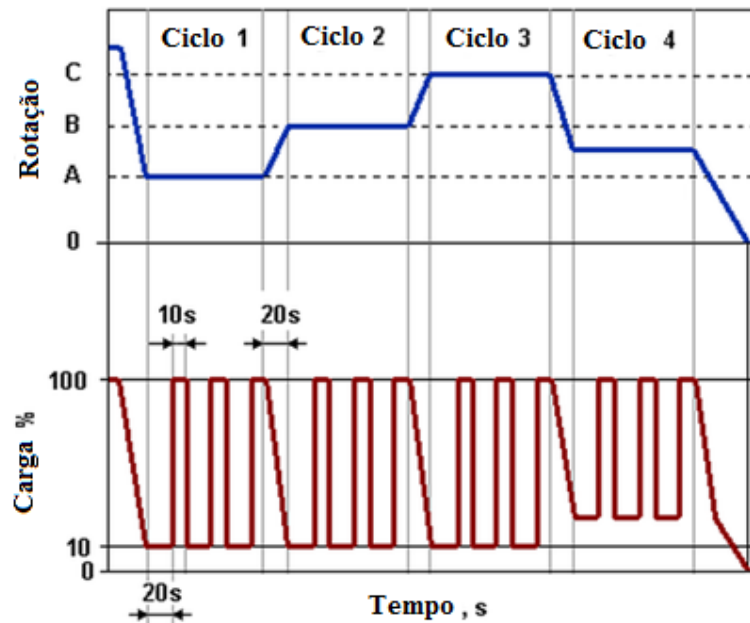


Figura 5: Ciclo ELR  
 Fonte: MF-583. R-0, 2002.

#### 2.3.4 WHSC, WHTC, OCE e *In-Service Conformity Testing*

Com a introdução do Euro 6, uma série de inovações tecnológicas foram incorporadas ao veículo, acarretando também na evolução dos testes necessários para verificar o cumprimento da legislação.

Os ciclos também evoluíram, sendo que o WHSC e WHTC se propõem a cobrir as condições típicas de condução de veículos pesados na Europa, Estados Unidos, Japão e Austrália. O primeiro deles substituiu o ESC, porém manteve os 13 diferentes modos criando apenas novos patamares de rotação e carga com dois principais diferenciais, partida a quente e último modo em marcha lenta.

O WHTC substituiu o ETC para testes transientes. A duração do teste continua em 1800s, porém as três distintas etapas foram substituídas por um ciclo mais dinâmico e representativo do segmento de veículos pesados. Requisitos de partida a quente e a frio foram também incluídos. Abaixo, na Figura 6, podem-se observar os perfis de torque e rotação no tempo.

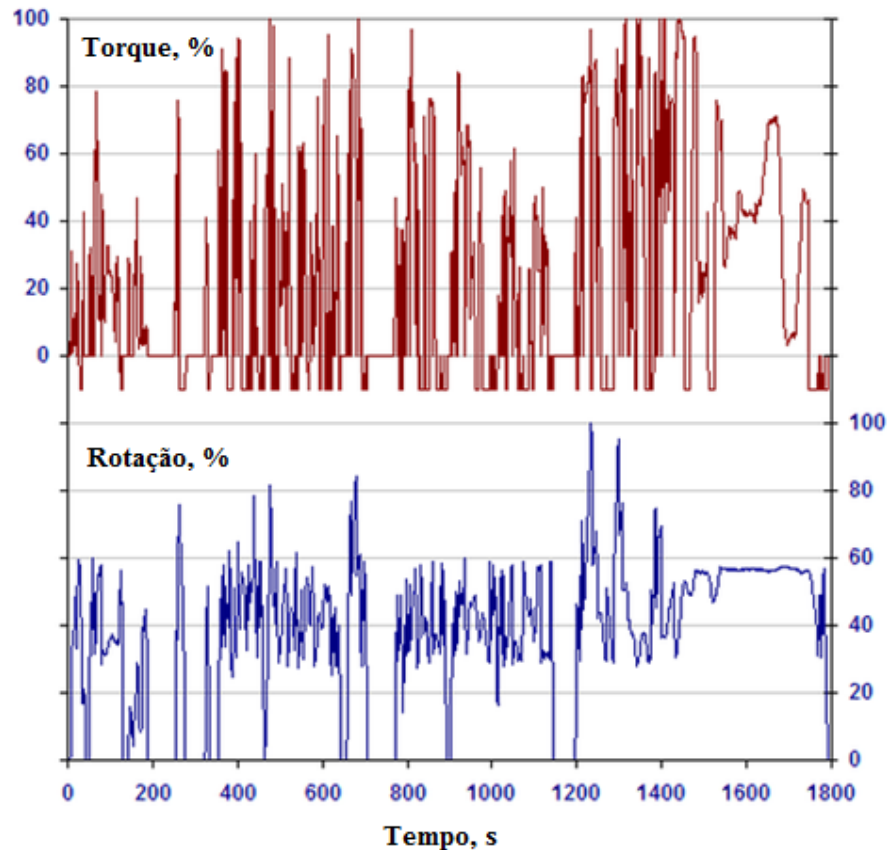


Figura 6: Ciclo WHTC  
Fonte: Dieselnets.

*Off-Cycle Testing* (OCE) foi introduzido com a entrada do Euro VI na Europa. Seguindo uma metodologia de não-exceder (NTE, *not-to-exceed*) os limites durante o teste. Os valores absolutos são agora importantes e não apenas valores ponderados. O teste envolve a escolha randômica de 3 áreas dentro de janelas previamente definidas no mapa do motor. Os valores de emissão não podem exceder os limites pré-estabelecidos.

*In-Service Conformity Testing* ou, em tradução livre, teste de conformidade durante a operação, envolve a utilização de equipamentos de medição de emissões portáteis, chamados em inglês de PEMS. O teste é conduzido em um misto de condições de operação (urbano, rural e rodoviário) dependendo do tipo do veículo.

Durante o teste, as emissões são calculadas através da metodologia “janelas médias de trabalho” (WBW). Tais “janelas” são determinadas baseadas no trabalho do ciclo ou na emissão de CO<sub>2</sub> durante o teste WHTC. Para passar no

teste, o nonagésimo percentil não deve exceder o valor obtido no WHTC multiplicado por um fator de conformidade para cada tipo de poluente.

Os novos testes da fase Euro 6 visam diminuir a diferença entre os valores de emissão em ciclos de referência com as emissões em ciclos reais de operação. Ross et al. (1998) e Pickrell (1999) já alertavam sobre essa discrepância entre as emissões da certificação versus as reais emissões durante o uso dos veículos. Justamente por isso tais testes de conformidade foram introduzidos com a evolução da legislação de emissões.

Uma vez revisados os tipos de tecnologias de propulsão disponíveis comercialmente, os impactos em termos ambientais que as mesmas podem acarretar e como a legislação visa limitar a emissão de poluentes impondo limites máximos aferidos em ciclos de teste padronizados, é preciso conhecer como os produtos são realmente aplicados pelos sistemas de transporte públicos em sua utilização diária. Na sequência, encontram-se detalhes do caso específico que este trabalho visa avaliar.

## 2.4 TRANSPORTE PÚBLICO DE CURITIBA

O sistema BRT de Curitiba é considerado internacionalmente uma referência em eficiência no transporte público de passageiros. Ao integrar uma série de características de um metrô tradicional, como reduzido número de paradas, pistas dedicadas evitando assim congestionamentos, sinaleiros sincronizados com a preferência para os ônibus, rápido e simultâneo embarque e desembarque de passageiros e o pagamento da tarifa antes mesmo do embarque (em estações tubo), torna-o realmente diferenciado conforme Green Cities (2010).

Os corredores expressos compõem um sistema ainda maior e mais complexo de transporte servindo de artérias para conectar pontos estratégicos ao centro da cidade. O sistema conta com 6 categorias de linhas além das categorias especiais (linha Circular Centro, Interhospitais, etc.). Tais categorias se dividem em: Expresso Ligeirão, Expresso, Ligeirinho, Interbairros, Alimentador e Troncal.

O foco deste trabalho está nas categorias Expresso Ligeirão (menor número de paradas e com isso maior velocidade média) e Expresso, entretanto cabe informar sucintamente a função das demais dentro do sistema. Nenhuma das quatro categorias restantes conta com corredores exclusivos de tráfego, entretanto o Ligeirinho também se utiliza das estações tubo para embarque e desembarque. Com pontos de parada em média a cada 3km, são complementares às linhas expressas e interbairros.

A categoria Interbairros se diferencia das demais pelo fato de conectar os bairros sem passar pelo centro da cidade, já os Alimentadores têm a função de ligar os terminais aos bairros e, da forma oposta, os Troncais conectam os terminais ao centro da cidade (URBS, 2014).

Os terminais de integração são responsáveis por conectar todas essas linhas em um sistema chamado de rede integrada de transporte (RIT), a qual permite aos usuários a utilização de mais de uma linha de ônibus com apenas uma tarifa entre as diferentes cidades da região metropolitana de Curitiba.

As linhas expressas têm papel fundamental nesse contexto, pois, dadas suas já mencionadas características, permitem um grande fluxo de passageiro-hora-sentido interligando toda a cidade. Na Figura 7 abaixo se pode ter uma visão mais clara da interligação entre essas linhas de operação.

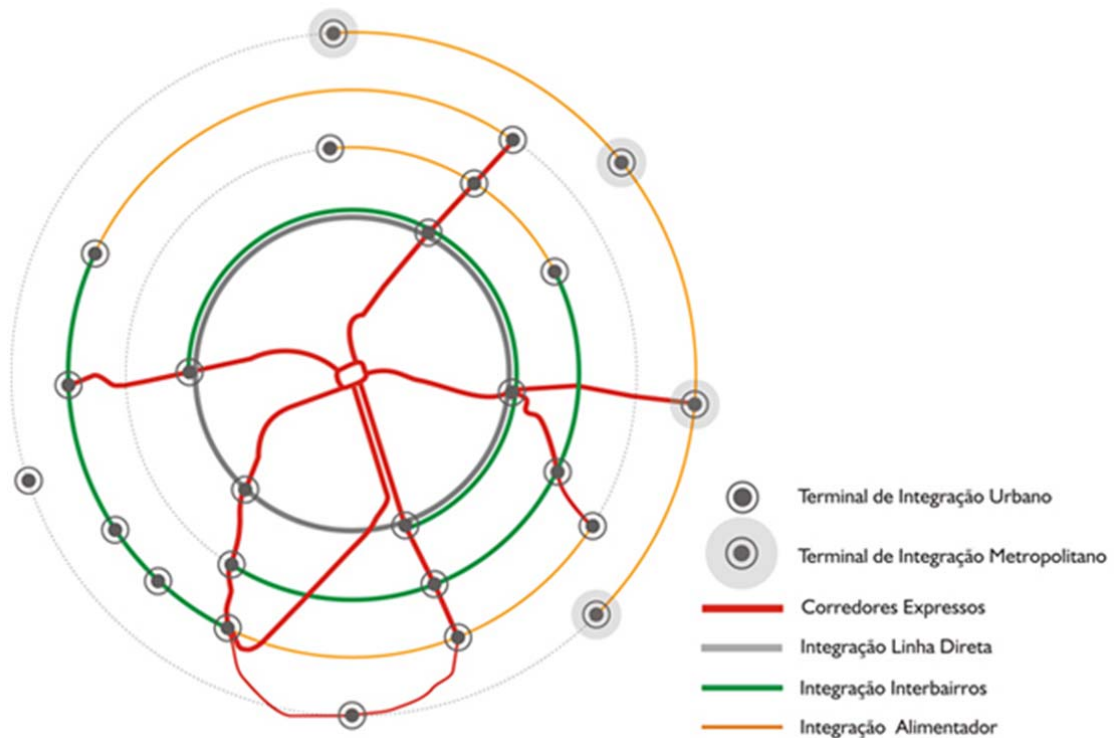


Figura 7: Rede Integrada de Transporte.  
Fonte: URBS

A situação atual do sistema de transporte público de Curitiba é, na verdade, uma evolução de mais de 40 anos. Conforme destaca a publicação do Greencities 2010, um importante aspecto do sistema é o fato dele estar intrinsecamente conectado ao plano diretor da cidade, encorajando o crescimento comercial ao longo das artérias e dessa forma desafogando o centro da cidade. Essa evolução ocorreu através 9 grandes marcos na história deste sistema, quais sejam: 1974 (Corredor Norte/Sul), 1975/1979 (Corredor Boqueirão/Tarifa Única / Interbairros1), 1991 (linhas Diretas), 1992 (Expresso Boqueirão), 1995 (Expresso Norte/Sul), 1996 (Integração Metropolitana), 1999 (Extensão do Eixos/Expresso Circular Sul), 2000 (Expresso Leste/Oeste) e 2009/2010 (Linha Verde/Ligeirão Boqueirão).

Atualmente, a RIT disponibiliza uma ferramenta integrada ao *Google Maps* com a qual é possível levantar facilmente o itinerário de um passageiro. Com o auxílio dessa ferramenta, foram gerados trajetos dos principais corredores BRT de Curitiba (Figura 8). Os pontos de parada são identificados pela letra P e os terminais de conexão pela letra T. As famosas estações tubo são os pontos de



parada deste sistema, sua característica de cobrança anterior ao embarque do passageiro e, de ser uma plataforma elevada, na mesma altura da porta do veículo, constituem características importantes do BRT, pois aumentam a agilidade do embarque/desembarque.

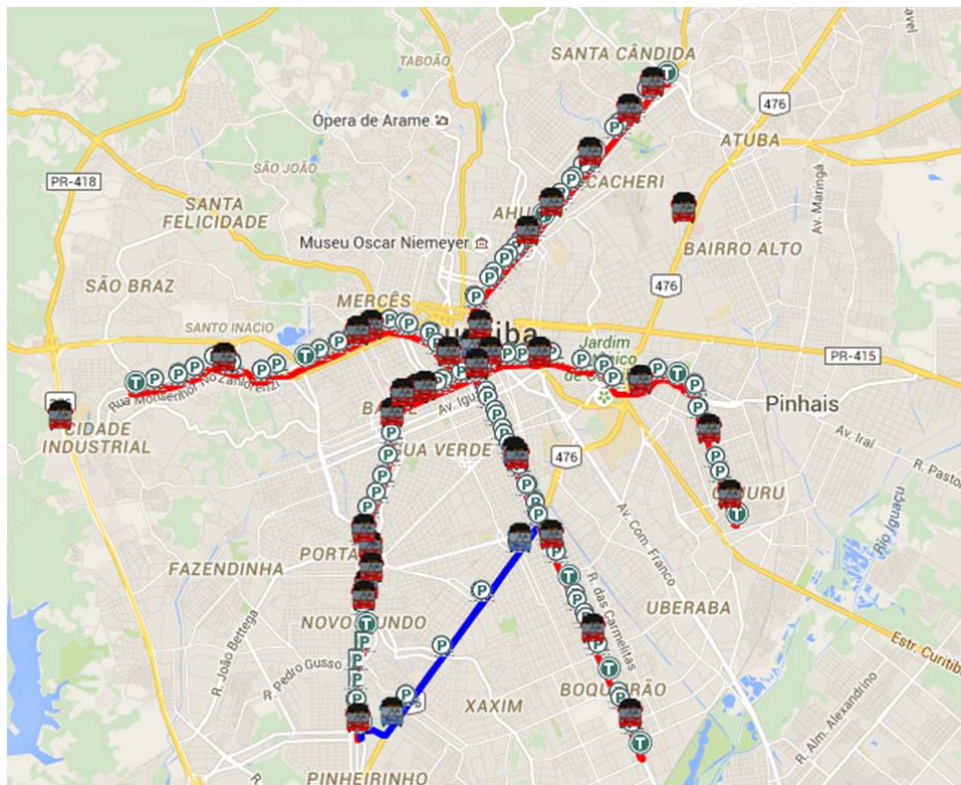


Figura 8: Itinerário das Linhas BRT em Curitiba.  
Fonte: URBS,2016

A Tabela 7 traz o resumo dos dados das rotas, incluindo número de estações tubo, terminais e a distância de cada uma delas.

Tabela 7: Resumo das Principais Linhas BRT em Curitiba

Linha	Estações Tubo[#]	Terminais [#]	Distância [m]
[203] Santa Cândida / Capão Raso	26	5	32.970
[303] Centenário / Campo Comprido	30	5	36.367
[503] Rui Barbosa/ Boqueirão	6	3	20.599
[550] Linha Verde	10	1	22.399
[603] Pinheirinho/ Rui Barbosa	18	3	20.061

### 2.4.1 Caracterização da Frota

De acordo com a URBS, a frota operando nas linhas Expresso Ligeirão e Expresso são de 27 e 166 veículos respectivamente. Como o foco deste estudo está intrinsecamente ligado aos corredores exclusivos de ônibus, apenas os 133 biarticulados da linha Expresso serão considerados. A Figura 9 apresenta os números por categoria e tipo de veículo.




COMPOSIÇÃO DA FROTA 2014						
RIT - REDE INTEGRADA DE TRANSPORTE						
CATEGORIA DE LINHA	TIPOS DE VEÍCULO	CAPACIDADE / VEÍCULO	FROTA OPERANTE		QTDE LINHAS	
			Subtotal	Total		
EXPRESSO LIGEIRÃO	BIARTICULADO 	250	27	27	02	
EXPRESSO	BIARTICULADO 	230/250	133	166	06	
	ARTICULADO 	170	33			

Figura 9: Composição da Frota 2014  
Fonte: URBS,2014

Todos os ônibus biarticulados que operam em Curitiba são fabricados pela empresa sueca Volvo. Existem basicamente duas especificações para este tipo de veículo conforme informado no site da empresa, sendo que neste estudo a caixa de câmbio da ZF foi considerada (VOLVO, 2014).

Tabela 8: Especificação básica dos ônibus Biarticulados

Especificação básica dos veículos Biarticulados		
<b>Motor</b>	DH12D 340 cv	
<b>Potência</b>	350kW (340cv)	
<b>Torque</b>	1700Nm (173kgfm)	
<b>Transmissão</b>	Automática ZF ECOLIFE 6AP1700B	Automática Voith DIWA 864.5
<b>Relação de Marchas</b>	1. <sup>a</sup> marcha: 7,09:1 6. <sup>a</sup> marcha: 0.61:1	1. <sup>a</sup> marcha: 5.05:1 4. <sup>a</sup> marcha: 0.73:1
<b>Eixo</b>	RS 1370 HV	
<b>Relação do Diferencial</b>	7.21	

<b>PBTC</b>	40.5ton
<b>Nr de Passageiros</b>	250
<b>Pneus</b>	295/80R22,5

Tendo sido brevemente descrita a situação da frota atuante em Curitiba que será objeto deste estudo de caso, é agora de interesse saber como a qualidade do ar na cidade é monitorada e em quais localidades tal controle é feito.

## 2.5 REDE DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

A região metropolitana de Curitiba (RMC) conta com uma rede de monitoramento da qualidade do ar desde os anos 80. Uma parceria entre o instituto ambiental do Paraná (IAP), empresas privadas e prefeitura viabilizam um total de doze estações na região das quais 8 são automáticas e 4 manuais (IAP, 2015).

Os poluentes monitorados variam de estação para estação sendo as automáticas mais completas, cumprindo com a resolução CONAMA03/90. Os poluentes monitorados por estação podem ser vistos na Tabela 9 abaixo, dados adaptados de IAP (2015).

Tabela 9: Estações de monitoramento da qualidade do ar da RMC.

Tipo	Estação	Parâmetros medidos		Período de Funcionamento
		Químicos	Meteorológicos	
Automáticas	Curitiba, Santa Cândida	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO e NO <sub>2</sub>		Desde 1998
	Curitiba, Cidade Industrial	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO, PTS e PI		Desde 1998
	Curitiba, Ouvidor Pardinho	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO, PTS e PI	Temperatura, Umidade Relativa, Radiação Global, Pressão, Velocidade e Direção do Vento	Agosto de 2002
	Curitiba, Boqueirão	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO, PTS e PI		Setembro de 2001
	Araucária, Assis	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> e PTS		Abril de 2000
	Araucária, NIS	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> e PI		Maio de 2003
	Araucária, CSN	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO, PTS e PI		Agosto de 2002

	Araucária, REPAR		SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO, PTS e PI		Julho de 2003
Manuais	Curitiba, Santa Casa		Fumaça, SO <sub>2</sub> , PTS e NH <sub>3</sub>	-	Desde 1985
	Araucária, São Sebastião		Fumaça, SO <sub>2</sub> , PTS e NH <sub>3</sub>	-	Desde 1985
	Araucária, Seminário		Fumaça, SO <sub>2</sub> , PTS e NH <sub>3</sub>	-	Desde 1985
	Colombo		PTS e PI	Velocidade e direção do Vento	Desde 2006

A distribuição geográfica das doze estações de monitoramento da RMC pode ser observada na Figura 10. A densidade demográfica da RMC, também apresentada na Figura 10 mostra que a maior concentração de estações está localizada na região de Araucária localizada ao sul de Curitiba próxima à Cidade Industrial de Curitiba. Isto porque a implantação e operação das mesmas foram exigências para concessão de licença ambiental de algumas empresas (REPAR, UEG, CISA-CSN PR e Assis) como medidas compensatórias dos impactos ambientais causados (IAP,2015).

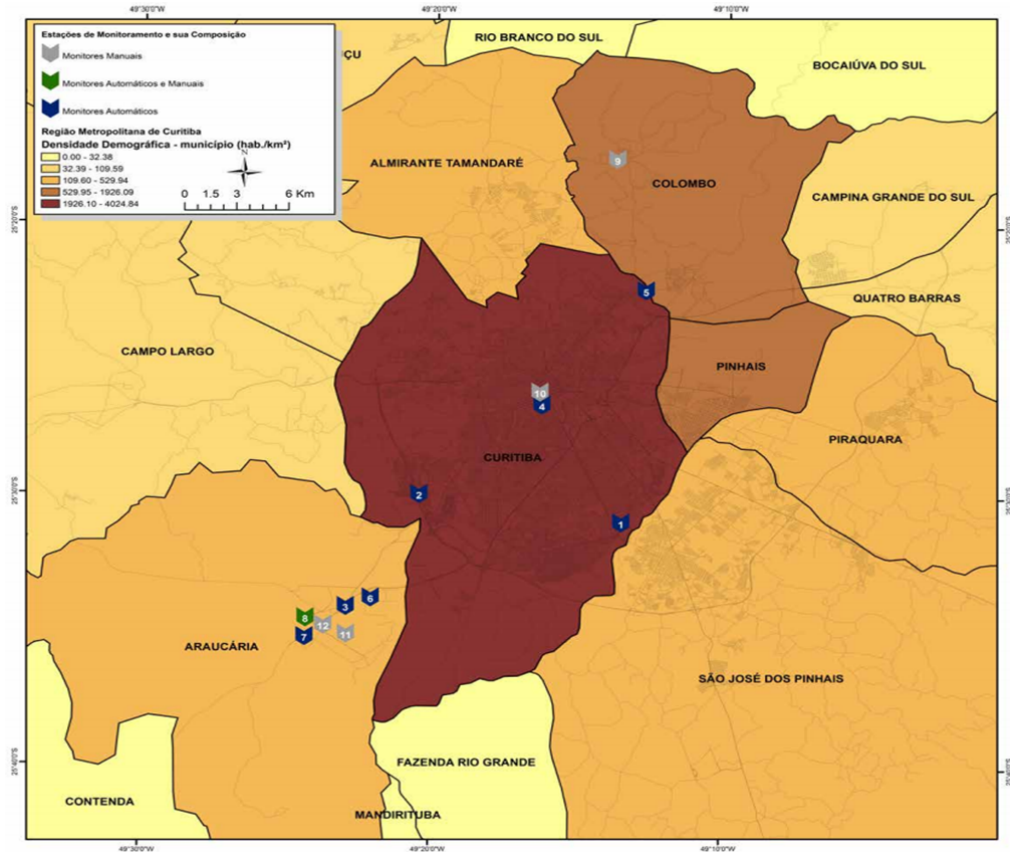


Figura 10: Localização das Estações de Monitoramento na RMC.  
Fonte: BRASIL, 2014.

Boletins mensais e atualizados da qualidade do ar podem ser obtidos diretamente do site do IAP (IAP, 2015). De forma geral, no relatório da qualidade do ar de 2013, observou-se que na maior parte do tempo a qualidade do ar da RMC atende aos padrões da Resolução CONAMA N03/90. A cidade de Curitiba não apresentou nenhuma violação em nenhum dos parâmetros primários e secundários (formados a partir dos poluentes primários) monitorados, já Araucária apresentou apenas uma violação referente ao poluente primário e cinco devido a poluentes secundários. O caso mais crítico observado foi em Colombo onde um número considerável de violações ocorreram, sendo necessárias ações de controle na região.

## 2.5.1 Densidade Popacional por Bairro em Curitiba

Num estudo comparativo dos últimos cinco censos nacionais, o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) detalhou a evolução da densidade demográfica de Curitiba. Segundo este estudo, os três bairros mais densamente povoados de Curitiba são o Centro, Água Verde e Sítio Cercado respectivamente. Na Figura 11 é possível observar a evolução da densidade demográfica nos diferentes bairros de Curitiba.

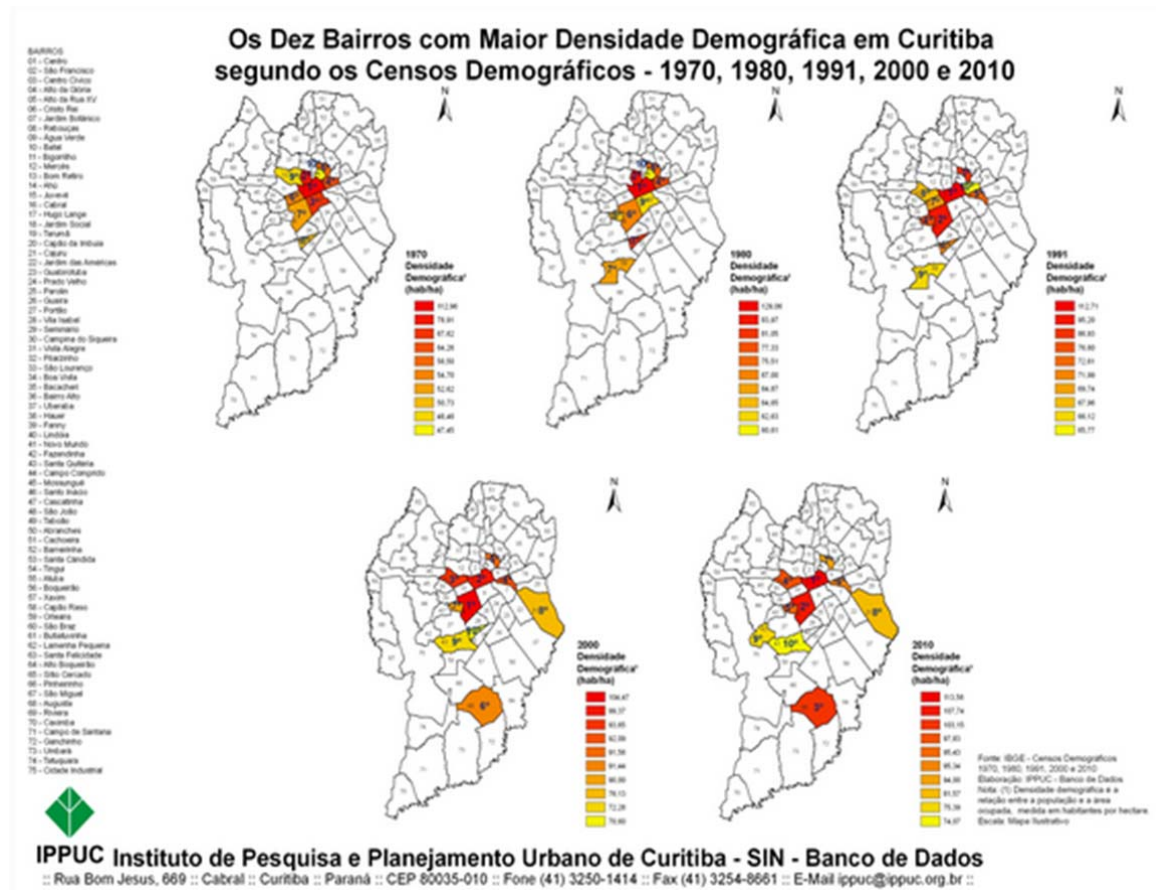


Figura 11: Os dez bairros com maior densidade demográfica de Curitiba.  
 Fonte: IPPUC

De acordo com a diretiva europeia 1999/30/CE, a RMC com uma população entre 2 e 4 milhões de pessoas deveria contar com três a sete pontos de

monitoramento, que devem estar localizados de forma a cobrir regiões industriais (fontes fixas de poluição, isto é, indústrias), centrais (área dominada pelas fontes móveis) e bairros residenciais (onde mora a maior parte da população). Neste contexto, chega-se à conclusão de que as estações atuais são suficientes, sendo necessário apenas adequá-las de forma que todas possam medir todos os parâmetros definidos pelo CONAMA (IAP, 2013).

Ao relacionar a distribuição dos bairros mais densamente povoados de Curitiba com a localização das estações de monitoramento da qualidade do ar é possível perceber que uma das quatro estações de monitoramento em Curitiba está situada no bairro mais densamente povoado, no caso o centro da cidade. Uma delas está situada na cidade industrial e as outras duas em bairros residenciais.

O monitoramento da poluição reflete o conjunto de todos os agentes poluidores na região da cidade de Curitiba. Para compreender o efeito de uma parte específica, no caso a frota de ônibus da cidade, é necessário recorrer a uma forma de avaliação diferente. Neste contexto, este trabalho tem uma função de certa forma inversa que a de prover um inventário de quanto este modal específico de transporte público contribui para as emissões atmosféricas.

## 2.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é utilizada na compilação e avaliação de aspectos ambientais e seus potenciais impactos ao longo de todo o ciclo de vida de um processo ou produto. Isto significa dizer que engloba desde a extração da matéria prima, passando pela produção, utilização, tratamento, reciclagem e descarte (ISO 14040). Os impactos referentes ao transporte estão implícitos durante e entre cada uma das etapas do ciclo de vida.

Para que se possa efetuar tal avaliação de forma científica, uma série de organizações vem desenvolvendo guias e normas de forma a aprimorá-la continuamente. Dentre as principais participantes, pode-se citar o *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) e a *International Organization for Standardization* (ISO). As normas ISO 14040 e ISO 14044 constituem algumas das

principais referências sobre o assunto. Tais normas descrevem o ACV em quatro fases, quais sejam:

- a) Fase da Definição do Objetivo e Escopo,
- b) Fase da Análise do Inventário,
- c) Fase da Avaliação do Impacto e,
- d) Fase da Interpretação dos Resultados.

Sucintamente, o escopo dependerá do objetivo do estudo e engloba a fronteira do sistema assim como o nível de detalhamento pretendido com o trabalho. A fase da análise do inventário corresponde a coleta dos dados de entrada e saída do sistema sendo estudado. A terceira fase tem a função de avaliar os impactos resultantes do processo com base nos dados do inventário, é nessa fase que os impactos ambientais são determinados. A última fase consiste em interpretar os resultados, emitindo conclusões e recomendações de acordo com o objetivo e escopo do estudo (ISO 14040).

É fácil notar que a avaliação e quantificação dos impactos ambientais é um processo complexo. É preciso conhecer o sistema do produto, suas operações e processos para que, após uma longa etapa de levantamento de dados (e muitas vezes envolvendo a criação de um novo banco de dados), uma avaliação dos reais impactos possa ser realizada.

Conforme dito anteriormente, a ACV é uma ferramenta e, como tal, não é a única capaz de quantificar os impactos ambientais. Um estudo da *Clean Vehicle Research* (CLEVER, 2007) comparou diferentes metodologias com diferentes abrangências/alcances para concluir que a ACV é indiscutivelmente a mais desenvolvida e aceita mundialmente dentre todas elas. As ferramentas *ECOSCORE*, *ECO-Efficiency*, *ACEEE's*, *The CAIR*, *ETA*, *The VCD*, *ECOfest EPA green vehicle guide*, *Cleaner Drive*, entre outras, foram estudadas e seus métodos detalhados, porém nenhum deles conseguiu cobrir tantos aspectos quanto a ACV. Esse estudo ainda levantou que existem quatro categorias principais de ACV (para estudos envolvendo veículos), quais sejam: 1) ACV de um veículo específico, 2) ACV de um veículo “médio”, 3) ACV comparativo de diferentes combustíveis e tecnologias e 4) ACV com perspectivas de implementação futuras. Com o contínuo desenvolvimento da própria ferramenta e também da ciência por trás desses tipos de análises, foram definidas novas classificações, mais amplas e capazes de cobrir outras áreas de interesse.



Ekvall et al. (2005) denominavam as avaliações de ciclo de vida como “retrospectiva” e “prospectiva” no sentido de que, dependendo do tipo poderiam simplesmente relatar os impactos levantados sem avaliar as consequências futuras de possíveis mudanças. O ACV atribucional, ou retrospectivo, foi, portanto, muito criticado. Um marco na determinação de novas terminologias foi um *workshop* que ocorreu na cidade de Cincinnati em 2001 envolvendo os maiores pesquisadores da área. Nele ficaram estabelecidos as novas nomenclaturas Atribucional e Consequencial.

Com relação à aplicação de cada um deles, muitos autores defendem que a escolha deve ser feita de acordo com o escopo do trabalho, sendo que o atribucional seria mais relevante para o conhecimento sobre os impactos ambientais e o consequencial no sentido de suportar alguma decisão. Existem ainda muitas divergências entre autores sobre a questão temporal, se seria possível aplicar um ACV atribucional para um ano futuro, por exemplo. Segundo Sandén e Karlstrom (2007) esta questão reside no volume de controle do sistema estudado, ou seja, tanto pode ser atribucional para um ano futuro quanto consequencial para um ano passado. Toda essa argumentação é importante, pois irá afetar os dados a serem utilizados na avaliação e por isso a escolha por um ou outro tipo de ACV precisa ser bem embasada. No contexto desta dissertação e destas diferentes classificações, pode-se dizer que o trabalho será um ACV atribucional e comparativo de diferentes combustíveis e tecnologias garantindo-se que os sistemas estudados serão equivalentes.

### 2.6.1 Estudos de ACV Relevantes ao Tema

A revisão da literatura de estudos correlatos focou nas áreas de ACV de transportes (em especial, ônibus) e tecnologias alternativas (híbridos e combustíveis alternativos). Esta seção inclui um resumo desses estudos realizados tanto no Brasil quanto em outros países e constrói a base de comparação dos resultados obtidos. A Tabela 10 traz o resumo desta revisão.

Tabela 10: Tabela resumo da literatura de ACVs de transporte utilizados.

<b>Autor (ano)</b>	<b>Unidade Funcional</b>	<b>Tecnologia do ônibus</b>	<b>Combustível</b>	<b>Emissões e Categorias de Impacto Estudadas*</b>
Chester (2008)	vkm/pkm	VCI /Elétrico	Diesel e Eletricidade	GHGs, CO, NOx, SO <sub>2</sub> , PM10, VOC
Sundvor (2013)	vkm/pkm	VCI	Diesel e CNG	GWP, FDP, HTP, EP, PM, MDP, POCP, AP
Simonsen (2012)	vkm/pkm	VCI / Híbrido	Diesel , CNG , Eletricidade e Biodiesel	Uso de Energia, CO <sub>2</sub> , formação de ozônio
Cooney (2011)	Vkm	VCI / Elétrico	Diesel e Eletricidade	GWP, ODP, inorgânicos inaláveis, cancerígenos, não-cancerígenos, orgânicos inaláveis, EP
Ally et al. (2007)	Vkm	VCI / Hidrogênio	Diesel, CNG e Hidrogênio	Uso de Energia, GWP, EP, AP, POCP
Ou et al (2010)	vkm/pkm	VCI / Elétrico / Híbrido	Diesel, CNG, LNG e Hidrogênio	Uso de Energia, CO <sub>2</sub>
Kliucininkas et al (2012)	1 km	VCI / Trolebus	Diesel , CNG , Gás Natural e óleo bruto	CO <sub>2</sub> , CO, NOx, SO <sub>2</sub> , PM
Garcia-Sanchez et al (2013)	1 km	VCI / Elétrico / Hidrogênio	Diesel , Eletricidade , Hidrogênio e Célula Combustível	Uso de Energia (primária e fóssil) , GWP
CASTRO (2008)	1 km	VCI (Eu3 e EEV)/ Híbrido	Diesel e GNV	CO <sub>2</sub> , CO, NOx, PM, VOC
LIMA (2013)	1 km	VCI (Eu 5)	Diesel	CO <sub>2</sub> , CO, NOx, SO <sub>2</sub> , PM, VOC

A maioria dos estudos contempla diferentes tecnologias de propulsão e de combustíveis porém em muitos deles não foi possível encontrar explicitamente para qual nível de emissões a avaliação foi feita.

