

PUCRS

FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS  
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

RONALDO SILVESTRE DA COSTA

**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA VEÍCULOS DE  
COLETA DE RESÍDUOS DOMICILIARES ABASTECIDOS COM GNV E DIESEL-B5  
UTILIZANDO AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)**

Porto Alegre  
2016

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul

## Ficha Catalográfica

C837q Costa, Ronaldo Silvestre da

Quantificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa para Veículos de Coleta de Resíduos Domiciliares Abastecidos com GNV e Diesel-B5 Utilizando Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) / Ronaldo Silvestre da Costa . – 2016.  
108 f.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcus Seferin.

Co-orientador: Prof. Dr. Fausto Freire.

1. Gás Natural Veicular (GNV). 2. Diesel-B5. 3. Caminhão. 4. Emissões. 5. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). I. Santos, Carlos Alexandre dos. II. Seferin, Marcus. III. Freire, Fausto. IV. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecário responsável: Marcelo Votto Texeira CRB-10/1974

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA  
PARA VEÍCULOS DE COLETA DE RESÍDUOS DOMICILIARES  
ABASTECIDOS COM GNV E DIESEL-B5 UTILIZANDO AVALIAÇÃO  
DE CICLO DE VIDA (ACV)**

**RONALDO SILVESTRE DA COSTA**

LICENCIADO EM CIÊNCIAS – HABILITAÇÃO EM QUÍMICA  
MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**

**Novembro, 2016**

**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA  
PARA VEÍCULOS DE COLETA DE RESÍDUOS DOMICILIARES  
ABASTECIDOS COM GNV E DIESEL-B5 UTILIZANDO AVALIAÇÃO  
DE CICLO DE VIDA (ACV)**

**RONALDO SILVESTRE DA COSTA**

LICENCIADO EM CIÊNCIAS – HABILITAÇÃO EM QUÍMICA  
MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS (PUCRS)

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCUS SEFERIN (PUCRS)

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. FAUSTO FREIRE (UNIVERSIDADE DE COIMBRA)

Tese realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

*Trabalho vinculado ao Convênio de Pesquisa SULGAS-PUCRS – AGT 2012-2013 e PDSE –CENTRO DE ECOLOGIA INDUSTRIAL – UNIVERSIDADE DE COIMBRA – FCTUC - DEP. ENG. MECÂNICA - DEM*

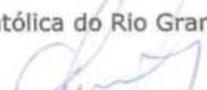
**Porto Alegre  
Novembro, 2016**

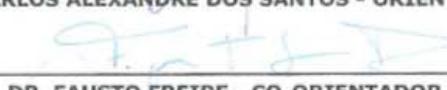


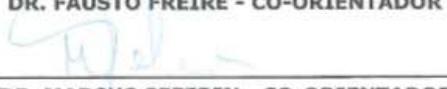
**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA VEÍCULOS DE COLETA DE RESÍDUOS DOMICILIARES ABASTECIDOS COM GNV E DIESEL-B5 UTILIZANDO AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)**

**CANDIDATO: RONALDO SILVESTRE DA COSTA**

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

  
\_\_\_\_\_  
**DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. FAUSTO FREIRE - CO-ORIENTADOR**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. MARCUS SEFERIN - CO-ORIENTADOR**

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. CARLOS ALBERTO MENDES MORAES - PPG ENGENHARIA MECÂNICA E PPG ENGENHARIA CIVIL - UNISINOS**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. LUIZ ANTONIO MAZZINI FONTOURA - DO CURSO DE QUÍMICA - ULBRA**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. FELIPE DALLA VECCHIA - DA FACULDADE DE ENGENHARIA - PUCRS**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. ROGÉRIO VESCIA LOUREGA - DO PGETEMA - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900  
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625  
E-mail: engenharia.pg.materials@pucrs.br  
www.pucrs.br/feng

*“Mestre não é quem sempre  
ensina, mas quem de repente  
aprende”*

*(João Guimarães Rosa, Grande  
Sertão: Veredas)*

## DEDICATÓRIA

A minha família que sempre me apoiou e incentivou os meus estudos e a jornada da minha vida. Meus eternos e maiores professores/educadores da vida Sra. Maria Eugenia da Costa, minha mãe, e Sr. Dimas Silvestre da Costa, meu pai, e irmãos Rubens e Rose.

Aos amigos, pelos momentos de apoio e confraternização, àqueles, mesmo estando longe, e, principalmente, àqueles que estão por perto, pois são minha família em Porto Alegre. Em especial ao Ir. Miguel Orlandi, Marcelo De Bastiani, Vinícios Malfatti, Sandro Baruffi, Sílvio Langer e Carlos Kochhann.

## **AGRADECIMENTOS**

Às agências de fomento CAPES e FAPERGS pela bolsa de doutorado o que me permitiu dedicação integral no desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade de Coimbra na pessoa do professor Dr. Fausto Freire e a PUCRS na pessoa dos professores Dr. Carlos Alexandre dos Santos, Dr. Marcus Seferin e Dra. Sandra Einloft, por toda a infraestrutura, e aos colaboradores que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho: alunos, professores, técnicos.

Minha família, por amor recebido na forma de gestos pela família e amigos, em especial aos meus pais, irmãos e sobrinho(as).

Ao professor Dr. Mazzini, pelas contribuições ao longo dos anos, em minha formação enquanto acadêmico e posteriormente colega de profissão.

Aos colegas de laboratório na pessoa do Me. Pedro e Dr. Amir Solist, do Centro para Ecologia Industrial(CIE) da Universidade de Coimbra(UC), que me acolheram e muito contribuíram para este trabalho ser melhorado.

Marcelo, Vínicius, Carlos, Ir. Miguel e Sandro que, além de amigos, são minha família aqui em Porto Alegre - RS.

Ao Instituto Marista pela formação e experiência de vida que tive o privilégio de realizar.

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS .....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
2.1. Objetivos Específicos .....	4
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
3.1. Considerações Gerais .....	5
3.2. Funcionamento dos Motores .....	6
3.2.1. Motor Ciclo Otto .....	7
3.2.2. Motor Ciclo Diesel.....	8
3.3. Combustíveis.....	9
3.3.1. Gás Natural Veicular .....	9
3.3.2. Diesel – B5.....	10
3.3.3. Biodiesel .....	11
3.4. Reações de Combustão.....	12
3.5. Emissões de Gases Poluentes .....	13
3.6. Ensaio de Emissões em Veículos.....	17
3.7. Avaliação do Ciclo de Vida como Ferramenta de Desempenho Ambiental	18
3.8. Estudos de ACV em Sistemas de Transporte Envolvendo GNV e Diesel ...	24
3.9. Análises de Incertezas de Monte Carlo .....	27
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
4.1. Monitoramento dos Veículos .....	30
4.1.1. Veículo Abastecido à GNV .....	30
4.1.2. Veículo Abastecido à Diesel .....	31
4.1.3. Etapas Anteriores às Medições .....	32

4.1.4. Dispositivo para os Equipamentos Embarcados.....	33
4.1.5. Equipamento Analisador de Gases.....	33
4.1.6. Equipamento Analisador de Injeção Eletrônica.....	35
4.1.7. Rotas Analisadas.....	37
4.1.8. Procedimento das Medições das Emissões.....	38
4.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	39
4.2.1. Definição de Objetivos, Escopo e Fronteiras do Sistema.....	40
4.2.2. Construção do Inventário.....	40
4.2.2.1. Transporte do GNV.....	42
4.2.2.2. Fase de Uso.....	44
4.3. Análise de Incertezas.....	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
5.1. Monitoramento das Emissões de Gases e Consumos de Combustíveis ...	49
5.1.1. Emissões de Gases para os Veículos Parados.....	49
5.1.2. Emissões de Gases para o Veículo em Rota.....	56
5.1.3. Dados Globais das Emissões de Gases em Rota.....	58
5.1.4. Consumos e Autonomias de Combustíveis em Rota.....	63
5.2. Inventário de Ciclo de Vida.....	64
5.3. Resultados Caracterizados pelo Método IPCC.....	72
5.4. Análise de Contribuição de Processo.....	73
5.5. Análise de Incertezas.....	76
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>81</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Princípio de funcionamento do motor ciclo Otto 4 Tempos (adaptado de Rahde, 2012). .....	7
Figura 3.2. Princípio de funcionamento do motor diesel quatro tempos (adaptado de Martins,2009). .....	8
Figura 3.3. Ilustração de um poço de gás associado e não associado ao petróleo (Silva, 2010). .....	9
Figura 3.4. Etapas ou fases que compõem o ciclo de vida do produto ( <a href="http://embalagensustentavel.com.br/wp-content/uploads/2010/05/ciclo-vida.jpg">http://embalagensustentavel.com.br/wp-content/uploads/2010/05/ciclo-vida.jpg</a> ). .....	19
Figura 3.5. Fluxo de trabalho envolvido na construção de um inventário. ....	22
Figura 3.6. Fronteira do sistema gás natural estudado por Tong (Tong, 2015). .....	26
Figura 4.1. Veículo Iveco Tector 170E20 dedicado a GNV. ....	31
Figura 4.2. Veículo Volkswagen Constellation dedicado a diesel – B5. ....	32
Figura 4.3. Dispositivo para armazenar o analisador de gases embarcado no veículo. ....	33
Figura 4.4. Analisador de gases portátil (Testo 350). ....	34
Figura 4.5. Sonda metálica de análises dos gases de exaustão. ....	35
Figura 4.6. Conversor de energia e display da Sonda Lambda, e Sonda Lambda instalada. ....	36
Figura 4.7. Imagem da janela do software FuelTech Datalogger 3.58. ....	36
Figura 4.8. Rota ID-03. ....	37
Figura 4.9. Rota PD-01. ....	38
Figura 4.10. Fronteiras definidas do sistema em estudo. ....	41
Figura 4.11. Gasoduto Bolívia-Brasil ( <a href="http://www.tbg.com.br/pt_br/o-gasoduto/tracado.htm">http://www.tbg.com.br/pt_br/o-gasoduto/tracado.htm</a> ). ....	43

Figura 5.1 Monitoramento do veículo a GNV na condição parado. Data: 24/03/2013.	50
Figura 5.2 Comparação dos gases para o veículo à GNV na condição parado. Data: 24/03/2013.	51
Figura 5.3 Monitoramento do veículo a diesel-B5 na condição parado. Data: 26/04/2013.	53
Figura 5.4. Comparação dos gases para o veículo a diesel-B5 na condição parado. Data: 26/04/2013.	54
Figura 5.5. Comparação dos gases para os combustíveis GNV e diesel-B5 para as análises com os veículos parados.	56
Figura 5.6. Monitoramento do veículo a GNV na rota ID 03 – 8h:27m às 09h:27m. 16/04/2016.	57
Figura 5.7. Monitoramento do veículo a GNV na rota PD-01.– 9h:31m às 10h:31m. 17/04/2013.	58
Figura 5.8. Distribuição dos valores de teor de O <sub>2</sub> na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.	59
Figura 5.9. Distribuição dos valores de teor em ppm de CO na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.	60
Figura 5.10. Distribuição dos valores de teor em ppm de NO <sub>x</sub> na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.	61
Figura 5.11. Distribuição dos valores de teor em ppm de NO na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.	62
Figura 5.12. Distribuição dos valores de teor em ppm de NO <sub>2</sub> na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.	62
Figura 5.13. Comparativo entre os dados referentes às autonomias dos veículos a GNV e Diesel-B5 em função do peso total transportado.	64
Figura 5.14. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.	67
Figura 5.15. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.	67

Figura 5.16. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.....	68
Figura 5.17. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.....	70
Figura 5.18. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.....	70
Figura 5.19. Comparação entre resultados caracterizados entre coleta de resíduos com caminhão movido a GNV e a Diesel-B5 para o cálculo do aquecimento global (IPCC 2007) para três horizontes temporais.....	72
Figura 5.20. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a GNV.....	74
Figura 5.21. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a diesel – B5.....	75
5.22 Histogramas dos valores simulados por Monte Carlo da categoria de Potencial de Aquecimento Global para os seus três horizontes temporais. ....	77
Figura 5.23: Histograma dos valores da simulação de Monte Carlo para o cenário de Diesel-B5 para a categoria de aquecimento global 100 anos.....	78
Figura 5.24. Distribuição dos valores simulados por Monte Carlo em gráficos de caixa.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Emissões totais de poluentes atmosféricos de veículos a gasolina, álcool, diesel, GNV e motos no ano de 2004 na região metropolitana de Porto Alegre – RS - 1000 t/ano (Teixeira, 2008). .....	6
Tabela 3.2. Propriedades do gás natural boliviano (Silva, 2010). .....	10
Tabela 3.3. Especificação do gás natural (Resolução n 16 de 17/06/2008 da ANP).11	
Tabela 3.4. Limites de emissões para veículos pesados – Ciclo Diesel com pós tratamento (ciclo de testes ESC/ELR) (PROCONVE/PROMOT, 2011). 15	
Tabela 3.5. Limites de emissões para veículos pesados – Ciclo Diesel convencional e pós tratamento (ciclo de testes ETC) (PROCONVE/PROMOT, 2011).16	
Tabela 3.6. Limites de emissões para veículos pesados movidos à GNV (ciclo de testes ETC) (PROCONVE/PROMOT, 2011).....	16
Tabela 4.1. Especificações técnicas do analisador de gases (Testo 350).....	34
Tabela 4.2. Distribuição dos dados do analisador de gases dos processos de combustão de GNV no caminhão. ....	46
Tabela 5.1. Dados dos consumos de combustíveis para os veículos em rotas com GNV e diesel-B5 durante 4 meses em 2013.....	63
Tabela 5.2. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.....	66
Tabela 5.3. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.....	66
Tabela 5.4. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.....	69
Tabela 5.5. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.....	69
Tabela 5.6. Entradas e Saídas Gerais considerados para o sistema de produto de	

coleta de resíduos do caminhão movido a Diesel-B5 .....	71
Tabela 5.7. Entradas e Saídas Gerais consideradas para o sistema de produto de coleta de resíduos do caminhão movido a GNV .....	71
Tabela 5.8. Resultados do aquecimento global (horizonte temporal de 20, 100 e 500 anos IPCC 2007) para o GNV e Diesel-B5. ....	72
Tabela 5.9. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a GNV.....	73
Tabela 5.10. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a diesel – B5.....	75
Tabela 5.11. Análise de incerteza para os resultados caracterizados. ....	76

## LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1. Especificações utilizadas da base de dados Ecoinvent v2.2. ....	42
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AICV - Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

CH<sub>4</sub> - Metano

CNG - *Compressed Natural Gas*

CO - Monóxido de Carbono

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

CV - Cavalo Vapor

CV - Coeficiente de Variação

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito

DETRAN - Departamento Estadual de Trânsito

Diesel-B5 - Diesel fóssil com adição de 5% de biodiesel em volume

FC - Fator de Caracterização

GEE - Gases de Efeito Estufa

GHG - *Greenhouse Gas*

GNC - Gás Natural Comprimido

GNV - Gás Natural Veicular

HC - Hidrocarbonetos

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICV - Inventário de Ciclo de Vida

ISO - Norma Americana

LCA - *Life Cycle Assessment*

MP - Material Particulado

NBR - Norma Brasileira

PNE 2030 - Plano Nacional de Energia 2030

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PROMOT - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Similares

PRONACOP - Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial

PRONAR - Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar

NO - Óxido de Nitrogênio

NO<sub>x</sub> - Óxidos Nitrosos

O<sub>2</sub> - Oxigênio

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

SULGAS - Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul

UF - Unidade Funcional

## RESUMO

COSTA, Ronaldo Silvestre da. **Quantificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa para Veículos de Coleta de Resíduos Domiciliares Abastecidos com GNV e Diesel-B5 Utilizando Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. Porto Alegre, RS. 2016. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O setor de transportes apresenta significativos problemas ambientais relacionados às emissões de poluentes, agravados em regiões urbanas. A queima e a exploração de combustíveis fósseis são constantemente relacionadas ao aumento da temperatura média global. O uso de combustíveis, como os de origem vegetal e gás natural, tem sido uma alternativa frequente na mitigação de gases de efeito estufa. No entanto, devido às várias fontes de poluentes presentes no ciclo de vida do produto, o desempenho ambiental de produtos considerados amigáveis ao meio ambiente deve ser verificado. Este trabalho teve como objetivo quantificar as emissões de gases de efeito estufa emitidos durante a coleta de resíduos domiciliares por veículos pesados (caminhões) abastecidos com diferentes combustíveis: gás natural e diesel-B5. Propõe-se o desenvolvimento e a implementação de uma metodologia para a comparação das emissões de poluentes para o uso de GNV (gás natural veicular) e Diesel-B5, objetivando a mitigação de impactos ambientais em frota cativa que trafega diariamente na cidade de Porto Alegre – RS. Os caminhões foram monitorados com um equipamento analisador portátil de gases ( $O_2$ , CO,  $CO_2$ , NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , HC), e os consumos e a autonomia dos combustíveis foram obtidos junto à empresa prestadora do serviço. Com os dados levantados nas rotas estabelecidas, foi aplicada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para realizar o estudo de comparação do desempenho ambiental entre o uso de GNV e Diesel-B5, considerando todas as etapas desde a produção até o consumo final dos combustíveis. Os resultados mostraram que o maior potencial para aquecimento global (segundo o método IPCC) ocorre para o GNV, considerando períodos de 20 anos, 100 anos e 500 anos. Quando comparadas as contribuições das diferentes etapas do processo, desde a produção até o uso do combustível, observou-se que o GNV apresenta os maiores

impactos nas etapas de transporte e coleta de resíduos, enquanto o Diesel-B5 apresenta impacto significativo apenas na etapa de coleta de resíduos.

Palavras-chaves: Gás Natural Veicular (GNV), Diesel-B5, Caminhão, Emissões, Impacto Ambiental, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

## ABSTRACT

COSTA, Ronaldo Silvestre da; **Quantification of Greenhouse Gas Emissions for Household Waste Collection Vehicles Fueled with CNG and Diesel-B5 Using Life Cycle Assessment (LCA)**. Porto Alegre, RS, 2016. Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The transport sector represents a significant responsibility in the pollution emissions. Also, the consumption of fossil fuels is related with the rising of global average temperature due to the greenhouse gas emissions. Biofuels and natural gas are investigated as alternative fuels to mitigate the environmental impacts. However, due to the several source emissions within a product life-cycle, the environmental performance of an environmental friendly product must be verified. This work aims to quantify greenhouse gas emissions during household waste collection by heavy vehicles (trucks) fueled with different fuels. It was proposed the development and implementation of a methodology to compare both pollutant gas emissions and noise for the use of CNG (compressed natural gas) and diesel-B5, aiming to mitigate environmental impacts in captive fleet that travels daily in the Porto Alegre city, Rio Grande do Sul state, Brazil. The trucks were monitored using a portable gas analyzer equipment (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HC), and the fuel consumptions and autonomy were obtained from the company that provides the service. With the data collected on established routes, it was applied the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to carry out the study comparing the environmental performance of the use of CNG and Diesel-B5. The results showed that higher global warming impact (according IPCC method) was observed to CNG, independently of the time horizon considered (20 100 or 500 years). When comparing the contribution of the process stages (from production to use of fuels), CNG presented higher impacts in the collection and venting steps, while diesel -- B5 presented in the collection step.

Keywords: Compressed Natural Gas (CNG), Diesel–B5, Truck, Emissions, Life Cycle Assessment (LCA).

## 1. INTRODUÇÃO

O setor dos transportes é um dos mais problemáticos num contexto da escassez do abastecimento de energia, de crescente circulação de veículos rodoviários e de aumento dos impactos ambientais relacionados às emissões atmosféricas. A previsão é que o maior aumento em termos absolutos do consumo de combustíveis no setor dos transportes ocorrerá nos veículos pesados para transporte de pessoas e mercadorias (MMA, 2013).

Historicamente, muitas ações e atividades contribuíram para o processo evolutivo das tecnologias limpas, destacando-se o avanço no desenvolvimento de motores para veículos menos poluentes e mais eficientes, e, conseqüentemente, o uso de combustíveis como o etanol, o gás natural veicular (GNV) e mais recentemente o biodiesel. Nesta constelação, os processos de monitoramento das emissões atmosféricas desses novos motores constituem elementos importantes na moderna indústria automotiva, uma vez que a circulação destes vem interferindo na qualidade do ar e, direta ou indiretamente, na qualidade de vida do homem (Lopes, 2013; Kwon, 2017).

Desta maneira, se faz necessário ter mecanismos de controles para limites de emissões, uma vez que as áreas urbanas são caracterizadas, de forma geral, por uma baixa qualidade do ar em virtude de grande densidade populacional, atividade econômica e elevado tráfego de veículos, gerando uma alta taxa das emissões de poluentes atmosféricos, principalmente por veículos automotores.

Os principais produtos gerados pela combustão dos combustíveis são dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Outros gases gerados são o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ), compostos de enxofre

(SO<sub>x</sub>), material particulado (MP), dentre outros, tais como dioxinas, ocasionando direta ou indiretamente impactos ambientais e problemas na saúde humana (Teixeira, 2008).

No caso específico dos veículos pesados, o uso de novos combustíveis alternativos ao diesel – B5, tais como o GNV e o diesel – B5/biodiesel, segundo a literatura, teriam taxas menores de emissão de poluentes para gases de efeito estufa se comparados ao diesel – B5 (Lopez et al, 2009).

No Brasil o uso de veículos pesados movidos a GNV ainda é incipiente, em caráter experimental em ônibus e caminhões para posteriormente serem homologados. Tendo em vista que a quantidade de veículos leves novos movidos a GNV é muito pouco significativa, e considerando a frota nacional, os veículos que se encontram em circulação são em sua maioria convertidos para o uso de GNV a partir da instalação de *kits* para uso de gás natural veicular (Lopes, 2013; Kwon, 2017). Segundo o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários de 2013, não há informações disponíveis, consistentes e detalhadas sobre essa frota convertida, tais como número de conversões anuais por ano-modelo e o combustível original dos veículos convertidos, motivo pelo qual se faz necessário realizar estudos locais, inventários, para determinadas aplicações, como a coleta de resíduos domiciliares utilizando veículo movido a GNV e comparando com um veículo movido a diesel – B5/biodiesel e avaliar os impactos ambientais, pois são vários os fatores que poderão influenciar nesse estudo, tornando-se, por isso, cada vez mais necessário realizar estudos de inventários locais que poderão contribuir significativamente em impactos locais ou até mesmo globais e, neste contexto, utilizando a ferramenta de avaliação do ciclo de vida como metodologia de tratamento das informações, auxiliando no processo de tomada de decisão frente aos dados estudados.

Com a celebração de convênio de pesquisa, entre os partícipes PUCRS e SULGAS – Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul, promoveu-se a integração na busca de conhecimento relacionado às emissões de poluentes em motores de veículos pesados operando com -B5 e GNV. Aliado à realização de

estágio de doutorado sanduíche na Universidade de Coimbra para realizar estudos sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das emissões de poluentes em veículos pesados com diferentes combustíveis, foi possível o desenvolvimento da tese como projeto de pesquisa.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral do trabalho é quantificar as emissões de gases de efeito estufa para veículos de coleta de resíduos domiciliares abastecidos com GNV e Diesel-B5 utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV), por meio dos seguintes objetivos específicos:

### **2.1. Objetivos Específicos**

Obtenção de dados das emissões dos gases de exaustão por meio do monitoramento de veículos pesados, caminhão marca Iveco Tector 170E20 200 CV operando com GNV em rota e parado, e caminhão marca Volkswagen Constellation operando com –B5, parado, ambos em operação da empresa Revita a serviço do Departamento de Limpeza Urbana de Porto Alegre - RS;

- Análises de emissões em duas rotas definidas, bem como com os veículos parados, para os consumos de combustíveis e correlação com as condições operacionais;
- Levantamento de dados referentes à metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), e uso para gases de efeito estufa e energia primária fóssil (atividade realizada durante estágio de doutorado realizado na Universidade de Coimbra - Portugal).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Considerações Gerais**

A frota de veículos urbanos vem aumentando a cada ano, conseqüentemente os problemas correlacionados a este crescimento vão surgindo tais como congestionamentos, aumento das emissões de poluentes e níveis de ruídos, sendo refletido diretamente na qualidade de vida da população (MMA, 2013).

Nas regiões metropolitanas, os veículos pesados movidos a diesel são responsáveis pelas maiores emissões de material particulado, óxidos de nitrogênio e enxofre, enquanto os veículos leves à gasolina emitem mais monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC). Com o aumento do etanol, GNV e o uso de biodiesel em veículos, o quadro de emissões deve modificar-se significativamente, promovendo uma melhoria na qualidade do ar nos grandes centros urbanos (Teixeira, 2008).