A variedade de categorias de impacto e emissões avaliadas também é bastante significativa. Enquanto Ou et al. (2010), Simonsen (2012) e Garcia-

Sanchez et al. (2013) avaliaram basicamente uso de energia e gases de efeito estufa, trabalhos como Cooney (2011), Ally et al. (2007), Sundvor (2013) e Chester (2008) cobriram uma série de outras emissões e categorias de impacto como pode ser visto na tabela anterior.

Chester (2008) utilizou a abordagem de ACV incluindo as fases de manufatura do veículo, extração e fabricação do combustível e infraestrutura para três grande cidades nos Estados Unidos (Chicago, Nova Iorque e Los Angeles). Os dados das condições de tráfego foram obtidos através das agências reguladoras de cada cidade e o estudo focou em impactos provenientes do gases de efeito estufa, CO, NOx, SO<sub>2</sub>, MP e compostos orgânicos voláteis (VOCs).

Cooney (2011) aplicou o método IMPACT2002+ para comparar um veículo convencional a Diesel com um veículo elétrico. Seus resultados mostraram a importância da fase “uso” frente as demais para a maioria das categorias avaliadas. Ele ressaltou porém a importância da fonte de eletricidade nos impactos provenientes dos veículos elétricos, sendo que em apenas oito estados americanos o veículo elétrico teria uma performance ambiental melhor que o veículo convencional. Essa ressalva quanto à fonte da eletricidade também pode ser observado nos trabalhos de Garcia-Sanchez et al. (2013) para o caso espanhol e Choma (2014) para o caso brasileiro. Este último não está listado na tabela pois seu estudo era para veículos de passeio, entretanto seus resultados também apontaram para a relevância da fonte geradora de eletricidade nos impactos decorrentes.

Ally et al. (2007) conduziram um estudo para a realidade australiana ao compararem a performance de veículos movidos a Diesel, gás natural e célula de combustível a hidrogênio. Este estudo cobriu todas as fases de utilização desde a produção até o descarte incluindo a infraestrutura dos combustíveis. Novamente a fase de utilização foi a maior responsável pelos impactos. Seus resultados mostraram que a utilização de gás natural traz consequências para o aquecimento global devido ao metano não queimado assim como à baixa eficiência do combustível (1.25 vezes maior quando comparado ao veículo movido a Diesel). Já para o veículo movido a célula combustível, a infraestrutura foi a maior responsável pelos impactos. Além disso, os veículos operando com esse combustível requerem maior uso de energia primário (cerca de três vezes mais que o movido a Diesel e duas vezes mais que o movido a gás natural) e apresentaram um maior potencial de criação de ozônio fotoquímico.

Um estudo de caso realizado na China por Ou et al. (2010) comparou uma frota de ônibus de 12m com capacidade para 70 passageiros operando com diferentes tecnologias incluindo gás natural, gás liquefeito, veículo elétrico-híbrido, diesel convencional e elétrico em Pequim. O principal foco foi na utilização de energia fóssil (MJ/km) e gases de efeito estufa (g CO<sub>2</sub> equivalente/km). Os autores encontraram significativas reduções de emissões de gases de efeito estufa para os veículos elétricos e a gás natural (13% e 26% respectivamente) quando comparados com o veículo a Diesel. O veículo elétrico (plug-in) apresentou os menores consumo de energia e de emissões de gases de efeito estufa entre todas as tecnologias estudadas. Entretanto, o estudo não contemplou a fabricação dos componentes elétricos e nem a infraestrutura necessária para o carregamento das baterias, o que resulta num menor consumo de energia e de emissões. Foi utilizada a metodologia *Well-to-Wheels* (WTW) contemplando somente a fase de uso.

Simonsen (2012) realizou um estudo bastante completo do transporte por ônibus na Noruega. O autor comparou veículos a Diesel, Biodiesel, hidrogênio e gás natural em veículos convencionais e elétrico-híbridos. Seus resultados apresentaram menor impacto para o modelo híbrido enquanto que o veículo movido a hidrogênio apresentou o maior consumo de energia e de emissões de CO<sub>2</sub>. Para embasar seu estudo, o autor utilizou dados históricos de taxa de ocupação tanto para ônibus urbanos e quanto rodoviários.

Kliucininkas et al. (2012) realizaram um estudo comparativo de alternativas para o transporte público na cidade de Kaunas, na Lituânia. Um inventário do ciclo de vida das cadeias de combustível foi conduzido usando um ônibus urbano e um veículo similar do tipo trólebus. Ao utilizar a metodologia ReCiPe, quantificaram os danos normalizados de cinco tipos de combustíveis alternativos (gás natural, eletricidade, óleo bruto, Diesel e biogás). A utilização de gás natural e óleo bruto na geração de eletricidade para o trólebus apresentaram os maiores danos (32% e 72% respectivamente) quando comparados com a utilização de biogás (45.7mPt/km). Já as cadeias de produção de Diesel e de gás natural apresentaram danos cerca de três vezes maior que a de biogás. A conclusão do estudo foi de que ônibus movidos a biogás e os trólebus seriam as melhores soluções para aquela cidade.

Garcia-Sanchez et al. (2013) conduziram um ACV de quatro tipos de ônibus, quais sejam: 1) ônibus movido a hidrogênio, 2) Elétrico-Híbrido, 3) Elétrico a bateria e 4) combustão interna convencional. As categorias de impacto avaliadas foram:

consumo de energia primária, energia fóssil e gases de efeito estufa. Dentre os principais resultados obtidos, observaram que os veículos dependentes de energia elétrica (1 e 3) durante a fase de uso são os mais sensíveis a variações na fonte produtora desta energia, porém apresentaram um potencial de redução de consumo de energia fóssil acima dos 25% e redução de gases de efeito estufa próximos a 30% quando comparados ao veículo 4.

Tonje (2015) e Sundvor (2013) realizaram ACVs para a cidade de Tordheim na Noruega. Tonje (2015) explorou diferentes tecnologias de ônibus já existentes na cidade (elétrico-híbrido, gás natural e Biodiesel), incluindo as três principais fases do ciclo de vida do produto. Avaliou as categorias de impacto, mudanças climáticas, depleção de combustíveis fóssil, eutrofização, formação de particulado e ocupação da terra através do método ReCiPe em diferentes rotas da cidade. Por fim comparou com estudos realizados com carros na mesma cidade para avaliar os gases de efeito estufa por passageiro quilômetro (pkm). Seus resultados mostraram que os veículos híbridos apresentaram menores valores em termos de gases de efeito estufa e depleção de combustíveis fósseis enquanto que a versão a gás natural apresentou menores emissões para as demais categorias de impacto avaliadas. Ao substituir o gás natural por biogás, todos os resultados ficaram favoráveis para essa tecnologia. Novamente a fase de uso foi responsável pela maior parte do impacto.

Sundvor (2013) comparou a performance ambiental de três tipos de veículos de passeio (*SUV*, *hatch* e compacto) com três ônibus sendo que dois deles, ônibus urbanos, operando a Diesel e Gás Natural e, um terceiro ônibus (agora, rodoviário) operando com Diesel. Sua pesquisa utilizou a unidade funcional pkm e o método ReCiPe. As categorias de impacto avaliadas foram depleção de combustíveis fóssil, toxicidade humana, eutrofização marinha, formação de particulado, depleção de metais, acidificação terrestre e oxidação fotoquímica. A fase de uso correspondeu a pelo menos 80% do impacto dependendo da categoria. Os resultados obtidos apresentaram vantagens para o veículo movido a gás natural sendo que os três tipos de ônibus foram melhores ambientalmente que os carros utilizados na comparação. Um fato relevante do estudo é a influência do ciclo de operação nos resultados, onde para o ciclo rodoviário os resultados obtidos foram significativamente menores. Já no Brasil, dois estudos relacionados a quantificação de emissões em corredores BRTs foram revisados. Castro (2008) e Lima (2013) fizeram levantamentos de dados operacionais (perfil de frota, padrão de condução,

contagem de tráfego entre outros) e de valoração econômica das emissões produzidas durante o uso dos veículos em corredores BRT em São Paulo e no Rio de Janeiro respectivamente. Ambos utilizaram a metodologia IVE (*International Vehicle Emissions*) para estimar os poluentes CO, HC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e Metano (CH<sub>4</sub>), considerando além dos ônibus, veículos de passeio, motocicletas e caminhões.

Lima (2013) utilizou o corredor BRT Transcarioca, na capital do Rio de Janeiro como estudo de caso. Nos seus cálculos avaliou as hipóteses de não haver migração de usuários do modal corrente para o sistema BRT assim como de uma redução de 5% na quantidade de automóveis por mudança de modal de seus usuários após a introdução do sistema. Dadas essas condições foram observadas reduções em todas as emissões veiculares para o sistema BRT.

Já Castro (2008) investiga a influência de fatores intervenientes nas emissões veiculares nos corredores BRT. Utilizando dados levantados pela SPTrans (autarquia que faz a gestão do transporte público em São Paulo) e pela Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) foi possível aplicar o método IVE. Ao todo, três grandes áreas foram abordadas em sua pesquisa. A primeira foi a avaliação da influência do ciclo de operação nas emissões. A segunda foi considerar os impactos da mudança de utilização de modais pós introdução do BRT no corredor Pirituba-Lapa-Centro e por último comparar tecnologias de ônibus (Euro3 e EEV movidos a GNV) num corredor hipotético. Suas conclusões mostraram a importância do ciclo de operação no resultados de emissões sendo possível obter ganhos significativos com uma melhora nas condições de tráfego, assim como pode comprovar os benefícios de novas tecnologias como Euro3 (equivalente a fase P5 do PROCONVE) e EEV movido a GNV.

Apesar dos dois estudos de caso de BRTs brasileiros não utilizarem a ferramenta ACV em seus estudos, a metodologia de quantificação de emissões, a importância dos ciclos de operação, e das tecnologias avaliadas são extremamente importantes para embasar algumas das escolhas feitas nesta dissertação.

Os sistemas híbridos assim como a bateria de Li-Íon utilizada são complexos tanto em sua modelagens quanto na obtenção de dados e informações a respeito. Os estudos descritos a seguir, buscaram contabilizar os impactos ambientais de tais sistemas com foco especial nas tecnologias de baterias disponíveis no mercado.

Autores como Hawkins et al.(2012), Majeau-Bettez et al.(2011) e Olofsson e Romare (2013), descrevem em detalhe os componentes, os processos, utilizados

nestes sistemas. O último trabalho compara tanto tecnologias atuais como futuras tendências de baterias Li-Íon apresentando um resumo bastante interessante e detalhado dos pontos mais relevantes. Neste estudo, foram considerados os valores disponíveis noecoinvent para a bateria (com adaptação) escalonados pelo peso da mesma, os mesmos estão de acordo com os valores apresentados por Gaines et al. (2010).

Notter et al. (2010) compararam um veículo elétrico com um veículo convencional a combustão interna utilizando a perspectiva hierarquista da metodologia Eco-indicator 99 para as categorias de impacto aquecimento global, uso de energia e depleção abiótica e emissões PM10, NOx, e SO<sub>2</sub>. O estudo focou na produção da bateria de Li-Íon porém também incluiu a fabricação e o uso do veículo.

Já Samaras et al. (2008) realizaram um estudo com três tecnologias (convencional, elétrico-híbrido e elétrico-híbrido plug in) em carros de passeio com foco em gases de efeito estufa e uso de energia. Ao estudar diferentes tipos de bateria como Ni-MH e ácido-chumbo, descobriram que a tecnologia Li-Íon era a que trazia o menor impacto dentre elas. Tal impacto também era significativamente pequeno quando comparado com as emissões provenientes da fase do uso. De forma geral, a utilização do veículos com carregamento externo reduziam em mais de 30% a emissão de gases de efeito estufa quando comparados com os veículos convencionais porém reduções mínimas se comparado com a versão elétrica híbrida. Assim como Choma (2014), alertaram para a alta sensibilidade ao mix de produção de eletricidade do país onde se dará o uso do produto.

Assim como Samaras et al. (2008), Notter et al. (2010) também mostraram que os impactos ambientais provenientes da produção e utilização de baterias de Li-Íon são pequenos quando comparados com outros processos da produção e uso dos veículos, variando de 5 a 15% dependendo do fator de impacto.

O estudo de Majeau-Bettez et al. (2011) comparando os impactos do ciclo de vida de diferentes tipos de bateria resultou em resultados cerca de quatro vezes maiores que os reportados por Notter et al. (2010) e Samaras et al. (2008) com valores de 22kg CO<sub>2</sub> por quilograma da bateria Li-Íon.

Existe uma gama bastante ampla de estudos na área, utilizando diferentes métodos de avaliação e diferentes tipos de tecnologia em várias localidades do mundo. Dentro do possível, os resultados deste trabalho serão cruzados com a literatura disponível.

### 3 MÉTODO E DETALHES DO SISTEMA

Para que a comparação entre diferentes tecnologias de propulsão seja apropriada, é necessário definir claramente o escopo e as fronteiras do sistema do produto de forma a incluir todas as diferenças relevantes entre as alternativas analisadas (HAWKINS et al., 2012). A unidade funcional deste estudo foi definida como 1 passageiro passageiro quilômetro (pkm) nas condições de tráfego dos corredores exclusivos de Curitiba sendo que a vida útil de um ônibus foi definida em 1.000.000km.

O fluxo de referência utilizado foi baseado na proporção dos passageiros transportados por quilômetro por tipo de veículo. A taxa de ocupação média de 174 passageiros por dia ao longo de 1.000.000km foi calculada proporcionalmente a capacidade de cada tipo de veículo resultando em frações de ônibus necessários para transportar tais passageiros em tal distância. Maiores detalhes serão fornecidos ao longo do trabalho.

O sistema do produto inclui uma análise do berço ao túmulo, ou seja, desde a extração, a produção, o uso e o descarte dos veículos assim como suas respectivas cadeias de produção.

Os atuais ônibus biarticulados B340M Euro3 da fabricante VOLVO serão os veículos de referência deste estudo. Seus componentes de veículo como chassis, freios, interior e pneus serão considerados idênticos entre as alternativas, exceto os propulsores a combustão interna e híbrido assim como seus acessórios.

Para o veículo articulado híbrido foram consideradas: a substituição do trem de força e a adição dos componentes elétricos que caracterizam o modelo híbrido. O restante do veículo foi considerado idêntico ao modelo convencional (chassis, carroceria, etc.). Os componentes elétricos adicionados são: motor elétrico, bateria de Li-Íon, unidade de controle, conversor, caixa de junção, cabos de alta tensão e sistema de aquecimento da bateria. Para a montagem foram utilizados dados do relatório de Sustentabilidade da Volvo (VOLVO, 2014c)

Para a fase de utilização do produto, foram levantados os dados de operação e posteriormente simulados o consumo de combustível nas rotas do



sistema BRT de Curitiba. Além disso os dados de manutenção também serão considerados neste estudo.

Para a fase do descarte, foram modelados o tratamento (reciclagem, se houver) e descarte do veículo e baterias.

Para o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) foram utilizados dados disponíveis publicamente e/ou fornecidos pelo fabricante do veículo. O banco de dados do ecoinvent v.3.01 (ECOINVENTCENTRE 2014) disponíveis no Software SimaPro 8.0 e o método de caracterização IMPACT2002+ v2.12 também foram usados neste estudo. Análises de sensibilidade foram realizadas para avaliar os efeitos das hipóteses e suposições relacionadas ao conteúdo energético e consequente consumo do Biodiesel B100, as emissões do veículo híbrido Eu5 e Eu6, ou relacionado ao método de caracterização seja ele IMPACT 2002+ v2.12, CML 2000 v3.02 com validade global e Eco-indicator 99 (H/A) v2.10.

### 3.1 ESCOPO

Os diferentes veículos abordados neste estudo foram:

- Ônibus biarticulado Euro3 operando com Diesel B7 (referência);
- Ônibus biarticulado Euro5 operando com Diesel B7;
- Ônibus biarticulado Euro5 operando com Diesel B100;
- Ônibus articulado Euro5 operando com Diesel B7;
- Ônibus articulado Euro5 operando com Diesel B100;
- Ônibus articulado híbrido Euro5 operando com Diesel B7;
- Ônibus articulado híbrido Euro5 operando com Diesel B100;

#### 3.1.1 Fronteiras do Sistema

Conforme previamente mencionado, as configurações estudadas foram comparadas com a versão P5 (Euro3) do produto. Para os veículos convencionais, os componentes de veículo foram considerados idênticos, salvo o material adicionado pelas diferentes configurações dos ônibus, seja articulado ou biarticulado. Já para o veículo híbrido os dados dos componentes elétricos foram adicionados a partir de estudos já publicados (LAUDON, 2012). Na Tabela 11 abaixo se pode verificar os principais componentes considerados na análise.

Tabela 11: Componentes dos veículos

<b>Componentes</b>		<b>MCI Biarticulado</b>	<b>MCI Articulado</b>	<b>Híbrido Articulado</b>
<b>Trem de Força</b>				
Volume	L	12	12	5
Número de Cilindros	-	6	6	4
Potência	cv	340	340	240
Massa do Motor	kg	1284	1284	496 <sup>1</sup>
Massa da Transmissão	kg	401	401	269 <sup>2</sup>
Eixos	kg	223 (4)	223 (3)	223 (3)
<b>Sistema de armazenamento de energia</b>				
Capacidade do tanque de combustível	L	300 (2)	300 (2)	190 (2)
Massa do sistema de combustível	kg	150	150	90
Massa de combustível	kg	550	550	350
<b>Componentes elétricos/híbridos<sup>3</sup></b>				
Motor Elétrico	kg	-	-	152
Bateria Pb	kg	56 (2)	56 (2)	29 (2)
Bateria Li-Ion	kg	-	-	212 (2)
Carregador interno	kg	-	-	6.2
Aquecimento da Bateria	kg	-	-	1.8
Unidade de controle do sistema híbrido	kg	-	-	1.9
Inversor DC/AC	kg	-	-	14
Caixa de Junção	kg	-	-	22.6
Conversor DC/DC	kg	-	-	21
Inversor de Potência	kg	-	-	28
Cabos de Alta Tensão	kg	-	-	8.1
<b>Carroceria<sup>4</sup></b>				
Carroceria	kg	11300	9010	8600
Pneus	kg	66.1 (14)	66.1 (10)	48 (10)

<sup>1</sup> HENRIKSSON 2008 apud LAUDON 2012.

<sup>2</sup> Volvo Bus Corporation 2015, a,b.

<sup>3</sup> LAUDON, 2012.

<sup>4</sup> Autor: diferença entre o peso total encarroçado e apenas o chassis.

Devido a questões de confidencialidade, os valores da massa dos componentes foram agregados e não poderão ser mostrados separadamente. Ou seja, a somatória de todo o aço inox utilizado no produto, por exemplo, será informada por completo e não componente a componente (vide capítulo 3.2).

### 3.1.2 Sistema do Produto

Atualmente, a produção de matéria prima e de componentes se dá por todo o mundo e, portanto neste estudo, valores médios globais foram utilizados conforme disponibilidade no ecoinvent v3.01 (vide comentários nos apêndices deste trabalho). Já para o processo de montagem, os dados coletados da planta de Curitiba foram utilizados como referência.

A fase de utilização é composta por 5 ciclos de BRT em Curitiba, e toda a fase de utilização se dará nesses ciclos.

O *mix* de fontes de geração de eletricidade utilizado durante a fase de produção será o do Brasil baseado no *dataset* disponível no ecoinvent v3.01.

Não foi modelado nenhum transporte dos componentes entre plantas e ou fornecedores.

### 3.1.3 Categorias de Impacto e Método de Caracterização

O *IMPact Assessment of Chemical Toxics* (IMPACT 2002+) é uma metodologia desenvolvida na Suíça que propõe uma abordagem mista *midpoint/endpoint* conectando os resultados do inventário de ciclo de vida em catorze categorias *midpoint* e quatro *endpoint* (JOLLIET et al. 2003), como pode ser visto na Figura 12.

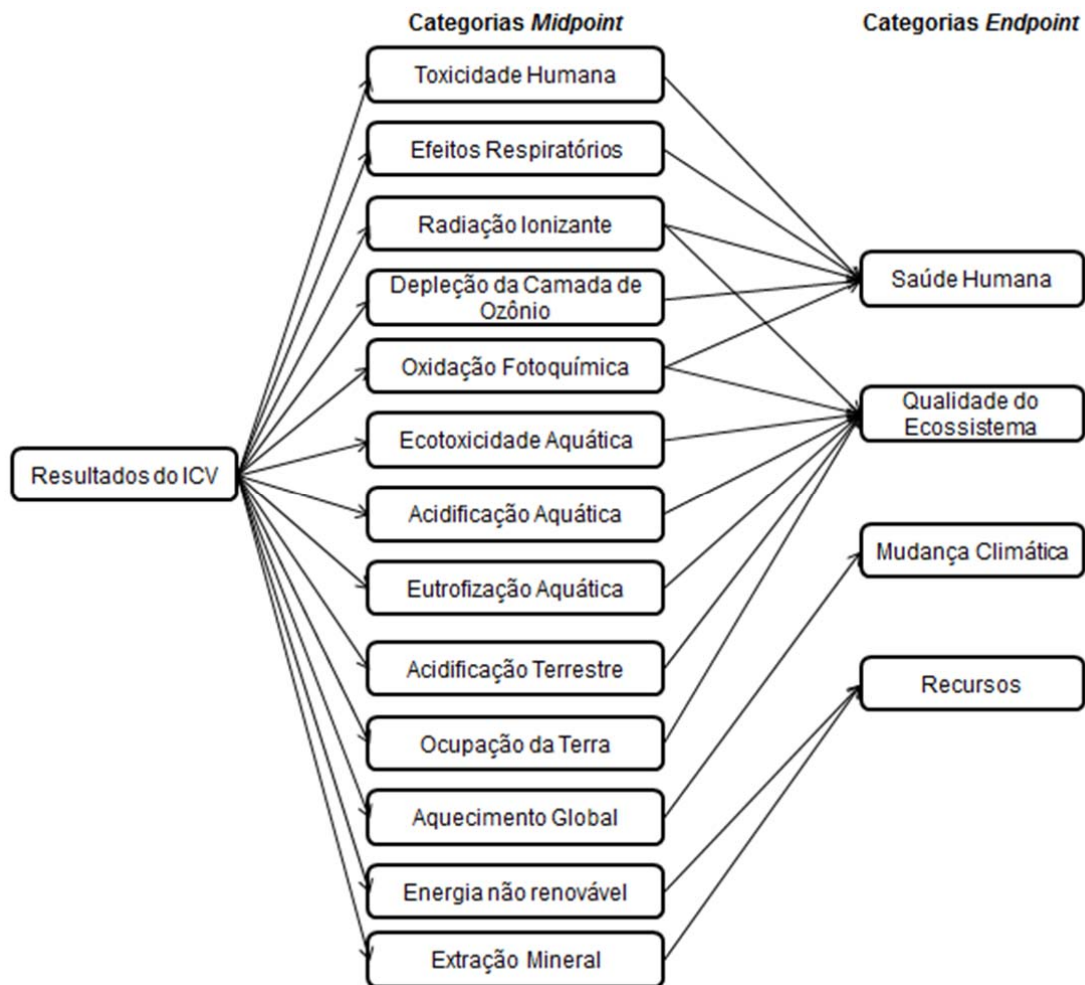


Figura 12: Relação entre Categorias de Impacto e *midpoint* e as Áreas de Dano  
 Fonte: Adaptado de Jolliet et al., 2003.

As setas simbolizam o caminho de impacto relevante para cada área de dano. A Tabela 12 traz os fatores aplicados a cada categoria de impacto por tipo de dano. Tais fatores influenciam diretamente o resultado final pois indicam a relevância de cada categoria *midpoint* nos danos. Tomando o dano Qualidade do Ecossistema como exemplo, é possível observar que a categoria de impacto Ocupação da Terra chega a ser um milhão de vezes mais relevante quando comparada a Ecotoxicidade Aquática. Já para a saúde humana, os inorgânicos inaláveis são bastante significativos e, especialmente para este trabalho, representados pelo material particulado emitido tanto pela queima dos combustíveis fósseis quando pela degradação da estrada.

Tabela 12: Fatores aplicados no método IMPACT 2002+ entre as categorias de impacto por dano

Avaliação de Danos	Categorias de Impacto	Fator	Unidade
Saúde Humana	Cancerígenos	2.80E-6	DALY /kg C2H3Cl eq
Saúde Humana	Não cancerígenos	2.80E-6	DALY /kg C2H3Cl eq
Saúde Humana	Inorgânicos Inaláveis	7.00E-4	DALY /kg PM2.5 eq
Saúde Humana	Radiação Ionizantes	2.10E-10	DALY /kg Bq eq
Saúde Humana	Depleção da Camada de Ozônio	1.05E-3	DALY /kg CFC-11 eq
Saúde Humana	Orgânicos Inaláveis	2.13E-6	DALY /kg C2H4 eq
Qualidade do Ecossistema	Ecotoxicidade aquática	5.20E-5	PDF*m2*yr /kg TEG water
Qualidade do Ecossistema	Ecotoxicidade terrestre	7.91E-3	PDF*m2*yr /kg TEG soil
Qualidade do Ecossistema	Acidificação terrestre	1.04	PDF*m2*yr /kg SO <sub>2</sub> eq
Qualidade do Ecossistema	Ocupação da Terra	1.09	PDF*m2*yr /kg m <sup>2</sup> org.arable
Mudanças climáticas	Aquecimento Global	1	kg CO <sub>2</sub> eq / kg CO <sub>2</sub> eq
Recursos	Energia não renovável	1	MJ primário / MJ primário
Recursos	Extração mineral	1	MJ primário / MJ primário

O método IMPACT2002+ fornece fatores de caracterização para quase 1500 substâncias. Tais fatores são provenientes de modelos de caracterização e são aplicados para converter o resultado da análise do inventário na unidade do indicador de categoria de impacto (ABNT,2009).

As quatro categorias de dano serão avaliadas neste trabalho e como análise de sensibilidade, os métodos CML 2000 v3.02 e Eco-indicator 99 (H/A) v2.10 serão utilizados. Os estudos de ACV realizados na Volvo, normalmente utilizam essa metodologia além do método EPS (HENRIKSSON 2008 apud LAUDON 2012).

O método CML 2000 começou a ser desenvolvido em 1992 na Holanda pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (CML) em parceria com outras instituições de ensino e pesquisa (GUINÉE, 2001). Esse método de avaliação de impacto no ciclo de vida (AICV) é baseado em uma abordagem *midpoint* e seus modelos de caracterização foram selecionados com base em uma extensa pesquisa e revisão das metodologias disponíveis no mundo. Quatro categorias de impacto dentre onze foram selecionadas para avaliação neste trabalho, quais sejam:

- Potencial de Aquecimento global (GWP em inglês) é calculado baseado em emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e é provavelmente a categoria de impacto mais utilizada na avaliação ambiental de produtos;
- Potencial de Acidificação (AP em inglês) é calculado em termos de kg SO<sub>2</sub> equivalente / kg emissões. Substâncias acidificantes causam uma série de impactos ao solo, águas, organismos e materiais (construções, por exemplo).
- Potencial de Toxicidade Humana (HTP em inglês) é medido em termos de 1,4 diclorobenzeno equivalente / kg de emissões. Esta categoria está relacionada aos efeitos das substâncias tóxicas no ser humano.
- Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (RDP em inglês) é medido em termos de kg Sb (antimônio) equivalente / kg de extração. Este indicador se relaciona com a extração de minerais e combustíveis fósseis do ecossistema. Esse indicador é extremamente relevante pois sistemas híbridos são equipamentos fabricados no estado da arte da tecnologia atual e repletos de eletrônica contendo circuitos impressos (contendo materiais escassos) e também baterias de Li-Íon.

O método Eco-indicator 99 é a evolução do método Eco-indicator 95 e foi desenvolvido também por organizações holandesas. É um método *endpoint* e foi desenvolvido para simplificar a interpretação e ponderação dos resultados. É amplamente utilizado por empresas pois permite, através de uma pontuação final única, compilar os diferentes impactos em um único indicador (GOEDKOOOP, 2000).

Existem basicamente três categorias de dano, quais sejam:

- Dano à saúde humana (unidade DALY = *Disability Adjusted Life Years*, a qual pondera distintas deficiências causadas por doenças).
- Dano a qualidade do ecossistema (unidade PDF\*m<sup>2</sup>\*ano = *Potentially Disappeared Fraction of plant/species*).
- Dano aos recursos (unidade MJ excedente de energia).

Para se ponderar e mesmo ordenar a importância entre as categorias de dano, o Eco-indicator 99 desenvolveu três perspectivas, quais sejam: hierarquista, igualitária e individualista para introduzir três abordagens de pensamento.

Dentro da abordagem hierarquista, a contribuição da saúde humana e da qualidade do ecossistema é de 31% e 54%, respectivamente. Sendo que danos respiratórios e de efeito estufa são dominantes dentro da saúde humana, uso da terra é dominante dentro de qualidade do ecossistema e a utilização de combustíveis fósseis tem papel preponderante dentro dos recursos naturais (PE INTERNATIONAL AG, 2002).

Na abordagem igualitária, a qualidade do ecossistema contribui com 50% do resultado total. Já a individualista não considera o risco de que, por exemplo, os combustíveis fósseis possam acabar, sendo que esta categoria de impacto é deixada de fora da análise. Este estudo utilizou a perspectiva hierarquista. Os estudos de ACV realizados na Volvo, normalmente utilizam essa abordagem além do método EPS (HENRIKSSON 2008 apud LAUDON 2012).

#### 3.1.4 Fluxograma do Ciclo de Vida

A Figura 13 traz o fluxograma simplificado das três fases da vida do produto. Sendo que para a fase de produção foram coletados dados primários de massa e material dos componentes utilizados na fabricação do veículo de referência junto ao fabricante assim como dados da produção do mesmo.

Já para a fase de uso, os dados referentes a produção do combustível são provenientes da base de dados ecoinvent (produção de Biodiesel de soja no Brasil e produção do Diesel fóssil). Para a manutenção dos produtos, dados do fabricante e da literatura foram utilizados. O consumo foi calculado utilizando a ferramenta de simulação GSP e as emissões calculadas de acordo com os fatores de emissões disponíveis na literatura (MMA, 2011). Similarmente à fase de produção, os resultados estão detalhadamente explicados e suas fontes identificadas no capítulo 4.1.2.

Com relação à última fase do ciclo de vida, será considerada reciclagem de 100% dos metais e da bateria de Li-Íon. Os resultados serão expostos no capítulo 4.1.3.

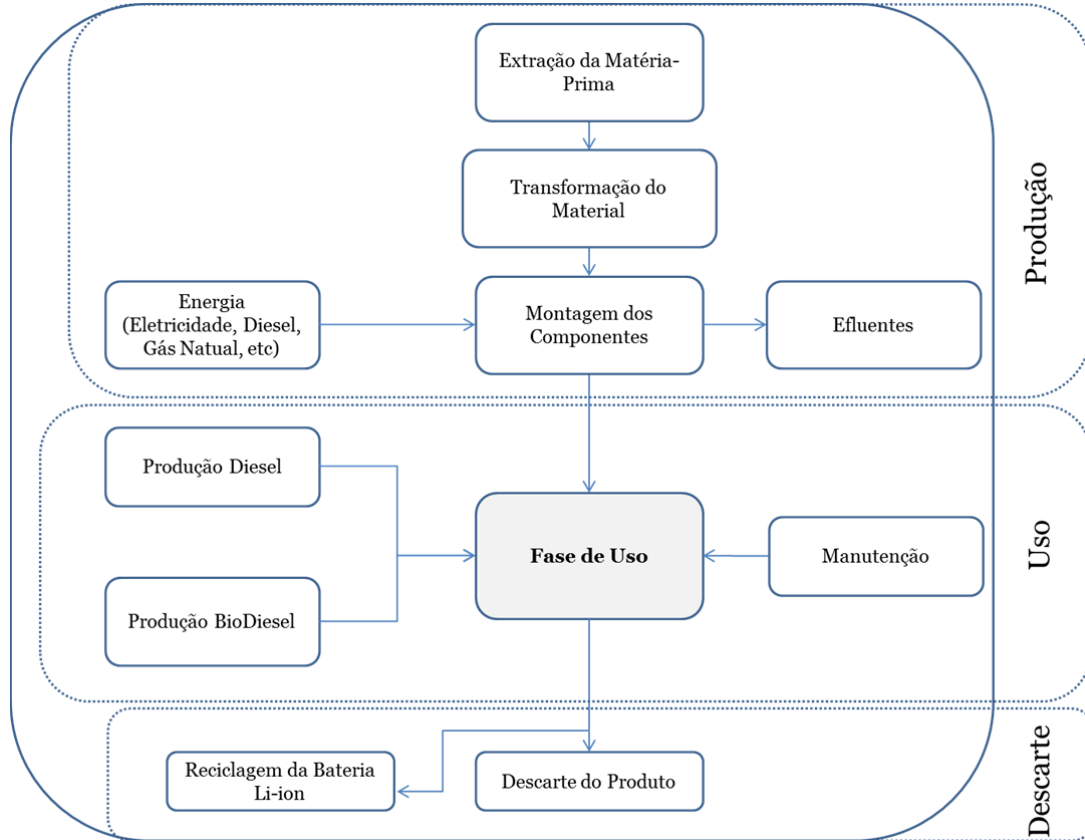


Figura 13: Fluxograma simplificado do ciclo de Vida  
Fonte: Autoria Própria.

### 3.1.5 Limitações

Neste trabalho nenhum aspecto social ou tampouco econômico foi abordado. As simplificações foram feitas com base ou na literatura ou na experiência de profissionais da área da engenharia de desenvolvimento do produto:

1. Estimativa da massa associada à carroceria dos ônibus uma vez que não houve retorno por parte dos encarregados questionados;
  - a. Utilização da redução da escala aplicada ao articulado em relação ao biarticulado (fator de escala 0.8);
  - b. Utilização da redução da escala aplicada ao motor 5 litros em relação ao 12 litros (fator de escala 0.416);



2. Utilização de fatores de emissões para os poluentes regulados em vez de valores reais medidos durante o uso.
3. Valores de emissões e efluentes apresentados no relatório de sustentabilidade referente à montagem do veículo foram alocados por unidade produzida, não somente ônibus.
4. A bateria utilizada no veículo híbrido é do tipo LFP ( $\text{LiFePO}_4$  como cátodo), entretanto por falta de dados, a bateria do tipo LMP ( $\text{LiMnPO}_4$  como cátodo) foi considerada.

Por falta de dados referentes à reciclagem de materiais de ônibus no Brasil, a simplificação de que 100% dos metais são reciclados foi adotada e o restante do veículo foi descartado. Adicionalmente a bateria de Li-Ion foi reciclada conforme processo doecoinvent.

### 3.2 FASE DE PRODUÇÃO

Para a fase de produção, o inventário será dividido em duas partes. A primeira contemplando os materiais utilizados na fabricação dos diversos componentes que compõe os veículos e a segunda incluindo a energia necessária para a montagem dos componentes, emissões para água e ar e consumíveis, ou seja, o processo de montagem dos ônibus, divisão similar à encontrada no ecoinvent. O transporte dos componentes e dos resíduos estão descartados neste estudo.

Para levantar os dados da primeira parte, os dados dos materiais utilizados, o sistema KOLA (sistema de gerenciamento de produto da Volvo) foi utilizado para obter o material e a massa de cada componente. Ao todo, mais de 3000 componentes são necessários para a montagem do chassi de um ônibus biarticulado. O critério inicial foi de 90% do peso do chassi, porém além disso 415 componentes possuíam dados da composição do material facilmente disponíveis, totalizando 94% do peso.

Para os dados de produção, o relatório de sustentabilidade da VOLVO 2013/2014 foi utilizado (VOLVO). Tal relatório contempla a sustentabilidade ao longo

de toda a cadeia de valor incluindo desenvolvimento de produto, compras, produção, rede de distribuição, uso do produto e reuso e reciclagem. A alocação dos dados é feita por unidade de produto, incluindo caminhões pesados, semipesados, motores, caixas de câmbio e chassis de ônibus.

Como o foco deste estudo são os ônibus B340M, a fonte das informações será em sua maioria do próprio fabricante, porém considerações e suposições deverão ser feitas em especial relacionadas às tecnologias de bateria e de propulsão híbrida e serão descritas detalhadamente na sequência deste trabalho.

### 3.3 FASE DE UTILIZAÇÃO

Para a fase de utilização será considerada a metodologia utilizada no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011).

Para elaborar o inventário, três grandes conjuntos de dados são importantes: a frota circulante ou produto, os fatores de emissão de poluentes e a intensidade de uso. A Figura 14 traz o fluxograma deste método o qual precisou ser adaptado para este trabalho. A frota circulante foi, na verdade, convertida em produto, dado a unidade funcional escolhida. Já os fatores de emissões foram utilizados conforme Inventário Nacional (MMA, 2013) e para a intensidade de uso foi realizada a coleta de dados da operação (seção 3.3.1) e a posteriori simulado os valores de consumo de combustível em cada rota avaliada (seção 3.3.3).

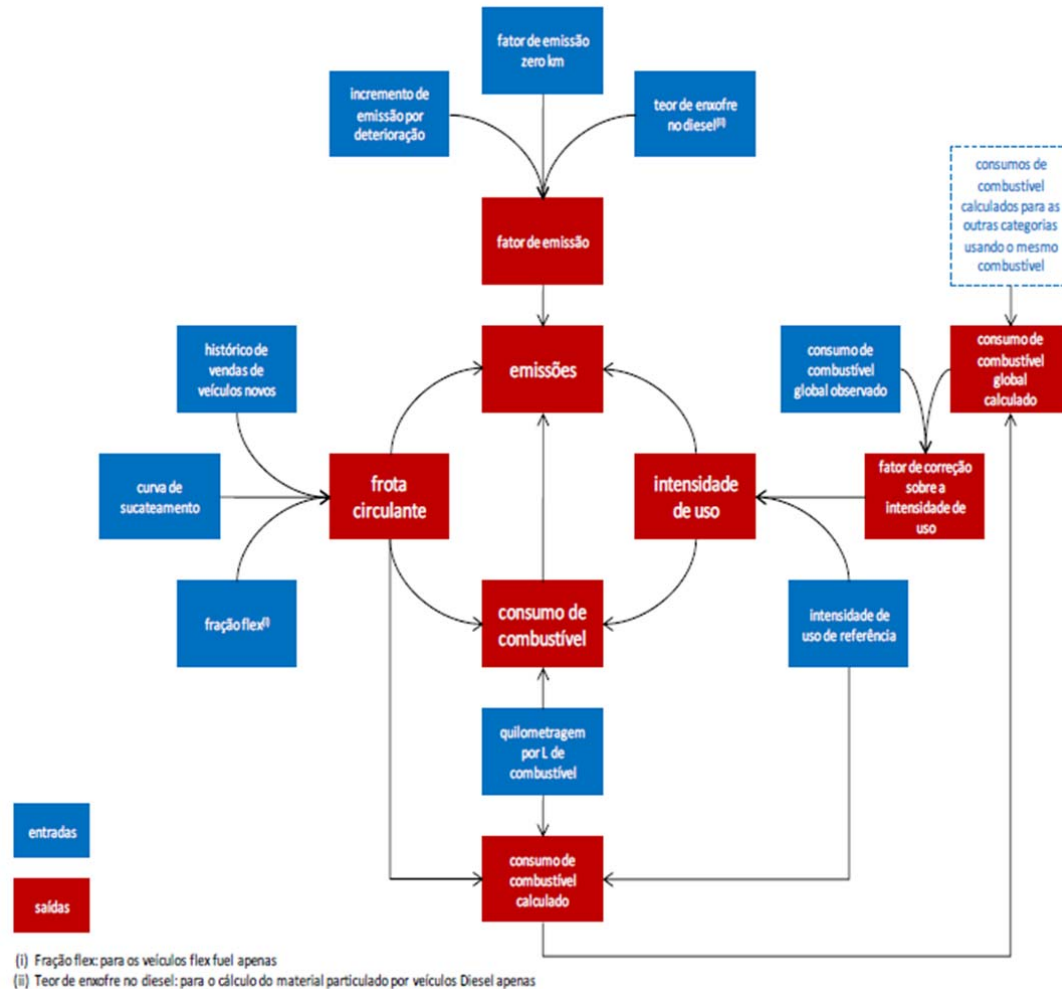


Figura 14: Fluxograma das entradas e saídas para avaliação de emissões veiculares.  
Fonte: MMA 2011.

Os dados da frota circulante foram apresentados na revisão da literatura e foram obtidos através de dados da URBS e do fabricante. Tais dados podem ser utilizados para compilar o impacto da frota em um estudo futuro e, nesse caso, seria necessário adotar a unidade funcional veículo quilômetro (vkm).

Já para o levantamento dos dados de emissões, fatores de emissões (vide Tabela 26) baseados no consumo e no tipo de combustível serão utilizados assim como um detalhamento do modelo de simulação para estimativa de consumo serão apresentados.

Com relação à intensidade de uso, os valores médios de consumo de combustível do 1º Inventário Nacional não são possíveis de serem utilizados, pois se referem ao tipo padrão básico de ônibus (normalmente com 12m de comprimento e

capacidade para cerca de 70 passageiros) e portanto será necessário rodar simulações de consumo de combustível com os respectivos veículos nos corredores exclusivos do sistema BRT de Curitiba. De maneira genérica, os dados de consumo médios da URBS para os veículos biarticulados gira em torno de 1,375km/l, esse valor será confrontado com os dados simulados (KARAS, 2013).

Isso se faz necessário para garantir que a energia disponível na roda seja similar entre as diferentes tecnologias, considerando suas especificidades como baterias, motorização e perdas de eficiência. Os dados de entrada de Diesel e Biodiesel são representativos do mercado brasileiro, isso significa dizer, por exemplo, que o Biodiesel considerado será 100% proveniente do soja. Segundo a ANP (2016), em 2016, no acumulado até o mês de abril, a participação das matérias-primas utilizadas na produção de Biodiesel foi: 76,7% soja, 17,2% gordura bovina e 1,3% algodão.

### 3.3.1 Coleta dos dados do Ciclo de Operação

Para se obter dados reais da operação nos corredores expressos, foram realizadas medições *in loco*. Ao todo foram realizadas três medições, ida e volta, por corredor ao longo de cinco dias úteis no mês de Abril de 2015, sendo que a média dos valores obtidos será considerada nesta análise.

Para a coleta de dados foi utilizado um celular Samsung S4. Tal aparelho possui uma série de sensores internos, dentre eles os de interesse deste trabalho são o GPS, temperatura ambiente e o sensor de pressão atmosférica. Através do aplicativo Androsensor é possível adquirir os sinais de latitude, longitude, altitude, velocidade e pressão atmosférica e posteriormente exportá-los em formato csv.

Os valores de altitude obtidos diretamente do GPS apresentam muitas oscilações e portanto não são satisfatórios e por isso a pressão barométrica precisa ser adquirida. Através da fórmula abaixo é possível calcular a altitude relativa e obter valores mais coerentes.

$$\Delta h = - \frac{\Delta P}{\left(\rho_0 \frac{T}{T+t}\right) g} \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta h = h_i - h_{min}$ ; (o menor ponto de altitude  $h_{min}$  é considerado 0m)

$\Delta P = P_i - P_{max}$ ; ( $P_{max}$  é a pressão no ponto mais baixo)

$\rho_0$  – densidade do ar a 0 grau Celsius;

$T$  - 273.15K;

$t$  – temperatura do ar (em graus Celsius);

$g$  – 9.81 m/s<sup>2</sup>

Os ciclos coletados foram avaliados conforme as referências do projeto ARTEMIS (*Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*), o qual investigou a confiabilidade de modelos de emissões e inventários na Europa assim como avaliou centenas de ciclos diferentes por todo o mundo (Haan e Keller, 2003). O projeto tinha dois objetivos principais, sendo o primeiro entender as razões principais das discrepâncias entre os modelos de predição de emissões e o segundo de desenvolver uma metodologia harmonizada na Europa para estimar as emissões do transporte público. Haan e Keller (2003) disponibilizaram mais de 30 fórmulas, algumas das quais foram utilizadas para calcular uma série de parâmetros que descrevem detalhadamente os ciclos BRT de Curitiba (vide capítulo 4.1.2.1 para detalhes e descrição dos parâmetros relevantes).

### 3.3.2 Dados de telemática da URBS para validação da coleta de dados

A URBS utiliza um sistema de telemática capaz de receber informações em tempo real dos ônibus durante seus trajetos. Uma metodologia para extração e tratamento de tais dados foi detalhado por Sebastiani (2014), a qual foi capaz de levantar dados de velocidade média, número de veículos operando por linha, número e distância entre pontos de parada entre outros. Entretanto, devido à baixa taxa de atualização dos dados da URBS (a cada dois minutos) uma aquisição de dados foi realizada para obter uma precisão maior nos dados de velocidade e tempo nas paradas, como será discutido no próximo capítulo.

A demanda de passageiros nos dias úteis (PASD.U.) por corredor pode ser vista na Figura 15 abaixo.

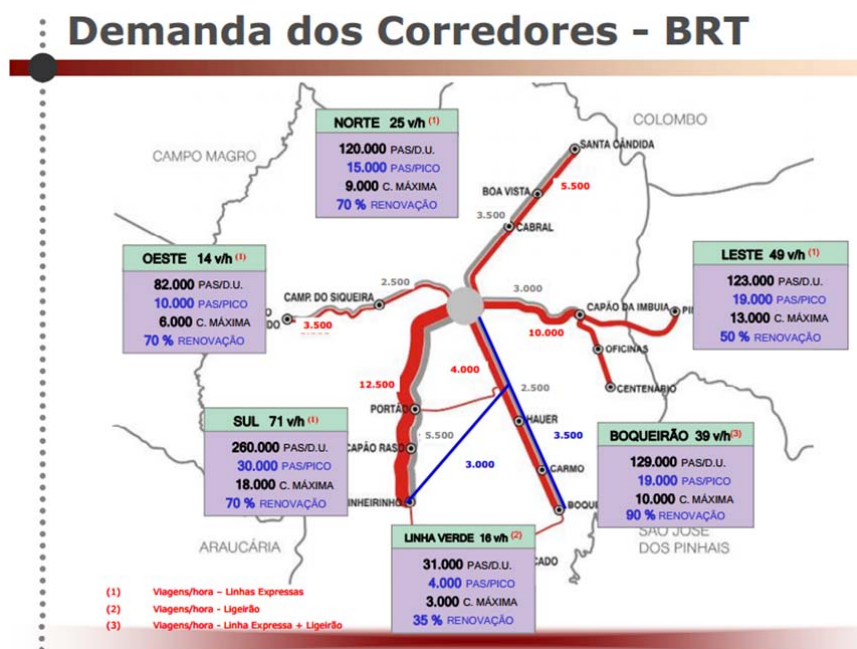


Figura 15: Demanda dos Corredores BRT.  
Fonte: URBS

O número total de passageiros transportados é importante para se obter a unidade final de comparação pkm, a qual será utilizada nos cálculos do ciclo de vida do produto. De forma a padronizar os dados, os nomes apresentados na Figura 15 serão descritos por número de linha, de forma a facilitar a compreensão.

Tabela 13: Demanda das linhas BRT em Curitiba. Fonte URBS

Linha	Estações Tubos	Terminais	Frota	Passageiros em dias úteis	Passageiros/hora (horário de pico)
[203] Santa Cândida / Capão Raso	26	5	46	171.315	5.519
[303] Centenário / Campo Comprido	30	5	28	103.145	5.094
[503] Rui Barbosa/ Boqueirão	6	3	12	34.099	1.780
[550] Linha Verde	10	1	16	30.904	3.018
[603] Pinheirinho/ Rui Barbosa	18	3	25	71.626	4.312

Além disso é importante ressaltar que a demanda oscila ao longo do dia (entre 05:00 e 24:00), de acordo com a URBS existem basicamente 3 horários de pico a serem considerados no sistema. Essa dinâmica pode ser vista na Tabela 14 e é importante em especial para avaliar o consumo médio nas diferentes rotas, pois o mesmo é diretamente proporcional ao peso transportado.

Tabela 14: Dinâmica da demanda de passageiros no sistema

<b>Horário de Pico 1</b>	<b>Das 05h00 às 8h30</b>
Período da Manhã	Das 08h31 às 11h30
Horário de Pico 2	Das 11h31 às 14h00
Período da Tarde	Das 14h01 às 16h30
Horário de Pico 3	Das 16h31 às 19h30
Período da Noite 1	Das 19h31 às 22h30
Período da Noite 2	Das 22h31 às 23h59

Fonte: Adaptado de URBS (2013b)

Por ser um sistema integrado de transporte é complexo estimar baseado no número de passageiros que pagaram a passagem em determinada estação pois os passageiros podem alterar sua rota de acordo com suas necessidades. Dreier (2015) utilizou dados de telemática de ônibus híbridos (Hibribus) operando em Curitiba e obteve taxas de ocupação ao longo do dia variando de 47% a 64%. Entretanto, neste trabalho a taxa de ocupação ao longo do dia seguirá a demanda de passageiros nos horários supracitados da Tabela 21, ou seja, durante 8h a taxa de ocupação será máxima (40,5ton), durante 10h a taxa de ocupação será de 50% (31ton) e na hora restante uma taxa de ocupação de 20% (26ton) será considerada para o biarticulado. Isso equivale a 174 passageiros em média por veículo e por ciclo. Para os articulados, entretanto, a massa máxima será considerada, sendo assim capaz de transportar a mesma quantidade de passageiros que o Biarticulado.

A Figura 18 traz um gráfico da demanda de passageiros em Bogotá, cidade que possui um sistema BRT semelhante ao de Curitiba (TRANSMILÊNIO, 2014). É possível observar a flutuação da demanda ao longo do dia, a qual acompanha o horário comercial das cidades.

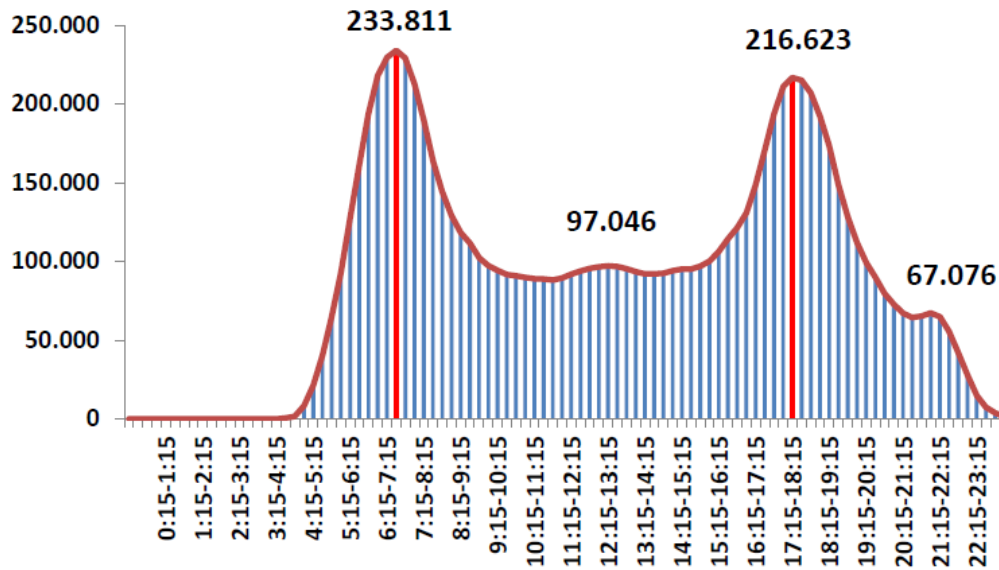


Figura 16: Flutuação da demanda ao longo de um dia em Bogotá  
 Fonte: TRANILÊNIO, 2014

### 3.3.3 Simulação de Consumo de Combustível

O modelo dinâmico de sistemas utilizado para calcular o consumo de energia para movimentar o ônibus é baseado na plataforma de simulação GSP da Volvo Powertrain. Modelos de sistemas são construções simplificadas construídas para prever o comportamento do sistema real (KATSUHIKO, 2011). Os programas comerciais MATLAB e Simulink são as ferramentas comumente utilizadas pela indústria automotiva para simulações de modelos de sistemas em tempo real (FREDRIKSSON et al., 2011).

Os modelos de sistema presentes nessa ferramenta utilizam-se da notação Bond Graph (BG), a qual é capaz de descrever as duas variáveis mutuamente dependentes de fluxo de energia e esforço entre os subsistemas e seus respectivos componentes (KATSUHIKO, 2011).

Os diferentes sistemas físicos apresentam diferentes variáveis de esforço e fluxo. As mais relevantes dentro do escopo deste trabalho são: elétrica, mecânica



(rotacional e translacional) e química. Na Tabela 15 é possível observar alguns exemplos dessa teoria.

Tabela 15: Variáveis de esforço e fluxo em diferentes sistemas físicos.

Sistema	Esforço $e(t)$	Fluxo $f(t)$
Elétrico	Tensão $e(t)$	Corrente $i(t)$
Translação Mecânica	Componente de Força $F(t)$	Componente de Velocidade $V(t)$
Rotação Mecânica	Torque $T(t)$	Velocidade angular $w(t)$
Químico	Energia Específica $E(t)$	Fluxo de Massa $m(t)$

O GSP é composto de forma simplificada por três subsistemas (Veículo, Ambiente e Motorista) e seus respectivos componentes. O subsistema Veículo é composto pelo componentes chassis, motor a combustão, embreagem, caixa de câmbio, eixos e rodas. Já o subsistema Ambiente descreve o ciclo de operação e Motorista, que considera a forma de condução do veículo a ser utilizada.

A dinâmica da simulação pode ser brevemente descrita da seguinte forma: O ciclo de operação define a velocidade a ser seguida pelo motorista, o qual baseado na velocidade atual e velocidade requerida ( $v_{ref}$ ) comanda o veículo utilizando o pedal (o motorista é geralmente um controlador PID - Proporcional Integral Derivativo). Na sequência, o motor utiliza do comando do pedal, de outros sistemas de controle (não mostrados na figura) para calcular o torque do motor ( $T$ ) e através do trem de engrenagens (caixa de câmbio e diferencial, ou *driveline*) calcular força trativa ( $F$ ) e assim por diante até chegar à roda do veículo a velocidade desejada.

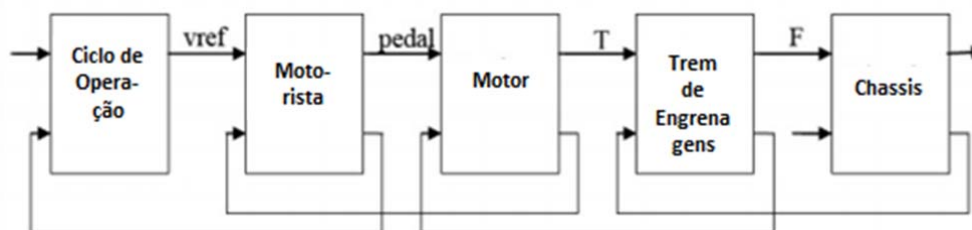


Figura 17: Estrutura do modelo de trem de força da simulação  
Fonte: Fredriksson, et al., 2011.

Cada componente é modelado individualmente por meio das equações físicas que o descrevem. As leis de Newton, por exemplo, governam os sistemas mecânicos, já a lei de Kirchhoff, os sistemas elétricos (KATSUHIKO, 2011). O modelamento básico do GSP é similar ao apresentado por Perrota et al. (2012a) e pode ser descrito por componente conforme os próximos subcapítulos (FREDRIKSSON et al., 2011).

### 3.3.3.1 Modelo do Veículo (Chassis)

O veículo é representado basicamente pela inércia e o princípio básico do modelo é que torque disponível na roda ( $T_{trativo}$ ) é o resultado da multiplicação do torque do motor ( $T_{motor}$ ) naquele instante pela relação de redução até a roda ( $r$ ) (caixa de câmbio, eixo, redução no cubo da roda, etc.).

$$T_{trativo} = T_{motor}r \quad (3.2)$$

A força trativa ( $F_{trativa}$ ) é a diferença do torque disponível na roda pelo torque resistivo ao movimento ( $T_{resistivo}$ ) dividido pelo raio da roda ( $r_{roda}$ ).

$$F_{trativa} = \frac{T_{trativo} - T_{resistivo}}{r_{roda}} \quad (3.3)$$

A força trativa é a força que efetivamente age sobre a rodovia e faz o veículo se movimentar. A somatória de forças pode então ser descrita conforme fórmula abaixo, onde a  $m_{veículo}$  é a massa do veículo e  $\dot{v}_{veículo}$  é a aceleração do mesmo.

$$m_{veículo}\dot{v}_{veículo} = F_{trativa} - F_{aero} - F_{rolagem} \pm F_{gravitacional} \quad (3.4)$$

O arrasto aerodinâmico é calculado baseado na densidade do ar ( $\rho$ ), coeficiente de arrasto ( $C_d$ ), área frontal ( $A_{frontal}$ ) e velocidade do veículo ( $v_{veículo}$ ).

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_{frontal} v_{veículo}^2 \quad (3.5)$$

A resistência à rolagem é calculada pela fração da carga normal  $f$  multiplicada pela massa do veículo e pela componente gravitacional baseada na inclinação da pista ( $\alpha$ ).

$$F_{rolagem} = f m_{veículo} g \cos(\alpha) \quad (3.6)$$

A força gravitacional é dada por:

$$F_{gravitacional} = m_{veículo} g \sin(\alpha) \quad (3.7)$$

É importante ressaltar que a massa  $m_{veículo}$  utilizada nos cálculos inclui a inércia de todos os componentes do trem de força (FREDRIKSSON et al., 2011).

### 3.3.3.2 Modelo do Motorista

O motorista é basicamente um controlador PI (proporcional integral). Baseado na velocidade requerida pelo ciclo de operação, acelera ou freia o veículo utilizando pedais de acelerador e freio dependendo da velocidade instantânea, caso esteja abaixo da desejada e vice-versa. Simplificadamente, busca sempre a velocidade requerida. Foi utilizado o motorista padrão do *software*.

### 3.3.3.3 Modelo do motor a combustão

O modelo do motor à combustão é complexo pois devido à dinâmica do turbo não pode ser modelado por um sistema linear de primeira ordem.

$$\dot{T}_{MCI} = -\frac{1}{\tau_2(\omega_{MCI})}(T_{MCI} - T_{MCI,des1(\omega_{MCI})}) + T_{MCI,des2(\omega_{MCI})} \quad (3.8)$$

A equação acima rege a “construção” do torque e é dada por dois termos, ambos dependentes da rotação do motor ( $\omega_{MCI}$ ). Os termos ( $T_{MCI}, T_{MCI,des1(\omega_{MCI})}$  e  $\tau_2(\omega_{MCI})$ ) correspondem ao Torque do motor, Torque desejado e tempo de resposta do motor respectivamente. O torque desejado é dividido em duas partes ( $T_{MCI,des1(\omega_{MCI})}$  e  $T_{MCI,des2(\omega_{MCI})}$ ), a primeira dinâmica e a segunda direta. Caso o torque requerido ( $T_{MCI,des1(\omega_{MCI})}$ ) seja menor ou igual ao torque instantâneo ( $T_{MCI}$ ), nenhum efeito da parte dinâmica é necessário para capturar o tempo de resposta do motor. Caso contrário, o tempo de resposta do motor é acrescido dinamicamente, o que inclui o “*delay*” físico do turbo.

O tempo de resposta do motor é dependente da rotação e pode ser levantado em testes de bancada dinamométrica. Os valores utilizados neste trabalho são os valores reais do motor DH12E340 fornecidos pela VOLVO, o que confere maior credibilidade aos resultados apresentados.

A Figura 18 traz para duas rotações distintas no tempo (s), os valores medidos (azul) e simulados (vermelho) de resposta do motor. A linha verde é uma simplificação muitas vezes utilizada quando não se tem acesso a tais dados do motor.

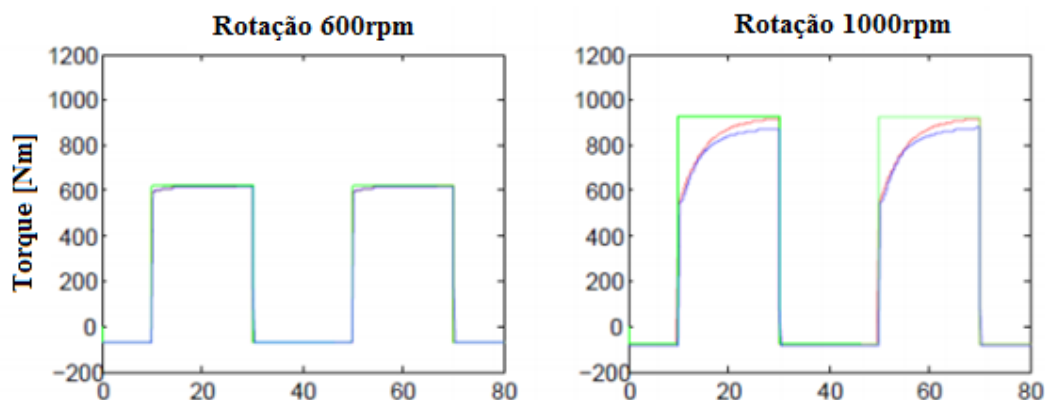


Figura 18: Resposta do motor por rotação  
Fonte: Fredriksson et al. 2011.

Fredriksson et al. (2011) descrevem detalhadamente o funcionamento da ferramenta de simulação. A maior qualidade da ferramenta não está em prover valores absolutos extremamente fidedignos, mas apresentar valores comparativos com o mínimo de erro possível. Nesta breve descrição aqui apresentada, a intenção é apenas ressaltar alguns pontos dos principais dos modelos de simulação sem entrar no mérito de cada um deles.

A Plataforma Global de Simulação (GSP) é portanto, capaz de combinar os fatores operacionais (ciclo de operação e motorista) com os veiculares (especificação do veículo) de forma a calcular o torque necessário a cada instante e consequentemente o consumo de combustível, o qual será utilizado neste trabalho.

Os valores foram obtidos em litros por ciclo de operação. Para a conversão em dados mássicos serão utilizadas as seguintes densidades: 0.8537kg/L para o Diesel puro, 0.8556 kg/L para a mistura B7 e 0.8814 kg/L para o Biodiesel puro B100 (DREIER, 2015). A mistura B7 se refere a uma demanda legal nacional que, atualmente, regula a fração volumétrica de 7% de Biodiesel no Diesel.

#### 3.3.3.4 Detalhes dos dados de entrada da simulação

Conforme visto anteriormente, os dados de entrada são cruciais para o resultado das simulações de consumo de combustível. De forma resumida, seguem os dados utilizados nesse trabalho.

Tabela 16: Dados de entrada para simulação de consumo de combustível

Item	Biartic P5	Biartic P7	Artic P7	Artic P7	Híbrido P7 *
Chassis / Comprimento	4x2+2+2 25m	4x2+2+2 25m	4x2+2 17.8m	4x2+2 17.8m	4x2+2 17.8m
Motor	DH12D340	DH12E340	DH12D340	DH12E340	D5K240
Transmissão	Voith DIWA 864	Voith DIWA 864	Voith DIWA 864	Voith DIWA 864	AT2412D I-Shift
Relação de Eixo traseiro	7.21	7.21	7.21	7.21	4.72
Área frontal [m <sup>2</sup> ]	8.22	8.22	8.22	8.22	7.52
Coefficiente de Arrasto [-]	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Pneus	295/80 R22,5	295/80 R22,5	295/80 R22,5	295/80 R22,5	275/70 R22,5
Raio Dinâmico [m]	0.507	0.507	0.507	0.507	0.465
Número de Pneus	14	14	10	10	10
Peso do chassis [kg]	11150 <sup>a</sup>	11150 <sup>a</sup>	8950 <sup>b</sup>	8950 <sup>b</sup>	8490 <sup>c</sup>
Peso Encarçoado [kg]	22450 <sup>a</sup>	22450 <sup>a</sup>	17960 <sup>b</sup>	17960 <sup>b</sup>	17090 <sup>c</sup>
Capacidade de Passageiros	250	250	170	170	154

<sup>a</sup> VOLVO, 2016f;

<sup>b</sup> hipótese considerada de 80% do valor do biarticulado;

<sup>c</sup> SVENSSON, 2011;

### 3.3.4 Emissões de poluentes – fatores de emissões

Para se obter os poluentes regulados (NO<sub>x</sub>, CO, NMHC e MP), as emissões foram calculadas utilizando os fatores de emissões informados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, do Ministério do Meio Ambiente (MMA,2013), na categoria ônibus urbanos. Já para os demais poluentes, as mesmas considerações aplicadas peloecoinvent em seu inventário serão utilizadas. Isso significa dizer que para as emissões de CO<sub>2</sub>, por exemplo, um fator de conversão de 3.172 kg<sub>CO2</sub>/kg<sub>combustível</sub> será utilizado para o Diesel fóssil e 2.83 kg<sub>CO2</sub>/kg<sub>combustível</sub> para o B100, sendo que o valor final utilizado no inventário ainda irá descontar os valores de CO. Na Tabela 14 é possível verificar todas as considerações utilizadas assim como sua origem. É importante ressaltar que as emissões não reguladas serão consideradas as mesmas tanto para B7 quanto B100.

Tabela 17 Considerações utilizadas para cálculo das emissões dos poluentes não regulados

<b>Emissões</b>	<b>Considerações</b>	<b>Fonte</b>
CO <sub>2</sub>	3.172 kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>combustível</sub>	Jungbluth, 2003
SO <sub>2</sub>	0.02 g <sub>SO2</sub> /kg <sub>combustível</sub>	Keller, 2004
Cádmio	0.01 mg/kg <sub>combustível</sub>	EMEP/CORINAIR 2006
Cobre	1.7 mg/kg <sub>combustível</sub>	EMEP/CORINAIR 2006
Cromo	0.05 mg/kg <sub>combustível</sub>	EMEP/CORINAIR 2006
Níquel	0.07 mg/kg <sub>combustível</sub>	EMEP/CORINAIR 2006
Selênio	0.01 mg/kg <sub>combustível</sub>	EMEP/CORINAIR 2006
Zinco	1 mg/kg <sub>combustível</sub>	EMEP/CORINAIR 2006
Chumbo	1.1E-07 mg/kg <sub>combustível</sub>	Jungbluth, 2003
Mercúrio	2E-05 mg/kg <sub>combustível</sub>	Jungbluth, 2003
Cromo IV	1E-04 mg/kg <sub>combustível</sub>	ecoinvent v2.0
CO, HC, NOx e MP	Fator de emissões (Tabela 26)	MMA (2013)
Tolueno	0,01% do HC	EMEP/CORINAIR 2006
Benzeno	0,07% do HC	EMEP/CORINAIR 2006
Xileno	0,88% do HC	EMEP/CORINAIR 2006
Formaldeído	8.40% do HC	EMEP/CORINAIR 2006
Acetaldeído	4.57% do HC	EMEP/CORINAIR 2006
PAHs	1E-06 g/km	ecoinvent v2.0

Para as emissões reguladas (CO, HC, NOx e MP), cabe ressaltar que os fatores de emissões são baseados nos resultados obtidos nos testes obrigatórios de homologação, ou seja, nos ciclos padrão. Por isso a tecnologia do veículo (P5 e P7), o combustível de homologação e a aplicação (urbana ou rodoviárias) são considerados e geram fatores específicos conforme a categoria (MMA, 2013).

Para as demais emissões para o solo e para a água, os valores do ecoinvent v2.0 serão considerados. Para emissões provenientes da abrasão dos pneus, os valores serão mantidos os mesmos sem nenhum escalonamento.

Já os valores de emissões resultantes na utilização de B100 precisam ser ajustados. Ainda existem muitas divergências entre estudiosos da área quanto aos fatores de emissões relacionados a utilização de B100. A URBS (apud KARAS, 2013) reportou aumento nas emissões de NOx em 19% para a utilização de B100. Estudos mais completos a respeito das emissões de poluentes com a utilização de diferentes proporções de Biodiesel, como NAEI (2013), ETC/ACC (2008) e EMEP/EEA (2009) trazem os fatores de escala que serão utilizados neste trabalho. Para as emissões de NOx, o fator de escala é de 1.1 em relação ao veículo convencional. Já para as emissões de MP o fator de escala é de 0.55. De maneira geral, os autores concordam que a utilização de Biodiesel e suas misturas reduzem as emissões de CO e HC, porém neste trabalho para estes poluentes nenhum fator

de escala será utilizado (EMEP/EEA, 2009). Para as demais emissões, os valores doecoinvent serão considerados.

É importante ressaltar que nenhum fator de escala foi aplicado devido ao envelhecimento do sistema de tratamento dos gases de escape ao longo da vida do veículo, dada a falta de dados conclusivos a esse respeito e está em linha com as diretivas do EMEP/EEA, 2009.

### 3.3.5 Dados de Manutenção

Já para a manutenção do produto durante a fase de utilização, o inventário foi baseado no *dataset* criado pelo ecoinvent acrescido das informações levantadas durante este estudo. As tabelas do ecoinvent por sua vez foram baseadas na Declaração Ambiental do Produto (Environmental Product Declaration) do ônibus Volvo 8500 (SUNDEVOR, 2013). Para o veículo híbrido, foi assumido que a bateria teria uma vida de 500.000km e por isso foi contabilizado durante a manutenção, uma troca de bateria.

É importante ressaltar que o processo de manutenção depende, além da tecnologia, da intensidade e condições de uso do veículo. Quanto mais severa a aplicação (cargas altas, anda e para (*stop and go*), topografia, consumo de combustível maior, entre outros), maior o número de manutenções preventivas. Dessa forma, os intervalos de troca dos consumíveis considerados terão como referência a frequência de troca do B340M, porém respeitando os volumes e massas do veículo híbrido também. Para isso serão utilizados os dados do fabricante quanto aos intervalos de troca recomendados como para os óleos lubrificantes, filtros, baterias, líquido de arrefecimento e pneus (vide capítulo 4.1.2.3.).

## 3.4 FASE DE DESCARTE



De acordo com o relatório de sustentabilidade da Volvo (VOLVO, 2014), o grupo se esforça para minimizar os impactos dos seus produtos inclusive na fase de pós-uso. Para isso conta com três principais pilares, o Programa Volvo Reman, o Programa Viking e o fato de que o índice de reciclabilidade é de aproximadamente 90%. O primeiro programa visa transformar peças usadas em outras equivalentes com a mesma garantia de qualidade através da remanufatura dos componentes. O segundo promove a reutilização dos produtos através da compra a venda de usados e além disso promove a reciclagem de veículos sinistrados.

Especificamente para o descarte das baterias de Li-Íon, no caso dos veículos híbridos, a Volvo é a dona do produto, o qual é oferecido aos operadores num formato de *leasing*. Finda a vida do componente, a Volvo envia as baterias para reciclagem na Suécia. O impacto proveniente dessa nova tecnologia nesta fase do produto se daria na Europa.

O estudo liderado pela Environmental Protection Agency (EPA) em parceria com Department of Energy (DOE), academias, indústria produtoras e recicladoras de baterias de Li-Íon buscou identificar os materiais e processos que mais impactam o meio ambiente e a saúde humana através da ferramenta ACV (EPA, 2013). Através deste estudo é possível identificar os materiais e a energia necessários para a reciclagem por kg de bateria (HAWKINS et al., 2013).

Contudo, esta dissertação irá utilizar a metodologia de reciclagem de acordo com oecoinvent, pois o mesmo foi especificamente criado para o tipo de bateria LMP, o qual por limitação de dados foi utilizada neste trabalho conforme já descrito. Para isso basta adaptar o peso da bateria em questão.

O tempo de uso dos veículos será assumido como 1.000.000km. Já o das baterias, de 500.000km. Isso está em linha com a realidade brasileira e a literatura (SILVA, 2009). Já para o descarte, serão usados dados doecoinvent v3 (BURNHAM et al., 2006; HAWKINS et al., 2012).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro se refere a coleta de dados e a montagem do ICV. Neste contexto um conjunto de dados primários foram incorporados aos *datasets* já existentes de forma a melhor reproduzir a realidade do estudo de caso. Os materiais utilizados na produção dos veículos, os dados referentes ao processo de montagem dos mesmos assim como os dados dos ciclos de operação, entre outros foram obtidos conforme metodologia previamente descrita e compõe o primeiro grupo de resultados. Já o segundo é constituído pela avaliação do impacto do ciclo de vida deste inventário. Através do método IMPACT 2002+ o impacto pode ser quantificado, comparado com resultados da literatura e submetido a análises de sensibilidade conforme poderá ser verificado no capítulo 4.2 4.3.

### 4.1 RESULTADOS DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

#### 4.1.1 Fase de Produção

##### *4.1.1.1 Materiais utilizados na fabricação de um veículo*

O inventário de produção é baseado no inventário disponibilizado peloecoinvent acrescido das informações levantadas durante este estudo. As tabelas doecoinvent por sua vez foram baseadas na Declaração Ambiental do Produto (Environmental Product Declaration) do ônibus Volvo 8500 disponibilizado pela Volvo em 2004, o qual não está mais disponível para o público (SUNDEVOR, 2013).

Conforme mencionado no capítulo 3.2, para o levantamento dos dados dos materiais dos ônibus foram utilizadas as listas de peças da produção. Através desta lista foi possível levantar os materiais e seus correspondentes pesos para o inventário. Por motivos de confidencialidade, os materiais foram agrupados em classes de materiais.

Os dados da estrutura, trem de força, tanques, rodas, pneus, dos componentes elétricos, enfim dos componentes que compõe o chassi do veículo foram obtidos ou por medições físicas ou cálculos por ferramentas de CAD e foram obtidos através dos sistemas do fabricante, no caso a Volvo. É importante ressaltar que os dados foram levantados para o chassis B340M biarticulado e escalonados para as demais configurações. Para os ônibus articulados foi aplicada uma redução de material proporcional ao tamanho do veículo (0.8) e para o articulado híbrido foi assumido que seria o mesmo chassis substituindo-se o trem de força atual pelo híbrido proposto. O peso dos componentes híbridos adicionados é de cerca de 466kg (LAUDON, 2012) ou neste caso como são duas baterias, 678kg.