No Brasil, o GNV surge como uma alternativa implantada e com demanda em crescimento no segmento de veículos leves, especialmente as frotas de táxi que recebem incentivos governamentais para o seu uso, bem como novas aplicações para veículos pesados, com tecnologias em uso em outros países (Lopes, 2013; Kwon, 2017).

Em sua pesquisa na elaboração de inventários de emissões atmosféricas, tendo por base a “*Environmental Protection Agency*” dos Estados Unidos, Teixeira e colaboradores (2008) usaram dados obtidos por modelagem matemática, e fizeram a simulação de emissões para a Região Metropolitana de Porto Alegre – RS. Os principais resultados deste trabalho estão apresentados na Tabela 3.1, sendo

observados os maiores valores para as emissões de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, MP e HC de diesel quando comparado às emissões para GNV, evidenciando assim a grande probabilidade de contribuição para o fenômeno das chuvas ácidas nos grandes centros urbanos. Ainda observando a Tabela 3.1, quando se compara as emissões de diesel ao GNV, nota-se valores maiores para o diesel.

Tabela 0.1. Emissões totais de poluentes atmosféricos de veículos a gasolina, álcool, diesel, GNV e motos no ano de 2004 na região metropolitana de Porto Alegre – RS - 1000 t/ano (Teixeira, 2008).

Poluentes	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	R-CHO	MP	HC
Gasolina	129,80	6,75	0,27	0,11	0,75	13,75
Álcool	16,97	1,00	*	0,08	*	2,02
Diesel	35,11	25,64	1,62	*	1,60	5,75
GNV	0,40	0,45	*	7,4X10 <sup>-5</sup>	*	0,22
Motos	13,46	0,27	*	*	*	1,92

\* Não determinado

Fontaras e grupo (2012), em estudo de avaliação das emissões em caminhões abastecidos com diesel/biodiesel e GNV, na coleta de resíduos em Milão, verificaram que os veículos pesados abastecidos com GNV mostram maior emissão de GEE, mais especificamente emissões de HC e CO, que aqueles abastecidos com diesel/biodiesel.

As normas de emissões atuais não são necessariamente refletidas na operação do mundo real, sob a qual o veículo a diesel apresentou emissões quase quatro vezes maiores que o a GNV para NO<sub>x</sub>, sendo assim importante realizar estudos locais. Além das questões relacionadas às emissões de gases poluentes, um dos fatores que contribui para o aumento do uso do GNV em veículos é o fato do custo por kW gerado/ ou km rodado ser menor que o diesel (Oliveira, 2010).

### 3.2. Funcionamento dos Motores

Para veículos pesados, o uso de GNV como combustível pode se dar de três formas: Motores ciclo Otto dedicados a Gás Natural Veicular; Conversão de motores

ciclo a diesel para o ciclo a Otto (“Ottolização”); e Uso de motores dual-fuel, injeção de GNV junto ao diesel.

### 3.2.1. Motor Ciclo Otto

No motor Ciclo Otto de quatro tempos, a combustão ocorre pela ignição (centelha) gerada por uma vela, sendo a descrição de seu funcionamento apresentada a seguir (Rahde, 2012), e observada na Figura 3.1.

- 1) Tempo de Admissão: a válvula de admissão permite a entrada da mistura ar e combustível e o pistão movimenta-se para baixo;
- 2) Tempo de Compressão: o pistão sobe no sentido a comprimir a mistura e as válvulas são fechadas;
- 3) Tempo de Explosão: no término da compressão do 2º tempo ocorre a centelha que ocasiona a explosão da mistura no 3º tempo, provocando a expansão do pistão;
- 4) Tempo de Exaustão/Expulsão: ocorre a abertura da válvula de descarga permitindo a exaustão dos gases liberados com a combustão.

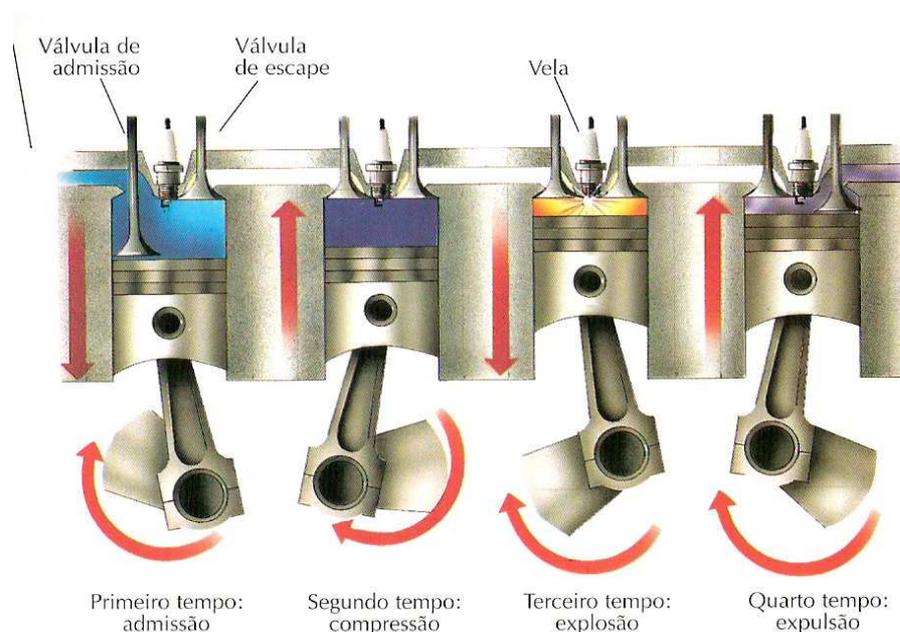


Figura 0.1. Princípio de funcionamento do motor ciclo Otto 4 Tempos (adaptado de Rahde, 2012).

### 3.2.2. Motor Ciclo Diesel

No motor ciclo Diesel de quatro tempos, a combustão é interna por compressão. A temperatura é elevada, em pressão constante, a mistura ar mais óleo diesel entra em combustão espontânea. Funcionam com uma taxa de compressão que varia de 14:1 a 25:1, e a combustão ocorre pela injeção direta na câmara de combustão, que inflama o combustível ao entrar em contato com o ar aquecido. Uma breve descrição do funcionamento é apresentada a seguir, e na Figura 3.2 pode ser observado o princípio de funcionamento do motor ciclo Diesel quatro tempos (Rahde, 2012; Oliveira, 2010).

- 1) Tempo de Admissão: o ar é aspirado para o interior do cilindro através da válvula de admissão;
- 2) Tempo de Compressão: o pistão sobe e comprime o ar dentro do cilindro, fazendo que este atinja elevada pressão e temperatura;
- 3) Tempo de Explosão: o combustível é injetado por uma bomba injetora e eleva a pressão do combustível nos injetores, a alta temperatura, entrando em combustão espontânea e impulsionando o cilindro para baixo;
- 4) Tempo de Exaustão/Expulsão: com a válvula de descarga aberta, os gases formados na fase anterior são expelidos do interior do cilindro para fora pelo movimento ascendente do pistão.

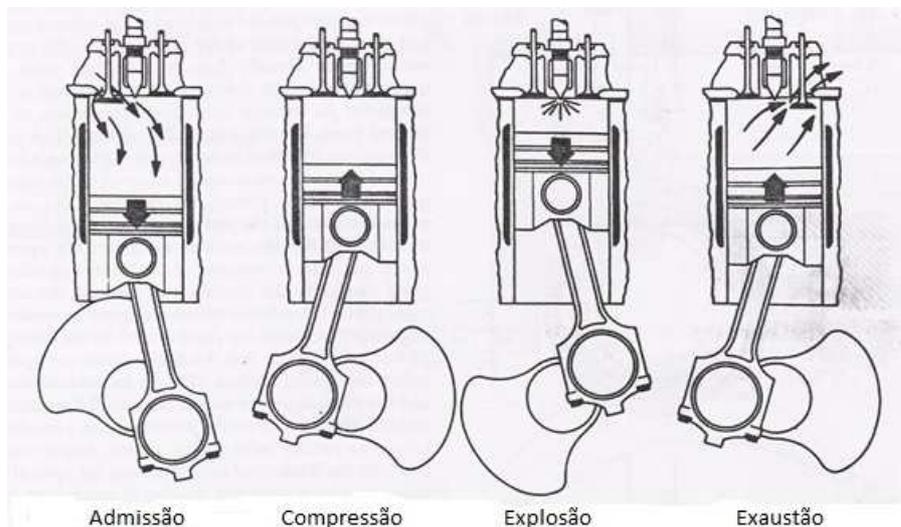


Figura 0.2. Princípio de funcionamento do motor diesel quatro tempos (adaptado de Martins,2009).

### 3.3. Combustíveis

#### 3.3.1. Gás Natural Veicular

O Gás Natural Veicular (GNV) ou Gás Natural Comprimido (GNC) é um combustível gasoso, formado pela decomposição de matérias orgânicas de forma anaeróbica, que reagiram entre si ao longo do tempo a altas temperaturas e pressões, sem entrar em contato com o ar. Quando está associado ao petróleo, possui maiores concentrações de etano, butano e homólogos superiores e, quando não associado ao petróleo, possui maiores concentrações de metano. Na Figura 3.3 pode ser observada uma ilustração de poços de gás onde se extrai o gás associado em solução óleo mais gás e não associado, extraído na capa de gás em maior concentração (Oliveira, 2010; Silva, 2010).

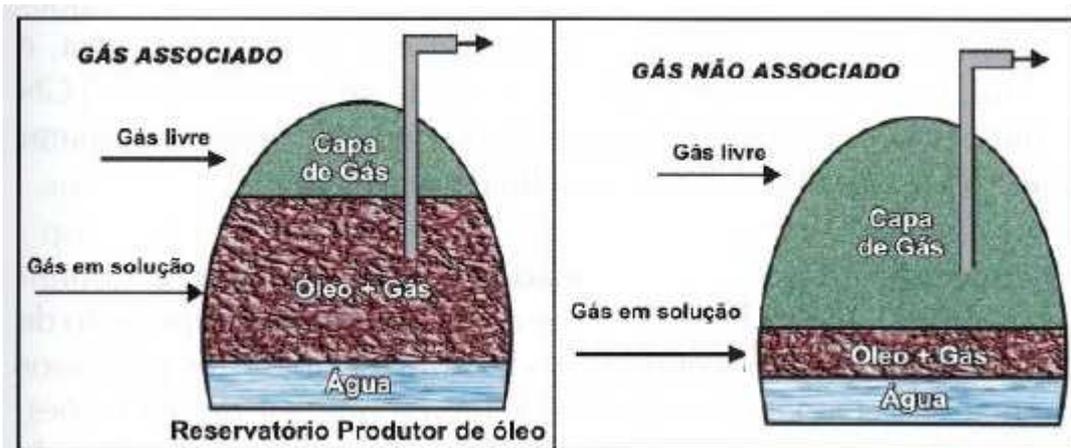


Figura 0.3. Ilustração de um poço de gás associado e não associado ao petróleo (Silva, 2010).

Normalmente, o gás natural tem em sua composição química principalmente o metano (hidrocarboneto simples, gás inodoro, incolor, com molécula tetraédrica e apolar, pouco solúvel em água, e quando adicionado ao ar se transforma em mistura de alto teor explosivo), etano, propano, butano e outros gases em menores composições, como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ . A Tabela 3.2 mostra as propriedades do gás natural boliviano que chega ao Brasil na região Sul, com suas maiores concentrações para metano, etano e propano.

Tabela 3.2. Propriedades do gás natural boliviano (Silva, 2010).

<b>Composição Média do Gás Natural Boliviano</b>				
<b>Compostos</b>		<b>% Volumétrico</b>	<b>Propriedades</b>	<b>Média</b>
<b>Metano</b>	CH <sub>4</sub>	91,8	Poder Calorífico Superior (kcal/Nm <sup>3</sup> )	9,958
<b>Etano</b>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5,58	Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm <sup>3</sup> )	8,993
<b>Propano</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,97	Densidade Relativa (ar=1)	0,602
<b>Iso-butano</b>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,03	Massa Molecular (g/mol)	17,367
<b>n-Butano</b>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02	Relação Gás/Ar (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	1/9,96
<b>Pentano</b>	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub>	0,1	Velocidade de Chama (cm/seg)	48,4
<b>Dióxido de Carbono</b>	CO <sub>2</sub>	0,8	Limite de Inflamabilidade Superior (% de gás no ar)	14,9
<b>Nitrogênio</b>	N <sub>2</sub>	1,42	Limite de Inflamabilidade Inferior (% de gás no ar)	4,8

O armazenamento do gás natural veicular é realizado em cilindros que são bem mais resistentes que os tanques para combustíveis líquidos de veículos, possuindo uma série de válvulas e chaves que evitam o vazamento de gás. No caso de vazamento, essas cortam a alimentação do mesmo evitando o escape. Devido à baixa densidade, o GNV logo se dissipa no ar, evitando os bolsões de combustível que podem ocasionar explosões, embora seja mais difícil acontecer, pois a queima ocorre a 650 °C, enquanto a gasolina entra em combustão a 300 °C. Na Tabela 3.3 pode ser observada a especificação do gás natural com seus compostos, limites máximos e mínimos, devendo ser atendida para manter a qualidade do gás e ser comercializado em todas as regiões do Brasil (ANP – Agência Nacional do Petróleo, 2008).

### 3.3.2. Diesel – B5

O diesel-B5 é um derivado do petróleo bruto, composto basicamente por hidrocarbonetos (C<sub>12</sub> a C<sub>20</sub>), enxofre, nitrogênio e 5% de biodiesel em volume, conforme a Lei nº 11.097, de 13 janeiro de 2005. Por ser um combustível fóssil, a sua queima é mais poluente quando comparado a outros combustíveis, tais como o biodiesel de origem vegetal. Apresenta maior segurança, pois é inflamável somente

a altas temperaturas e pressões. Sua mistura foi alterada para 6% de biodiesel em julho de 2014 e para 7% em novembro de 2014 (Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014). Após a promulgação da Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016, passa a ser 8% até um ano, 9 % até 2 anos e 10% até 3 anos.

Tabela 3.3. Especificação do gás natural (Resolução n 16 de 17/06/2008 da ANP).

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE (2) (3)			MÉTODO		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO
<b>Poder calorífico superior (4)</b>	kJ/ m <sup>3</sup>	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976
	kWh/m <sup>3</sup>	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94				
<b>Índice de Wobbe (5)</b>	kJ/m <sup>3</sup>	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500		15213	--	6976
<b>Número de metano, mín. (6)</b>		Anotar (3)	65		--	--	15403
<b>Metano, mín.</b>	% mol.	68	85		14903	1945	6974
<b>Etano, máx.</b>	% mol.	12	12		14903	1945	6974
<b>Propano, máx.</b>	% mol.	3	6		14903	1945	6974
<b>Butanos e mais pesados, Max</b>	% mol.	1,5	3		14903	1945	6974
<b>Oxigênio, máx. (7)</b>	% mol.	0,8	0,5		14903	1945	6974
<b>Inertes (N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>), máx.</b>	% mol.	18	8	6	14903	1945	6974
<b>CO<sub>2</sub>, máx.</b>	% mol.	3			14903	1945	6974
<b>Enxofre Total, máx. (8)</b>	mg/m <sup>3</sup>	70			--	5504	6326-3
							6326-5
							19739
<b>Gás Sulfídrico (H<sub>2</sub>S), máx.</b>	mg/m <sup>3</sup>	10	13	10	--	5504	6326-3
						6228	

### 3.3.3. Biodiesel

Segundo as definições da ANP, o biodiesel é um *“combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem*

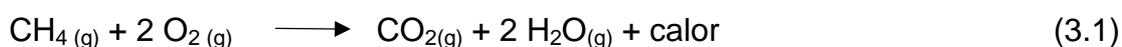
*vegetal ou animal, e que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico nº 3/2014”.*

O biodiesel vem sendo adicionado ao diesel – B5, conforme regulamentação, com intuito de também diminuir as emissões atmosféricas. Além disso, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), um programa interministerial do Governo Federal, objetiva a implementação de forma sustentável, tanto técnica como economicamente, da produção e uso do Biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda. Implanta-se, assim, um programa sustentável, promovendo inclusão social, garantindo preços competitivos, qualidade e suprimento, produzindo o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas e em regiões diversas do Brasil.

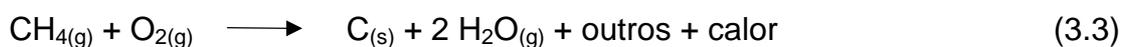
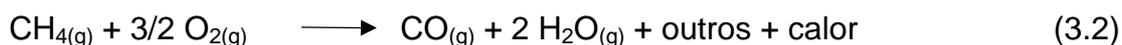
### **3.4. Reações de Combustão**

As reações de combustão podem ser completas Equação (3.1) e incompletas Equações (3.2 e 3.3). Quando existe oxigênio suficiente para consumir todo o combustível, tem-se uma reação completa (Equação 3.1). Já quando a combustão ocorre de forma incompleta (Equações 3.2 e 3.3), não há oxigênio suficiente para consumir todo o combustível (Silva, 2010).

Na reação de combustão completa do metano em ar tem-se:



Já na reação de combustão incompleta do metano tem-se:



Por vezes, essa combustão é tão incompleta (Equação 3.3) que o carbono ( $C_s$ ) se torna visível ao sair pelo escapamento dos carros, na forma de material particulado ou fuligem (fumaça escura/preta).

Dentro do contexto desse estudo, as reações de combustão podem ser representadas genericamente para qualquer hidrocarboneto, podendo ser utilizadas posteriormente para o GNV e diesel-B5, que são compostos de uma mistura de substâncias combustíveis. Na Equação 3.4 apresenta-se a reação para qualquer combustível com o conteúdo de carbono e disponibilidade de  $O_2$  variáveis.



### 3.5. Emissões de Gases Poluentes

As emissões de um veículo automotor podem ocorrer pelo escapamento (emissões diretas) ou podem ser de natureza evaporativa do combustível, aparecendo durante o uso e o repouso do veículo. São influenciadas por vários fatores, dentre os quais pode-se destacar: tecnologia do motor, porte e tipo de uso do veículo, idade do veículo, projeto e materiais do sistema de alimentação de combustível, tipo e qualidade do combustível (pressão de vapor), condições de manutenção e condução, além de fatores meteorológicos (pressão e temperatura ambientes).

As emissões atmosféricas de veículos são regulamentadas pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), e o veículo, quando fabricado de acordo com o motor, tipo de combustível e tipo de ensaio deve atender a esta regulamentação, conforme Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7.

Segundo Braun et al, (2003), os gases de escape podem ser classificados em dois tipos: os que não causam danos à saúde ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  e  $N_2$ ) e os que apresentam perigos à saúde humana, sendo os regulamentados ( $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $MP$ ) e ainda não regulamentados (aldeídos, amônia, benzeno, cianetos, tolueno e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares).

O GNV pode apresentar uma combustão completa, tendo como resíduo o  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  sob vapor, os quais são não tóxicos, ou seja, sua queima é mais limpa com redução de emissões de poluentes. Os principais produtos da combustão incompleta do GNV são o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$  e outros em menores escalas tais como  $\text{SO}_x$  e material particulado.

Os principais gases para análise de combustão são:

- $\text{CO}$ : monóxido de carbono – resultado da combustão incompleta, devido à quantidade de ar ser insuficiente para que todo o combustível seja queimado;

- $\text{CO}_2$ : dióxido de carbono – resultando direto da combustão, pode ser utilizado como referência na eficiência da combustão;

- $\text{O}_2$ : oxigênio – é o gás responsável pela combustão (queima), a quantidade deste no escapamento indica se a mistura ar/combustível esta rica ou pobre. Quando há elevados índices de  $\text{O}_2$  indica mistura pobre, enquanto que valores baixos indicam mistura rica. Mistura pobre: excesso de ar e pouco combustível na relação ar/combustível. Mistura rica: excesso de combustível e pouco ar na relação ar/combustível.

A EPA (“*Environmental Protection Agency*”, dos Estados Unidos) define material particulado como qualquer massa que é coletada em um filtro de exaustão de veículo ou máquina específica, após um determinado ciclo de operação, colocado a uma temperatura de exaustão mantida constante a  $52^\circ\text{C}$  (Braun, 2003).

Os ensaios europeus, definidos e utilizados na norma brasileira (IBAMA, Proconve/Promot, 2011), realizados em banco dinamométrico, são:

- Ensaio E.S.C: é denominado Ciclo Europeu em Regime Constante, um ciclo de ensaios que consiste em 13 modos de operação em regime constante;

- Ensaio E.L.R: é denominado Ciclo Europeu de Resposta em Carga, um ciclo de ensaios que consiste numa sequência de quatro patamares de carga a rotações constantes e cargas decrescentes de dez a cem por cento, para determinação da opacidade da emissão de escapamento;

- Ensaio ETC: é denominado Ciclo Europeu em Regime Transiente, um ciclo de ensaios que consiste em 1800 modos transientes, segundo-a-segundo, simulando condições reais de uso.

Observa-se que os valores para os limites de emissões vêm diminuindo gradativamente conforme a fase do Proconve/Ano, sendo evidenciadas pequenas diferenças para os limites entre diesel e GNV em veículos pesados e o tipo de ensaio empregado, conforme observado nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6.

Tabela 0.4. Limites de emissões para veículos pesados – Ciclo Diesel com pós tratamento (ciclo de testes ESC/ELR) (PROCONVE/PROMOT, 2011).

Poluentes	Limites		
	Fase P-5 <sup>(1)</sup>	Fase P-6	Fase P-7
	Desde 1/1/2004	A partir de 1/1/2009	A partir de 1/1/2012
Monóxido de carbono (CO em g/Kwh)	2,1	1,5	1,5
Hidrocarbonetos (THC em g/KWh)	0.66	0.46	0.46
Óxido de nitrogênio (Nox em g/KWh)	5,0	3,5	2,0
Material particulado (MP em g/kWh)	0,10 ou 0,13 <sup>(2)</sup>	0,02	0,02
Opacidade ELR (m <sup>-3</sup> )	0,8	0,5	0,5

(1) Permanece em vigor nos anos de 2009, 2010, e 2011 por força do Termo de Ajustamento de Condata homologada pela Juíza Federal no estado de São Paulo.

(2) Aplicável somente em motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> e rotação à potência normal superior a 3000 min<sup>-1</sup>.

Tabela 0.5. Limites de emissões para veículos pesados – Ciclo Diesel convencional e pós tratamento (ciclo de testes ETC) (PROCONVE/PROMOT, 2011).

Poluentes	Limites		
	Fase P-5 <sup>(1)</sup>	Fase P-6	Fase P-7
	Desde 1/1/2004 <sup>(2)</sup>	A partir de 1/1/2009	A partir de 1/1/2012
Monóxido de carbono (CO em g/Kwh)	5,45	4,0	4,0
Hidrocarbonetos (THC em g/KWh)	0,78	0,55	0,55
Óxido de nitrogênio (Nox em g/KWh)	NE	NE	NE
Material particulado (MP em g/kWh)	5,0	3,5	2,00
Opacidade ELR (m <sup>-3</sup> )	0,16 ou 0,21 <sup>(3)</sup>	0,03	0,03

(1) Permanece em vigor nos anos de 2009, 2010, e 2011 por força do Termo de Ajustamento de Condato homologada pela Juíza Federal no estado de São Paulo.

(2) Aplicável somente para veículos com pós-tratamento.

(3) Aplicável somente em motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> e rotação à potência normal superior a 3000 min<sup>-1</sup>.

(NE) Não Exigível.

Tabela 0.6. Limites de emissões para veículos pesados movidos à GNV (ciclo de testes ETC) (PROCONVE/PROMOT, 2011).

Poluentes	Limites	
	Fase P-6	Fase P-7
	A partir de 1/1/2009	A partir de 1/1/2012
Monóxido de carbono (CO em g/Kwh)	4,0	4,0
Hidrocarbonetos (THC em g/KWh)	0,55	0,55
Metano (CH <sub>4</sub> )	1,10	1,10
Óxido de nitrogênio (Nox em g/KWh)	3,5	2,00
Material particulado (MP em g/kWh)	NE	NE

(NE) Não Exigível

### 3.6. Ensaio de Emissões em Veículos

Recentemente, a importância da utilização de gás natural veicular (GNV) em veículos pesados foi aumentada em todo o mundo. Poucos trabalhos têm sido relacionados com este aspecto, comparando o desempenho e emissões de GNV com outros combustíveis como o diesel e biodiesel (Serrano, 2012). A maioria dos trabalhos tem focado na comparação entre diesel e biodiesel em condições diferentes, tais como em laboratório e em estradas. Uma das vantagens no uso de Gás Natural é gerar a menor taxa de emissão em termos de volume de emissões diretas de CO<sub>2</sub> quando comparada com o uso de diesel, contribuindo diretamente para a redução do efeito estufa (Monteiro, 2010).