Já para os dados de materiais da carroceria, os valores precisaram ser estimados pois não houve retorno por parte de duas encarroçadoras questionadas (principais encarroçadoras do mercado). A estimativa entretanto foi feita baseada em três principais fontes: 1) no manual de especificação de frotas da URBS (URBS, 2013<sup>1</sup>) o qual contém detalhes das especificações mínimas dos veículos a serem utilizados; 2) no catálogo de peças de uma encarroçadora de biarticulados (NEOBUS, 2015); 3) nos dados da carroceria do veículo Volvo 8500LEA. Os valores foram então estimados de forma a bater com dados de peso total do veículo já encarroçado, uma vez que tal valor é conhecido e os dados do chassis são mais confiáveis.

Tabela 18: Massa dos materiais utilizados nos veículos (kg)

<b>Materiais</b>	<b>Biarticulado Eu3<sup>1</sup></b>	<b>Biarticulado Eu5<sup>1</sup></b>	<b>Articulado Eu5<sup>2</sup></b>	<b>Articulado Híbrido Eu5<sup>3</sup></b>
Ferro Fundido	2163.2	2163.2	1730.56	1382
Aço	8623.7	8623.7	6599.6	6152
Aço inoxidável	59.47	59.47	59.47	475
Alumínio	3457.5	3457.5	2903.5	2937
Chumbo	84	84	84	31
Cobre	153.8	153.8	133	137

Bronze	0.9	0.9	0.9	1
Termoplástico	891.6	891.6	780	771
Termofixo	262.7	262.7	221.1	221
Borracha	1180.3	1180.3	1152.3	1152
Vidro	1070.4	1070.4	892	892
Tecidos	43.2	43.2	36	36
Tinta	68	68	57	45
Óleos/Graxas	150	150	150	63
Ácido sulfúrico	38.1	38.1	38.1	25
Betumem	117.6	117.6	98	98
Madeira	1321	1321	1103	1098
Outros	627.6	627.6	567	511
Bateria Li-Ion	NA	NA	NA	424
Total	20313.07	20313.07	16605.53	16452
Valor Aferido	22450	22450	17450	NA

<sup>1</sup> Valores levantados pelo autor pelo sistema KOLA do fabricante

<sup>2</sup> Valores proporcionais (Fator 0.8 para a carroceria do Biarticulado)

<sup>3</sup> Valores proporcionais ao do Volvo 8500LEA

A diferença básica entre as versões Eu3 e Eu5 é o sistema de pós tratamento de gases (*Selective Catalytic Converter, SCR*). Os dados referentes aos materiais foram incluídos no estudo, porém não constam no trabalho detalhadamente por questões de confidencialidade.

Danielsson et al. (2001) foi a única referência encontrada ao longo deste trabalho que apresenta dados de inventário para o veículo modelo B340M (apenas chassis). Entretanto, o valor total da massa inventariada é de 5980kg, bem abaixo dos 9331kg obtidos neste trabalho através da lista de peças (segundo o KOLA, o valor total, caso todos os materiais de todos os componentes tivessem sido identificados, seria de 10202kg com uma incerteza de  $\pm 69.8$ kg). Dessa forma, optou-se por utilizar os dados inventariados aqui.

O veículo híbrido é produzido atualmente na Europa enquanto que os demais possuem fabricação local. Ao se comparar os inventários da Tabela 12, é nítida a diferença na utilização de aço inox entre os veículos produzidos na Europa e no Brasil. Enquanto a parte estrutural dos veículos europeus utiliza aço inox, no Brasil utiliza-se aço carbono. Isso se deve principalmente por questões de corrosão e aceitação do mercado na Europa (VOLVO BUS CORPORATION, 2016f).

A massa relativa aos pneus é significativa tanto na produção quanto na manutenção do veículo. A divisão da sua massa em materiais foi dada na seguinte proporção no software SimaPro 8: *0,23 carbon black, 0,07 chemicals inorganic, 0.48 synthetic rubber, 0.22 reinforcing steel* (SPIELMANN et al, 2007).

No Anexo A é possível visualizar todas as alterações feitas no *dataset* original do ecoinvent, comentadas e referenciadas.

#### 4.1.1.2 Processo de Montagem

Os dados referentes à produção/montagem dos veículos na planta de Curitiba foram extraídos do Relatório de Sustentabilidade 2013/2014 (VOLVO BUS CORPORATION 2014c). Neste relatório os valores foram alocados por unidade fabricada, que pode ser um ônibus articulado, um ônibus biarticulado, um caminhão, ou mesmo um motor ou uma cabine. Neste trabalho os dados serão considerados *ipsis litteris* como os do relatório, sendo que os mesmos valores valerão para todas as configurações estudadas.

O consumo específico de energia (MWh/unidade produzida) pode ser visto na Tabela 19 abaixo:

Tabela 19: Consumo de Energia – Planta de Curitiba

Consumo de energia por unidade		
Fonte de Energia	Ano	Consumo por unidade produzida (MWh)
Elétrica	2014	0,50
GLP	2014	0,053
Gás Natural	2014	0,23
Diesel	2014	0,05

Já a emissão de poluentes atmosféricos oriundos da montagem dos veículos foi calculada neste mesmo relatório conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Emissão de Poluentes por unidade – Planta de Curitiba

Emissão de Poluentes por unidade				
Ano	NOx (kg/ unidade)	SO <sub>2</sub> (kg/ unidade)	CO <sub>2</sub> (kg/ unidade)	HCFC (R22) (kg/ unidade)
2012	0,254	0,027	64,16	1,7
2013	0,211	0,031	75,63	0,77
2014	0,215	0,031	72,54	0,70

O consumo de água para a produção de 1 unidade foi calculado em 1,64m<sup>3</sup> no ano de 2014, sendo que as emissões para a água (efluentes industriais) podem ser vistas na Tabela 21.

Tabela 21: Parâmetros de qualidade para a geração de efluentes – Curitiba (PR)

Parâmetro	Resultado 2014 (mg/l)
DQO*	1205
DBO**	693
Cádmio	0,05
Cromo Total	0,05
Cobre	0,1
Chumbo	0,1
Merúrio	0,001
Níquel	0
Prata	0,05
Estanho	0,5
Zinco	0,55
Cianetos Livres	0,006

\*DQO – Demanda Química de Oxigênio

\*\*DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

Para a utilização destes dados no *dataset* a proporção relativa ao consumo de água precisou ser considerada para obtermos o valor por unidade produzida.

Com relação à destinação dos resíduos gerados durante as operações da unidade fabril em Curitiba, pode-se perceber que nenhum resíduo é enviado para o aterro. A Tabela 22 abaixo traz os valores detalhados:

Tabela 22: Destinação dos resíduos – Planta de Curitiba

Tipo de Resíduo	Destinação/volume de resíduos gerados por unidade produzida - Curitiba					
	Resíduos perigosos (kg)			Resíduos não perigosos (kg)		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014
Reciclagem, incluindo sucata metálica	182750	477499	329809	3E+06	3446153	3229747
Destinação com recuperação de energia / coprocessamento	507740	684347	688774	2E+06	3643252	2278375
Destinação sem recuperação de energia	0	150	225	537300	592800	516166
Enviados ao aterro sanitário	0	0	0	0	0	0
Total	690490	1161997	1018808	6E+06	7682205	6024288
Geração do tipo por unidade (kg/unid)	9,9	12,2	11,5	85,8	80,7	68,2

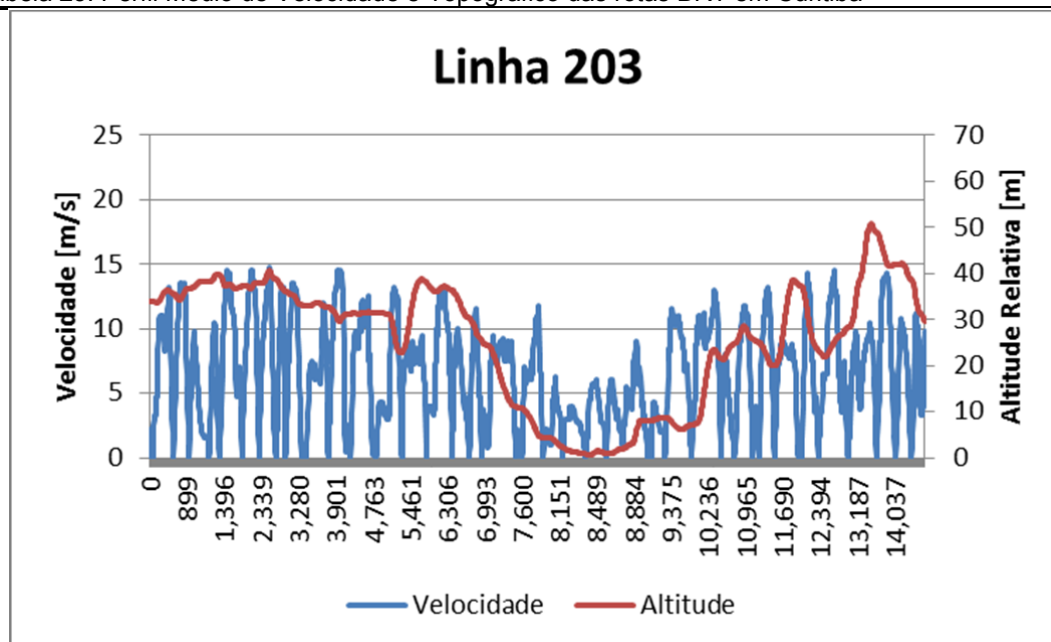
No Apêndice A é possível visualizar todas as alterações feitas no *dataset* original doecoinvent, comentadas e referenciadas.

#### 4.1.2 Fase de Utilização

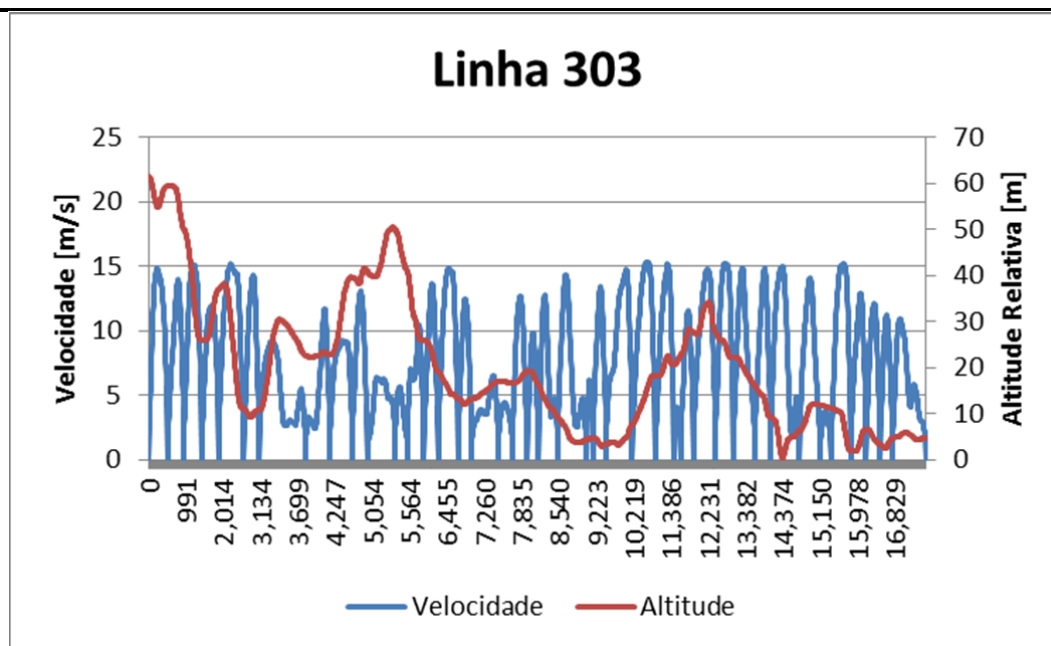
##### 4.1.2.1 Dados dos Ciclos de Operação

A coleta de dados gerou os ciclos de operação para os corredores exclusivos do sistema BRT de Curitiba, os quais são dados de entrada para as simulações de consumo. A Tabela 23 traz a representação do perfil de velocidade e altimétrico dos 5 ciclos aquisitados.

Tabela 23: Perfil Médio de Velocidade e Topográfico das rotas BRT em Curitiba

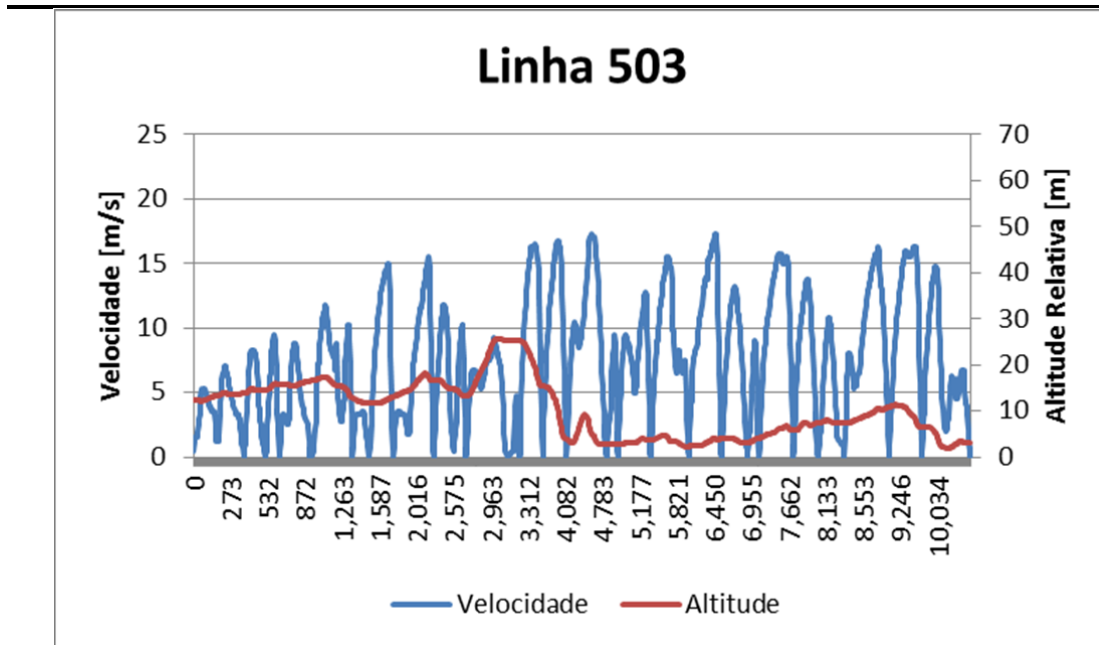


Linha 203: Sta. Cândida – C. Raso

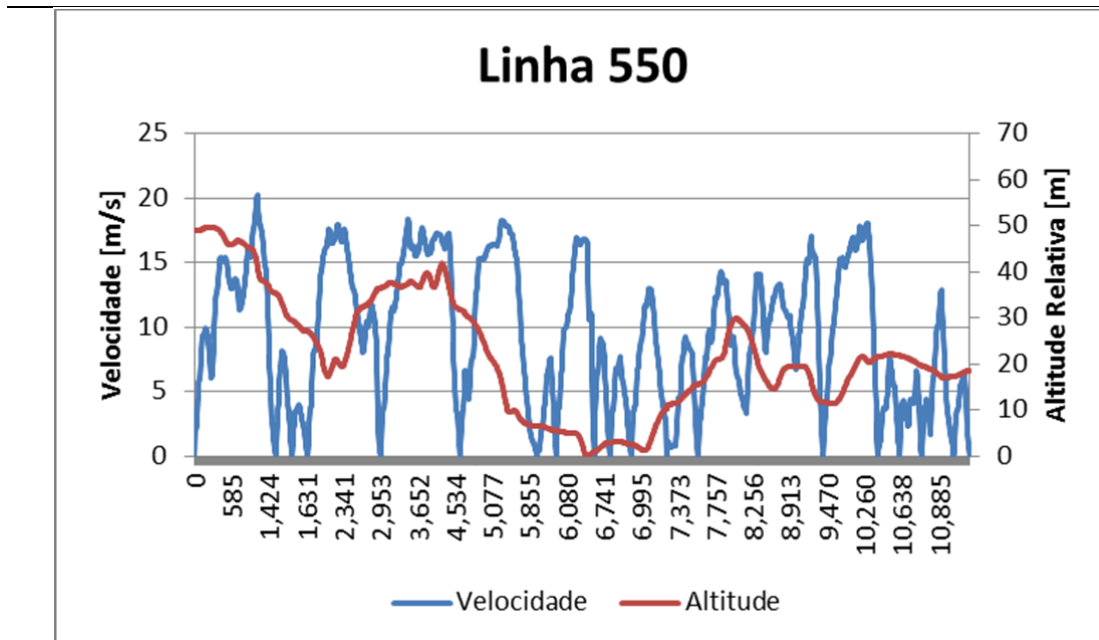


Linha 303: Campo Comprido – Centenário

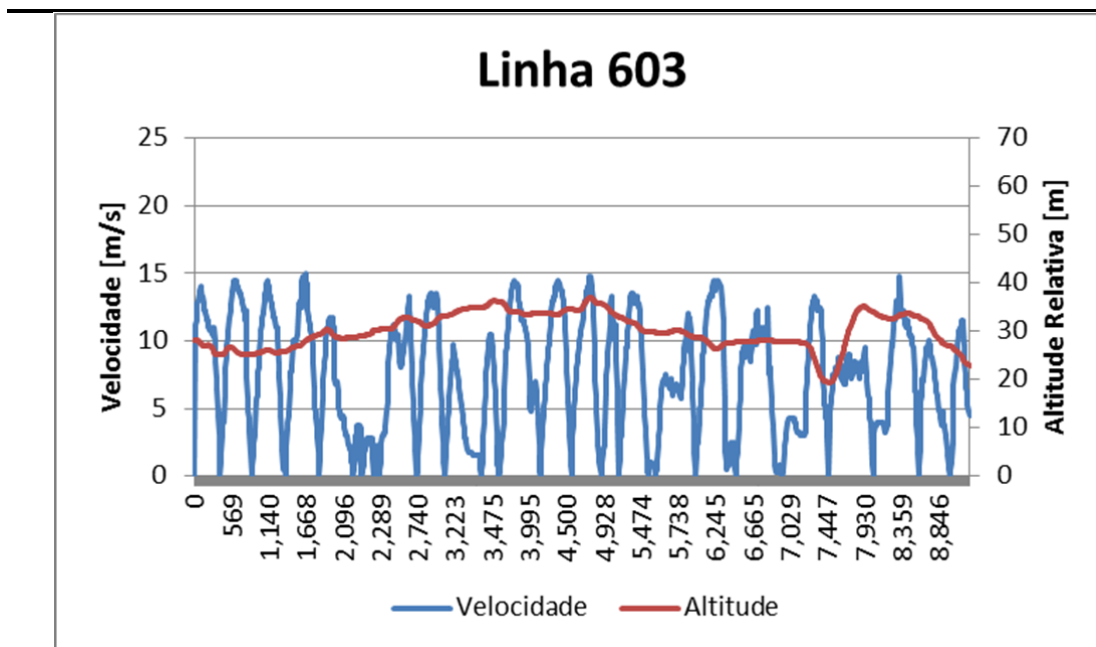




Linha 503: Rui Barbosa – Boqueirão



Linha 550: Pinheirinho – Carlos Gomes



Linha 603: Pinheirinho – Rui Barbosa

Os valores abaixo (Tabela 24) são resultados da coleta dos ciclos de operação e refletem as condições as quais os veículos são submetidos no sistema BRT de Curitiba.

Tabela 24: Dados Cinemáticos das Rotas de Curitiba.

Parâmetros	Unidade	Linha 203	Linha 303	Linha 503	Linha 550	Linha 603
Distância Total	m	16246.3	17644.3	10069.0	11062.4	9679.0
Tempo Acelerando	s	934	1040	649	535	550
Tempo Desacelerando	s	885	812	451	510	515
Tempo Freando	s	565	440	299	252	329
Tempo Parado	s	1165	1190	604	318	649
Tempo Total	s	3601	3293	1943	1484	1986
Tempo "Rodando"	s	2436	2103	1339	1166	1337
Tempo em Velocidade de Cruzeiro	s	617	251	239	121	272
% do Tempo "Rodando"	%	67.6%	63.9%	68.9%	78.6%	67.3%
% do Tempo em	%	17.1%	7.6%	12.3%	8.2%	13.7%

Velocidade de Cruzeiro						
% do Tempo Acelerando	%	25.9%	31.6%	33.4%	36.1%	27.7%
% do Tempo Desacelerando	%	24.6%	24.7%	23.2%	34.4%	25.9%
% do Tempo Freando	%	15.7%	13.4%	15.4%	17.0%	16.6%
% do Tempo Parado	%	32.4%	36.1%	31.1%	21.4%	32.7%
Velocidade Média do Ciclo	m/s	16.242	18.196	18.656	26.836	17.545
Velocidade Média "rodando"	m/s	24.009	28.492	27.071	34.155	26.062
Desvio Padrão da Velocidade	m/s	16.201	18.245	18.961	22.421	17.366
Percentil da Velocidade (75-25)	m/s	8.500	9.150	9.000	12.417	9.000
Velocidade Máxima	m/s	53.100	54.960	62.100	72.763	54.000
Aceleração Média	m/s <sup>2</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Média da Aceleração Positiva	m/s <sup>2</sup>	0.656	0.442	0.582	0.482	0.705
Média da Aceleração Negativa	m/s <sup>2</sup>	-0.692	-0.543	-0.838	-0.507	-0.753
Desvio padrão da Aceleração	m/s <sup>2</sup>	0.609	0.604	0.668	0.579	0.722
Desvio padrão da Aceleração Positiva	m/s <sup>2</sup>	0.516	0.457	0.401	0.372	0.694
Percentil da Aceleração (75-25)	m/s <sup>2</sup>	0.250	0.233	0.250	0.530	0.500
Número de Acelerações	#	329.0	66.0	107.0	90.0	183.0
Acelerações por km	#/km	20.3	4.0	10.6	8.1	18.9
Número de Paradas	#	47.0	41.0	29.0	18.0	29.0
Paradas por km	#/km	2.9	2.5	2.9	1.6	3.0
Tempo Médio das Paradas	s	24.8	29.0	20.8	17.7	22.4
Distância Média das Paradas	m	345.7	406.0	347.2	614.6	333.8
Aceleração Média Positiva [RPA]	m/s <sup>2</sup>	0.218	0.179	0.233	0.193	0.238
Energia Cinética Positiva [PKE]	m/s <sup>2</sup>	0.476	0.385	0.497	0.405	0.532

Os ciclos reais de operação apresentados acima são muito mais dinâmicos que ciclos utilizados em homologações como o ETC, por exemplo. Isso ocorre

mesmo em corredores dedicados aos ônibus biarticulados. Este tipo de ciclo “anda e para”, característico de aplicações urbanas de ônibus não possui longos períodos estáticos como se pode observar em operações rodoviárias, por exemplo.

Os dados aqusitados neste trabalho estão de acordo com os dados médios calculados e apresentados por Sebastiani (2014) sendo que todos os ciclos estão dentro dos limites das distribuições médias de velocidade. Entretanto é necessário ressaltar que mesmo entre os cinco ciclos aqusitados, existem grandes diferenças de operação. A linha 550, também chamada de “ligeirão”, apresenta uma maior velocidade média, menos paradas por quilômetro e menos tempo frenando que as demais linhas. Tais características são intrínsecas a essa linha, a qual foi concebida justamente para ser uma conexão mais rápida entre o bairro Pinheirinho e o centro da cidade.

A RPA é também mais baixa para a linha 550. Este parâmetro é calculado através da potência necessária para todas as acelerações positivas no ciclo dividida pela distância do mesmo, conforme fórmula abaixo, na qual  $a_i$  representa a aceleração instantânea do veículo,  $v_i$  a velocidade instantânea,  $d$  a distância total percorrida e  $n$  o tempo total em segundos.

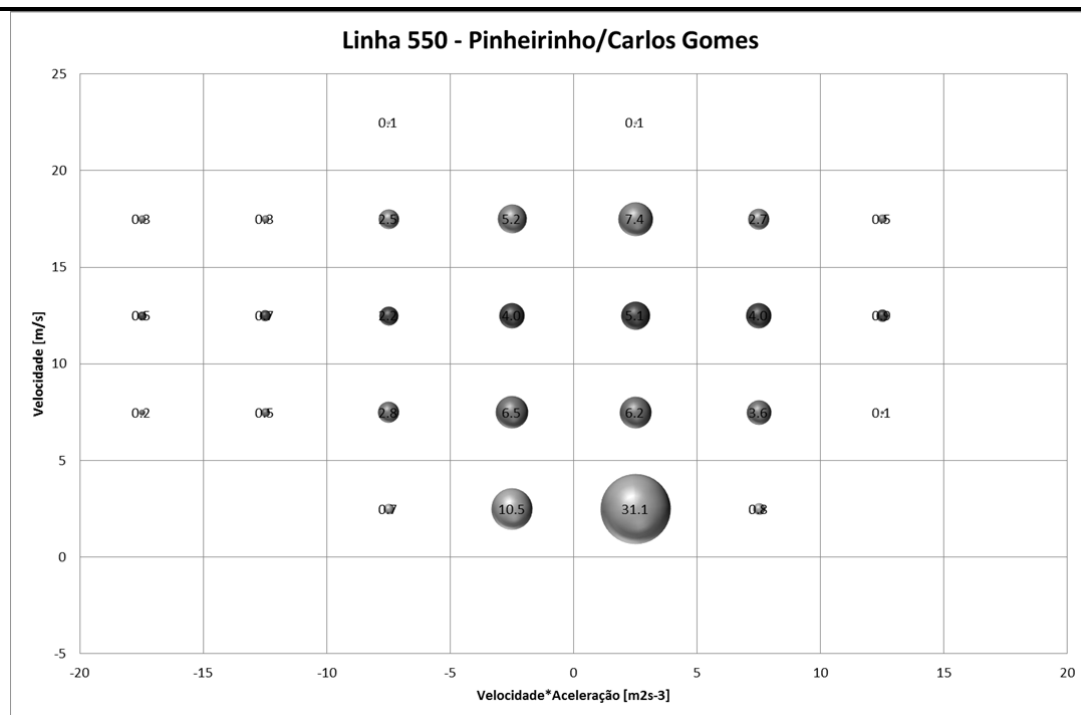
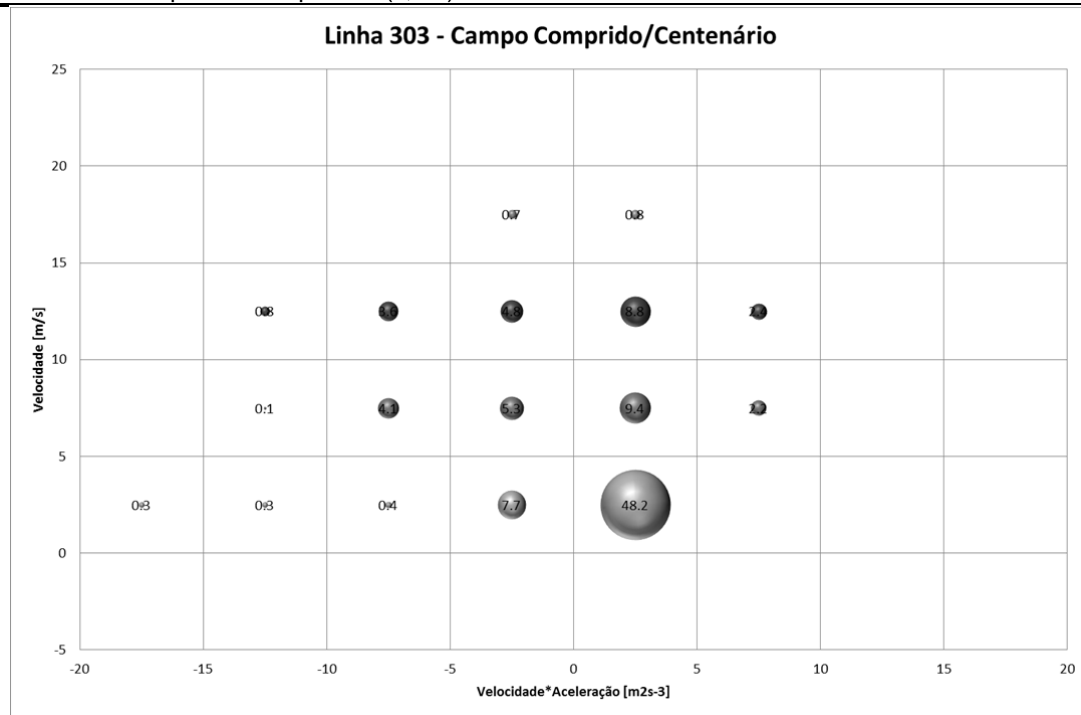
$$RPA = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \frac{a_i v_i}{3.6} (a_i > 0) \quad (4.1)$$

Quanto mais acelerações que demandem alta potência estiverem presentes no ciclo, maior será a RPA e conseqüentemente, maior o consumo e emissões (MORRISON, 2007). Este resultado é coerente com os valores de consumo encontrados na simulação, em que o ciclo de menor consumo é exatamente a linha 550.

A Tabela 25 abaixo apresenta os mapas de frequência dos ciclos BRT selecionados, construída pelos valores da velocidade ( $v$ ), e o produto da velocidade ( $v$ ) pela aceleração, ( $a$ ). Este tipo de representação permite demonstrar quão dinâmico ou transiente é o ciclo. Quanto maior a dispersão dos pontos no mapa, mais transiente ou dinâmico é o ciclo. Se a linha 303 for tomada como referência pode-se perceber que possui a menor dispersão em relação às demais e por conseqüência apresenta um padrão de ciclo mais constante, com menos

acelerações e desacelerações abruptas. Um paralelo destes resultados será feito com os impactos provenientes de cada ciclo.

Tabela 25: Mapas de Frequência (v,v.a) dos ciclos BRT 303 e 550



Existem métodos que utilizam a velocidade instantânea do veículo para cálculo de emissões (EEA,2012). Entretanto optou-se por utilizar os valores do inventário nacional neste trabalho (MMA, 2013), conforme Tabela 26.

Tabela 26: Fatores de emissão de CO, NOx, NMHC e MP<sub>comb</sub>\* para motores Diesel, em g<sub>poluente</sub>/kWh

	CO	NMHC	NOx	MP
P5 (Euro3)	0.90	0.11	4.73	0.08
P7 (Euro 5)	0.27	0.02	1.29	0.0125

MP<sub>comb</sub>\*: Valor válido para o teor de enxofre no diesel de homologação

#### 4.1.2.2 Dados de Consumo de Combustível oriundos da Simulação

Os valores simulados de consumo de combustível foram normalizados em relação ao Biarticulado B7 P5 linha 203 e podem ser vistas na Tabela 27.

Tabela 27: Consumo de combustível para as diferentes tecnologias e combustíveis

Veículo/Combustível /Emissões	Linhas BRT (um sentido)	Distância [km]	Consumo de Combustível [-]		
			100% de carga	50% de carga	20% de carga
<b>Biarticulado B7 P5</b>	203	16.25	1.00	0.83	0.74
	303	17.64	1.02	0.84	0.75
	503	10.07	0.66	0.55	0.49
	550	11.06	0.57	0.48	0.43
	603	9.68	0.58	0.48	0.43
<b>Biarticulado B100 P5</b>	203	16.25	1.05	0.87	0.78
	303	17.64	1.07	0.89	0.79
	503	10.07	0.70	0.58	0.52
	550	11.06	0.60	0.51	0.46
	603	9.68	0.61	0.51	0.45
<b>Biarticulado B7 P7</b>	203	16.25	0.97	0.81	0.72
	303	17.64	0.99	0.82	0.73
	503	10.07	0.64	0.54	0.48
	550	11.06	0.55	0.47	0.42

	603	9.68	0.57	0.47	0.42
<b>Biarticulado B100 P7</b>	203	16.25	0.92	0.77	0.68
	303	17.64	0.94	0.78	0.69
	503	10.07	0.61	0.51	0.45
	550	11.06	0.53	0.44	0.40
	603	9.68	0.54	0.44	0.40
<b>Articulado B7 P7</b>	203	16.25	0.79	0.72	0.62
	303	17.64	0.80	0.73	0.63
	503	10.07	0.53	0.48	0.41
	550	11.06	0.46	0.42	0.36
	603	9.68	0.46	0.42	0.36
<b>Articulado B100 P7</b>	203	16.25	0.75	0.68	0.58
	303	17.64	0.76	0.69	0.60
	503	10.07	0.50	0.45	0.39
	550	11.06	0.44	0.40	0.34
	603	9.68	0.43	0.40	0.34
<b>Articulado Híbrido B7 Eu5</b>	203	16.25	0.55	0.50	0.43
	303	17.64	0.56	0.51	0.44
	503	10.07	0.37	0.33	0.29
	550	11.06	0.32	0.29	0.25
	603	9.68	0.32	0.29	0.25
<b>Articulado Híbrido B100 Eu5</b>	203	16.25	0.52	0.48	0.41
	303	17.64	0.53	0.49	0.42
	503	10.07	0.35	0.32	0.27
	550	11.06	0.31	0.28	0.24
	603	9.68	0.30	0.28	0.24

Para se obter kg/pkm foi utilizados os fatores de conversão de densidade, valor médio de ocupação e as distâncias dos ciclos conforme já explicitado anteriormente.

Somados aos valores de consumo de Diesel, 5% de Arla32 (reagente utilizado para reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio) serão adicionados na avaliação. A base de dados do ecoinvent 3.01 não possui esse composto e, portanto, uma solução de 32,5% de  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  (Amônia) e 67,5% de  $\text{H}_2\text{O}$  (água) (ABNT NBR ISO 22241-1, 2011) será considerada nessa proporção.

Os valores de biodiesel foram adaptados conforme dados de Pereira, 2015, o qual obteve dados de consumo comparativos entre veículos operando com B7 e B100 nos mesmos corredores do sistema BRT de Curitiba. Ele encontrou valores de consumo variando entre -4 e -6% no consumo de B7 em comparação com B100.

Neste trabalho, um aumento de 5% no consumo foi atribuído quando utilizando B100. No capítulo 4.3 Análise de Sensibilidade, um dos casos utilizará o valor da redução do conteúdo energético do Biodiesel em relação ao Diesel (13%), de forma a avaliar o impacto desta hipótese simplificadora.

Já para os valores de consumo para o veículo híbrido foi aplicada a redução de 30% no consumo. Muitos trabalhos científicos discutem a eficiência energética de sistemas híbridos pois o mesmo teste repetido várias vezes pode trazer resultados de consumo de combustível distintos diferentemente de sistemas convencionais. Isto se deve principalmente ao nível de carga da bateria e principalmente do controle eletrônico responsável pelo carregamento/descarregamento dinâmico da mesma (FREDRIKSSON et al., 2011).

Esta dificuldade fez com que neste trabalho seja utilizado que os valores de redução do consumo informados pela fabricante, ou seja, uma redução de 30% em relação aos valores encontrados nos veículos com motor a combustão interna (VOLVO<sup>2</sup>). Apesar de simplista, tanto a hipótese simplificadora quanto o valor da redução possuem respaldo na literatura disponível (LARMINIE J et al., 2003).

No Apêndice B é possível visualizar todas as alterações feitas no *dataset* original do ecoinvent, comentadas e referenciadas.

#### 4.1.2.3 *Dados de manutenção dos veículos*

O processo de manutenção inclui tanto a energia elétrica média utilizada nas garagens, consumo de água, os materiais dos componentes trocados assim como os fluidos necessários durante o período de vida avaliado. Os materiais levantados nesse estudo complementam o *dataset* original do ecoinvent (SPIELMANN et al., 2007). Na Tabela 28 abaixo estão os componentes que foram adicionados e/ou alterados neste trabalho.