Serguei e colaboradores (2006) verificaram em seu estudo de uso de GNV em ônibus urbano em Porto Alegre - RS uma redução de 40% na geração de CO<sub>2</sub>, eliminação da emissão de material particulado e de enxofre. Constataram também que, se a frota a diesel fosse convertida para GNV, haveria um ganho expressivo na diminuição da emissão desses poluentes na região de Porto Alegre, focando no desempenho do veículo e ensaios de medição da emissão de poluentes em estrada com equipamentos instalados no veículo.

Andrade e Santos (2009) basearam-se na metodologia usada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*The Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, 2007) para inventários nacionais de gases de efeito estufa. Usando referenciais teóricos como energia produzida, distância percorrida, fatores de ajustes e convertendo as emissões para CO<sub>2</sub> equivalente utilizando fatores de caracterização apresentados pelo IPCC, obtiveram valores menores de emissões para o uso do GNV em frota de ônibus em Natal - RN, quando comparado ao diesel.

Hesterberg et al (2008) apresentaram um trabalho de revisão, comparando vinte e cinco trabalhos publicados sobre padrões de emissão de gases poluentes em diversos veículos pesados para transporte de passageiros, carga e coleta de resíduos. A compilação feita por estes autores indica que há significativas diferenças no padrão de emissão de gases poluentes pelos veículos em função de haver ou

não sistemas de pós-tratamento (chamado no Brasil de catalisador de exaustão), o que deve ser levado em conta na tomada de decisão sobre qual veículo deva ser utilizado, pois há importantes incrementos de consumo de combustível associados à redução de níveis dos principais poluentes (GEE, óxidos de enxofre e de nitrogênio e material particulado). De fato, há vários sistemas regulatórios no mundo que delimitam níveis de emissão de gases poluentes e material particulado para os sistemas nacionais de transporte rodoviário, que obrigam os fabricantes de motores e veículos a adotarem soluções tecnológicas de pós-tratamento ou condição de operação dos motores. No Brasil, o sistema regulatório para o setor de transportes é chamado de PROCONVE e está em vigor atualmente o padrão chamado de PROCONVE P7, que é equivalente ao padrão europeu EURO V, conforme apresentado na Seção 0. (PROCONVE/PROMOT, 2011)

### **3.7. Avaliação do Ciclo de Vida como Ferramenta de Desempenho Ambiental**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gerenciamento/desempenho ambiental aplicada a produtos e serviços (podendo ser englobado como um produto) para a obtenção de aspectos ambientais e possíveis impactos potenciais ao meio ambiente, associados ao ciclo de vida de um produto ou comparações entre produtos. Começou a ser desenvolvida no começo dos anos 70 e vem sendo refinada desde então, com disponibilização de bases de dados de inventários diversos e metodologias de avaliação de impactos. Atualmente é possível aplicar a metodologia de ACV para sistemas bem complexos e comparar o desempenho ambiental de diferentes produtos e processos (Kralisch, 2015).

A avaliação desses produtos é realizada em todos os estágios de produção associada na obtenção dos mesmos, também conhecida como as fases do ciclo de vida do produto. Dentro da metodologia de ACV é apresentada a possibilidade de todas as fases do ciclo de vida de um produto ter potencial de gerar impactos relevantes ao meio ambiente, que estarão associados aos fluxos de massa e energia envolvidos nos processos de extração, produção e transporte das matérias brutas; produção e transporte das matérias primas; manufatura do produto; transporte do produto; uso do produto; e finalmente seu descarte ou reuso. Essas

citadas por último são as etapas, ou fases, que compõem o ciclo de vida do produto (Figura 3.4). Conforme o propósito do estudo, uma ou mais fases do ciclo de vida do sistema de produto é considerada e a essa abrangência é dada a denominação de “escopo” do estudo. A abordagem sistêmica de todo o ciclo de vida de um produto é conhecida como uma avaliação “do berço ao túmulo”.

A norma NBR ISO 14.040 (2009) conceitua a ACV como uma investigação abrangente do uso de todos os insumos relativos a um processo de obtenção de um bem ou serviço e suas consequências em termos de impactos ambientais. Efetivamente, a ACV consiste em um levantamento minucioso qualitativo de insumos utilizados, energia consumida, processos produtivos, utilização, reutilização e reciclagem seguida da disposição final.

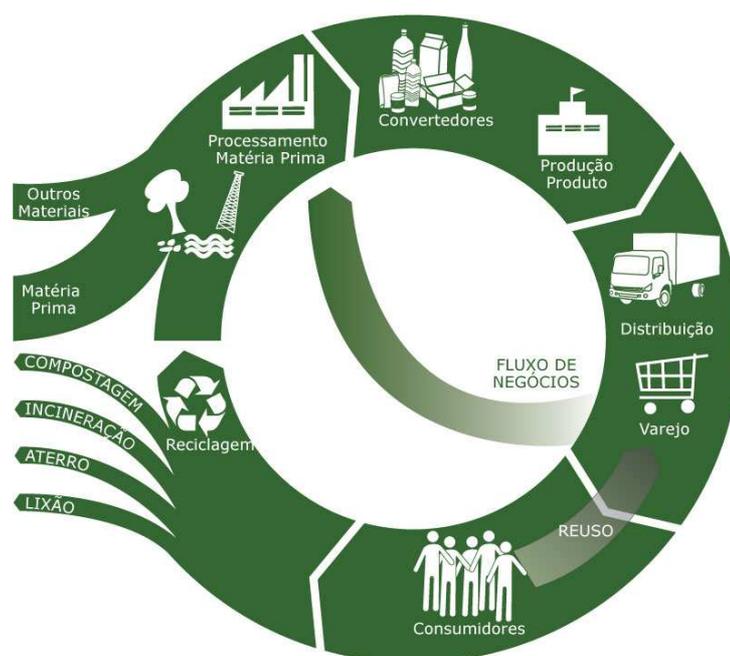


Figura 0.4. Etapas ou fases que compõem o ciclo de vida do produto (<http://embalagensustentavel.com.br/wp-content/uploads/2010/05/ciclo-vida.jpg>).

A metodologia é reconhecida internacionalmente e possui uma sólida base científica, sendo padronizada pelas normas NBR 14040:2009 e NBR 14044:2009, (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). A execução da ACV é separada em quatro etapas:

- i) Definição do objetivo e escopo;
- ii) Análise do Inventário;

- iii) Avaliação dos Impactos;
- iv) Interpretação.

Na primeira etapa, o objetivo e o escopo do estudo devem ser claramente apresentados e justificados e estarem de acordo com a aplicação esperada (ISO 14040). Nessa etapa a motivação do estudo é apresentada e justificada, da mesma forma que as fronteiras do sistema e da unidade funcional.

As fronteiras do sistema revelam os processos e os fluxos a serem analisados e quantificados, indicando a profundidade no ciclo de vida do processo. As emissões para os processos que não estão presentes na fronteira do sistema não serão consideradas para a quantificação dos impactos avaliados. As fronteiras geográficas, temporais, naturais e da tecnosfera também são definidas. Essas considerações são necessárias quando esse tipo de fator tem influência na natureza e qualidade dos dados.

O escopo deve especificar claramente as funções desempenhadas pelo sistema que está sendo estudado, sendo essas características de desempenho e função sendo representadas pela unidade funcional (UF). Esta deve ser consistente com o objetivo e escopo do estudo e tem a função primária de servir de unidade para a normalização dos valores das entradas e saídas do sistema.

Na etapa subsequente, análise de inventário, é onde são apresentados todos os fluxos materiais e energéticos e suas respectivas emissões para os compartimentos da natureza (ar, água e solo). O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é o resultado da análise do inventário, sendo representada por uma tabela indicando os valores quantificados das entradas e saídas dos processos que se encontram dentro das fronteiras do sistema. No ICV, também podem ser encontrados informações sobre a qualidade estatística de cada dado, indicando seu tipo de distribuição, valores máximos e mínimos e outras estatísticas que servem para indicar o quão representativo é aquela informação. Os dados apresentados podem ter origens distintas, assim como os métodos de sua obtenção, sendo classificados em Primários e Secundários. Os dados Primários são obtidos através de medidas,

questionários ou cálculos. Os dados secundários são aqueles obtidos através de outras fontes, podendo vir da literatura, tabelas e/ou base de dados.

A construção do Inventário é comumente referida nos processos de obtenção do ICV. O fluxo de trabalho envolvido na construção do inventário é apresentado na Figura 3.5. Na coleta dos dados é observada a relevância daquelas informações em relação ao objetivo e escopo do estudo, levando em consideração sua importância em quantidade de massa, possíveis impactos, econômicos, energéticos etc. Obviamente, algumas informações não são contempladas devido ao aumento da complexidade do estudo, portanto na etapa de coleta de dados é necessário estabelecer critérios de relevância já mencionados para a contabilização dos dados. No entanto, informações para a construção do ICV podem ser revistas quanto a sua relevância para o estudo nas etapas posteriores do mesmo. Assim, é estabelecida uma das mais importantes características do ACV: ser um processo operado iterativamente, ou seja, sendo realizado novamente desde as etapas iniciais utilizando informações posteriores decorrentes do próprio estudo.

Os dados coletados são posteriormente analisados quanto a sua representatividade estatística das informações que representam fluxos e processos. Essa etapa da construção do inventário é conhecida como validação dos dados e tem a função primária de verificar erros significativos no balanço de massa e falta de informações que poderiam ser importantes para o estudo. Dependendo do resultado dessas validações, o estudo pode acabar voltando para suas etapas iniciais, novamente podendo mudar o objetivo e escopo para prover um inventário mais consistente com os objetivos do estudo.

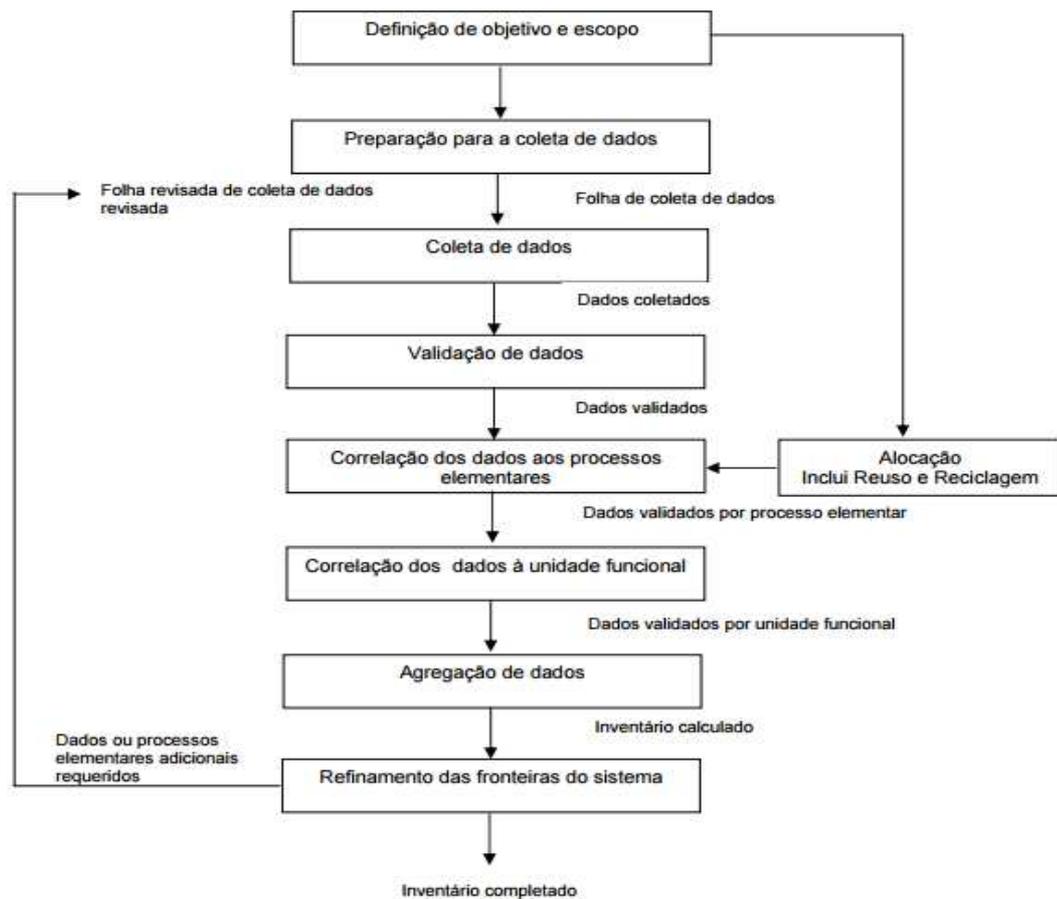


Figura 0.5. Fluxo de trabalho envolvido na construção de um inventário.