Tabela 28: Itens de manutenção adicionados

Item	Tipo de ônibus	Peso na vida (kg)
Líquido de arrefecimento	Biarticulado / Articulado	144 <sup>1</sup>
Líquido de arrefecimento	Híbrido	70 <sup>1</sup>
Pneus	Biarticulado	17583 <sup>2</sup>
Pneus	Articulado/Híbrido	12559 <sup>2</sup>
Filtro de Arla	Biarticulado / Articulado/ Híbrido	3 <sup>1</sup>
Bateria Pb	Biarticulado / Articulado/ Híbrido	336 <sup>1</sup>
Bateria Pb	Híbrido	116 <sup>1</sup>
Bateria Li-Ion	Híbrido	424 <sup>3</sup>
Óleo do motor	Biarticulado / Articulado	1800 <sup>1</sup>
Óleo do motor	Híbrido articulado	1210 <sup>1</sup>
Óleo da Caixa	Biarticulado / Articulado	180 <sup>1</sup>
Óleo da Caixa	Híbrido articulado	40 <sup>1</sup>
Filtro de óleo	Biarticulado / Articulado	191 <sup>1</sup>
Filtro de óleo	Híbrido articulado	48 <sup>1</sup>
Filtro de água	Biarticulado / Articulado/Híbrido	20 <sup>1</sup>
Filtro de Combustível	Biarticulado / Articulado/Híbrido	76 <sup>1</sup>
Óleo do eixo traseiro	Biarticulado	250 <sup>1</sup>
Óleo do eixo traseiro	Articulado/Híbrido	125 <sup>1</sup>
Óleo do retarder	Biarticulado / Articulado	25 <sup>1</sup>
Óleo da rótula	Biarticulado	80 <sup>1</sup>
Óleo da rótula	Articulado/Híbrido	40 <sup>1</sup>

Fontes: <sup>1</sup> Intervalo de Manutenção, <sup>2</sup> Tonje 2015, <sup>3</sup> Estimado

Alguns autores como Tonje (2015) e Simonsen (2012) fizeram um levantamento mais detalhado a ponto de conhecer a energia gasta por hora de serviço em diferentes garagens na Europa, porém, além da falta de dados deste tipo no Brasil, o impacto proveniente da omissão destes dados, conforme estudos supracitados, no impacto ambiental dos produtos pode ser considerado mínimo. Os pneus são trocados a cada 55.000km (arredondando 19 trocas) para todos os ônibus neste estudo conforme Tonje (2015). Demais componentes de desgaste como freios e amortecedores não foram considerados por falta de dados.

De acordo com Pereira (2015), o intervalo de troca de óleo do motor para veículos operando com B100 é de dois terços da quilometragem em relação ao veículo operando com B7, assim como a troca de filtro de combustível é três vezes mais frequente. Esse incremento foi considerado nos *datasets*.

No Apêndice C é possível visualizar todas as alterações feitas no *dataset* original doecoinvent, comentadas e referenciadas.

#### 4.1.3 Fase de Descarte

Como não foi possível encontrar dados detalhados a respeito do que exatamente acontece com os veículos após sua utilização na capital do estado do Paraná, este trabalho irá portanto se basear nos dados já disponíveis na base doecoinvent (SPIELMANN et al., 2007). Todos os metais são assumidos como 100% reciclados após 10 anos ou 1 milhão de km e, para os demais materiais, o descarte total é adotado. Já o das baterias, o valor de 500.000km foi adotado, ou seja dois conjuntos usados durante a vida do produto. Para isso, o peso do conjunto foi considerado duas vezes.

## 4.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Conforme visto na revisão bibliográfica, o IMPact Assessment of Chemical Toxics (IMPACT 2002+) é uma metodologia desenvolvida na Suíça que propõe uma abordagem mista *midpoint/endpoint* conectando os resultados do inventário de ciclo de vida através de catorze categorias *midpoint* e quatro *endpoint* (JOLLIET et al. 2003). As quatro categorias de dano serão avaliadas neste trabalho e são similares as categorias de danos do método Eco-indicator 99 (H/A) v2.10 acrescidas de Mudanças Climáticas.

Os resultados obtidos através do software SimaPro 8.0 podem ser vistos na Tabela 29 abaixo. Para cada uma das combinações de tipo de veículo, tecnologia de emissões, combustível utilizado e rota do BRT é possível identificar o valor correspondente ao dano calculado. A formatação condicional por cores foi feita por categoria de dano e visa destacar qual produto em qual corredor apresentou o maior dano final, sendo vermelho o maior e o verde o menor valor, respectivamente.

Tabela 29: Resultados por categoria de dano

Tipo do Veículo	Saúde Humana	Qualidade do Ecossistema	Mudanças Climáticas	Recursos
	[DALY]	[PDF*m2*yr]	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[MJ primário]
BiArtic P5 B100 BRT203	5.4E-07	2.9E-03	5.8E-03	8.2E-02
BiArtic P5 B100 BRT303	5.1E-07	2.8E-03	5.5E-03	7.8E-02
BiArtic P5 B100 BRT503	5.8E-07	3.0E-03	6.1E-03	8.6E-02
BiArtic P5 B100 BRT550	4.6E-07	2.7E-03	5.1E-03	7.2E-02
BiArtic P5 B100 BRT603	5.3E-07	2.9E-03	5.7E-03	8.0E-02
BiArtic P5 B7 BRT203	1.0E-06	3.5E-03	3.8E-03	2.7E-01
BiArtic P5 B7 BRT303	9.5E-07	3.4E-03	3.6E-03	2.6E-01
BiArtic P5 B7 BRT503	1.1E-06	3.6E-03	4.0E-03	2.9E-01
BiArtic P5 B7 BRT550	8.6E-07	2.9E-03	3.3E-03	2.3E-01
BiArtic P5 B7 BRT603	1.0E-06	3.5E-03	3.7E-03	2.7E-01
BiArtic P7 B100 BRT203	8.7E-08	2.3E-03	5.1E-03	7.5E-02
BiArtic P7 B100 BRT303	8.2E-08	2.2E-03	4.9E-03	7.1E-02
BiArtic P7 B100 BRT503	9.3E-08	2.3E-03	5.5E-03	8.0E-02
BiArtic P7 B100 BRT550	7.4E-08	2.2E-03	4.5E-03	6.6E-02
BiArtic P7 B100 BRT603	8.5E-08	2.3E-03	5.0E-03	7.3E-02
BiArtic P7 B7 BRT203	1.6E-07	3.0E-03	3.7E-03	2.7E-01
BiArtic P7 B7 BRT303	1.5E-07	2.9E-03	3.5E-03	2.5E-01
BiArtic P7 B7 BRT503	1.7E-07	3.1E-03	3.9E-03	2.9E-01
BiArtic P7 B7 BRT550	1.4E-07	2.8E-03	3.2E-03	2.3E-01
BiArtic P7 B7 BRT603	1.6E-07	3.0E-03	3.6E-03	2.6E-01
Artic P7 B100 BRT203	7.5E-08	2.2E-03	4.6E-03	6.7E-02
Artic P7 B100 BRT303	6.9E-08	2.1E-03	4.3E-03	6.3E-02
Artic P7 B100 BRT503	8.0E-08	2.2E-03	4.9E-03	7.1E-02
Artic P7 B100 BRT550	6.4E-08	2.1E-03	4.0E-03	5.9E-02
Artic P7 B100 BRT603	6.4E-08	2.1E-03	4.5E-03	6.5E-02
Artic P7 B7 BRT203	1.4E-07	2.8E-03	3.3E-03	2.4E-01
Artic P7 B7 BRT303	1.3E-07	2.8E-03	3.1E-03	2.2E-01
Artic P7 B7 BRT503	1.5E-07	3.0E-03	3.5E-03	2.6E-01
Artic P7 B7 BRT550	1.2E-07	2.7E-03	2.9E-03	2.1E-01
Artic P7 B7 BRT603	1.3E-07	2.8E-03	3.2E-03	2.3E-01
Artic Híb. P7 B100 BRT203	5.2E-08	2.1E-03	3.5E-03	5.2E-02
Artic Híb. P7 B100 BRT303	4.9E-08	2.0E-03	3.4E-03	5.0E-02
Artic Híb. P7 B100 BRT503	5.6E-08	2.1E-03	3.7E-03	5.5E-02
Artic Híb. P7 B100 BRT550	4.5E-08	2.0E-03	3.1E-03	4.6E-02
Artic Híb. P7 B100 BRT603	5.1E-08	2.1E-03	3.5E-03	5.1E-02
Artic Híb. P7 B7 BRT203	9.7E-08	2.5E-03	2.6E-03	1.7E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT303	9.0E-08	2.5E-03	2.5E-03	1.6E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT503	1.0E-07	2.6E-03	2.7E-03	1.9E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT550	8.3E-08	2.4E-03	2.3E-03	1.5E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT603	9.4E-08	2.5E-03	2.6E-03	1.7E-01

De forma geral, configuração articulada foi sensivelmente melhor que a biarticulada para todas as categorias de dano sendo que o principal motivo foi a taxa de ocupação utilizada. Ou seja, enquanto a versão biarticulada operou com 70% da ocupação máxima a versão articulada operou ligeiramente acima da capacidade, necessitando 2,3% de outro ônibus para a operação. Dada a unidade funcional pkm, o resultado faz sentido, porém na realidade seriam necessários mais veículos articulados para cobrir a mesma demanda. Da mesma forma para a tecnologia híbrida a qual precisou de 13% de outro veículo para suprir o escopo deste trabalho. Tal tecnologia apresentou resultados melhores para todas as categoria de danos avaliados, com destaque para categoria de dano de saúde humana.

Ademais é possível identificar que a tecnologia de emissões afeta significativamente e em maior escala as categorias de dano, ou seja, os veículos que atendem a legislação P5 causam mais dano quando comparados ao veículos com tecnologia P7. Tais valores estão intrinsicamente ligados ao sistema de pós tratamento dos gases utilizados nos veículos mais modernos e também com o consumo de combustível, o qual melhorou com o advento de novas tecnologias. Tal diferença é mais evidente quando se avalia a categoria de dano Saúde Humana, conforme exemplo da Figura 19 para a rota 550.

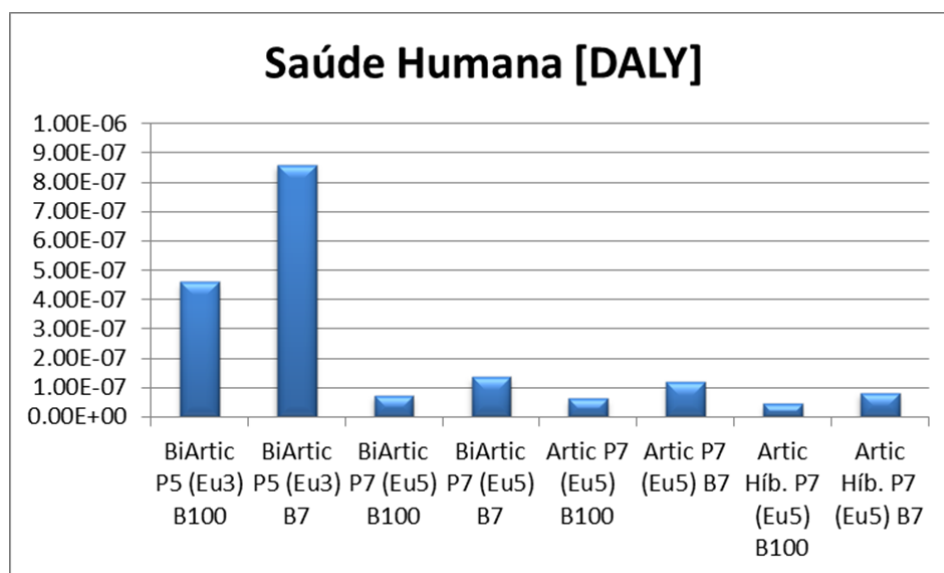


Figura 19: Rota 550: Saúde Humana  
Fonte: Autoria Própria.

A proporção de Biodiesel utilizado, apesar de aumentar o consumo total de combustível com o aumento da sua quantidade, impacta positivamente na qualidade do ecossistema como pode ser visto na Figura 20., superando assim o seu aumento de consumo.

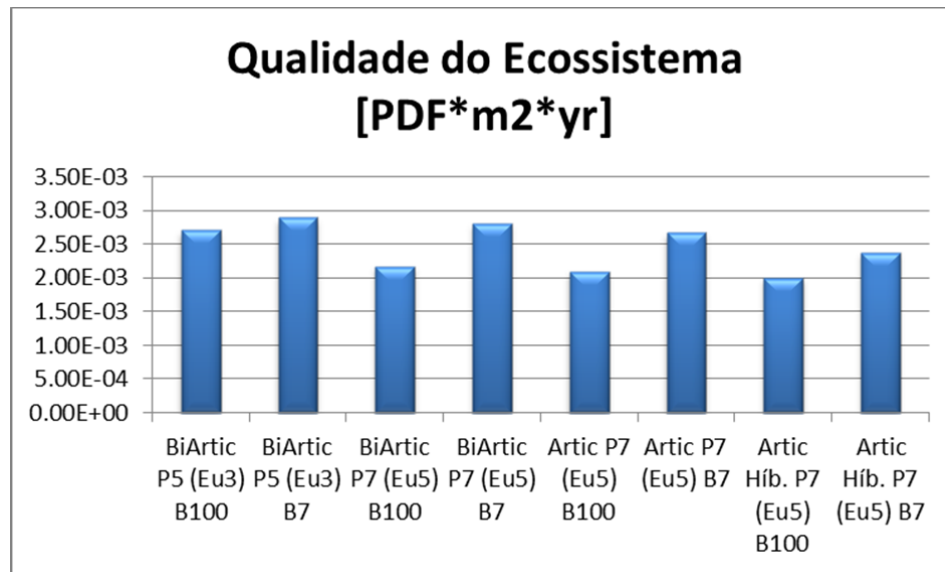


Figura 20: Rota 550: Qualidade do Ecossistema  
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 21 traz uma informação aparentemente contraditória pois apresenta valores maiores de mudanças climáticas quando da utilização de B100 comparado ao B7. Este fato está relacionado a produção do Biodiesel, desde a plantação do soja e passando pela produção do Biocombustível. Este fato será melhor detalhado na sequência deste capítulo quando for explicada a influência de cada processo na composição do dano.

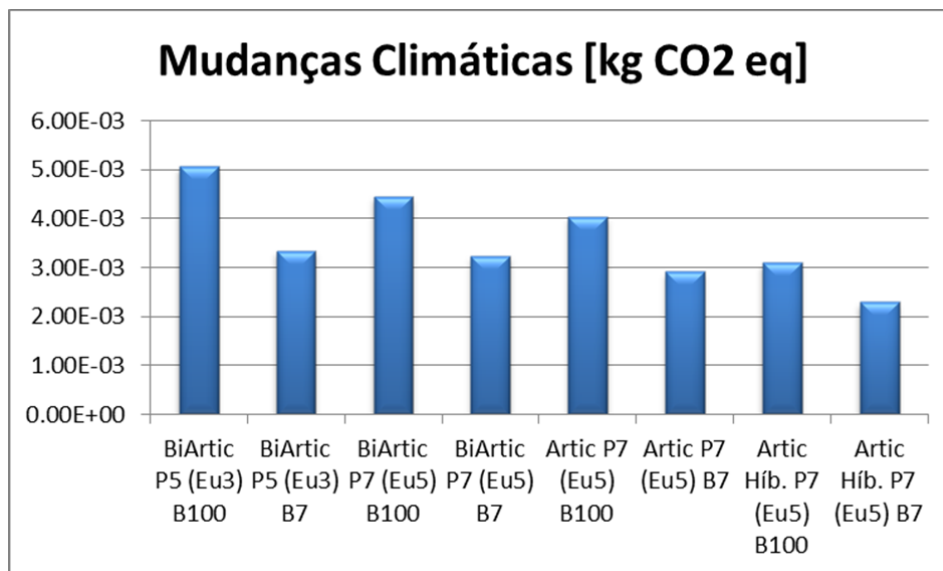


Figura 21: Rota 550: Mudanças Climáticas  
Fonte: Autoria Própria.

Já para a categoria de consumo de recursos, devido ao conceito de energia excedente, acaba refletindo diretamente no resultado apresentando valores maiores quanto maior for a proporção entre a mistura de Diesel fóssil e Biodiesel.

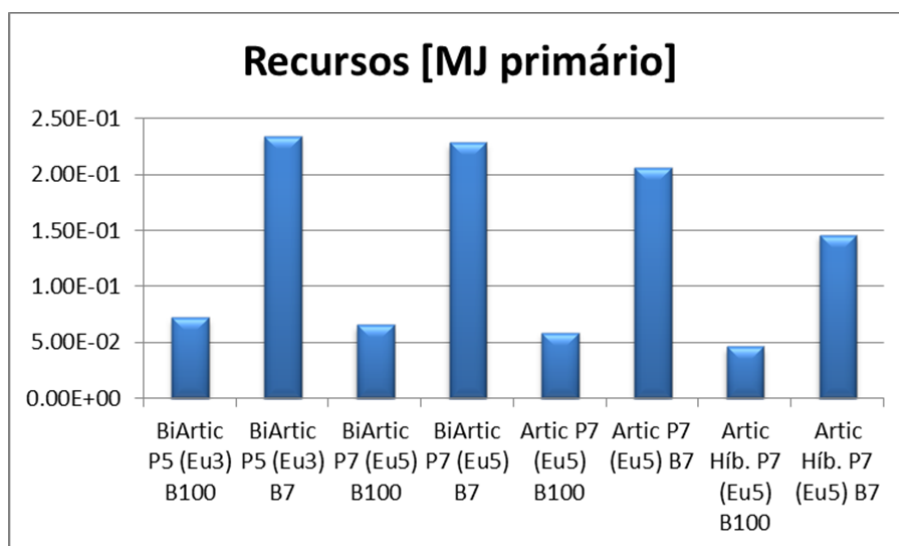


Figura 22: Rota 550: Recursos  
Fonte: Autoria Própria.

A comparação direta dos resultados obtidos com a literatura é difícil de ser realizada pois, ou os autores utilizaram uma unidade funcional diferente ou um método diferente em suas avaliações ou ainda porque o escopo e objetivo dos demais autores internacionais eram outros. O modal de transporte de ônibus urbano (ônibus menores com comprimento médio de 12m e com capacidade de passageiros também bastante reduzida, cerca de 70 enquanto que os biarticulados podem transportar até 250 passageiros) também tem grande influência nos resultados. Um paralelo entre os estudos contudo é sim, possível de ser efetuado.

Os estudos mais próximo a este foram realizados por Cooney (2011) no Estados Unidos e por Dreier (2015) no Brasil. O primeiro autor o avaliou as emissões de gases de efeito estufa e obteve um valor 2,86 kg CO<sub>2</sub>eq /km para o motor a combustão interna e 4.52 kg CO<sub>2</sub>eq /km para o ônibus elétrico. Valores estes cerca de 80% e 235% respectivamente maiores que valores encontrados nos estudos realizados por Ou et al. (2010) e Chester (2009). Já Dreier (2015) avaliou as emissões de CO<sub>2</sub> durante a fase de uso baseado no consumo de energia pelo método de balanço de carbono (IPCC, 1996). Através deste método (para ver os fatores aplicáveis, vide capítulo 3.3.4) obtém-se valores diretamente proporcionais ao consumo de combustível. A comparação fica injusta com os trabalhos anteriormente citados pois precisaria descontar a contribuição dos demais gases que contribuem para a contagem dos gases de efeito estufa e conseqüentemente de CO<sub>2</sub> equivalente. De toda forma, este estudo obteve os valores para o biarticulado P7 B7 (3.86 kg CO<sub>2</sub>eq /km), para o articulado P7 B7 (3.43 kg CO<sub>2</sub>eq /km) e para o articulado híbrido P7 B7 (2.70 kg CO<sub>2</sub>eq /km) utilizando o método *Greenhouse Gas Protocol V1.01* apenas para esta comparação.

As diferenças entre corredores BRT refletem basicamente a diferença de consumo de combustível por rota avaliada. Sendo que a rota 550 é a que apresenta os melhores valores (ou seja, menores) para todas as categorias de dano justamente por apresentar condições de tráfego e operação distinta das demais, resultando num menor consumo por pkm e conseqüentemente nos danos associados. Os resultados aqui apresentados são coerentes com os parâmetros cinemáticos calculados em especial para o parâmetro RPA, velocidade média, número de acelerações e paradas por km (apresentado durante a revisão bibliográfica), ou seja, existe uma relação direta entre esses parâmetros e o maior consumo de combustível e conseqüentemente os danos causados pelas emissões

resultantes. A importância do ciclo de operação durante a avaliação do uso fica claramente evidenciada através desta combinação de parâmetros.

É importante ressaltar também a localização de cada um destes ciclos dentro do contexto geográfico da cidade de Curitiba. As rotas 203 e 303, que cortam a cidade de leste a oeste e de norte a sul passando pela região central, cruzam as regiões mais densamente povoadas da cidade e seus impactos são sentidos por um número maior de pessoas. Nesse sentido é interessante destacar as diferenças entre as rotas 503 e 550 as quais dividem um trecho comum de corredor (mesma topografia) mas devido ao comportamento dinâmico bastante distinto (número de paradas, velocidade média, etc.) apresentaram resultados bastante distintos nas emissões finais. No Anexo D é possível observar os resultados para todas as cinco rotas avaliadas neste trabalho.

É possível comparar as 4 categorias de impacto *endpoint* numa escala comum e compreender a magnitude dos impactos normalizados ao avaliar o indicador de pontuação única do método IMPACT 2002+ v2.12. Quando os dados são expostos desta forma, é possível notar o impacto a Saúde Humana é mais representativo que os demais e numa escala bastante significativa. A Figura 23 e a Figura 24 abaixo trazem os comparativos para os veículos Biarticulados, operando com B7 e B100, com tecnologias de emissões P5 e P7 em duas rotas diferentes, quais sejam 203 e 550.

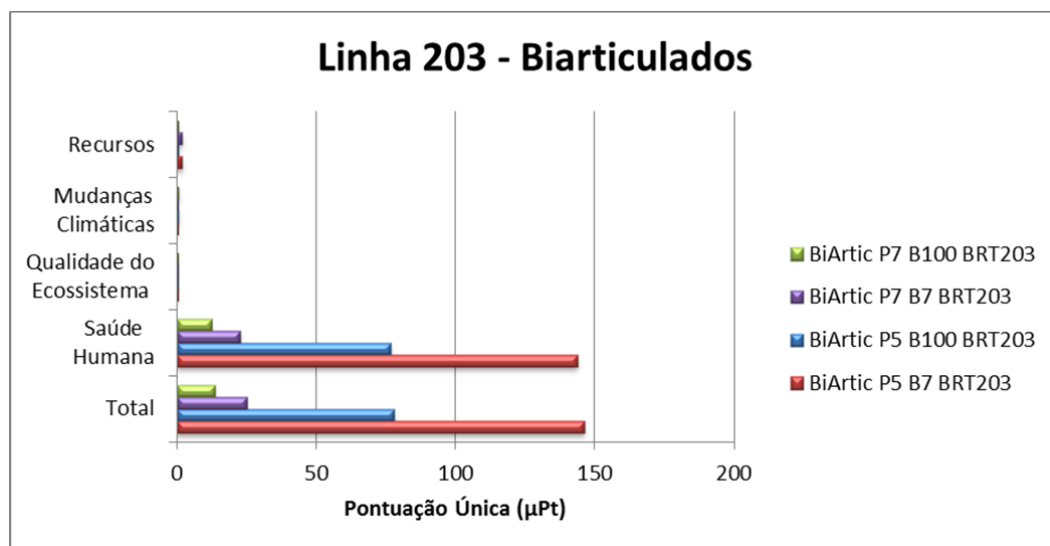


Figura 23: Pontuação Única Linha 203 - Biarticulados  
Fonte: Autoria Própria.



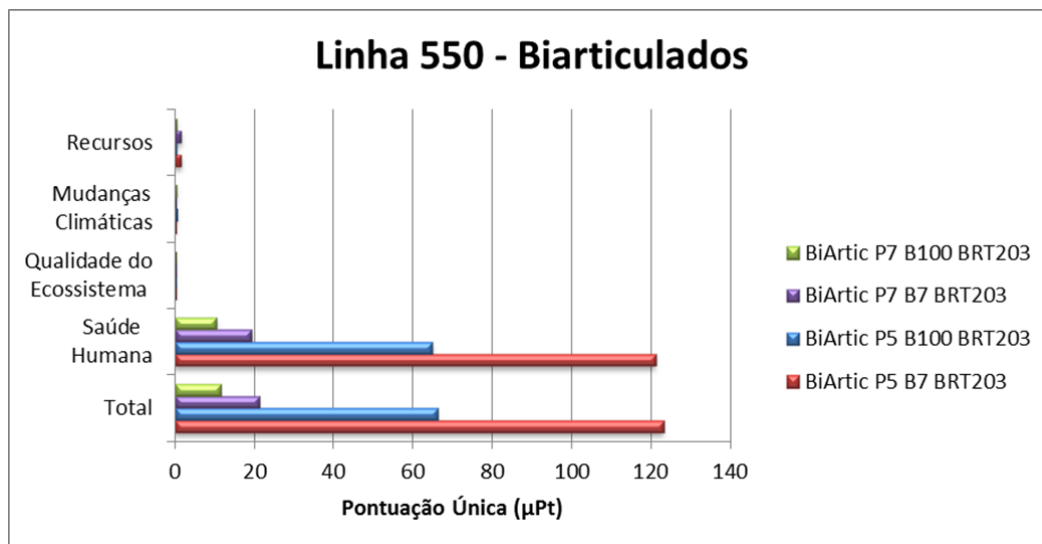


Figura 24: Pontuação Única Linha 550 - Biarticulados  
Fonte: Autoria Própria.

Além da clara relevância da categoria de dano Saúde Humana nos impactos ambientais é também bastante importante ressaltar a diferença entre as configurações expostas acima, onde a tecnologia P5 operando com B7 apresentou ao longo do seu ciclo de vida um resultado quase 6 vezes pior quando comparado à versão P7 para o mesmo combustível. Da mesma forma, é nítido o ganho da utilização de 100% de biocombustível para uma dada tecnologia na melhoria da Saúde Humana com uma redução de cerca de mais de duas vezes.

Com relação ao dano Saúde Humana, a categoria de impacto que mais influencia nesse resultado são os inorgânicos inaláveis tanto no fator atribuído no método quanto na quantidade gerada. Dentro deste contexto, é de extrema importância este resultado pois expõe a população dos grandes centros urbanos à grande quantidade de material particulado emitido durante a combustão. Novamente a relação entre a localização geográfica da rota com a densidade populacional do bairro pode intensificar os danos causados.

Quando se avalia os resultados obtidos através Avaliação do Ciclo de Vida, é de extrema importância identificar dentro da rede de processos que constituem o ciclo de vida do produto quais são os mais relevantes em termos de contribuição para os impactos. Desta forma para cada uma das 32 combinações possíveis para uma mesma rota do sistema BRT, quais sejam, tipo de veículo, nível de emissões, combustível utilizado e as quatro categorias de dano aplicáveis do método IMPACT

2002+ v2.12, os processos mais significativos até o nível 3 (três etapas do processo) foram levantadas. De forma visual e esquemática, a rede de processos relacionados a estes produtos pode ser vista na Figura 25. Um corte de 0.1% foi aplicado na visualização do dano mudanças climáticas para o Articulado P7 operando com B100 no ciclo BRT203. Já a Figura 26 apresenta em destaque os fluxos mais importantes desta avaliação. A espessura da linha vermelha indica a maior participação no dano para cada fluxo elementar.

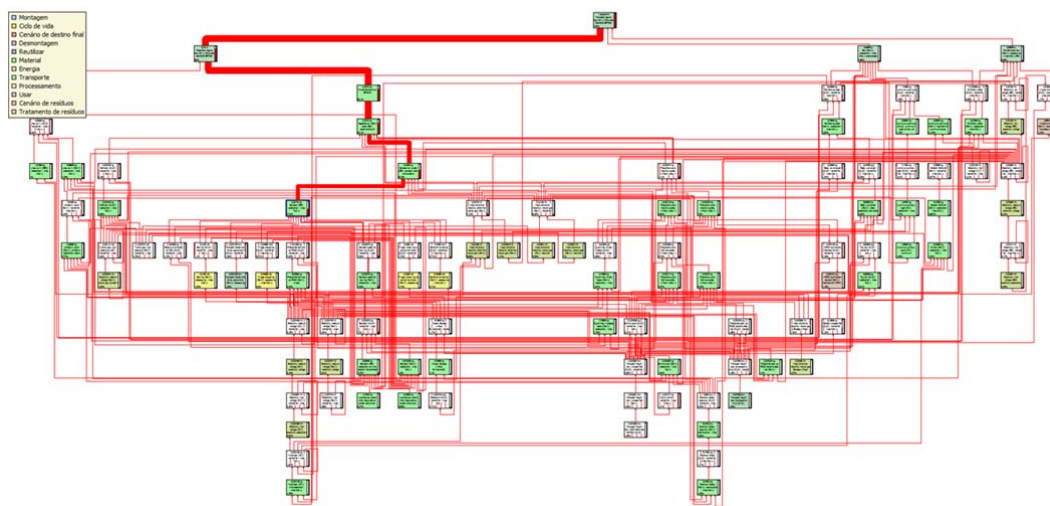


Figura 25: A rede de processos envolvidos no ciclo de vida do produto. Corte: 0,1%  
Fonte: Autoria Própria.

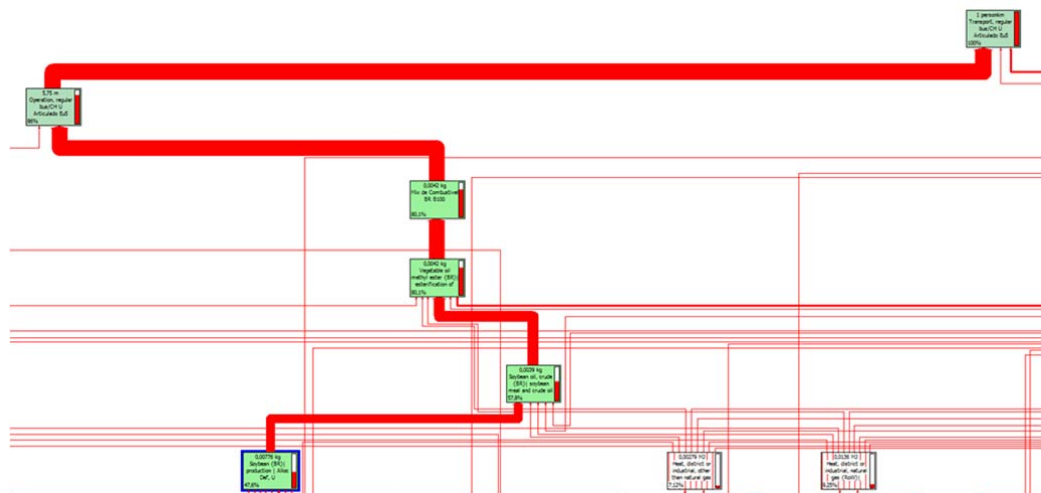


Figura 26: Destaque nos processos mais relevantes. Corte 0.1%  
Fonte: Autoria Própria.

A rede de processos para cada uma das combinações estudadas neste trabalho foi criada e analisada de forma a entender qual fase do ciclo de vida é a mais importante assim como identificar quais são os processos que mais contribuíram para os respectivos impactos. A Tabela 30 traz esse resumo:

Tabela 30: Proporção de contribuição entre as fase Ciclo de Vida do Produto (IMPACT2002+)

<b>Tipo de Veículo</b>	<b>Avaliação de Danos</b>	<b>Uso (%)</b>	<b>Produção (%)</b>	<b>Manutenção (%)</b>
BiArtic P5 B7	Saúde Humana	99.7	NA	NA
BiArtic P5 B7	Qualidade do Ecosistema	88.2	3.17	8.62
BiArtic P5 B7	Mudança Climática	79.2	4.45	16.2
BiArtic P5 B7	Recursos	76.8	4.97	18.2
BiArtic P5 B100	Saúde Humana	99.7	0.0647	0.202
BiArtic P5 B100	Qualidade do Ecosistema	88.2	3.17	8.62
BiArtic P5 B100	Mudança Climática	79.2	4.45	16.2
BiArtic P5 B100	Recursos	76.8	4.97	18.2
BiArtic P7 B7	Saúde Humana	99.5	0.219	0.304
BiArtic P7 B7	Qualidade do Ecosistema	92.9	3.02	4.1
BiArtic P7 B7	Mudança Climática	80.8	6.96	12
BiArtic P7 B7	Recursos	94.8	1.53	3.65
BiArtic P7 B100	Saúde Humana	99	0.405	0.569
BiArtic P7 B100	Qualidade do Ecosistema	90.4	4.02	5.62
BiArtic P7 B100	Mudança Climática	85.9	5.02	8.9
BiArtic P7 B100	Recursos	81.2	5.44	13.4
Artic P7 B7	Saúde Humana	99.5	0.216	0.314
Artic P7 B7	Qualidade do Ecosistema	93.2	2.73	4.08
Artic P7 B7	Mudança Climática	80.8	6.95	11.9
Artic P7 B7	Recursos	95	1.57	3.45
Artic P7 B100	Saúde Humana	99	0.397	0.587
Artic P7 B100	Qualidade do Ecosistema	91	3.53	5.45
Artic P7 B100	Mudança Climática	86	4.95	8.83
Artic P7 B100	Recursos	81.8	5.56	12.7
Artic Híb. P7 B7	Saúde Humana	99	0.42	0.542
Artic Híb. P7 B7	Qualidade do Ecosistema	90.1	4.4	5.51
Artic Híb. P7 B7	Mudança Climática	71.8	10.4	17.5
Artic Híb. P7 B7	Recursos	91.9	2.58	5.5
Artic Híb. P7 B100	Saúde Humana	98.2	0.774	1.01
Artic Híb. P7 B100	Qualidade do Ecosistema	87.8	5.35	6.88

Artic Híb. P7 B100	Mudança Climática	79	7.69	13.1
Artic Híb. P7 B100	Recursos	73	8.48	18.5

A fase de Uso do produto é indubitavelmente a mais relevante, contribuindo muitas vezes com mais de 90% dos impactos provenientes destes produtos. Este valor é bastante alto mesmo quando comparado com estudos anteriores de avaliação de ciclo de vida os quais normalmente reportam entre 70 e 80% dos impactos advindos do uso (OU et al. (2010), SIMONSEN (2012), GARCIA-SANCHEZ et al. (2013), ALLY et al. (2007), SUNDVOR (2013) e CHESTER (2008), DEIER (2015) e VOLVO(2015)). Uma das razões para explicar este número ainda mais alto neste caso advém do consumo de combustível deste tipo específico de ônibus. Dadas suas dimensões e peculiaridades de uso, a fase de utilização se torna realmente muito relevante, atingindo valores bastante significativos em comparação com a produção manutenção e descarte. Dentre os estudos revisados nesta dissertação, somente Choma (2015) encontrou valores mais significativos para a fase de produção do veículo. Independentemente da tecnologia de propulsão utilizada, (veículo elétrico ou veículo a combustão interna a gasolina ou a etanol) a fase de produção foi a maior responsável na maioria das categorias de impacto. Cabe ressaltar entretanto, que o estudo foi realizado para veículos de passeio e não de transporte em massa.

O desdobramento por processo foi realizado para todos os 32 casos em 3 níveis e, para todos eles, sem exceção, os três principais processos estavam relacionados a fase de Operação, seguido do mix de combustível utilizado e por fim a origem do combustível, seja fóssil ou proveniente da transesterificação do óleo vegetal.

A grande diferença fica no entanto, quanto a contribuição de cada uma delas. Para as operações realizadas com B7, a principal parte do impacto advém da queima do combustível fóssil durante o uso. Já para o B100, uma parcela significativa (sempre maior que 50%) é proveniente da própria produção do biocombustível. Ou seja, a produção do soja (*dataset* regionalizado para Brasil) e o processo de produção de Biodiesel pela rota metilica, é um fator extremamente importante no inventário e conseqüentemente na avaliação dos impactos ambientais. O zinco utilizado mostrou-se como um dos principais responsáveis por

esses valores seguido do Metanol. Além disso, a forma como o *dataset* está construído no SimaPro não contabiliza o carbono biogênico (ou seja, não há absorção de carbono durante a produção), o que implica no resultado ser mais impactante na categoria de dano Mudanças Climáticas que a própria queima do combustível.

Uma outra forma de avaliar os resultados obtidos é identificar as substâncias que mais contribuem para cada categoria de dano, ou seja, realizar a avaliação do inventário do ciclo de vida (ICV). Neste contexto, os inventários da rota BRT203 serão detalhados por categoria de dano.

Para a saúde humana, a maior influência é o material particulado (mais de 97% da contribuição total para todos os produtos avaliados), seguido do NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Hidrocarbonetos Aromáticos e demais substâncias conforme pode ser visto na Tabela 31.

Tabela 31: ICV – Contribuição por substância para a Saúde Humana, IMPACT2002+

Produto / Substância	Total [DALY]	MP, < 2.5 um [DALY]	NO <sub>2</sub> [DALY]	SO <sub>2</sub> [DALY]	Aromáticos [DALY]	Outras [DALY]
BiArtic P5 B100	5.44E-07	5.32E-07	1.15E-08	1.26E-09	6.68E-10	-1.57E-09
BiArtic P5 B7	1.02E-06	1.01E-06	1.06E-08	1.27E-09	1.76E-10	4.57E-10
BiArtic P7 B100	8.70E-08	8.28E-08	3.97E-09	1.16E-09	6.12E-10	-1.60E-09
BiArtic P7 B7	1.61E-07	1.55E-07	3.55E-09	1.24E-09	1.73E-10	4.51E-10
Artic P7 B100	7.45E-08	7.09E-08	3.45E-09	1.04E-09	5.50E-10	-1.43E-09
Artic P7 B7	1.37E-07	1.33E-07	3.07E-09	1.11E-09	1.51E-10	4.28E-10
Artic HYB P7 B100	5.24E-08	4.96E-08	2.47E-09	7.95E-10	4.07E-10	-8.22E-10
Artic HYB P7 B7	9.67E-08	9.30E-08	2.21E-09	8.46E-10	1.27E-10	4.81E-10

Já para a categoria de dano, mudanças climáticas, os resultados mais significativos ficam por conta do CO<sub>2</sub> fóssil (de 65 a 90%) seguido do metano, óxido de dinitrogênio. CO<sub>2</sub> oriundo da transformação da terra e demais substâncias. A relação de substâncias, conforme visto anteriormente é, em grande parte proveniente da fase de uso e portanto recai nos aspectos ligados ao combustível, seja fóssil ou biogênico.

Tabela 32: ICV – Contribuição por substância para as Mudanças Climáticas, IMPACT2002+

Produto / Substância	Total	CO <sub>2</sub> , fossil	CH <sub>4</sub> , fossil	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , transf. terra	Substâncias restantes
		kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq
BiArtic P5 B100	5.79E-03	3.88E-03	1.28E-04	1.08E-03	6.21E-04	8.02E-05
BiArtic P5 B7	3.80E-03	3.43E-03	1.34E-04	9.64E-05	7.47E-05	5.84E-05
BiArtic P7 B100	5.13E-03	3.33E-03	1.11E-04	1.04E-03	6.01E-04	4.7E-05
BiArtic P7 B7	3.70E-03	3.36E-03	1.31E-04	9.45E-05	7.38E-05	3.53E-05
Artic P7 B100	4.61E-03	2.98E-03	9.90E-05	9.43E-04	5.48E-04	4.18E-05
Artic P7 B7	3.29E-03	2.98E-03	1.16E-04	8.62E-05	7.05E-05	3.11E-05
Artic HYB P7 B100	3.51E-03	2.33E-03	7.68E-05	6.68E-04	3.99E-04	3.45E-05
Artic HYB P7 B7	2.60E-03	2.35E-03	8.93E-05	6.75E-05	6.40E-05	2.7E-05

Já para o uso de recursos, existe uma variação natural da importância da utilização de óleo bruto para produção de diesel entre as versões operando com B7 e B100, mas em geral as substâncias mais relevantes são as necessárias para a geração de energia, seja elétrica ou para a combustão do veículo. É nesse sentido que o Urânio aparece na lista, ou seja na geração de energia elétrica.

Tabela 33: ICV – Contribuição por substância para os Recursos, IMPACT2002+

Produto / Substância	Total	Gas, natural/m3	Oil, crude	Coal, hard	Uranium	Substâncias restantes
		MJ primary	MJ primary	MJ primary	MJ primary	MJ primary
BiArtic P5 B100	8.19E-02	3.55E-02	2.92E-02	1.21E-02	0.003271	0.001842
BiArtic P5 B7	2.73E-01	1.78E-02	2.45E-01	6.76E-03	0.002464	0.000929
BiArtic P7 B100	7.48E-02	3.36E-02	2.75E-02	9.31E-03	0.002954	0.001479
BiArtic P7 B7	2.67E-01	1.75E-02	2.39E-01	6.65E-03	0.002425	0.000916
Artic P7 B100	6.67E-02	3.03E-02	2.41E-02	8.27E-03	0.002629	0.001317
Artic P7 B7	2.39E-01	1.56E-02	2.14E-01	5.82E-03	0.002138	0.000803
Artic HYB P7 B100	5.20E-02	2.22E-02	1.97E-02	6.68E-03	0.002205	0.001182
Artic HYB P7 B7	1.73E-01	1.19E-02	1.54E-01	4.97E-03	0.001865	0.000823

O corte utilizado para apresentar os resultados acima foi de 0.1% porém para a qualidade do ecossistema, devido a grande quantidade de substâncias, as mesmas foram limitadas às 5 principais. Também para este dano, compartimento

afetado (conforme nomenclatura doecoinvent) variou sendo que a matéria prima (ocupação da terra), o solo (alumínio e zinco) e o ar (NOx e cobre) foram afetados. A Tabela 34 abaixo traz os resultados obtidos. Novamente é possível ver a influência do combustível nos resultados. Sempre que a proporção de Biodiesel na mistura aumentou, o impacto da área ocupada, alumínio e zinco se alteram significativamente.

Tabela 34: ICV – Contribuição por substância para a Qualidade Ecossistema, IMPACT2002+

Produto / Substância	Total	Terra, arável, não irrigada, intensiva, PDF*m2*yr	Alumínio PDF*m2*yr	Zinco PDF*m2*yr	NOx PDF* m2*yr	Cobre PDF* m2*yr	Substâncias restantes PDF*m2*yr
BiArtic P5 B100	2.89 E-03	2.23E-02	1.73E-04	-1.43E-02	0.0007 37	0.0001 38	-0.00613
BiArtic P5 B7	3.50 E-03	1.44E-03	8.23E-04	4.91E-04	0.0006 79	0.0001 02	-3.6E-05
BiArtic P7 B100	2.27 E-03	2.16E-02	1.63E-04	-1.38E-02	0.0002 55	0.0001 27	-0.006
BiArtic P7 B7	3.02 E-03	1.41E-03	8.04E-04	5.13E-04	0.0002 28	1E-04	-3.1E-05
Artic P7 B100	2.18 E-03	1.95E-02	1.48E-04	-1.24E-02	0.0002 21	0.0001 14	-0.00544
Artic P7 B7	2.85 E-03	1.27E-03	7.23E-04	5.98E-04	0.0001 97	8.88E-05	-2.6E-05
Artic HYB P7 B100	2.06 E-03	1.37E-02	1.21E-04	-8.28E-03	0.0001 58	9.16E-05	-0.00373
Artic HYB P7 B7	2.53 E-03	8.94E-04	5.26E-04	8.31E-04	0.0001 42	7.41E-05	6.41E-05

#### 4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma série de suposições e hipóteses foram levantadas e descritas ao longo deste trabalho. A fim de se identificar os efeitos das mesmas no resultado, as seguintes análises de sensibilidade foram realizadas.

#### 4.3.1 Biodiesel

O conteúdo energético do B100 é cerca de 13% menor quando comparado ao B7 dadas as propriedades do Biodiesel (CANAKCI 2003 apud DREIER, 2015). Entretanto, de acordo com Pereira (2015), o valor do consumo de B100 em veículos biarticulados operando em Curitiba foi de cerca de 5% a mais. Já os resultados médios reportados pela URBS (KARAS, 2013) trazem valores de aumento de consumo na ordem de 1,8%.

Por estes motivos uma análise de sensibilidade referente ao consumo do Biodiesel foi realizada comparando essas duas variáveis, 5% e 13% maior em relação ao B7.

Os resultados podem ser vistos na Figura 27 e mostram uma pequena variação no resultado final. A maior diferença ficou para mudanças climáticas onde, como visto anteriormente, o maior contribuinte é o processo de produção do soja para a manufatura do Biodiesel. Por esse motivo, os valores de consumo obtido por Pereira (2015) podem ser usados como referência para o consumo de combustível de B100.

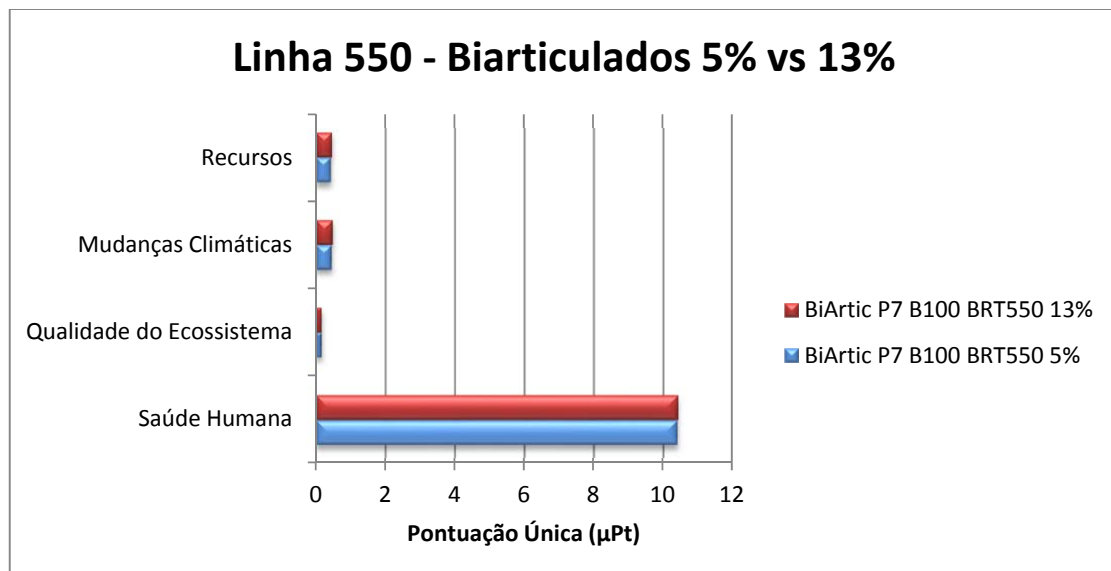


Figura 27: Resultado comparativo da análise de sensibilidade  
Fonte: Autoria Própria.



#### 4.3.2 Articulado Híbrido

De acordo com as declarações oficiais do fabricante Volvo, o ônibus híbrido pode economizar entre 35% e 39% de energia quando comparado com um ônibus convencional (VOLVO BUS CORPORATION 2015d,e). Entretanto o mesmo não especifica detalhes da operação ou rota. Os resultados encontrados por Dreier (2015) corroboram com a declaração do fabricante e literatura e, mais especificamente, seus valores foram obtidos para os corredores do sistema BRT de Curitiba. Por esse motivo a análise de sensibilidade para o articulado híbrido será feito em relação ao nível de emissões e não ao consumo de combustível. A versão comercialmente disponível do veículo articulado híbrido é Euro 6, porém, neste estudo foram considerados valores de emissões Euro 5. O motivo desta adaptação foi para comparar tecnologias prováveis em utilização. Ou seja, caso este produto seja comercializado no Brasil (Fase P7 ou Euro5) muito provavelmente seria enquadrado nos limites legais regionais. Com a análise de sensibilidade, os fatores de emissões serão adaptados conforme tabela abaixo.

Tabela 35 Emissões resultantes da tecnologia Euro 6

<b>Emissões</b>	<b>g<sub>poluente</sub>/km</b>
CO	0.223
HC	0.022
NOx	0.597
PM	0.0023

Fonte: EMEP/EEA, 2012

Para os demais poluentes (SO<sub>2</sub>, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, Cd, e Hg), as regras observadas serão consideradas válidas, sendo correspondentes ao consumo de combustível informado.

A Figura 28 traz o resultado da comparação entre o veículo articulado híbrido Euro 5 (em vermelho) e a versão Euro 6 (em azul) conforme método IMPACT2002+ v2.12 para cada uma das cinco rotas avaliadas. Este exercício não contemplou as mudanças de material, produção, manutenção entre outras, mas buscou sim ressaltar o expressivo impacto da utilização das tecnologias de

emissões mais avançadas no impacto *endpoint* de saúde humana. O resultado já era de certa forma esperado pois, como visto anteriormente, os inaláveis orgânicos são responsáveis por grande parte do impacto nesta categoria de dano e possuem um fator expressivo para a normalização dos dados. A introdução de sistemas de pós tratamento com filtros de particulado ainda mais restritos, a adoção de estratégias de regeneração desses filtros ao longo da utilização do produto permitem obter valores bastante menores quando comparados com a legislação Euro 5.

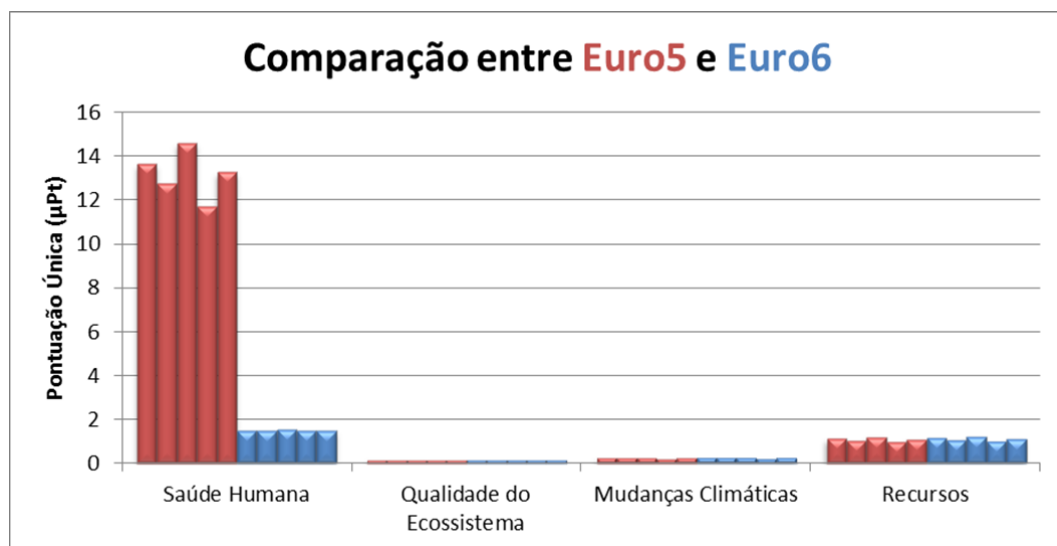


Figura 28: Comparação entre tecnologias de emissões – Pontuação Única (IMPACT2002+)  
Fonte: Autoria Própria.

O comparativo completo por fator de caracterização pode ser encontrado no Anexo E.

#### 4.3.3 Métodos de AICV

Conforme mencionado previamente, uma análise entre diferentes métodos de caracterização foi proposta como análise de sensibilidade. Os métodos CML 2000 v3.02 e Eco-indicator 99 (H/A) v2.10 foram utilizados para tal.

Os quatro fatores de caracterização do método CML correspondentes podem ser vistos na Figura 29 abaixo. Para toxicidade humana tem-se um ponto interessante para se analisar pois para este fator a mudança de combustível de B7 para B100 praticamente igualou o fator mesmo para tecnologias diferentes, ou seja, versões com e sem pós tratamento de gases. Entretanto, quando do uso do mesmo combustível (B7, por exemplo) o fator quase dobra quando se compara as tecnologias fase P5 e fase P7.

Já para o aquecimento global, pode-se notar a grande influência do processo de produção da soja seguido da produção do Biodiesel no resultado final. A forma como o *dataset* foi construído acaba trazendo um impacto maior para a utilização de biocombustível quando comparado com combustível fóssil. Apenas a rota 203 foi plotada e apenas para as versões biarticuladas. Os dados completos podem ser vistos no Anexo F.

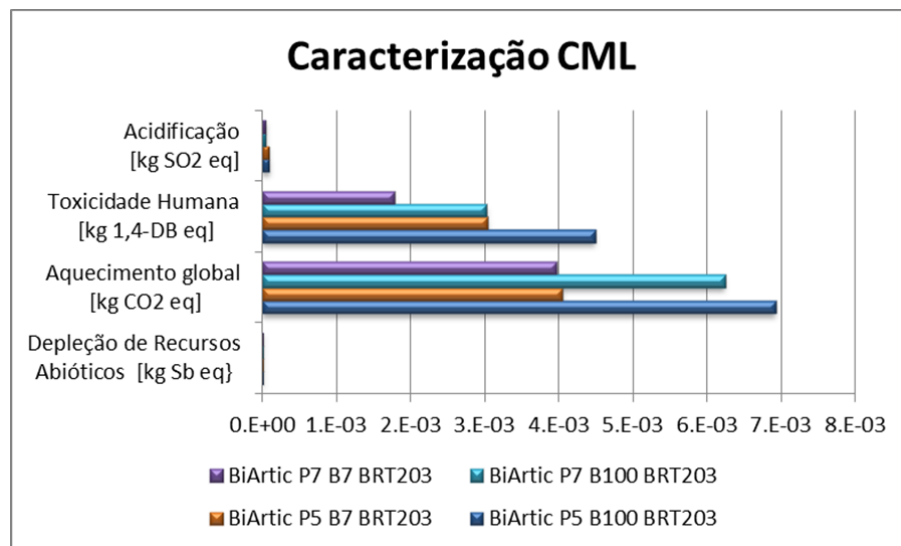


Figura 29: Fatores de Caracterização - CML  
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 30 traz o resultado normalizado. Através da normalização, pode se comparar numa mesma escala os diferentes impacto e nesse momento é possível verificar que a acidificação e a depleção de recursos abióticos tornam-se mais relevantes que o aquecimento global. A proporção de Biodiesel é de extrema importância para todos os fatores considerados.

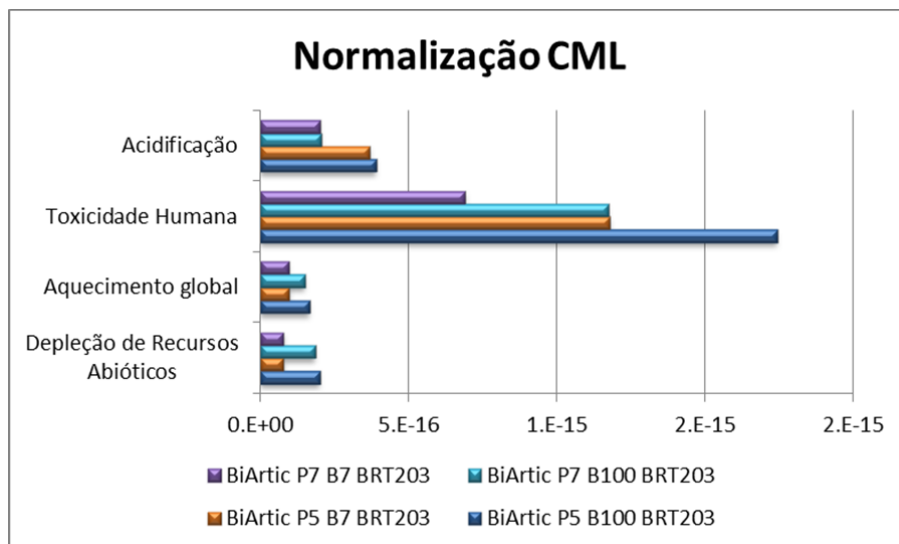


Figura 30: Normalização - CML  
Fonte: Autoria Própria.

Os resultados da pontuação única (mPt) obtidas através do método Eco-indicator 99, para a rota 203, podem ser vistos nas figuras abaixo. Com relação a saúde humana, os veículos com tecnologia P5 apresentaram os maiores impactos como esperado. A utilização de B100 na tecnologia P5 reduz significativamente os danos a saúde humana porém não o suficiente para se aproximar de qualquer outra alternativa estudada, proporcionando cerca de 3 vezes mais impacto.

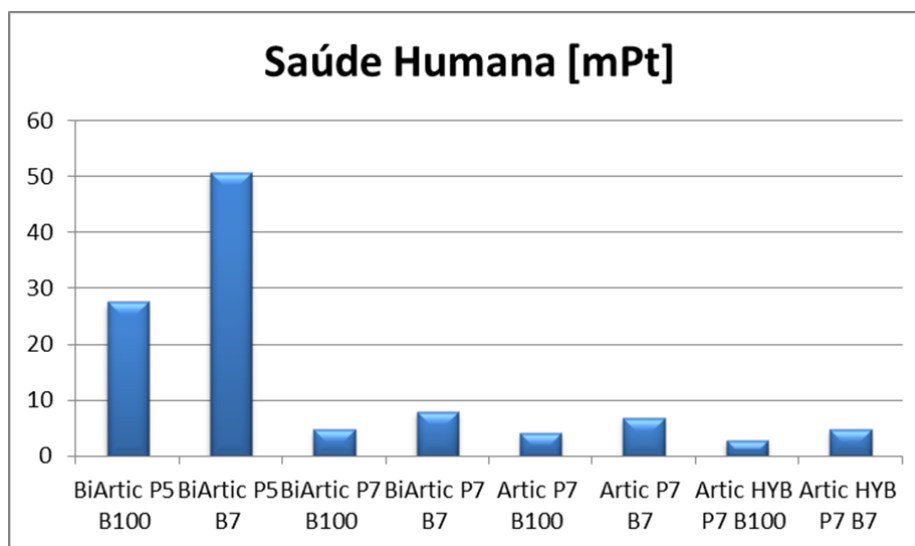


Figura 31: Saúde Humana – Pontuação Única - Eco-indicator.  
Fonte: Autoria Própria.

Para a qualidade do ecossistema os valores obtidos trouxeram pontuação negativa, a qual é atribuída a utilização de biocombustível devido ao método de AICV utilizado. O mesmo não pode ser observado nos outros dois métodos testados. Mesmo no caso do B7, onde 7% do combustível é biogênico, foi possível neutralizar o dano.

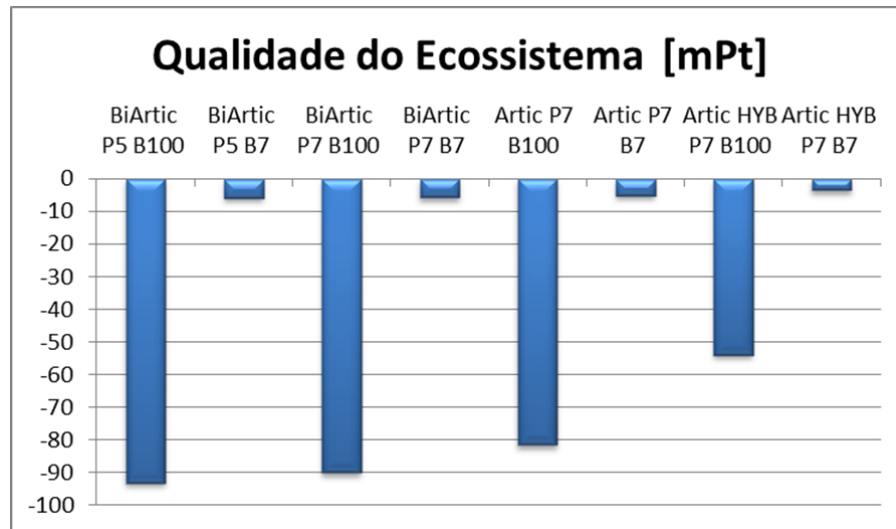


Figura 32: Qualidade do Ecossistema – Pontuação Única - Eco-indicator.  
Fonte: Autoria Própria.

Para a categoria de dano aos Recursos, os valores serão proporcionais a utilização do combustível fóssil. Quanto maior a utilização do mix de combustível B7 maior é o dano. Importante ressaltar que, neste caso, o dano está intrinsicamente ligado a quantidade de combustível consumido e por isso, mesmo com a introdução de tecnologias mais avançadas, a redução do dano é refletida apenas na diminuição do consumo de combustível.

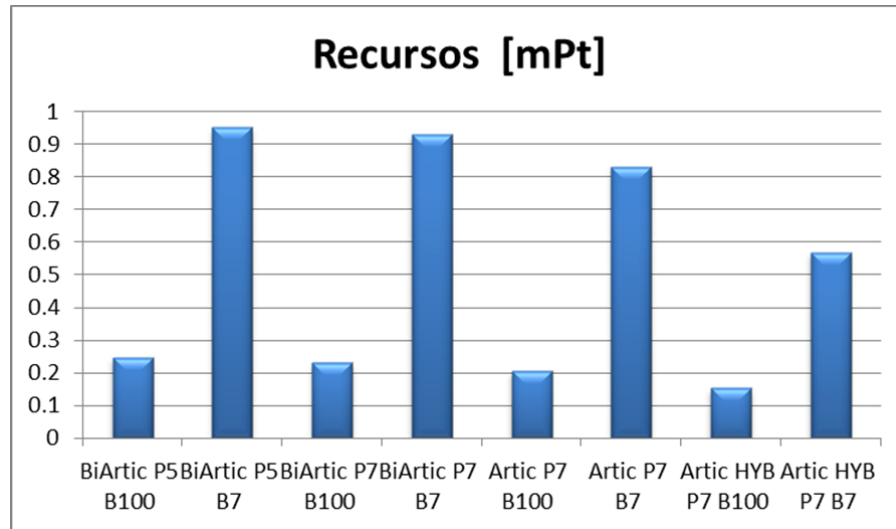


Figura 33: Recursos – Pontuação Única - Eco-indicator.  
Fonte: Autoria Própria.

#### 4.3.4 Inclusão dos dados no software

Os *datasets* já disponíveis no SimaPro provenientes do ecoinvent foram utilizados como referência durante este trabalho. As adaptações realizadas, sejam elas a simples atualização da quantidade de material, a adição de novos tipos de material ou mesmo a exclusão de materiais não utilizados podem ser vistas nos anexos A, B e C. Para toda e qualquer alteração um registro no campo comentário foi feito indicando a referência ou o motivo da alteração.

Para cada uma das 40 diferentes combinações simuladas, uma estrutura foi criada no programa com as respectivas características do conjunto. Para o combustível, foi criado um processo chamado “Mix de Combustível”, o qual contemplava tanto o B7 quanto o B100, combinando Diesel de baixo teor de enxofre com Biodiesel de soja (*dataset* já regionalizado para o Brasil). A adição de Arla 32 quando necessário, também foi feita neste processo numa proporção de 5% em relação ao consumo de combustível como já previamente descrito. O produto Arla32 precisou ser criado no programa pois não havia produto semelhante disponível.

O mix de eletricidade para a produção dos veículos utilizou somente dados de eletricidade do Brasil, dados estes já previamente disponíveis no ecoinvent.

## 5 CONCLUSÕES

A escolha de determinada tecnologia veicular como solução de transporte público nas cidades deve ser submetida para análise sob uma série de dimensões, incluindo tecnológica, de custos, social e também ambiental. Este trabalho apresentou diferentes tecnologias veiculares capazes de cumprir com as diferentes legislações de emissões vigentes no mercado brasileiro e global contextualizado a sua atual disponibilidade. Detalhes técnicos e de funcionamento foram brevemente descritos e criaram uma base para compreensão de suas diferenças e respectivas implicações.

A abordagem de avaliação de ciclo de vida do produto foi utilizada para comparar tais tecnologias dentro da realidade do sistema BRT de Curitiba. Neste sentido o levantamento de dados da frota, das corredores exclusivos e dos ciclos de operação foram detalhadamente apresentados e representam uma foto do estado atual do sistema BRT. O detalhamento dos ciclos de operação merece destaque aqui pois foram parte importante para uma boa qualidade dos resultados obtidos tanto da simulação de consumo de combustível quanto da avaliação dos impactos ambientais provenientes do ciclo de vida do produto. Tal detalhamento poderá ser usado por demais pesquisadores para avançar ainda mais no sentido de aprimorar o sistema de transporte da cidade.

Através das diferentes metodologias apresentadas para cada etapa do trabalho foi possível levantar dados dos materiais utilizados na produção, manutenção e descarte dos produtos assim como caracterizar as emissões veiculares para cada uma das diferentes combinações de tecnologia de motor, combustível e de tipo de veículo para os cinco principais corredores expressos de Curitiba.

Ressalta-se a importância em se ter dados de inventários nacionais para que mais estudos na área ambiental possam ser feitos para a realidade brasileira. Tal carência leva a utilização de dados globais, que não necessariamente levam a resultados coerentes com nossa realidade.

A atualização da frota da cidade é uma necessidade no que tange os potenciais benefícios descritos ao longo deste trabalho. A simples renovação dos

veículos para o nível de emissões exigidos pela legislação fase P7 trará benefícios significativos para a sociedade e o meio ambiente. Tecnologias de propulsão mais modernas como a híbrida apresentada assim como a utilização de biocombustíveis também trarão resultados relevantes para o contexto do sistema BRT de Curitiba.

Entretanto é importante ressaltar que a produção de biocombustíveis afeta significativamente os resultados. É necessário avançar na compreensão deste tema pois, conforme resultados aqui obtidos, seus impactos, dependendo do método e da categoria de dano considerados, são muitas vezes mais relevantes que os provenientes da queima de combustíveis fósseis.

A escolha do método de avaliação do ciclo de vida traz significativas variações dos resultados obtidos e é preciso ser cuidadosamente escolhido para se obter o melhor compromisso com a realidade possível. Da mesma forma, a taxa de ocupação tem papel significativo nos resultados. Neste trabalho uma ocupação média de 174 passageiros, condizente com a realidade curitibana foi utilizada. No *software* SimaPro é possível considerar frações de veículo ou de manutenção para manter a mesma relação pkm transportado porém na realidade seria necessário mais um veículo similar ou mesmo de menor capacidade para transportar o mesmo número de passageiros acarretando num aumento significativo dos impactos. Dessa forma é possível afirmar que a mudança por parte da população na escolha do modal de transporte utilizado, por si só traz benefícios para os veículos biarticulados. Quanto maior a taxa de ocupação, menor o impacto produzido comparativamente. Isso tudo sem contabilizar as emissões que deixaram de ser emitidas pela mudança de modal.

A fase de uso foi responsável pela maior impacto durante o ciclo de vida do produto. Os resultados aqui apresentados foram mais significativos para esta fase do que estudos internacionais de ACV de transporte público onde, normalmente, cerca de 70% é atribuído ao uso. Exatamente por esse motivo a busca por sistemas energeticamente mais eficientes é o que trará os maiores benefícios para o meio ambiente e sociedade como um todo.

Já dentro das categorias de impacto avaliadas, a saúde humana foi a mais afetada sendo que o principal contribuinte para tal resultado foi o material particulado, o qual possui elevada relevância dentro da metodologia de cálculo desta categoria. Para sanar esse problema as soluções tecnologicamente mais avançadas



como a utilização de veículos que cumprem a fase P7 e veículos híbridos trazem uma vantagem significativa frente a atual frota de ônibus curitibana

A execução de estudos utilizando a ferramenta ACV auxilia a tomada de decisões públicas e privadas ao quantificar de forma científica os impactos ambientais provenientes das diferentes tecnologias de produtos disponíveis. Quanto mais estudos nesta área forem feitos, maior será a qualidade dos resultados obtidos e mais forte será o embasamento da sociedade para tomar decisões sustentáveis em relação aos produtos consumidos.

## 6 ESTUDOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento deste trabalho ficou claro a necessidade de mais trabalhos correlatos para fechar os “*gaps*” no entendimento do ciclo de vida do produto e para isso as seguintes sugestões de estudos futuros são dadas:

- Diálogo maior com os fabricantes, montadores e encarroçadores de veículos para ser possível obter um inventário o mais próximo possível da realidade.
- Importância do ciclo de operação precisa ser ressaltada de forma a reduzir hipóteses simplificadoras nesse ponto tão crucial para o consumo dos veículos. Investigar as formas de utilização do produto para conhecer os extremos da sua utilização;
- Pesquisa sobre o final de vida do produto e descarte. Infelizmente não foi possível encontrar dados quaisquer a esse respeito aqui no Brasil e uma série de hipóteses precisaram ser levantadas;
- Melhor compreensão do *dataset* referente a produção de Biodiesel de soja no Brasil. Uma revisão dos valores do inventário pode indicar alguns pontos de melhoria e adaptação que podem afetar significativamente os resultados.
- Pesquisa sobre as principais diferenças entre os tipos de bateria de Li-Íon e seus respectivos impactos ao meio ambiente.

Conforme visto durante o desenvolvimento deste trabalho, a metodologia do ACV é bastante ampla e ambiciosa. Contemplar todos os impactos ambientais de todos os processos industriais torna necessário o levantamento de muitos dados complexos de serem obtidos. Todos os estudos verificados como, por exemplo, de Ou et al. (2010), Simonsen (2012), Garcia-Sanchez et al. (2013), Ally et al. (2007), Sundvor (2013) e Chester (2008) demonstraram que as fases de produção e descarte são importantes, claro, porém praticamente constantes na vida total do produto. Ou seja, dependendo do estudo a ser realizado, uma análise mais específica de uma das fases do ciclo de vida do produto, utilizando outras metodologias, pode ser mais indicada.

## REFERÊNCIAS

ALLY, J. and PRYOR, T. (2007). **Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems.** Journal of Power Sources, 170(2):401–411.

ANEXO à Portaria n.º 549, de 25 de outubro de 2012, **Medição de Emissão e Consumo em Veículos Elétricos Híbridos Leves (recarregáveis externamente ou não).** Disponível em <[http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/veiculos\\_hibridos.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/veiculos_hibridos.pdf)>. Acesso em 10/02/2015.

ARAUJO, C. A. M. , **Ônibus: Transporte Público Brasileiro.** São Paulo, Edição do Autor, 2012, 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 22241-1: Requisitos de qualidade - **Motores Diesel - Agente Redutor Líquido Automotivo – ARLA 32.**, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental - **Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura,** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental - **Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações** Rio de Janeiro, 2009 a.

BARLOW, T. J., LATHAM, S., MCCRAE, I. S., BOULTER, P. G.. **A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions.**(2009) England.

BOUREIMA, F. (2007). Clean Vehicle Research: LCA and Policy Measures Report **Task 1 .2 Overview of environmental vehicle assessments.**

BRASIL. 1º **Diagnóstico da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil** (2014). Disponível em <<http://www.energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2015/08/1-diagnostico-da-rede-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>>, acesso 18/05/2015.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal: Comunicação Inicial do Brasil.**(2010) Brasília: MCT, 9999. 86 p.

BRANCO, S. M.; MURGEL, E. **Poluição do Ar**. São Paulo, Editora Moderna, 2001, 87p.

BRAGA, et al., **Introdução a Engenharia Ambiental**, 2º Ed., Prentice Hall Brasil, 2005.

BRAVO D. M.; MEIRELLES P. S.; GIALONARDO W. 2014; **ANÁLISE DOS DESAFIOS PARA A DIFUSÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS NO BRASIL**, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica. Disponível em <[http://www.academia.edu/8552184/AN%C3%81LISE\\_DOS\\_DESAFIOS\\_PARA\\_A\\_DIFUS%C3%83O\\_DOS\\_VE%C3%8DCULOS\\_EL%C3%89TRICOS\\_E\\_H%C3%8DBRIDOS\\_NO\\_BRASIL](http://www.academia.edu/8552184/AN%C3%81LISE_DOS_DESAFIOS_PARA_A_DIFUS%C3%83O_DOS_VE%C3%8DCULOS_EL%C3%89TRICOS_E_H%C3%8DBRIDOS_NO_BRASIL)> Acesso em 30/01/2015

BURNHAM, A., M. WANG, Y. WU. 2006. **Development and applications of GREET 2.7—The transportation vehicle-cycle model.**ANL/ESD/06. Argonne, IL, USA: Argonne National Laboratory, University of Chicago, U.S. Department of Energy.

California Environmental Protection Agency – **Air Resources Board History**. Disponível em <<http://www.arb.ca.gov/knowzone/history.htm>>, acesso em 09/12/2014.

CAMUS, C., FARIAS, T., ESTEVES, J. (2011). **Potential impacts assessment of plug-in electric vehicles on the Portuguese energy market.** Energy Policy, 39(10), 5883–5897. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.042

CASTRO, B.; FERREIRA, T.. **Veículos Elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades.** BNDES Setorial 32, p. 267-310, 2010.

CASTRO, C.F.C., (2008). **Avaliação de fatores Intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus.** Dissertação (mestrado). – Escola Politécnica da universidade de São Paulo – São Paulo, 2008.

CETESB. **Portal do Governo do Estado de São Paulo.** Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 12/01/2015.

CHEVRON CORPORATION. **Diesel Fuels Technical Review** - San Ramon, 2007. Disponível em <[http://www.chevron.com/products/prodserv/fuels/documents/Diesel\\_Fuel\\_Tech\\_Review.pdf](http://www.chevron.com/products/prodserv/fuels/documents/Diesel_Fuel_Tech_Review.pdf)>. Acesso em 08/01/2015.

CHESTER, M. V., HORVATH, A., and Madanat, S. (2010). **Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions.** Atmospheric Environment, 44(8):1071–1079.

CHESTER, M. V. (2008). **Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States.** Doctor of philosophy, University of California, Berkeley.

CHESTER, M. V. and HORVATH, A. (2009). **Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains.** Environmental Research Letters, 4:024008.

CLEVER (Clean Vehicle Research) (2007). **Clean Vehicles Research, Overview of vehicle technologies Task 1 . 1.**

COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS DA UTFPR. **Normas para a Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2008.

CONMETRO, Resolução nº4, de 15 de Dezembro de 2010, **Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida**.

COPPE (2006), **Emissões de Dióxido de Carbono por Queima de Combustíveis: Abordagem Top-Down**. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/proclima/file/publicacoes/energia/portugues/1.pdf>>. Acesso em 10/04/2014

COONEY, G. A., **Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transport Buses**. (2011). Master Thesis Pittsburg

EMEP/EEA (2012) **Exhaust emissions from road transport**. Disponível em <<http://eea.europa.eu/emep-eea-guidebook>>. Acessado em 01/06/2016.

EMEP/EEA (2009) **Air Pollutant Emission Inventory Guidebook – 2009**. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>>. Acessado em 01/06/2016.