A transformação em relação a UF é uma das etapas finais da construção do Inventário e tem como objetivo principal normalizar todas as entradas e saídas com respeito à função específica do processo. O resultado organizado dessa etapa é o Inventário concluído. Logo após essa etapa, pode ser considerado um novo ciclo da construção do inventário, ou até mesmo do ACV inteiro, para refinar as fronteiras do sistema, tornando assim o inventário final o mais consistente possível com os objetivos do estudo.

Depois de concluído o ICV, é possível que se obtenham valores referentes a potenciais de impacto ambiental específicos das emissões calculadas. Esses indicadores de impacto são obtidos através da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), que, por sua vez, consiste nas seguintes etapas obrigatórias: classificação e caracterização. E das seguintes etapas facultativas: Normalização, Ponderação e Agrupamento. A etapa de classificação consiste em enquadrar os

fluxos que apresentem algum tipo de emissão para um compartimento da natureza, para uma categoria de impacto. Um fluxo pode ser classificado para mais de uma categoria de impacto se as suas emissões contribuem para as mesmas.

A etapa de caracterização consiste em aplicar um modelo que transforme os valores de saída classificados para uma categoria de impacto para um valor em comum que represente o potencial de impacto daquela categoria. Esse valor comum é conhecido como indicador da categoria de impacto, que é representado pela emissão de uma substância específica frequentemente associada ao impacto. Um exemplo comum é o indicador da categoria de impacto de potencial de aquecimento global, representado pela emissão de dióxido de carbono. O dióxido de carbono é a substância em maior quantidade na atmosfera, causadora da variação de temperatura média global pela absorção de radiação infravermelho emitida pelo sol; também é a substância com o maior tempo de vida médio na atmosfera que causa esse efeito e, por isso, é normalmente escolhida como indicador dessa categoria de impacto.

Outras substâncias também causam o aumento da temperatura média global pelo mesmo mecanismo que o dióxido de carbono, no entanto, seu efeito pode ser mais ou menos intenso, por mais ou menos tempo. Os modelos de caracterização têm seus Fatores de Caracterização para as substâncias que eles consideram como impactantes para cada categoria de impacto, e são utilizados para caracterizar as emissões classificadas de um ICV. Portanto, a escolha de um método de caracterização e categorias de impacto devem ser consistentes com os objetivos e escopo do estudo.

A última etapa da ACV é a interpretação dos resultados. Nessa etapa são relatados e discutidos os resultados do ICV e AICV a cumprir os objetivos do estudo. A qualidade do estudo também é apresentada referente aos resultados das etapas. Normalmente apresenta uma avaliação estatística da representatividade dos dados coletados, uma análise de incerteza referente aos fluxos do ICV em relação aos valores caracterizados dos impactos calculados, além de análises de sensibilidade, momento em que é acessada a influência da falta de disponibilidade de dados

específicos e considerações realizadas. A avaliação de contribuição é um meio de rastrear as fontes de impactos do sistema para processos e fluxos individuais, também podendo ser analisadas individualmente as etapas do ciclo de vida. O principal objetivo da etapa de interpretação é fornecer informações para o tomador de decisão sobre os seus processos de produção referentes a aspectos ambientais condizentes com os objetivos do estudo.

### **3.8. Estudos de ACV em Sistemas de Transporte Envolvendo GNV e Diesel**

A Avaliação de Ciclo de Vida é provavelmente a métrica mais importante para orientar tomadores de decisão a escolherem soluções tecnológicas para uma finalidade específica por ser capaz de apresentar os impactos associados a toda uma cadeia produtiva e não apenas a uma fase específica do ciclo de vida de um sistema. No caso da escolha de combustíveis para um dado sistema de transporte, a abordagem de ACV é particularmente importante, já que é comum que os tomadores de decisão e a própria opinião pública tenham a tendência de observar apenas os impactos associados ao uso do combustível. No entanto, há impactos ambientais, econômicos e sociais muito relevantes associados à extração/produção do combustível e a seu transporte até os locais de distribuição e abastecimento dos veículos. Para os sistemas de produto que envolvem combustíveis, os escopos adotados recebem denominações particulares: *well-to-tank* (berço ao tanque), que avalia impactos associados a extração, processamento e transporte do combustível até os pontos de abastecimento, *tank-to-wheel* (tanque às rodas), contemplando os impactos estritamente relacionados ao uso do combustível em veículos e *well-to-wheel* (berço às rodas), que é o escopo completo, (do berço ao túmulo). É importante destacar que considerações particulares quanto à inclusão ou não de produção e manutenção dos veículos e da infraestrutura de abastecimento devem ser referidas nos trabalhos.

No caso do GNV, as fases de extração, beneficiamento e transporte são usualmente desconsideradas pela opinião pública, que considera seu uso benéfico levando em conta especialmente critérios econômicos e baixas emissões de GEE na fase de uso. No entanto, é importante que se destaque que as etapas do escopo

well-to-tank podem trazer impactos ambientais significativos, tanto se forem considerados impactos globais (potencial de aquecimento global), quanto impactos locais (como, por exemplo, potenciais de eutrofização e acidificação). Esses impactos serão tão maiores quanto mais complexa for a estrutura de distribuição do GNV e mais longa for a distância entre a origem do gás e os pontos de abastecimento dos veículos.

Para ilustrar a importância da inclusão do escopo *well-to-tank*, pode-se mencionar o trabalho recente de Safaei, Freire e Antunes (Safaei, 2015), que identificaram estágios de processamento (liquefação do gás) e transporte como gargalos tecnológicos para o uso do GNV liquefeito importado da Nigéria para a Europa.

As tecnologias de extração e beneficiamento do gás natural são diversas, conforme a origem do gás natural e as empresas que realizam estas operações, o que traz grande complexidade para estudos *well-to-tank* realizados para locais de abastecimento que recebam gás de várias origens, como é o caso da Europa. Também é importante destacar que a pressão de gás nos pontos de abastecimento pode aumentar ou reduzir as demandas de energia do sistema e que o gás natural pode ser liquefeito e transportado do ponto de produção ao ponto de uso ou transportado por gasodutos, trazendo mais variáveis a serem consideradas em estudos para locais como a Europa, pelas mesmas razões anteriormente expostas.

Lopez e colaboradores (2009) aplicaram a ACV para compararem impactos associados às emissões de gases de efeito estufa e consumo de combustível em veículos de coleta de lixo na cidade de Madrid, na Espanha. Três combustíveis diferentes foram considerados: diesel, diesel com 30% de biodiesel (B30) e GNV em dois tipos de motores: ciclo Otto e ciclo diesel. O trabalho explorou cenários *well-to-tank*, *tank-to-wheel* e *well-to-wheel*.

Comparando-se apenas a análise *tank-to-wheel*, os resultados mostraram que o diesel com 30% de biodiesel apresentou as mais baixas emissões de CO<sub>2</sub> em kg/km, seguido de diesel e biodiesel. Nos escopos *well-to-tank*, a com o menor

potencial de aquecimento global foi obtido para o GNV, mas deve-se destacar que os autores consideraram que o GNV foi transportado por navio, liquefeito e, por isso, não há impactos associados às emissões em gasodutos, onde ocorre uso do próprio gás para a energia necessária em estações de compressão, controles de pressão do sistema por queima de parte do gás (operação chamada usualmente de *flare* ou *flaring*) ou por purga (operação usualmente chamada de *venting*). As operações de queima emitem majoritariamente CO<sub>2</sub>, enquanto que a purga emite CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos, esta última com importante efeito estufa.

Recentemente, Tong et al (2015) conduziram um estudo de ACV para veículos médios e pesados abastecidos com gás natural e outros combustíveis originados do gás natural, com diferentes tecnologias, incluindo veículos com célula de combustível e veículos a diesel abastecidos com diesel produzido a partir do processo Fischer-Tropsch, originado do gás de síntese que pode ser obtido por reforma do gás natural. Neste estudo foi apresentada uma varredura de tecnologias para conversão química e física do gás, criando uma estrutura metodológica consistente, onde o gás extraído pode ser beneficiado, processado e armazenado por diferentes tecnologias, favorecendo estudos posteriores mais robustos e procedimentos de alocação, conforme mostra a Figura 3.6.

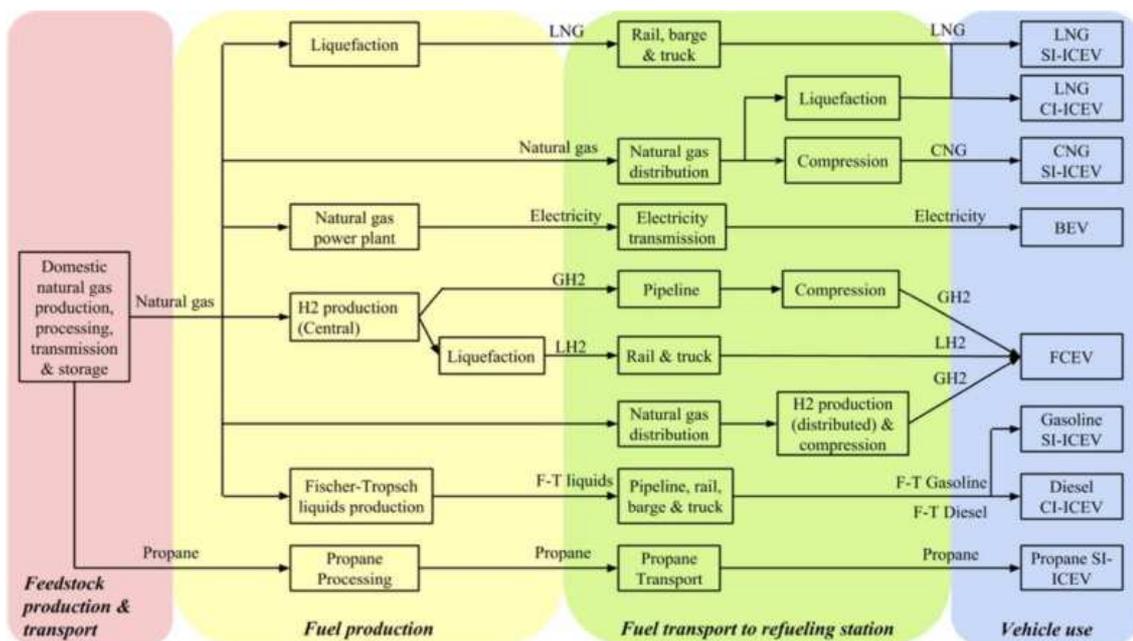


Figura 0.6. Fronteira do sistema gás natural estudado por Tong (Tong, 2015).

### **3.9. Análises de Incertezas de Monte Carlo**

Devido às possíveis fontes de variações nos dados utilizados na construção do ICV e dos modelos de caracterização, os resultados do inventário e resultados caracterizados apresentam incertezas. A falta de conhecimento do perfil estatístico dos resultados da ACV é uma das principais dificuldades para a comparação entre diferentes estudos. Além disso, as ferramentas estatísticas servem para a verificação da qualidade dos dados, identificação de dados anômalos, e comparação entre impactos de diferentes sistemas de produto que realizam a mesma função (Lloyd et al, 2007).

As principais fontes de incertezas dentro de um estudo de ACV são: parâmetros associados aos dados coletados; incertezas do modelo utilizado; incerteza devido às considerações do estudo; variações especiais e temporais; diferença entre tecnologias e equipamentos para a fabricação do mesmo produto. Os parâmetros e a incerteza do modelo são caracterizados por distribuições de probabilidade, enquanto que a incerteza devido às escolhas é abordada através do desenvolvimento de cenários únicos (Malça, 2011). Um estudo de ACV geralmente incorpora vários fluxos e processos, e também suas incertezas que, propagadas, resultam em uma incerteza, estando associado a um fluxo de saída ou categoria de impacto. As causas das incertezas devido aos dados são erros de medidas experimentais; dados não representativos; e falta de dados. As incertezas associadas à modelagem do ACV tendem a surgir quando as incertezas dos dados alimentados são relativamente grandes. Variações espaciais e temporais são bem recorrentes nos estudos de ACV, pois é comum adaptar base de dados de vários locais do mundo ao mesmo tempo, assim como utilizar dados que foram coletados em momentos diferentes (Guo, 2012).