EPA (2013) **Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles**. <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/lithium\\_batteries\\_lca.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/lithium_batteries_lca.pdf)> Acessado em 28/10/2015

EU, 1999. "Directive 1999/96/EC", **Official Journal of the European Communities**, 16.2.2000, L 44/1. Disponível em <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:044:0001:0155:EN:PDF>> Acesso em 30/01/2015.

EKVALL, T., TILLMAN, A. M., MOLANDER, S. (2005) **Normative ethics and methodology for life cycle assessment**. Journal of Cleaner Production, n.13, 1225-1234, 2005.

ETC/ACC (2008) **Effect of biodiesel and bioethanol on exhaust emissions**. Disponível em <  
[http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC\\_TP\\_2008\\_5\\_biofuels\\_emissions.pdf](http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TP_2008_5_biofuels_emissions.pdf)>.  
 Acessado em 01/06/2016.

FREDRIKSSON, J., GELSO, E., ASBOGARD, M., HYGRELL, M. **On emission certification of heavy-duty hybrid electric vehicles using hardware-in-the-loop simulation**. (2011) Disponível em <  
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/HDH-05-06e.pdf>>.  
 Acesso em 19/01/2015.

GAINES L. and NELSON P., 2010, **Lithium-Ion Batteries: Examining Material Demand and Recycling Issues**, Conference Paper, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.

GARCIA-SANCHEZ, J. A., MARTINEZ, L. , J. M., MARTIN, L., FLORES HOLGADO, M. N., AGUILAR MORALES, H. (2013). **Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System**. Energy Conversion and Management, 74, 332–343. doi:10.1016/j.enconman.2013.05.023

GARG, B. D., S. H. CADLE, P. A. MULAWA, P. J. GROBLICKI, C. LAROO, G. A. PARR. 2000. **Brake wear particulate matter emissions**. Environmental Science & Technology 34(21): 4463–4469.

GOEDKOOOP M., HUIJUNGS K., HUIJBREGTS M. A. J., SCHRYVER A. D, STRUIS J., e ZELM R. V., 2009. **ReCiPe 2008**. Netherlands: Dutch Ministry of the Environment, The Hague

GOEDKOOP, M., SPRIENSMA, R. (2000) **The Eco-indicator 99 – A damage-oriented method for life cycle impact assessment**. Methodology report, second edition, version 17-4-2000. Pré Consultants B.V. Amersfoort, the Netherlands.

GREEN CITIES: **Cities and Climate Change in Brazil**. (2010).Disponível em  
<<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/12785/701860ESW0P1180ate0Change0in0Brazil.pdf?sequence=1>>. Acesso em 20/01/2015

HAWKINS, T. R., B. SINGH, G. MAJEAU-BETTEZ e STROMMAN, A. H. 2012. **Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles**.Journal of Industrial Ecology DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x Vol. 17, Issue 1, 158–160, Version of Record online: 16 JAN 2013

HENRIKSSON, M. W. (2008). **Engineering Report - LCA of powertrain**. Volvo Technology

IAP (2011), **Plano de Controle de Poluição Veicular – PCPV**, 95. Disponível em  
<[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao\\_ambiental/Legislacao\\_estadual/RESOLUCOES/PCPV\\_Estado\\_do\\_Parana.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/PCPV_Estado_do_Parana.pdf)> . Acesso em 21/01/2015

IAP (2013), **Relatório Anual da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba**. Disponível em  
<[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Relatorios\\_qualidade\\_do\\_ar/RELATORIO\\_AR\\_2013\\_final.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Relatorios_qualidade_do_ar/RELATORIO_AR_2013_final.pdf)>. Acesso em 21/01/2015

IEA (International Energy Agency). **Key World Energy Statistics**.OECD/IEA, Paris (2009). Disponível em  
<[http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key\\_stats\\_2009.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf)>.Acesso em 15/01/2015



IPPC (2006), **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em <[http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf)>. Acesso em 15/04/2014.

JUNIOR, Gilberto Benedet. **Avaliação de Incertezas em Inventários de Ciclo de Vida**, Florianópolis: UFSC, 2007.

KARAS, E. L. **Planejamento e Gerenciamento dos Serviços de Transporte. Curitiba: URBS, 2013. 45 p.** Disponível em:<[http://files-server.antp.org.br/\\_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/05/09/434A002D-B361-475B-BAD3-9FF52FBB71B9.pdf](http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/05/09/434A002D-B361-475B-BAD3-9FF52FBB71B9.pdf)> . Acesso em: 15/04/2016.

KATSUHIKO O. (2011). **Engenharia de Controle Moderno**, 5th Ed. 801p.

KLIUCININKAS, L., MATULEVICIUS, J., MARTUZEVICIUS, D. (2012). **The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolleybuses**. Journal of Environmental Management, 99, 98–103. doi:10.1016/j.jenvman.2012.01.012

KOREN, H. S. (1995). **Associations between Criteria Air Pollutants and Asthma**. Environmental Health Perspectives, 103, 235-242.

LARMINIE J., LOWRY J. (2003), **Electric Vehicle Technology Explained**, 1<sup>st</sup> Ed. 317p.

LAUDON N. P., SORIANO M. I., 2012. **Comparative LCA of Electrified Heavy Vehicles in Urban Use**. In collaboration with Volvo Group Trucks Technology Master Science Thesis [Technology, Society and the Environment, MPTSE]. Disponível em : <<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/169561/169561.pdf> >. Acesso em 22/10/2015.

LIMA, G.S., (2013). **METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL DAS EMISSÕES VEICULARES NA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA BRT** Dissertação (mestrado). – Instituto Militar de Engenharia. – Rio de Janeiro, 2013.

MAGDI K. KHAIR, HANNU, J. **Combustion in Diesel Engines**. Disponível em < [http://www.dieselnet.com/tech/diesel\\_comb.html](http://www.dieselnet.com/tech/diesel_comb.html) >, acesso em 18/01/2015.

MAJEAU-BETTEZ G., HAWKINS T. R., STROMMAN H. 2011, **Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles**. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45 (10), pp 4548–4554 DOI: 10.1021/es103607c April 20, 2011

MELO, T. C. C., GIONGO, A, BRITO, M. F. M., FREITAS, F. PIRES, L. C., FURLAN, C. A., JUNIOR, J. A. S., 2015, "**Efeito da Qualidade da Solução de Arla 32 na Eficiência do SCR, nas emissões de NOx e no Sistema de Injeção de Arala**", p. 399-417 . In: In Anais do XXIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA 2014 São Paulo: Blucher, 2015. ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/engpro-simea2015-PAP177

MMA (2011), **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Disponível em <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf)>. Acesso em 12/04/2014.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Histórico**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/governanca-ambiental/portal-nacional-de-licenciamento-ambiental/licenciamento-ambiental/hist%C3%B3rico>> Acesso em 26/04/2014.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Relatório Final**. Disponível em <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf)>. Acesso em 15/01/2015

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Relatório Final**. Disponível em <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdmx/~edisp/inea0031540.pdf>>. Acesso em 20/01/2015

MORETTI, Tassia. **MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DE INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA: ANÁLISE PARA CASOS BRASILEIROS**, Curitiba: UTFPR, 2011.

MF-583.R-0 - **MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA OPACIDADE EMITIDA POR VEÍCULOS AUTOMOTORES DO CICLO DIESEL**, (2002) Disponível em <[http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter\\_pres\\_aspres/documents/document/zwff/mda3/~edisp/inea\\_007907.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_pres_aspres/documents/document/zwff/mda3/~edisp/inea_007907.pdf)>. Acesso em 01/02/2015

NAEI, 2013 **Emission Factors for Alternative Vehicle Technologies**. Disponível em: <[http://naei.defra.gov.uk/resources/NAEI\\_Emission\\_factors\\_for\\_alternative\\_vehicle\\_technologies\\_Final\\_Feb\\_13.pdf](http://naei.defra.gov.uk/resources/NAEI_Emission_factors_for_alternative_vehicle_technologies_Final_Feb_13.pdf)>. Acesso em 01/06/2016.

NEOBUS 2015. **Catálogo de Peças\_brt Articulado e Biarticulado (com rampa)**. Disponível em <<http://www.neobus.net.br/Catalogos/28-catalogobrtarticuladobiarticulado.zip>>, acesso em 18/05/2015.

OLOFSSON Y., ROMARE M, 2013. **Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Buses**. Master Thesis. Disponível em <<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/180166/180166.pdf>> Acesso em 30/05/2016

PE INTERNATIONAL AG. (2012). **"GaBi 5."** Disponível em: [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com). Acesso em 22/03/2015.

PREFEITURA DE CURITIBA (2014), **Curitiba vai testar ônibus híbrido elétrico articulado na Linha Verde** Disponível em <<http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/curitiba-vai-testar-onibus-hibrido-eletrico-articulado-na-linha-verde/34565>> Acesso em 29/10/2014.

Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores **PROCONVE**, PROMOT 2ª edição – Atualizada IBAMA. Brasília, 2004. Disponível em <[http://www.ibama.gov.br/proconve/Legislacoes/manual\\_volumel.pdf](http://www.ibama.gov.br/proconve/Legislacoes/manual_volumel.pdf)> e <[http://www.ibama.gov.br/proconve/Legislacoes/manual\\_volumell.pdf](http://www.ibama.gov.br/proconve/Legislacoes/manual_volumell.pdf)>, acesso em 10/02/2015.

**PROGRAMA BRASILEIRO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – PBACV.** Disponível em:<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/resc000236.pdf>> Acesso em 20/04/2014.

PICKRELL, D. **Transport. Res. Part A** (1999), 33, 527-547.

ROSS, M, GOODWIN, R.; WATKINS, R.; WENZEL, T.; WANG, M. Q. J. **Air Waste Manage.** Assoc. (1998), 48, 502-515.

SAE J1711 - **Prática recomendada para medição de gases de escapamento e consumo de combustível para veículos híbridos elétricos, incluindo veículos híbridos plug-in** – Junho de 2010; Disponível em <>. Acesso em 10/02/2015.

SAMARAS, C. e MEISTERLING K..2008. **Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: Implications for policy.** Environmental Science & Technology 42(9): 3170–3176.

SANDÉN,B.A., KARLSTROM, M. **Positive and negative feedback in consequential life cycle assessment.**Journal of Cleaner Production, n.15, 1469-1481, 2007.

SILVA, C., ROSS, M., FARIAS, T. (2009). **Evaluation of energy consumption, emissions and cost of plug-in hybrid vehicles**. Energy Conversion and Management, 50(7), 1635–1643. doi:10.1016/j.enconman.2009.03.036

SIMAPRO 8. **ecoinvent**. Disponível em <<http://www.pre-sustainability.com/simapro>>. Acesso em 14/04/2014.

SONNEMANN, G.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. (2003) **Integrated life-cycle and risk assessment for industrial process**. Spain: CRC Press, 2003. 392 p.

SPIELMANN M., BAUER C., DONES R., e TUSCHMID M. (2007). **Transport Services**.ecoinvent report no.14. Technical report, ecoinvent centre, Villigen and Uster.

SULLIVAN J.L. e GAINES L., 2010.**A review of Battery Life Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Review**.Conference Paper, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.

SUNDEVOR C. F., (2013). **Life Cycle Assessment of Road Vehicles for Personal and Public Transportation**.Dissertação de Mestrado, Norwegian University of Technology and Science.

SVENSSON, R. (2011). Engineering Report – **Life Cycle Assessment for 8500LEA**. Volvo Technology

TADANO, Y. S., **Análise do impacto de mp 10 na saúde populacional: estudo de caso em Araucária, PR**. (2007).Curitiba, Dissertação de Mestrado.

TILLMAN, A. M. **Significance of decision-making for LCA methodology**. **Environmental Impact Assessment Review**, n.20, p.113-123,2000.

TONJE B., (2015). **Environmental Assessment of Bus Transport in the Trondheim.** Dissertação de Mestrado, Norwegian University of Technology and Science.

TRANSMILENIO. **Estudios de Preinversion Preinversión, 2014** <[http://www.transmilenio.gov.co/sites/default/files/01-estudios\\_previos\\_parte\\_1-v0.pdf](http://www.transmilenio.gov.co/sites/default/files/01-estudios_previos_parte_1-v0.pdf)>, acesso em 18/05/2015.

UNECE, **Development of a worldwide harmonized heavy-duty engine emission test cycle**, Tech. report, ECE-GRPE WHDC Working Group, 2001.

URBS, 2013. **Biodiesel – Informações sobre preço, consumo e emissões.** Disponível em <[http://www.antp.org.br/\\_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/05/09/434A002D-B361-475B-BAD3-9FF52FBB71B9.pdf](http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/05/09/434A002D-B361-475B-BAD3-9FF52FBB71B9.pdf)>

URBS, Rede Integrada de Transporte 2014a Disponível em <<http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/rede-integrada-de-transporte>>. Acesso em 12/01/2015.

URBS, 2013<sup>1</sup>. **Manual de Especificação de Frota.** Disponível em <[http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/pdf/transporte/rit/Manual\\_Caderno.pdf](http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/pdf/transporte/rit/Manual_Caderno.pdf)>, acesso em 18/05/2015.

VOLVO BUS COPORATION (2015a), **Fact Sheet.** Disponível em <<http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Downloads/Volvo-I-Shift-Euro6-Fact-Sheet-EN.pdf>>. Acessado em 01/06/2016.

VOLVO BUS COPORATION (2015b), **Volvo Hybrid Driveline Euro6Fact Sheet.** Disponível em <<http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Downloads/Volvo-Hybrid-Driveline-Euro6-Fact-Sheet-EN.pdf>>. Acessado em 01/06/2015.

VOLVO (2014c). **Relatório de Sustentabilidade 2013/2014**. Disponível em <[http://www.volvo.com.br/relatoriosocial/relatorio2014/static/files/relatorio\\_sustentabilidade20132014.pdf](http://www.volvo.com.br/relatoriosocial/relatorio2014/static/files/relatorio_sustentabilidade20132014.pdf)>, acesso em 18/05/2015.

VOLVO BUS COPORATION(2015d).**Volvo Buses Latin America**. Disponível em <<http://www.volvobuses.com/bus/brazil/es-br/linea-productos/urbanos/Pages/default.aspx> >. Acesso em 18/05/2016

VOLVO BUS COPORATION (2015e). **Volvo B290R Urbano**. Disponível em <<http://www.volvobuses.com/BUS/BRAZIL/PT-BR/LINHA-PRODUTOS/URBANOS/B290R-B290RLE/PAGES/DEFAULT.ASPX>>. Acesso em 18/05/2016

VOLVO BUS COPORATION (2016f). Entrevista com engenheiro de produto da Volvo Bus Corporation. Curitiba, Brasil.

WEIDEMA B. P. and WESNAES M. S. **Data Quality Management for Life Cycle Inventories - An Example of Using Data Quality Indicators**. Journal of Cleaner Production 4(3-4): 167-174. 1996.

YOUNG, K.; WANG, C.; WANG, L. Y.; STRUNZ, K. **Electric Vehicle Battery Technologies**. In: Garcia-Valle, Rodrigo; Lopes, João A.P. Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks. 1ed. New York: Springer, 2013.p. 15-56

OU XM, ZHANG XL, CHANG SY. (2010) **Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations**. Energy Policy 2010;38(1):406–18.

## APÊNDICE A – ALTERAÇÕES DO DATASETS UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO - PRODUÇÃO.

<b>Process</b>			
<b>Category type</b>	transport		
<b>Process identifier</b>	Standard49664900095		
<b>Type</b>	Unit process		
<b>Process name *</b>	bus production RoW		
<b>System description</b>	Ecoinvent v3		
<b>Products</b>			
<b>Bus {RoW}  production   Alloc Def, U eletricidade BR materias BiArtic Eu3 **</b>	1	p	
<b>Resources</b>			
Water, well, in ground, RoW	1.64	m3	Assumindo que a água utilizada em Curitiba se refere ao todo.
<b>Materials/fuels</b>			
Ethylene glycol {GLO}  market for   Alloc Def, U	60	kg	
Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for   Alloc Def, U	891.6	kg	Todos os termoplásticos foram enquadrados aqui.
Road vehicle factory {GLO}  market for   Alloc Def, U	8.73E-07	p	ecoinvent
Nitric acid, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.098486	kg	ecoinvent
Tempering, flat glass {GLO}  market for   Alloc Def, U	1070.4	kg	Baseado no B340M
Lime, hydrated, packed {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.309955	kg	ecoinvent
Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	68	kg	Baseado no B340M
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}  market for   Alloc Def, U	59.47	kg	Baseado no B340M
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Alloc Def, U	43.1	kg	Baseado no B340M. Proporção similar ao do dataset original.
Sheet rolling, steel {GLO}  market for   Alloc Def, U	1724.74	kg	Baseado no B340M
Section bar rolling, steel {GLO}  market for   Alloc Def, U	776.13	kg	Baseado no B340M
Reinforcing steel {GLO}  market for   Alloc Def, U	6079.7	kg	Baseado no B340M
Copper {GLO}  market for   Alloc Def, U	44	kg	Baseado no B340M (reduzido do cobre wiring deste dataset)
Cast iron {GLO}  market for   Alloc Def, U	1661.28	kg	Baseado no B340M (menos 502kg de ferro gusa deste dataset)
Sulfuric acid {GLO}  market for   Alloc Def, U	38.1	kg	Baseado no B340M
Pig iron {GLO}  market for   Alloc Def, U	501.9275	kg	ecoinvent
Refrigerant R134a {GLO}  market for   Alloc Def, U	1.999711	kg	ecoinvent
Pitch {GLO}  market for   Alloc Def, U	117.6	kg	Levantamento de dados do B340M (Bitumen)
Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO}  market for   Alloc Def, U	262.7	kg	Todos os Termofixos foram enquadrados aqui.
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW}  market for   Alloc Def, U	0.188973	kg	ecoinvent
Brass {GLO}  market for   Alloc Def, U	2.999567	kg	ecoinvent
Synthetic rubber {GLO}  market for   Alloc Def, U	1180.3	kg	Baseado no B340M
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.380945	kg	ecoinvent
Lead {GLO}  market for   Alloc Def, U	84	kg	Baseado no B340M.
Plywood, for outdoor use {RoW}  market for   Alloc Def, U	2.64	m3	Baseado no B340M
Lubricating oil {GLO}  market for   Alloc Def, U	150	kg	Baseado no B340M
Wire drawing, copper {GLO}  market for   Alloc Def, U	108.9843	kg	ecoinvent
Aluminium, cast alloy {GLO}  market for   Alloc Def, U	3457.5	kg	Baseado no B340M.
Diesel {RoW}  market for   Alloc Def, U	166.9759	kg	ecoinvent
Acetic acid, without water, in 98% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.06599	kg	ecoinvent
Tap water {CA-QC}  market for   Alloc Def, U	30.72475	kg	ecoinvent



Tap water {RoW}  market for   Alloc Def, U	16366.91	kg	ecoinvent
<b>Electricity/heat</b>			
Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.05	MW h	Relatório de Sustent. 2013/2014
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  market for   Alloc Def, U	0.053	MW h	Relatório de Sustent. 2013/2014
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  market for heat, district or industrial, natural gas   Alloc Def, U	0.23	MW h	Relatório de Sustent. 2013/2014
Electricity, medium voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	0.5	MW h	Relatório de Sustent. 2013/2014
<b>Emissions to air</b>			
Mercury	3.45E-09	kg	ecoinvent
Carbon monoxide, fossil	0.97286	kg	ecoinvent
Nitrogen oxides	5.999134	kg	ecoinvent
Xylene	0.005509	kg	ecoinvent
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0.021197	kg	ecoinvent
Selenium	1.73E-06	kg	ecoinvent
Lead	1.9E-08	kg	ecoinvent
Carbon dioxide, fossil	72.54	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Toluene	0.005509	kg	ecoinvent
Dinitrogen monoxide	0.022297	kg	ecoinvent
Particulates, < 2.5 um	0.253963	kg	ecoinvent
Ammonia	0.022297	kg	ecoinvent
Sulfur dioxide	0.031	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	7.868864	kg	ecoinvent
Benzene	0.013098	kg	ecoinvent
Chromium	0.000293	kg	ecoinvent
Copper	0.000293	kg	ecoinvent
Nickel	1.21E-05	kg	ecoinvent
Methane, fossil	0.016498	kg	ecoinvent
Water/m3	12.88314	m3	ecoinvent
Zinc	0.000173	kg	ecoinvent
Particulates, > 10 um	0.010898	kg	ecoinvent
Cadmium	1.73E-06	kg	ecoinvent
<b>Emissions to water</b>			
DOC, Dissolved Organic Carbon	0.055092	kg	ecoinvent
BOD5, Biological Oxygen Demand	0.693	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
COD, Chemical Oxygen Demand	1.205	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
TOC, Total Organic Carbon	0.055092	kg	ecoinvent
Cyanide	0.006	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Zinc	0.55	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Tin	0.5	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Silver	0.05	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Mercury	0.001	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Lead	0.1	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Copper	0.1	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Chromium	0.05	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
Cadmium	0.05	kg	Relatório de Sustent. 2013/2014
<b>Waste to treatment</b>			
Wastewater from lorry production {GLO}  market for   Alloc Def, U	2.179685	m3	ecoinvent
Used bus {GLO}  market for   Alloc Def, U	0.999856	p	ecoinvent
Wastewater, average {GLO}  market for   Alloc Def, U	1.64	m3	Relatório de Sustent. 2013/2014

\* Processo usado como referência para adaptação ao estudo de caso desta dissertação;

\*\* Adaptado para cada tipo de produto e de tecnologia;

## APÊNDICE B - ALTERAÇÕES DO DATASETS UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – USO.

<b>Process</b>			
<b>Category type</b>	transport		
<b>Process identifier *</b>	Standard49664900075		
<b>Type</b>	Unit process		
<b>Process name</b>	operation, regular bus/km/CH		
<b>System description</b>	Ecoinvent		
<b>Products</b>			
<b>Operation, regular bus/CH U Biarticulado Eu3 BRT203 **</b>	1	km	
<b>Materials/fuels</b>			
Arla32 BR	CC*0,05	kg	5%v de Arla32
Mix de Combustível BR B100	CC	kg	Simulações via GSP
<b>Emissions to air</b>			
Carbon dioxide, fossil	(CC*2,83-CO/1000)/1000	kg	GSP e fator de emissão
Sulfur dioxide	CC*0,02/1000	kg	Conforme referências no trabalho
Cadmium	0,01*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Copper	1,7*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Chromium	0,05*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Nickel	0,07*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Zinc	CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Lead	1,1E-7*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Selenium	0,01*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Mercury	2E-5*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Chromium VI	1E-4*CC/1000000	kg	Conforme referências no trabalho
Carbon monoxide, fossil	CO/1000	kg	Conforme referências no trabalho
Nitrogen oxides	NOX/1000	kg	Conforme referências no trabalho
Particulates, < 2.5 um	MP*0,7898	kg	Mantida a proporção do ecoinvent
Particulates, > 10 um	MP*0,1007	kg	Mantida a proporção do ecoinvent
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	MP*0,1095	kg	Mantida a proporção do ecoinvent
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0.00074883	kg	ecoinvent
Methane, fossil	HC/1000/40,8695	kg	Conforme referências no trabalho
Benzene	HC/1000*0,07/100	kg	Conforme referências no trabalho
Toluene	HC/1000*0,01/100	kg	Conforme referências no trabalho
Xylene	HC/1000*0,88/100	kg	Conforme referências no trabalho
Formaldehyde	HC/1000*8,4/100	kg	Conforme referências no trabalho
Acetaldehyde	HC/1000*4,57/100	kg	Conforme referências no trabalho
Ammonia	0.000005	kg	ecoinvent
Dinitrogen monoxide	0.000013219	kg	ecoinvent
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	0.000001	kg	ecoinvent
Heat, waste	15.776	MJ	ecoinvent
<b>Emissions to water</b>			
Zinc	5.0189E-06	kg	ecoinvent
Copper	1.1893E-07	kg	ecoinvent
Cadmium	1.7771E-09	kg	ecoinvent

Chromium	8.4754E-09	kg	ecoinvent
Nickel	2.2966E-08	kg	ecoinvent
Lead	7.3135E-08	kg	ecoinvent
<b>Emissions to soil</b>			
Zinc	5.0189E-06	kg	ecoinvent
Copper	1.1893E-07	kg	ecoinvent
Cadmium	1.7771E-09	kg	ecoinvent
Chromium	8.4754E-09	kg	ecoinvent
Nickel	2.2966E-08	kg	ecoinvent
Lead	7.3135E-08	kg	ecoinvent
<b>Input parameters</b>			
CC	0.81	kg	Consumo Diesel
CO	3.5653	kg	Calculado Fator de Emissões
HC	0.4357	kg	Calculado Fator de Emissões
NOX	18.7377	kg	Calculado Fator de Emissões
MP	0.3169	kg	Calculado Fator de Emissões

\* Processo usado como referência para adaptação ao estudo de caso desta dissertação;

\*\* Adaptado para cada rota, tipo de tecnologia e tipo de combustível;

## APÊNDICE C - ALTERAÇÕES DO DATASETS UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – MANUTENÇÃO.

<b>Process</b>			
<b>Category type</b>	transport		
<b>Process identifier *</b>	Standard49664900 031		
<b>Type</b>	Unit process		
<b>Process name</b>	maintenance, bus RoW		
<b>System description</b>	Ecoinvent		
<b>Products</b>			
<b>Maintenance, bus {RoW}  processing   Alloc Def, U BRA BIARTIC EU3 **</b>	1	p	
<b>Materials/fuels</b>			
Lubricating oil {GLO}  market for   Alloc Def, U	2335	kg	Todos os óleos e graxas foram alocados aqui.
Reinforcing steel {GLO}  market for   Alloc Def, U	3954.4	kg	Todos os aços foram alocados aqui.
Lead {GLO}  market for   Alloc Def, U	231.2	kg	Baseado na coleta de dados
Carbon black, at plant/GLO U	4044.01	kg	Baseado na coleta de dados
Ethylene glycol, at plant/RER U	144	kg	Baseado na coleta de dados
Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for   Alloc Def, U	1.39997	kg	ecoinvent
Paper, woodfree, uncoated {RoW}  market for   Alloc Def, U	201.04	kg	Assumindo que a media filltrante é desse material
Synthetic rubber {GLO}  market for   Alloc Def, U	8439.84	kg	Baseado na coleta de dados
Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U	104.83	kg	Proveniente das baterias
Chemicals inorganic, at plant/GLO U	1230.8	kg	Proveniente da composição dos pneus.
Tap water {RoW}  market for   Alloc Def, U	483989.6	kg	ecoinvent
<b>Electricity/heat</b>			
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  market for   Alloc Def, U	38379.17	MJ	Alocado tudo para RoW
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  market for heat, district or industrial, natural gas   Alloc Def, U	38379.17	MJ	Alocado tudo para RoW
Electricity, low voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	67798.54	kWh	Alocado tudo para BR
<b>Emissions to air</b>			
Water/m3	72.59843	m3	ecoinvent
<b>Waste to treatment</b>			
Wastewater, average {GLO}  market for   Alloc Def, U	483.9896	m3	ecoinvent
Waste plastic, mixture {GLO}  market for   Alloc Def, U	54.89882	kg	ecoinvent
Waste mineral oil {GLO}  market for   Alloc Def, U	2335	kg	Baseado no input de óleo.

\* Processo usado como referência para adaptação ao estudo de caso desta dissertação;

\*\* Adaptado para cada tipo de tecnologia e tipo de combustível;

## APÊNDICE D – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA AS CATEGORIAS MIDPOINT – IMPACT 2002+ V2.12.

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+

Indicador: Caracterização

Tipo do Veículo	Carcinogens [kg C2H3Cl eq]	Non-carcinogens [kg C2H3Cl eq]	Respiratory inorganics [kg PM2.5 eq]	Ionizing radiation [Bq C-14 eq]	Ozone layer depletion [kg CFC-11 eq]	Respiratory organics [kg C2H4 eq]	Aquatic ecotoxicity [kg TEG water]
BiArtic P5 B100 BRT203	3.23E-04	-6.77E-04	7.78E-04	4.16E-02	7.49E-10	1.50E-05	-2.35E+00
BiArtic P5 B100 BRT303	3.07E-04	-6.24E-04	7.28E-04	3.95E-02	7.17E-10	1.42E-05	-2.17E+00
BiArtic P5 B100 BRT503	3.39E-04	-7.30E-04	8.35E-04	4.36E-02	7.81E-10	1.58E-05	-2.52E+00
BiArtic P5 B100 BRT550	2.85E-04	-5.53E-04	6.59E-04	3.68E-02	6.75E-10	1.32E-05	-1.93E+00
BiArtic P5 B100 BRT603	3.18E-04	-6.59E-04	7.60E-04	4.09E-02	7.39E-10	1.47E-05	-2.29E+00
BiArtic P5 B7 BRT203	1.25E-04	7.28E-05	1.46E-03	1.26E-01	3.32E-09	7.77E-06	6.26E-01
BiArtic P5 B7 BRT303	1.20E-04	7.33E-05	1.36E-03	1.18E-01	3.13E-09	7.48E-06	5.99E-01
BiArtic P5 B7 BRT503	1.30E-04	7.21E-05	1.56E-03	1.34E-01	3.54E-09	8.11E-06	6.57E-01
BiArtic P5 B7 BRT550	1.14E-04	7.41E-05	1.23E-03	1.08E-01	2.86E-09	7.08E-06	5.63E-01
BiArtic P5 B7 BRT603	1.23E-04	7.30E-05	1.42E-03	1.23E-01	3.24E-09	7.65E-06	6.15E-01
BiArtic P7 B100 BRT203	2.87E-04	-6.70E-04	1.26E-04	3.79E-02	7.07E-10	1.41E-05	-2.30E+00
BiArtic P7 B100 BRT303	2.73E-04	-6.26E-04	1.18E-04	3.62E-02	6.81E-10	1.34E-05	-2.15E+00
BiArtic P7 B100 BRT503	3.06E-04	-7.32E-04	1.35E-04	4.03E-02	7.44E-10	1.50E-05	-2.50E+00
BiArtic P7 B100 BRT550	2.52E-04	-5.55E-04	1.07E-04	3.34E-02	6.38E-10	1.24E-05	-1.91E+00
BiArtic P7 B100 BRT603	2.82E-04	-6.52E-04	1.23E-04	3.72E-02	6.97E-10	1.38E-05	-2.24E+00
BiArtic P7 B7 BRT203	1.23E-04	7.24E-05	2.29E-04	1.23E-01	3.24E-09	7.49E-06	6.15E-01
BiArtic P7 B7 BRT303	1.19E-04	7.30E-05	2.14E-04	1.15E-01	3.05E-09	7.21E-06	5.89E-01
BiArtic P7 B7 BRT503	1.28E-04	7.18E-05	2.46E-04	1.31E-01	3.47E-09	7.82E-06	6.47E-01
BiArtic P7 B7 BRT550	1.13E-04	7.38E-05	1.93E-04	1.05E-01	2.79E-09	6.82E-06	5.52E-01
BiArtic P7 B7 BRT603	1.21E-04	7.27E-05	2.24E-04	1.20E-01	3.17E-09	7.38E-06	6.05E-01
Artic P7 B100 BRT203	2.60E-04	-6.02E-04	1.08E-04	3.39E-02	6.43E-10	1.30E-05	-2.07E+00
Artic P7 B100 BRT303	2.47E-04	-5.57E-04	1.00E-04	3.22E-02	6.17E-10	1.23E-05	-1.92E+00
Artic P7 B100 BRT503	2.76E-04	-6.55E-04	1.16E-04	3.59E-02	6.75E-10	1.38E-05	-2.25E+00
Artic P7 B100 BRT550	2.30E-04	-5.04E-04	9.21E-05	3.01E-02	5.85E-10	1.16E-05	-1.75E+00

Artic P7 B100 BRT603	2.55E-04	-5.84E-04	9.26E-05	3.32E-02	6.33E-10	1.27E-05	-2.01E+00
Artic P7 B7 BRT203	1.11E-04	7.08E-05	1.95E-04	1.10E-01	2.92E-09	6.96E-06	5.65E-01
Artic P7 B7 BRT303	1.07E-04	7.14E-05	1.83E-04	1.03E-01	2.73E-09	6.69E-06	5.38E-01
Artic P7 B7 BRT503	1.16E-04	7.01E-05	2.10E-04	1.18E-01	3.14E-09	7.29E-06	5.96E-01
Artic P7 B7 BRT550	1.02E-04	7.20E-05	1.68E-04	9.54E-02	2.54E-09	6.41E-06	5.12E-01
Artic P7 B7 BRT603	1.09E-04	7.11E-05	1.90E-04	1.07E-01	2.84E-09	6.85E-06	5.54E-01
Artic Híb. P7 B100 BRT203	2.05E-04	-3.74E-04	7.55E-05	2.73E-02	5.53E-10	1.01E-05	-1.38E+00
Artic Híb. P7 B100 BRT303	1.97E-04	-3.48E-04	7.07E-05	2.63E-02	5.37E-10	9.69E-06	-1.29E+00
Artic Híb. P7 B100 BRT503	2.16E-04	-4.10E-04	8.09E-05	2.87E-02	5.74E-10	1.06E-05	-1.49E+00
Artic Híb. P7 B100 BRT550	1.83E-04	-3.04E-04	6.47E-05	2.46E-02	5.10E-10	9.05E-06	-1.14E+00
Artic Híb. P7 B100 BRT603	2.02E-04	-3.66E-04	7.36E-05	2.70E-02	5.47E-10	9.95E-06	-1.35E+00
Artic Híb. P7 B7 BRT203	9.78E-05	9.76E-05	1.37E-04	7.66E-02	2.04E-09	5.71E-06	4.58E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT303	9.53E-05	9.79E-05	1.28E-04	7.22E-02	1.93E-09	5.54E-06	4.42E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT503	1.01E-04	9.71E-05	1.47E-04	8.23E-02	2.19E-09	5.93E-06	4.79E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT550	9.19E-05	9.84E-05	1.17E-04	6.65E-02	1.78E-09	5.32E-06	4.21E-01
Artic Híb. P7 B7 BRT603	9.69E-05	9.77E-05	1.33E-04	7.51E-02	2.00E-09	5.65E-06	4.53E-01

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+  
Indicador: Caracterização

Tipo do Veículo	Terrestrial ecotoxicity [kg TEG soil]	Terrestrial acid/nutri [kg SO2 eq]	Land occupation [m2org.arable]	Aquatic acidification [kg SO2 eq]	Aquatic eutrophication [kg PO4 P-lim]	Global warming [kg CO2 eq]	Non-renewable energy [MJ primary]	Mineral extraction [MJ surplus]
BiArtic P5 B100 BRT203	-2.57E+00	7.41E-04	2.07E-02	1.15E-04	1.34E-05	5.79E-03	8.12E-02	6.93E-04
BiArtic P5 B100 BRT303	-2.38E+00	6.94E-04	1.93E-02	1.08E-04	1.25E-05	5.48E-03	7.69E-02	6.70E-04
BiArtic P5 B100 BRT503	-2.76E+00	7.93E-04	2.21E-02	1.23E-04	1.43E-05	6.10E-03	8.54E-02	7.16E-04
BiArtic P5 B100 BRT550	-2.13E+00	6.29E-04	1.74E-02	9.82E-05	1.13E-05	5.06E-03	7.12E-02	6.40E-04
BiArtic P5 B100 BRT603	-2.51E+00	7.24E-04	2.03E-02	1.13E-04	1.31E-05	5.69E-03	7.98E-02	6.86E-04
BiArtic P5 B7 BRT203	1.58E-01	6.82E-04	1.39E-03	1.08E-04	2.28E-06	3.80E-03	2.73E-01	2.36E-04
BiArtic P5 B7 BRT303	1.60E-01	6.40E-04	1.31E-03	1.01E-04	2.15E-06	3.61E-03	2.57E-01	2.30E-04
BiArtic P5 B7 BRT503	1.55E-01	7.32E-04	1.49E-03	1.15E-04	2.43E-06	4.02E-03	2.92E-01	2.42E-04
BiArtic P5 B7 BRT550	1.64E-01	2.64E-04	1.19E-03	5.16E-05	1.97E-06	3.34E-03	2.34E-01	2.23E-04
BiArtic P5 B7 BRT603	1.59E-01	6.67E-04	1.36E-03	1.05E-04	2.23E-06	3.72E-03	2.66E-01	2.34E-04
BiArtic P7	-2.49E+00	2.74E-04	2.00E-02	5.39E-05	1.28E-05	5.13E-03	7.44E-02	4.70E-04