Devido aos vários tipos e fontes de variabilidade e incerteza já citados, surgiram várias metodologias de classificação e quantificação, sendo o método estatístico Simulação de Monte Carlo (SMC) considerada a que prove mais informações ao tomador de decisões. A SMC é uma técnica que propaga as incertezas conhecidas dos parâmetros alimentados para resultar na distribuição de

probabilidade de uma variável de saída. Consequentemente, é uma técnica ideal para quantificar as incertezas dentro de estudos de ACV, entretanto é pouco utilizada nos mesmos, pois tende a ser um processo computacionalmente custoso (Lloyd et al, 2007).

No próximo capítulo apresenta-se a metodologia empregada neste trabalho.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada ao trabalho divide-se em duas partes: a primeira refere-se ao levantamento de dados experimentais das emissões de gases de exaustão de veículos pesados empregados na coleta de lixo urbano na cidade de Porto Alegre / RS, e do consumo dos combustíveis utilizados em cada veículo: diesel-B5 e GNV. Os veículos foram monitorados nas condições parado e em rota, durante o período de agosto de 2012 a julho de 2013. A segunda parte refere-se à Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) utilizando-se dos dados experimentais obtidos durante monitoramento, bem como informações obtidas de base de dados das ferramentas de ACV.

Para o monitoramento dos veículos foi utilizada a infraestrutura disponível na PUCRS e veículos vinculados ao convênio de pesquisa entre a PUCRS e empresa SULGAS, sendo um veículo dedicado a GNV (caminhão marca Iveco Tector 170E20 200 CV), monitorado em ambas as condições (parado e em rota), e um veículo dedicado a diesel-B5 (caminhão marca Volkswagen Constellation), este monitorado apenas na condição parado, ambos da empresa Revita, empregados na coleta de resíduos domiciliares e similares nos quesitos potência e torque do motor, e consumo específico de combustíveis.

Para o desenvolvimento da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e sua aplicação foi utilizada a infraestrutura da Universidade de Coimbra, em período de doutorado sanduíche (Programa PDSE), no Departamento de Engenharia Mecânica, que já desenvolve pesquisa em emissões de veículos pesados movidos a biodiesel.

## **4.1. Monitoramento dos Veículos**

A pesquisa com o veículo abastecido a GNV teve início em agosto de 2012, e seguiu até junho de 2013, obtendo resultados para duas condições distintas: veículo parado e veículo em rota. Foram selecionadas duas rotas de coleta de resíduos domiciliares na cidade de Porto Alegre / RS, sendo estas consideradas as mais significativas e utilizadas diariamente na operação normal da empresa. Para este veículo foram realizados três monitoramentos com o veículo parado (novembro/2012, fevereiro/2013, abril/2013), que corresponde aos períodos de início, meio e fim de operação do veículo durante o desenvolvimento do convênio entre a PUCRS e a SULGAS. Estes ensaios foram realizados com o intuito de verificar se as condições de funcionamento e manutenção do motor encontravam-se adequadas durante todo o período de testes. Para os ensaios em rotas do veículo a GNV, foram monitoradas de 8 a 10 horas de operação por dia, totalizando um total de 208 horas durante todo o período (10 meses).

Para o veículo abastecido a diesel-B5, foram realizados também três monitoramentos com o veículo na condição parado, nos mesmos períodos do veículo a GNV (novembro/2012, fevereiro/2013, abril/2013). Os ensaios no veículo operando com diesel-B5 não foram possíveis de serem realizados em rota devido a problemas com a empresa prestadora do serviço. Então, como alternativa, foram utilizados somente os dados de consumo de combustível obtidos junto à empresa Revita para o mesmo período do veículo que operou com GNV, sendo, posteriormente, aplicada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para ambas as condições.

### **4.1.1. Veículo Abastecido à GNV**

Para os ensaios com GNV foi utilizado um caminhão Iveco Tector 170E20 abastecido a GNV, conforme Figura 4.1. A tecnologia da IVECO já é utilizada em outros países, sendo um protótipo importado para o Brasil com motor 6 NEF dedicado exclusivamente a GNV, 6 cilindros em linha, quatro válvulas por cilindro e 5,9l, atingindo sua potência máxima de 147 kW em 2700 rpm e 650 N.m de torque

máximo a 1250 rpm, e autonomia média de 1,7 km/m<sup>3</sup>. De acordo com as especificações do fabricante (FPT Industrial), o motor pode reduzir em até 90% o material particulado (MP) quando comparado a um motor EURO III operando com diesel – B5, reduzindo ainda o percentual de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>.



Figura 0.1. Veículo Iveco Tector 170E20 dedicado a GNV.

Para o armazenamento do gás, o veículo foi equipado com 6 cilindros, marca Convergás, sendo 3 cilindros de cada lado do veículo (Figura 4.2), com capacidade total de 126 m<sup>3</sup> a 200 bar de pressão, e com duas válvulas para abastecimento simultâneo com intuito de diminuir o tempo de abastecimento, que ocorre em torno de 15 minutos.

#### 4.1.2. Veículo Abastecido à Diesel

Para os ensaios com diesel-B5 foi utilizado um caminhão Volkswagen Constellation, conforme Figura 4.2, com peso bruto de 16 toneladas, potência máxima de 186 kW a 2500 rpm, torque máximo de 950 N.m a 1400 rpm, e autonomia média de 1,6 km.L<sup>-1</sup>.



Figura 0.2. Veículo Volkswagen Constellation dedicado a diesel – B5.

#### **4.1.3. Etapas Anteriores às Medições**

Com o intuito de diminuir as possíveis falhas durante as medições, foi realizado um protocolo anterior às medições, que teve por base as seguintes etapas:

1) Verificação do local de instalação do equipamento no caminhão a ser monitorado: - melhores pontos de fixação dos sensores; - disponibilidade de passagem dos cabos de comunicação sensores-módulo; - definição do posicionamento do módulo de aquisição em local seguro e lacrado.

2) Instrução da equipe que operou o veículo (motorista e coletores): - informações referentes ao manuseio e cuidado com o equipamento e sensores em campo;

3) Definição da estratégia de instalação do equipamento e dos ensaios em campo, bem como datas e períodos de análise, com intuito de interferir o menos possível na rotina operacional da equipe. Para acompanhamento dos ensaios com

as informações necessárias durante operação, foi confeccionada planilha para coleta dos dados em campo.

#### 4.1.4. Dispositivo para os Equipamentos Embarcados

Após a definição dos locais de sensoriamento e armazenagem dos analisadores, foi confeccionado e instalado o dispositivo, Figura 4.3, para alojamento correto e seguro dos equipamentos de monitoramento. As condições de ensaio foram testadas para prevenir influências, tais como chuva, vento, aquecimento, trepidação, lavagem do veículo, e outras inesperadas.



Figura 0.3. Dispositivo para armazenar o analisador de gases embarcado no veículo.

#### 4.1.5. Equipamento Analisador de Gases

O equipamento utilizado para monitoramento dos gases de exaustão foi um analisador de gases da marca Texto, modelo 350 (Figura 4.4), com capacidade de analisar por infravermelho não dispersivo (NDIR) e sensores eletroquímicos os seguintes gases: oxigênio ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos nitrosos ( $NO_x$ ) e compostos de enxofre ( $SO_x$ ), conforme especificações apresentadas na Tabela 4.1. O equipamento opera com um software dedicado para compilação dos dados, fornecendo resultados gráficos em tempo real e salvando os mesmos em tabelas que podem ser exportadas para outros aplicativos.



Figura 0.4. Analisador de gases portátil (Testo 350).

Tabela 4.1. Especificações técnicas do analisador de gases (Testo 350).

TESTO 350	Limite de Detecção	Tempo de Resposta (s)	Resolução	Exatidão
O <sub>2</sub>	0,01%	< 20	0,01%	±0,8% v.m.
CO	1 ppm	< 40	1 ppm	± 5% v.m.
CO <sub>2</sub>	0,01%	< 10	0,01%	±1,5% v.m.
NO	1 ppm	< 30	1 ppm	<10% v.m..
NO <sub>2</sub>	0,1 ppm	< 40	0,1 ppm	± 2% v.m.
SO <sub>2</sub>	0,1 ppm	< 30	1 ppm	± 5% v.m.
HC	100 ppm	< 35	10 ppm	± 2% v.m.

v.m.: valor medido

Com o analisador instalado no interior do dispositivo projetado, seus cabos foram acoplados e a alimentação de energia ligada, de modo que sua unidade de controle, acoplada por cabo até a cabine do caminhão, ficasse visível para o acompanhamento das medições pelo pesquisador.

O início e o fim da coleta de dados foram programados em intervalos de tempos de 30 minutos, no transcorrer do percurso da rota, com leituras de 1 em 1 segundo, com intuito de não prejudicar ou saturar as células de leituras dos gases. Adicionalmente um tempo de 10 a 15 minutos foi utilizado para limpeza das células, sendo o equipamento instalado e retirado início e no fim de cada medição.

A sonda para captura dos gases de exaustão foi instalada na ponta do escapamento do caminhão, no sentido perpendicular ao escapamento, conforme orientação do fabricante do analisador (Figura 4.5). A sonda foi protegida com material refratário envolto para não ocasionar danos ao equipamento e erros nas medições, sendo retirada a cada ensaio.



Figura 0.5. Sonda metálica de análises dos gases de exaustão.

#### **4.1.6. Equipamento Analisador de Injeção Eletrônica**

Primeiramente foi instalado um conversor de energia de 12V para 110V, dentro do dispositivo a fim de ligar o analisador de gases durante os ensaios. Próximo ao conversor foi fixado um display da Sonda Lambda e datalogger (Figura 4.6). A sonda lambda foi instalada na saída inicial dos gases de escapamento antes do catalisador.



Figura 0.6. Conversor de energia e display da Sonda Lambda, e Sonda Lambda instalada.

Para aquisição de dados pelo datalogger, o sinal foi adquirido em paralelo dos sensores de temperatura da água e ar, ângulo da borboleta, MAP, pressão do turbo, TPS, rotação e lambda. Na Figura 4.7 segue a janela do software FuelTech Datalogger 3.58 utilizado para a compilação dos dados.

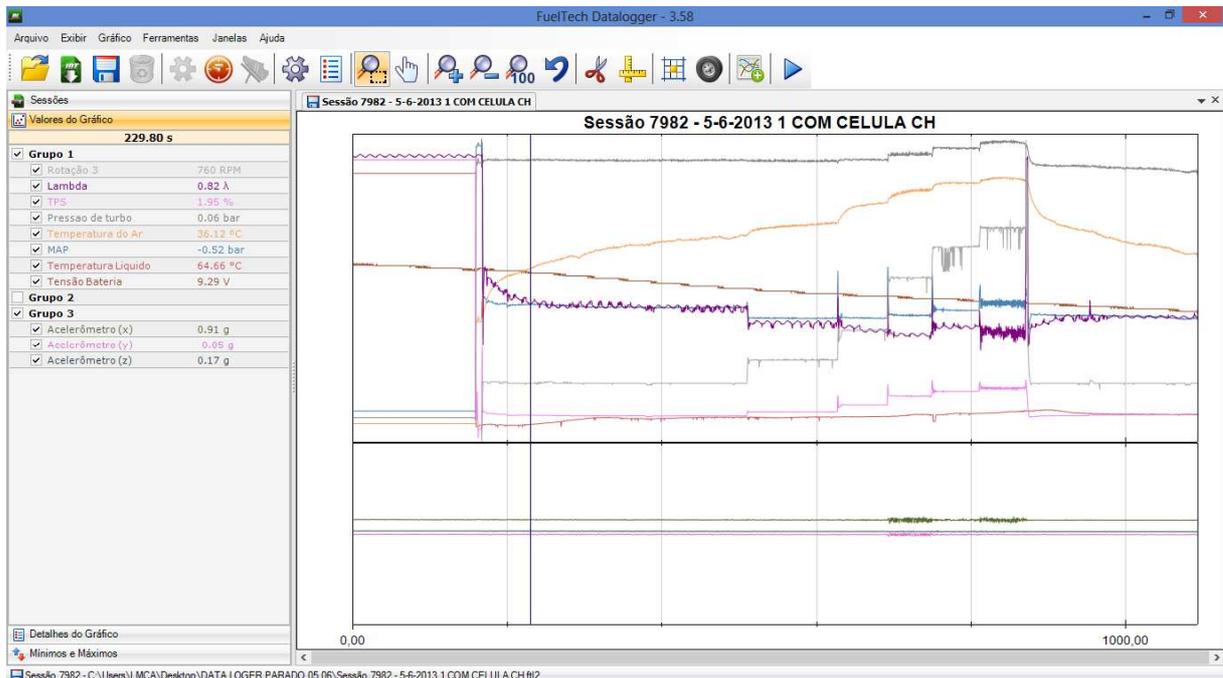


Figura 0.7. Imagem da janela do software FuelTech Datalogger 3.58.