B100 BRT203								
BiArtic P7 B100 BRT303	-2.33E+00	2.58E-04	1.88E-02	5.08E-05	1.21E-05	4.87E-03	7.08E-02	4.51E-04
BiArtic P7 B100 BRT503	-2.71E+00	2.94E-04	2.17E-02	5.78E-05	1.39E-05	5.49E-03	7.93E-02	4.97E-04
BiArtic P7 B100 BRT550	-2.08E+00	2.34E-04	1.70E-02	4.62E-05	1.09E-05	4.46E-03	6.51E-02	4.21E-04
BiArtic P7 B100 BRT603	-2.43E+00	2.68E-04	1.95E-02	5.27E-05	1.26E-05	5.03E-03	7.29E-02	4.63E-04
BiArtic P7 B7 BRT203	1.59E-01	2.47E-04	1.36E-03	5.17E-05	2.23E-06	3.70E-03	2.66E-01	2.34E-04
BiArtic P7 B7 BRT303	1.61E-01	2.32E-04	1.27E-03	4.86E-05	2.10E-06	3.51E-03	2.50E-01	2.28E-04
BiArtic P7 B7 BRT503	1.56E-01	2.65E-04	1.46E-03	5.52E-05	2.38E-06	3.92E-03	2.86E-01	2.40E-04
BiArtic P7 B7 BRT550	1.65E-01	2.11E-04	1.15E-03	4.44E-05	1.92E-06	3.25E-03	2.28E-01	2.21E-04
BiArtic P7 B7 BRT603	1.60E-01	2.42E-04	1.32E-03	5.05E-05	2.18E-06	3.62E-03	2.60E-01	2.32E-04
Artic P7 B100 BRT203	-2.24E+00	2.39E-04	1.81E-02	4.75E-05	1.16E-05	4.61E-03	6.62E-02	4.12E-04
Artic P7 B100 BRT303	-2.08E+00	2.24E-04	1.70E-02	4.46E-05	1.09E-05	4.35E-03	6.27E-02	3.93E-04
Artic P7 B100 BRT503	-2.43E+00	2.56E-04	1.95E-02	5.08E-05	1.25E-05	4.92E-03	7.05E-02	4.35E-04
Artic P7 B100 BRT550	-1.89E+00	2.06E-04	1.55E-02	4.12E-05	9.99E-06	4.04E-03	5.84E-02	3.71E-04
Artic P7 B100 BRT603	-2.18E+00	2.16E-04	1.77E-02	4.42E-05	1.13E-05	4.50E-03	6.48E-02	4.05E-04
Artic P7 B7 BRT203	1.60E-01	2.15E-04	1.22E-03	4.53E-05	1.99E-06	3.29E-03	2.38E-01	1.97E-04
Artic P7 B7 BRT303	1.63E-01	2.01E-04	1.14E-03	4.25E-05	1.86E-06	3.10E-03	2.22E-01	1.92E-04
Artic P7 B7 BRT503	1.57E-01	2.30E-04	1.32E-03	4.87E-05	2.14E-06	3.51E-03	2.58E-01	2.04E-04
Artic P7 B7 BRT550	1.65E-01	1.86E-04	1.05E-03	3.94E-05	1.73E-06	2.91E-03	2.06E-01	1.86E-04
Artic P7 B7 BRT603	1.61E-01	2.09E-04	1.19E-03	4.42E-05	1.94E-06	3.21E-03	2.32E-01	1.95E-04
Artic Hib. P7 B100 BRT203	-1.51E+00	1.73E-04	1.27E-02	3.50E-05	8.31E-06	3.51E-03	5.16E-02	4.38E-04
Artic Hib. P7 B100 BRT303	-1.41E+00	1.63E-04	1.20E-02	3.32E-05	7.86E-06	3.35E-03	4.95E-02	4.26E-04
Artic Hib. P7 B100 BRT503	-1.63E+00	1.84E-04	1.37E-02	3.73E-05	8.90E-06	3.72E-03	5.44E-02	4.53E-04
Artic Hib. P7 B100 BRT550	-1.25E+00	1.49E-04	1.08E-02	3.05E-05	7.12E-06	3.10E-03	4.59E-02	4.07E-04
Artic Hib. P7 B100 BRT603	-1.48E+00	1.69E-04	1.25E-02	3.44E-05	8.16E-06	3.46E-03	5.09E-02	4.34E-04
Artic Hib. P7 B7 BRT203	1.78E-01	1.53E-04	8.19E-04	3.25E-05	1.48E-06	2.48E-03	1.63E-01	2.84E-04
Artic Hib. P7 B7 BRT303	1.80E-01	1.44E-04	7.68E-04	3.07E-05	1.40E-06	2.37E-03	1.54E-01	2.81E-04
Artic Hib. P7 B7 BRT503	1.76E-01	1.64E-04	8.86E-04	3.48E-05	1.58E-06	2.64E-03	1.76E-01	2.88E-04
Artic Hib. P7 B7 BRT550	1.82E-01	1.32E-04	7.01E-04	2.84E-05	1.30E-06	2.22E-03	1.41E-01	2.76E-04
Artic Hib. P7 B7 BRT603	1.79E-01	1.49E-04	8.02E-04	3.19E-05	1.45E-06	2.45E-03	1.60E-01	2.83E-04



## APÊNDICE E – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – ARTIC HÍB B7 EU5 VERSUS EU6.

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+

Indicador: Caracterização

Tecnologia: Euro5

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>BRT203</b>	<b>BRT303</b>	<b>BRT503</b>	<b>BRT550</b>	<b>BRT603</b>
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.0001	9.78E-05	0.000104	9.44E-05	9.95E-05
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	9.72E-05	9.75E-05	9.67E-05	9.8E-05	9.73E-05
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0.000137	0.000128	0.000147	0.000118	0.000134
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0.080889	0.076561	0.086661	0.070789	0.079446
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2.16E-09	2.04E-09	2.31E-09	1.89E-09	2.12E-09
Respiratory organics	kg C2H4 eq	5.87E-06	5.71E-06	6.09E-06	5.49E-06	5.82E-06
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	0.473648	0.457902	0.494643	0.436907	0.4684
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0.176755	0.178223	0.174798	0.18018	0.177244
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0.000156	0.000147	0.000167	0.000135	0.000152
Land occupation	m2org.arable	0.000869	0.000819	0.000936	0.000751	0.000852
Aquatic acidification	kg SO2 eq	3.36E-05	3.17E-05	3.59E-05	2.94E-05	3.29E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1.56E-06	1.48E-06	1.66E-06	1.38E-06	1.53E-06
Global warming	kg CO2 eq	0.002597	0.002484	0.002748	0.002333	0.002559
Non-renewable energy	MJ primary	0.172934	0.163338	0.185729	0.150544	0.169736
Mineral extraction	MJ surplus	0.000287	0.000284	0.000291	0.000279	0.000286

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+

Indicador: Caracterização

Tecnologia: Euro6

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>BRT203</b>	<b>BRT303</b>	<b>BRT503</b>	<b>BRT550</b>	<b>BRT603</b>
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.0001	9.78E-05	0.000104	9.44E-05	9.95E-05
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	9.72E-05	9.75E-05	9.67E-05	9.8E-05	9.73E-05
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	1.43E-05	1.42E-05	1.45E-05	1.4E-05	1.43E-05
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0.080889	0.076561	0.086661	0.070789	0.079446
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2.16E-09	2.04E-09	2.31E-09	1.89E-09	2.12E-09
Respiratory organics	kg C2H4 eq	5.86E-06	5.7E-06	6.08E-06	5.48E-06	5.81E-06
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	0.473648	0.457902	0.494643	0.436907	0.4684
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0.176755	0.178223	0.174798	0.18018	0.177244
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	8.01E-05	7.71E-05	8.4E-05	7.32E-05	7.91E-05
Land occupation	m2org.arable	0.000869	0.000819	0.000936	0.000751	0.000852
Aquatic acidification	kg SO2 eq	2.39E-05	2.29E-05	2.53E-05	2.15E-05	2.36E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1.56E-06	1.48E-06	1.66E-06	1.38E-06	1.53E-06
Global warming	kg CO2 eq	0.002593	0.002481	0.002744	0.002331	0.002556
Non-renewable energy	MJ primary	0.172934	0.163338	0.185729	0.150544	0.169736
Mineral extraction	MJ surplus	0.000287	0.000284	0.000291	0.000279	0.000286

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+  
 Indicador: Avaliação de Danos  
 Tecnologia: Euro5

Categoria de danos	Unidade	BRT203	BRT303	BRT503	BRT550	BRT603
Human health	DALY	9.67E-08	9.04E-08	1.04E-07	8.28E-08	9.41E-08
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0.002531	0.002478	0.002601	0.002407	0.002513
Climate change	kg CO2 eq	0.002597	0.002484	0.002748	0.002333	0.002559
Resources	MJ primary	0.173221	0.163622	0.18602	0.150823	0.170022

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+  
 Indicador: Avaliação de Danos  
 Tecnologia: Euro6

Categoria de danos	Unidade	BRT203	BRT303	BRT503	BRT550	BRT603
Human health	DALY	1.06E-08	1.05E-08	1.08E-08	1.03E-08	1.06E-08
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0.002452	0.002405	0.002515	0.002342	0.002437
Climate change	kg CO2 eq	0.002593	0.002481	0.002744	0.002331	0.002556
Resources	MJ primary	0.173221	0.163622	0.18602	0.150823	0.170022

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+  
 Indicador: Pontuação Única  
 Tecnologia: Euro5

Categoria de danos	Unidade	BRT203	BRT303	BRT503	BRT550	BRT603
Total	μPt	15.21767	14.25758	16.30055	13.08401	14.82204
Human health	μPt	13.6308	12.7492	14.60912	11.68021	13.26136
Ecosystem quality	μPt	0.184772	0.180858	0.189891	0.175705	0.183438
Climate change	μPt	0.26231	0.250891	0.277528	0.23567	0.258502
Resources	μPt	1.139796	1.076634	1.224012	0.992418	1.118742

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+  
 Indicador: Pontuação Única  
 Tecnologia: Euro6

Categoria de danos	Unidade	BRT203	BRT303	BRT503	BRT550	BRT603
Total	μPt	3.076619	2.982312	3.202363	2.856568	3.045183
Human health	μPt	1.495854	1.479537	1.517609	1.457781	1.490415
Ecosystem quality	μPt	0.17903	0.175583	0.183627	0.170987	0.177881
Climate change	μPt	0.261939	0.250557	0.277115	0.235382	0.258145
Resources	μPt	1.139796	1.076634	1.224012	0.992418	1.118742

## APÊNDICE F – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – BIODIESEL.

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+

Indicador: Caracterização

Rota: BRT550

Categoria de impacto	Unidade	BioDiesel 5%	BioDiesel 13%
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.000252	0.000268
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	-0.00055	-0.00061
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0.000107	0.000107
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0.033439	0.035491
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	6.38E-10	6.7E-10
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1.24E-05	1.32E-05
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	-1.91467	-2.09107
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	-2.08068	-2.27056
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0.000234	0.000241
Land occupation	m2org.arable	0.016958	0.018369
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4.62E-05	4.82E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1.09E-05	1.18E-05
Global warming	kg CO2 eq	0.004458	0.004767
Non-renewable energy	MJ primary	0.065122	0.069387
Mineral extraction	MJ surplus	0.000421	0.000444

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+

Indicador: Avaliação de Danos

Rota: BRT550

Categoria de danos	Unidade	BioDiesel 5%	BioDiesel 13%
Human health	DALY	7.38E-08	7.4E-08
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0.002173	0.002207
Climate change	kg CO2 eq	0.004458	0.004767
Resources	MJ primary	0.065543	0.069831

Método: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+

Indicador: Pontuação Única

Rota: BRT550

Categoria de danos	Unidade	BioDiesel 5%	BioDiesel 13%
Total	µPt	11.45011	11.53474
Human health	µPt	10.40997	10.43263
Ecosystem quality	µPt	0.158641	0.161123
Climate change	µPt	0.450224	0.481498
Resources	µPt	0.431273	0.459488

## APÊNDICE G – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – ECO-INDICADOR 99.

Método: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H

Indicador: Caracterização

Tipo do Veículo	Abiotic depletion	Abiotic depletion (fossil fuels)	Global warming (GWP100a)	Ozone layer depletion (ODP)	Human toxicity	Fresh water aquatic ecotox.
	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
BiArtic P5 B100 BRT203	4.18E-08	0.077895	0.006927	7.49E-10	0.004491	0.00261
BiArtic P5 B100 BRT303	4.00E-08	7.38E-02	6.54E-03	7.17E-10	4.27E-03	2.48E-03
BiArtic P5 B100 BRT503	4.37E-08	8.20E-02	7.31E-03	7.81E-10	4.72E-03	2.74E-03
BiArtic P5 B100 BRT550	3.75E-08	6.83E-02	6.03E-03	6.75E-10	3.97E-03	2.31E-03
BiArtic P5 B100 BRT603	4.12E-08	7.65E-02	6.80E-03	7.39E-10	4.42E-03	2.57E-03
BiArtic P5 B7 BRT203	1.63E-08	2.70E-01	4.04E-03	3.32E-09	3.04E-03	8.61E-04
BiArtic P5 B7 BRT303	1.60E-08	2.54E-01	3.84E-03	3.13E-09	2.88E-03	8.31E-04
BiArtic P5 B7 BRT503	1.66E-08	2.89E-01	4.29E-03	3.54E-09	3.22E-03	8.96E-04
BiArtic P5 B7 BRT550	1.56E-08	2.32E-01	3.56E-03	2.86E-09	2.59E-03	7.90E-04
BiArtic P5 B7 BRT603	1.61E-08	2.64E-01	3.96E-03	3.24E-09	2.98E-03	8.49E-04
BiArtic P7 B100 BRT203	3.87E-08	7.14E-02	6.24E-03	7.07E-10	3.02E-03	2.23E-03
BiArtic P7 B100 BRT303	3.71E-08	6.80E-02	5.92E-03	6.81E-10	2.88E-03	2.12E-03
BiArtic P7 B100 BRT503	4.09E-08	7.62E-02	6.69E-03	7.44E-10	3.23E-03	2.38E-03
BiArtic P7 B100 BRT550	3.46E-08	6.25E-02	5.41E-03	6.38E-10	2.64E-03	1.95E-03
BiArtic P7 B100 BRT603	3.81E-08	7.00E-02	6.11E-03	6.97E-10	2.96E-03	2.19E-03
BiArtic P7 B7 BRT203	1.61E-08	2.64E-01	3.96E-03	3.24E-09	1.78E-03	8.47E-04
BiArtic P7 B7 BRT303	1.59E-08	2.48E-01	3.76E-03	3.05E-09	1.70E-03	8.18E-04
BiArtic P7 B7 BRT503	1.65E-08	2.83E-01	4.20E-03	3.47E-09	1.87E-03	8.83E-04
BiArtic P7 B7 BRT550	1.55E-08	2.26E-01	3.48E-03	2.79E-09	1.59E-03	7.77E-04
BiArtic P7 B7 BRT603	1.60E-08	2.58E-01	3.88E-03	3.17E-09	1.75E-03	8.36E-04
Artic P7 B100 BRT203	3.47E-08	0.063603	0.005615	6.43E-10	0.002687	0.002006
Artic P7 B100 BRT303	3.31E-08	6.02E-02	5.29E-03	6.17E-10	2.54E-03	1.90E-03
Artic P7 B100 BRT503	3.65E-08	6.77E-02	6.00E-03	6.75E-10	2.86E-03	2.14E-03
Artic P7 B100 BRT550	3.12E-08	5.61E-02	4.91E-03	5.85E-10	2.37E-03	1.77E-03
Artic P7 B100 BRT603	3.40E-08	6.22E-02	5.49E-03	6.33E-10	2.61E-03	1.96E-03
Artic P7 B7 BRT203	1.42E-08	2.36E-01	3.53E-03	2.92E-09	1.55E-03	7.49E-04
Artic P7 B7 BRT303	1.39E-08	2.20E-01	3.33E-03	2.73E-09	1.47E-03	7.19E-04
Artic P7 B7 BRT503	1.45E-08	2.55E-01	3.77E-03	3.14E-09	1.64E-03	7.84E-04
Artic P7 B7 BRT550	1.37E-08	2.04E-01	3.12E-03	2.54E-09	1.39E-03	6.90E-04
Artic P7 B7 BRT603	1.41E-08	2.30E-01	3.45E-03	2.84E-09	1.52E-03	7.37E-04
Artic HÍb. P7	2.93E-08	4.94E-02	4.24E-03	5.53E-10	2.40E-03	1.65E-03

B100 BRT203						
Artic Híb. P7 B100 BRT303	2.83E-08	4.73E-02	4.04E-03	5.37E-10	2.32E-03	1.59E-03
Artic Híb. P7 B100 BRT503	3.05E-08	5.21E-02	4.49E-03	5.74E-10	2.52E-03	1.74E-03
Artic Híb. P7 B100 BRT550	2.68E-08	4.39E-02	3.72E-03	5.10E-10	2.17E-03	1.48E-03
Artic Híb. P7 B100 BRT603	2.90E-08	4.87E-02	4.17E-03	5.47E-10	2.37E-03	1.63E-03
Artic Híb. P7 B7 BRT203	1.48E-08	1.62E-01	2.67E-03	2.04E-09	1.57E-03	7.52E-04
Artic Híb. P7 B7 BRT303	1.46E-08	1.52E-01	2.54E-03	1.93E-09	1.52E-03	7.35E-04
Artic Híb. P7 B7 BRT503	1.50E-08	1.74E-01	2.83E-03	2.19E-09	1.63E-03	7.76E-04
Artic Híb. P7 B7 BRT550	1.44E-08	1.39E-01	2.38E-03	1.78E-09	1.46E-03	7.11E-04
Artic Híb. P7 B7 BRT603	1.47E-08	0.158349	0.002625	2E-09	0.001551	0.000747

Método: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H  
Indicador: Caracterização

	Marine aquatic ecotoxicity	Terrestrial ecotoxicity	Photochemical oxidation	Acidification	Eutrophication
Tipo do Veículo	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
BiArtic P5 B100 BRT203	6.787212	4.43E-06	1.25E-05	9.33E-05	8.48E-05
BiArtic P5 B100 BRT303	6.45E+00	4.66E-06	1.17E-05	8.76E-05	7.93E-05
BiArtic P5 B100 BRT503	7.13E+00	4.21E-06	1.33E-05	9.95E-05	9.05E-05
BiArtic P5 B100 BRT550	5.99E+00	4.96E-06	1.06E-05	7.97E-05	7.18E-05
BiArtic P5 B100 BRT603	6.67E+00	4.51E-06	1.22E-05	9.13E-05	8.30E-05
BiArtic P5 B7 BRT203	2.74E+00	9.40E-06	3.38E-06	8.81E-05	2.36E-05
BiArtic P5 B7 BRT303	2.65E+00	9.10E-06	3.19E-06	8.27E-05	2.22E-05
BiArtic P5 B7 BRT503	2.86E+00	9.76E-06	3.61E-06	9.43E-05	2.52E-05
BiArtic P5 B7 BRT550	2.51E+00	8.67E-06	2.92E-06	4.66E-05	1.28E-05
BiArtic P5 B7 BRT603	2.70E+00	9.28E-06	3.31E-06	8.61E-05	2.31E-05
BiArtic P7 B100 BRT203	6.01E+00	1.21E-06	1.13E-05	4.86E-05	7.08E-05
BiArtic P7 B100 BRT303	5.73E+00	1.41E-06	1.07E-05	4.59E-05	6.67E-05
BiArtic P7 B100 BRT503	6.41E+00	9.41E-07	1.23E-05	5.21E-05	7.64E-05
BiArtic P7 B100 BRT550	5.27E+00	1.72E-06	9.65E-06	4.18E-05	6.02E-05
BiArtic P7 B100 BRT603	5.90E+00	1.29E-06	1.11E-05	4.76E-05	6.92E-05
BiArtic P7 B7 BRT203	2.70E+00	9.12E-06	2.78E-06	4.79E-05	1.32E-05
BiArtic P7 B7 BRT303	2.61E+00	8.83E-06	2.62E-06	4.51E-05	1.24E-05
BiArtic P7 B7 BRT503	2.82E+00	9.47E-06	2.97E-06	5.12E-05	1.40E-05
BiArtic P7 B7 BRT550	2.47E+00	8.42E-06	2.40E-06	4.12E-05	1.14E-05
BiArtic P7 B7 BRT603	2.67E+00	9.00E-06	2.72E-06	4.68E-05	1.29E-05
Artic P7 B100 BRT203	5.372372	1.05E-06	1.02E-05	4.3E-05	6.38E-05
Artic P7 B100 BRT303	5.09E+00	1.25E-06	9.60E-06	4.04E-05	5.98E-05
Artic P7 B100 BRT503	5.71E+00	8.16E-07	1.10E-05	4.60E-05	6.87E-05
Artic P7 B100 BRT550	4.75E+00	1.48E-06	8.82E-06	3.73E-05	5.49E-05
Artic P7 B100 BRT603	5.26E+00	1.13E-06	9.99E-06	4.05E-05	6.18E-05
Artic P7 B7 BRT203	2.36E+00	8.18E-06	2.48E-06	4.22E-05	1.16E-05
Artic P7 B7 BRT303	2.27E+00	7.89E-06	2.32E-06	3.95E-05	1.09E-05

Artic P7 B7 BRT503	2.48E+00	8.53E-06	2.66E-06	4.53E-05	1.24E-05
Artic P7 B7 BRT550	2.17E+00	7.59E-06	2.16E-06	3.67E-05	1.01E-05
Artic P7 B7 BRT603	2.32E+00	8.06E-06	2.41E-06	4.11E-05	1.13E-05
Artic Híb. P7 B100 BRT203	4.49E+00	2.58E-06	7.31E-06	3.19E-05	4.56E-05
Artic Híb. P7 B100 BRT303	4.32E+00	2.70E-06	6.91E-06	3.03E-05	4.31E-05
Artic Híb. P7 B100 BRT503	4.71E+00	2.42E-06	7.83E-06	3.40E-05	4.88E-05
Artic Híb. P7 B100 BRT550	4.03E+00	2.89E-06	6.27E-06	2.79E-05	3.91E-05
Artic Híb. P7 B100 BRT603	4.43E+00	2.62E-06	7.17E-06	3.14E-05	4.48E-05
Artic Híb. P7 B7 BRT203	2.32E+00	7.41E-06	1.77E-06	3.03E-05	8.70E-06
Artic Híb. P7 B7 BRT303	2.26E+00	7.24E-06	1.68E-06	2.86E-05	8.25E-06
Artic Híb. P7 B7 BRT503	2.40E+00	7.65E-06	1.90E-06	3.24E-05	9.26E-06
Artic Híb. P7 B7 BRT550	2.19E+00	7.01E-06	1.55E-06	2.65E-05	7.68E-06
Artic Híb. P7 B7 BRT603	2.302671	7.36E-06	1.74E-06	2.97E-05	8.54E-06

Método: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H

Indicador: Avaliação de Danos

	Saúde Humana	Qualidade do Ecossistema	Recursos
Tipo do Veículo	[DALY]	[PDF*m2*yr]	[MJ primário]
BiArtic P5 B100 BRT203	6.04E-07	-1.33E+00	9.37E-03
BiArtic P5 B100 BRT303	5.66E-07	-1.24E+00	8.87E-03
BiArtic P5 B100 BRT503	6.48E-07	-1.42E+00	9.87E-03
BiArtic P5 B100 BRT550	5.12E-07	-1.12E+00	8.20E-03
BiArtic P5 B100 BRT603	5.91E-07	-1.30E+00	9.20E-03
BiArtic P5 B7 BRT203	1.11E-06	-8.50E-02	3.59E-02
BiArtic P5 B7 BRT303	1.04E-06	-7.98E-02	3.38E-02
BiArtic P5 B7 BRT503	1.19E-06	-9.13E-02	3.85E-02
BiArtic P5 B7 BRT550	9.36E-07	-7.28E-02	3.08E-02
BiArtic P5 B7 BRT603	1.09E-06	-8.29E-02	3.51E-02
BiArtic P7 B100 BRT203	1.07E-07	-1.29E+00	8.70E-03
BiArtic P7 B100 BRT303	1.01E-07	-1.21E+00	8.28E-03
BiArtic P7 B100 BRT503	1.15E-07	-1.39E+00	9.28E-03
BiArtic P7 B100 BRT550	9.10E-08	-1.09E+00	7.61E-03
BiArtic P7 B100 BRT603	1.05E-07	-1.26E+00	8.53E-03
BiArtic P7 B7 BRT203	1.76E-07	-8.33E-02	3.51E-02
BiArtic P7 B7 BRT303	1.65E-07	-7.81E-02	3.29E-02
BiArtic P7 B7 BRT503	1.89E-07	-8.97E-02	3.76E-02
BiArtic P7 B7 BRT550	1.49E-07	-7.07E-02	3.00E-02
BiArtic P7 B7 BRT603	1.72E-07	-8.12E-02	3.42E-02
Artic P7 B100 BRT203	9.24E-08	-1.17E+00	7.74E-03
Artic P7 B100 BRT303	8.61E-08	-1.09E+00	7.33E-03
Artic P7 B100 BRT503	9.91E-08	-1.26E+00	8.25E-03
Artic P7 B100 BRT550	7.90E-08	-9.99E-01	6.82E-03
Artic P7 B100 BRT603	8.06E-08	-1.14E+00	7.58E-03
Artic P7 B7 BRT203	1.51E-07	-7.49E-02	3.14E-02
Artic P7 B7 BRT303	1.41E-07	-6.96E-02	2.93E-02
Artic P7 B7 BRT503	1.61E-07	-8.12E-02	3.39E-02

Artic P7 B7 BRT550	1.29E-07	-6.44E-02	2.71E-02
Artic P7 B7 BRT603	1.47E-07	-7.28E-02	3.05E-02
Artic Híb. P7 B100 BRT203	6.51802E-08	-0.817583205	0.006055369
Artic Híb. P7 B100 BRT303	6.10878E-08	-0.772165031	0.005803831
Artic Híb. P7 B100 BRT503	6.98E-08	-8.78E-01	6.39E-03
Artic Híb. P7 B100 BRT550	5.59E-08	-6.96E-01	5.38E-03
Artic Híb. P7 B100 BRT603	6.36E-08	-8.02E-01	5.97E-03
Artic Híb. P7 B7 BRT203	1.06E-07	-4.96E-02	2.15E-02
Artic Híb. P7 B7 BRT303	9.92E-08	-4.64E-02	2.02E-02
Artic Híb. P7 B7 BRT503	1.14E-07	-5.38E-02	2.32E-02
Artic Híb. P7 B7 BRT550	9.09E-08	-4.22E-02	1.85E-02
Artic Híb. P7 B7 BRT603	1.03E-07	-4.85E-02	2.10E-02

## APÊNDICE H – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO – CML.

Método: CML –IA baseline V3.02 / World 2000

Indicador: Caracterização

Categoria de impacto	Abiotic depletion	Abiotic depletion (fossil fuels)	Global warming (GWP100a)	Ozone layer depletion (ODP)	Human toxicity	Fresh water aquatic ecotox.
	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
BiArtic P5 B100 BRT203	2E-16	2.05E-16	1.66E-16	3.3E-18	1.74E-15	1.1E-15
BiArtic P5 B100 BRT303	1.91E-16	1.94E-16	1.56E-16	3.16E-18	1.66E-15	1.05E-15
BiArtic P5 B100 BRT503	2.09E-16	2.16E-16	1.75E-16	3.44E-18	1.83E-15	1.16E-15
BiArtic P5 B100 BRT550	1.79E-16	1.8E-16	1.44E-16	2.98E-18	1.54E-15	9.75E-16
BiArtic P5 B100 BRT603	1.97E-16	2.01E-16	1.62E-16	3.26E-18	1.71E-15	1.09E-15
BiArtic P5 B7 BRT203	7.77E-17	7.11E-16	9.67E-17	1.46E-17	1.18E-15	3.64E-16
BiArtic P5 B7 BRT303	7.64E-17	6.69E-16	9.18E-17	1.38E-17	1.12E-15	3.52E-16
BiArtic P5 B7 BRT503	7.92E-17	7.61E-16	1.02E-16	1.56E-17	1.25E-15	3.79E-16
BiArtic P5 B7 BRT550	7.47E-17	6.11E-16	8.51E-17	1.26E-17	1E-15	3.34E-16
BiArtic P5 B7 BRT603	7.72E-17	6.94E-16	9.47E-17	1.43E-17	1.16E-15	3.59E-16
BiArtic P7 B100 BRT203	1.85E-16	1.88E-16	1.49E-16	3.12E-18	1.17E-15	9.44E-16
BiArtic P7 B100 BRT303	1.78E-16	1.79E-16	1.41E-16	3E-18	1.12E-15	8.98E-16
BiArtic P7 B100 BRT503	1.96E-16	2E-16	1.6E-16	3.28E-18	1.25E-15	1.01E-15
BiArtic P7 B100 BRT550	1.66E-16	1.64E-16	1.29E-16	2.82E-18	1.03E-15	8.24E-16
BiArtic P7 B100 BRT603	1.82E-16	1.84E-16	1.46E-16	3.07E-18	1.15E-15	9.25E-16
BiArtic P7 B7 BRT203	7.72E-17	6.94E-16	9.47E-17	1.43E-17	6.9E-16	3.58E-16
BiArtic P7 B7 BRT303	7.6E-17	6.52E-16	8.99E-17	1.35E-17	6.59E-16	3.46E-16
BiArtic P7 B7 BRT503	7.87E-17	7.44E-16	1E-16	1.53E-17	7.26E-16	3.73E-16
BiArtic P7 B7 BRT550	7.42E-17	5.94E-16	8.31E-17	1.23E-17	6.16E-16	3.29E-16
BiArtic P7 B7 BRT603	7.67E-17	6.77E-16	9.28E-17	1.4E-17	6.78E-16	3.53E-16
Artic P7 B100 BRT203	1.66E-16	1.67E-16	1.34E-16	2.84E-18	1.04E-15	8.48E-16
Artic P7 B100 BRT303	1.58E-16	1.58E-16	1.27E-16	2.72E-18	9.86E-16	8.02E-16
Artic P7 B100 BRT503	1.75E-16	1.78E-16	1.43E-16	2.98E-18	1.11E-15	9.04E-16
Artic P7 B100 BRT550	1.49E-16	1.47E-16	1.17E-16	2.58E-18	9.18E-16	7.47E-16
Artic P7 B100 BRT603	1.63E-16	1.64E-16	1.31E-16	2.79E-18	1.01E-15	8.3E-16
Artic P7 B7 BRT203	6.78E-17	6.21E-16	8.43E-17	1.29E-17	6E-16	3.17E-16
Artic P7 B7 BRT303	6.66E-17	5.79E-16	7.95E-17	1.2E-17	5.7E-16	3.04E-16
Artic P7 B7 BRT503	6.93E-17	6.71E-16	9.01E-17	1.39E-17	6.35E-16	3.32E-16
Artic P7 B7 BRT550	6.53E-17	5.38E-16	7.47E-17	1.12E-17	5.39E-16	2.92E-16
Artic P7 B7 BRT603	6.73E-17	6.04E-16	8.24E-17	1.25E-17	5.88E-16	3.12E-16



Artic HYB P7 B100 BRT203	1.4E-16	1.3E-16	1.01E-16	2.44E-18	9.33E-16	6.98E-16
Artic HYB P7 B100 BRT303	1.35E-16	1.24E-16	9.66E-17	2.37E-18	8.98E-16	6.71E-16
Artic HYB P7 B100 BRT503	1.46E-16	1.37E-16	1.07E-16	2.53E-18	9.78E-16	7.35E-16
Artic HYB P7 B100 BRT550	1.28E-16	1.15E-16	8.9E-17	2.25E-18	8.42E-16	6.25E-16
Artic HYB P7 B100 BRT603	1.38E-16	1.28E-16	9.97E-17	2.41E-18	9.21E-16	6.89E-16
Artic HYB P7 B7 BRT203	7.06E-17	4.25E-16	6.37E-17	9E-18	6.08E-16	3.18E-16
Artic HYB P7 B7 BRT303	6.99E-17	4E-16	6.08E-17	8.5E-18	5.9E-16	3.11E-16
Artic HYB P7 B7 BRT503	7.16E-17	4.58E-16	6.76E-17	9.67E-18	6.32E-16	3.28E-16
Artic HYB P7 B7 BRT550	6.89E-17	3.66E-16	5.69E-17	7.84E-18	5.66E-16	3.01E-16
Artic HYB P7 B7 BRT603	7.04E-17	4.16E-16	6.27E-17	8.84E-18	6.02E-16	3.16E-16

Método: CML –IA baseline V3.02 / World 2000

Indicador: Caracterização

Categoria de impacto	Marine aquatic ecotoxicity	Terrestrial ecotoxicity	Photochemical oxidation	Acidificati on	Eutrophicati on
	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
BiArtic P5 B100 BRT203	3.5E-14	4.06E-18	3.4E-16	3.91E-16	5.36E-16
BiArtic P5 B100 BRT303	3.33E-14	4.26E-18	3.18E-16	3.67E-16	5.01E-16
BiArtic P5 B100 BRT503	3.68E-14	3.85E-18	3.62E-16	4.17E-16	5.72E-16
BiArtic P5 B100 BRT550	3.09E-14	4.53E-18	2.88E-16	3.34E-16	4.54E-16
BiArtic P5 B100 BRT603	3.44E-14	4.12E-18	3.33E-16	3.83E-16	5.24E-16
BiArtic P5 B7 BRT203	1.42E-14	8.6E-18	9.19E-17	3.69E-16	1.49E-16
BiArtic P5 B7 BRT303	1.37E-14	8.32E-18	8.67E-17	3.47E-16	1.41E-16
BiArtic P5 B7 BRT503	1.47E-14	8.93E-18	9.82E-17	3.95E-16	1.6E-16
BiArtic P5 B7 BRT550	1.3E-14	7.94E-18	7.94E-17	1.95E-16	8.1E-17
BiArtic P5 B7 BRT603	1.4E-14	8.49E-18	8.99E-17	3.61E-16	1.46E-16
BiArtic P7 B100 BRT203	3.1E-14	1.11E-18	3.09E-16	2.04E-16	4.47E-16
BiArtic P7 B100 BRT303	2.96E-14	1.29E-18	2.91E-16	1.92E-16	4.21E-16
BiArtic P7 B100 BRT503	3.31E-14	8.61E-19	3.33E-16	2.18E-16	4.83E-16
BiArtic P7 B100 BRT550	2.72E-14	1.58E-18	2.63E-16	1.75E-16	3.8E-16
BiArtic P7 B100 BRT603	3.04E-14	1.18E-18	3.01E-16	1.99E-16	4.37E-16
BiArtic P7 B7 BRT203	1.4E-14	8.34E-18	7.56E-17	2.01E-16	8.33E-17
BiArtic P7 B7 BRT303	1.35E-14	8.08E-18	7.13E-17	1.89E-16	7.86E-17
BiArtic P7 B7 BRT503	1.45E-14	8.66E-18	8.08E-17	2.14E-16	8.88E-17
BiArtic P7 B7 BRT550	1.28E-14	7.7E-18	6.53E-17	1.72E-16	7.21E-17
BiArtic P7 B7 BRT603	1.38E-14	8.24E-18	7.39E-17	1.96E-16	8.15E-17
Artic P7 B100 BRT203	2.77E-14	9.61E-19	2.79E-16	1.8E-16	4.03E-16
Artic P7 B100 BRT303	2.63E-14	1.14E-18	2.61E-16	1.69E-16	3.78E-16

Artic P7 B100 BRT503	2.95E-14	7.46E-19	3E-16	1.93E-16	4.34E-16
Artic P7 B100 BRT550	2.45E-14	1.35E-18	2.4E-16	1.56E-16	3.47E-16
Artic P7 B100 BRT603	2.71E-14	1.03E-18	2.72E-16	1.7E-16	3.91E-16
Artic P7 B7 BRT203	1.22E-14	7.48E-18	6.74E-17	1.77E-16	7.32E-17
Artic P7 B7 BRT303	1.17E-14	7.22E-18	6.31E-17	1.65E-16	6.87E-17
Artic P7 B7 BRT503	1.28E-14	7.8E-18	7.24E-17	1.9E-16	7.84E-17
Artic P7 B7 BRT550	1.12E-14	6.95E-18	5.88E-17	1.54E-16	6.4E-17
Artic P7 B7 BRT603	1.2E-14	7.38E-18	6.57E-17	1.72E-16	7.14E-17
Artic HYB P7 B100 BRT203	2.32E-14	2.36E-18	1.99E-16	1.34E-16	2.88E-16
Artic HYB P7 B100 BRT303	2.23E-14	2.47E-18	1.88E-16	1.27E-16	2.73E-16
Artic HYB P7 B100 BRT503	2.43E-14	2.22E-18	2.13E-16	1.42E-16	3.09E-16
Artic HYB P7 B100 BRT550	2.08E-14	2.65E-18	1.7E-16	1.17E-16	2.47E-16
Artic HYB P7 B100 BRT603	2.29E-14	2.4E-18	1.95E-16	1.31E-16	2.83E-16
Artic HYB P7 B7 BRT203	1.2E-14	6.78E-18	4.82E-17	1.27E-16	5.5E-17
Artic HYB P7 B7 BRT303	1.17E-14	6.62E-18	4.56E-17	1.2E-16	5.22E-17
Artic HYB P7 B7 BRT503	1.24E-14	7E-18	5.16E-17	1.36E-16	5.85E-17
Artic HYB P7 B7 BRT550	1.13E-14	6.41E-18	4.22E-17	1.11E-16	4.85E-17
Artic HYB P7 B7 BRT603	1.19E-14	6.73E-18	4.73E-17	1.25E-16	5.4E-17