Estas informações foram utilizadas para acompanhar e verificar as condições de funcionamento do motor a GNV durante todo o período de operação, permitindo inclusive intervenções para manutenção do veículo.

#### 4.1.7. Rotas Analisadas

Nas Figuras 4.8 e 4.9 podem ser observadas as duas rotas definidas para acompanhamento dos ensaios. O acesso ao sistema de GPS (GIS EYES) utilizado foi fornecido pela empresa Revita, usuária deste sistema em seus veículos. O sistema, além de fornecer dados on-line de onde o veículo se encontra, também permite observar todo o trajeto percorrido, endereços, distância, hora e outros dados a serem utilizados nas análises correlacionadas às emissões. Ainda, nas Figura 4.8 e 4.9, pode-se observar algumas informações obtidas após a operação diária do veículo, como distância total percorrida, tempo total de operação, tempo total com o veículo parado, tempo total em movimento, velocidade média, entre outras.

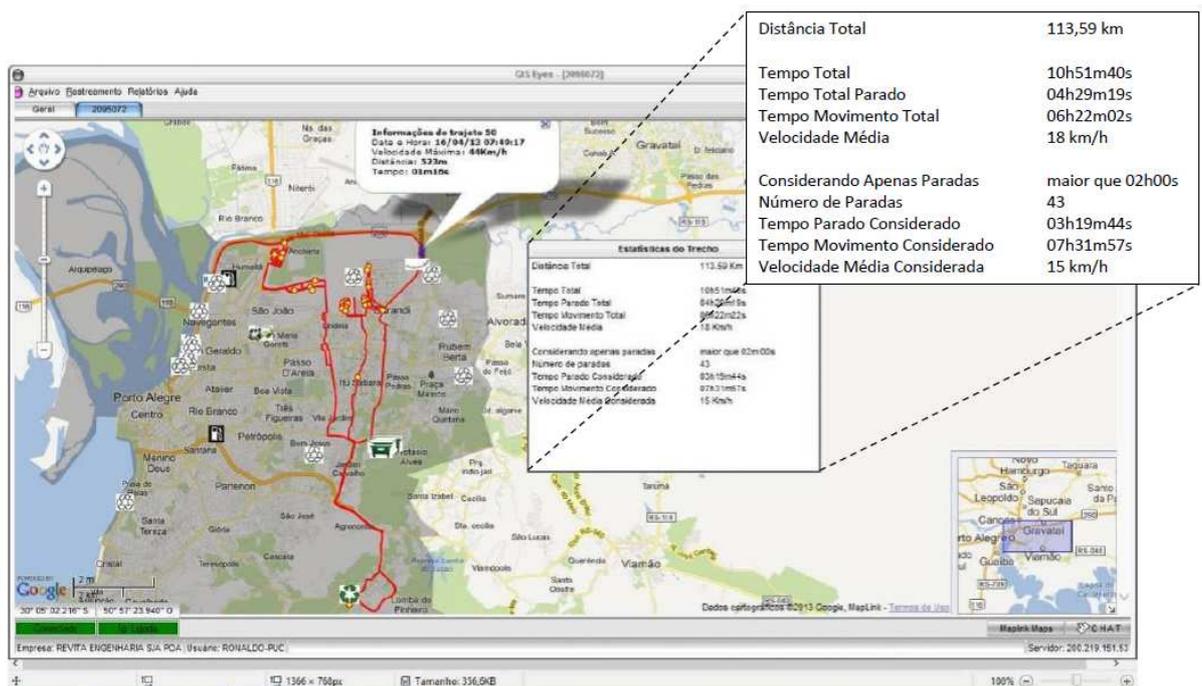


Figura 0.8. Rota ID-03.

Para a rota ID-03, a distância média percorrida é de 110 km, o que demanda um tempo total médio de 10 horas, sendo que 60% deste tempo é com o veículo em movimento e 40% com o veículo parado (esperando carregamento ou realizando a compactação do resíduo coletado). A velocidade média imposta ao veículo é de 15 km/h e o número médio de paradas é superior a 40. Em relação ao relevo

topográfico do trecho, observa-se que estas não apresentam aclives e, por vezes, apresentam trechos não asfaltados.

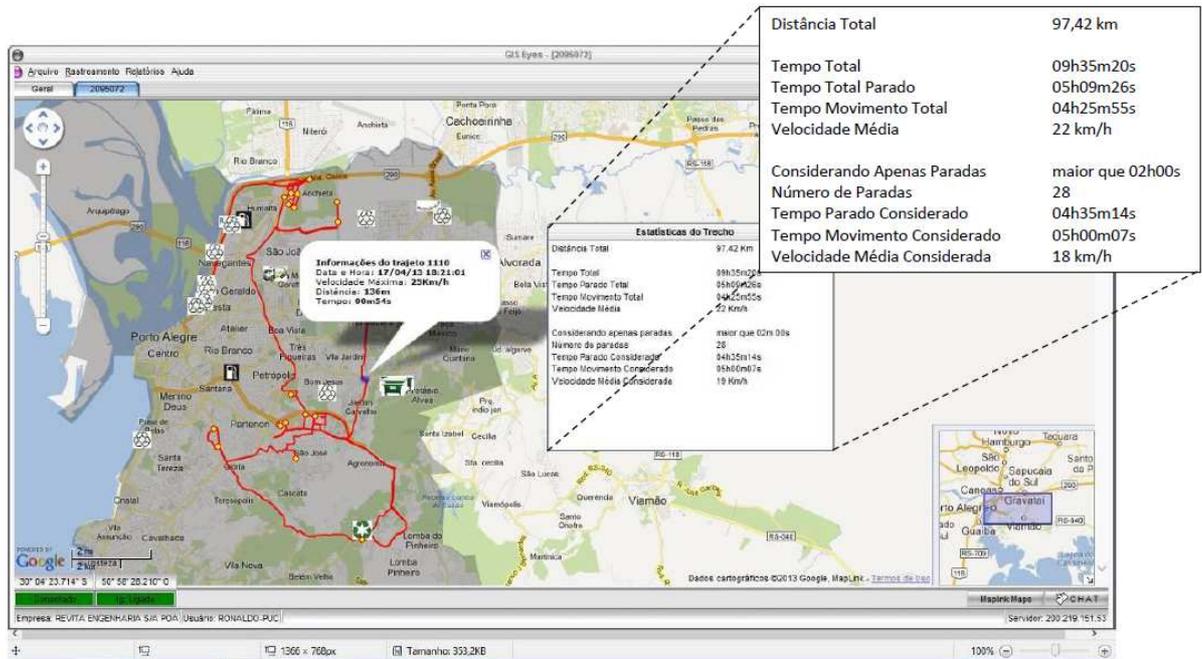


Figura 0.9. Rota PD-01.

Para a rota PD-01, a distância percorrida é pouco inferior a rota ID-03, com aproximadamente 100 km, o que demanda um tempo total médio de 9 horas, sendo 55% deste tempo com o veículo em movimento e 45% com o veículo parado. A velocidade média imposta ao veículo é de 18 km/h e o número médio de paradas é superior a 30. Em relação ao relevo topográfico do trecho, observa-se que existem ruas com maiores aclives e todo o trecho é asfaltado.

#### 4.1.8. Procedimento das Medições das Emissões

As medições das emissões se deram de duas formas:

- Com o veículo parado: inicialmente o veículo foi colocado em funcionamento em marcha lenta (800 rpm), e mantido por aproximadamente 5 minutos para estabilização das condições do motor, como temperatura do motor e do óleo lubrificante. Posteriormente, aumentava-se a rotação do motor até o limite máximo (2800 rpm), utilizando-se intervalos de incremento de rotação de 500 rpm, o que resultou em rotações de 800, 1000, 1500, 2000, 2500 e 2800 rpm. Para cada

rotação do motor, foi empregado um período de monitoramento de 5 minutos, com frequência de aquisição dos dados de 1 em 1 segundo. As medições com o veículo parado em sua grande maioria foram realizadas aos domingos, dia no qual o veículo não se encontrava em operação. Os veículos foram monitorados durante 3 períodos de tempo: imediatamente antes de entrar em operação de coleta (novembro/2012), após 3 meses de operação (fevereiro/2013), e ao final do projeto (abril/2013). Em todas as análises, foram realizadas pelo menos 3 medições para cada veículo em cada dia (tanto GNV quanto diesel-B5), sendo que em todos os casos as medições foram duplicadas em função da limitação no número de células que podem ser utilizadas no analisador de gases. Sendo assim, eram realizadas medições ora com a célula de SO<sub>x</sub> ora com a célula de HC, mantendo as demais.

- Com o veículo em rota: as medições foram realizadas apenas com o veículo a GNV. A rota PD-01 era utilizada nas segundas, quartas e sextas, e a rota ID-03 nas terças, quintas e sábados. A metodologia de ensaio consistiu das seguintes etapas: o equipamento era instalado no caminhão no pátio da empresa, depois o veículo se dirigia ao posto para abastecimento e, no fim da rota, realizava um novo abastecimento para acompanhar o consumo da rota no dia da medição. As medições foram realizadas com o veículo vazio nos trajetos e com ele cheio até o descarregamento da carga de lixo. Normalmente eram realizadas de 2 a 3 descargas tendo em vista que o volume de lixo variava conforme a rota, dia e o fator clima.

#### **4.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi utilizada para comparar o desempenho ambiental da coleta de resíduos domiciliares para duas rotas representativas do sistema de coleta do município de Porto Alegre-RS em veículos pesados abastecidos com GNV e com Diesel-B5. O estudo de ACV foi desenvolvido conforme procedimentos descritos pelas normas NBR 14040:2009 e NBR 14044:2009 (NBR ABNT, 2009a; NBR ABNT, 2009b). A modelagem dos fluxos e processos inventariados e a etapa caracterização foi realizada no software OpenLCA 1.5.0.

#### **4.2.1. Definição de Objetivos, Escopo e Fronteiras do Sistema**

O estudo desenvolvido tem como objetivo a análise do desempenho ambiental do sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, com o propósito de comparar o impacto ambiental relativo ao potencial de aquecimento global do sistema quando são utilizados veículos para a coleta de resíduos domiciliares abastecidos com diferentes combustíveis, GNV e Diesel-B5. O estudo se destina ao público geral e contempla todas as fases do ciclo de vida do sistema, para ambos os combustíveis, abordagem conhecida como *well-to-wheel* (Orsi et al, 2016) procurando identificar gargalos ambientais para o sistema.

A unidade funcional (UF) foi escolhida a partir da função do sistema, coleta de resíduos sólidos urbanos, e dos resultados preliminares de avaliação de representatividade estatística dos dados experimentais coletados.

#### **4.2.2. Construção do Inventário**

O processo de construção do inventário foi realizado como descrito nas normas NBR 14040:2009 e NBR 14044:2009 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). A coleta dos dados compreende a fase de transporte do GNV, da Bolívia até Porto Alegre, e uso. Para o uso em caminhão, para a coleta dos resíduos, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram registradas junto com dados do percurso e consumo de combustível.

As emissões contabilizadas foram somente as emissões de GEE, utilizando o modelo IPCC 2007 para a classificação e caracterização das substâncias emitidas referente ao indicador kg CO<sub>2</sub>/UF. As emissões de monóxido de carbono não são contabilizadas para a fase de uso de GNV, conforme descrito no Item 4.2.2.2 .

As fronteiras do sistema estão apresentadas na Figura 4.10, indicando os processos elementares nos quais o sistema foi dividido. Para o consumo de diesel-

b5 no mesmo processo, a contabilização das emissões dos processos de extração, produção e transporte são oriundos da base de dados Ecoinvent v2.2, e o consumo proveniente de dados primários de consumo.

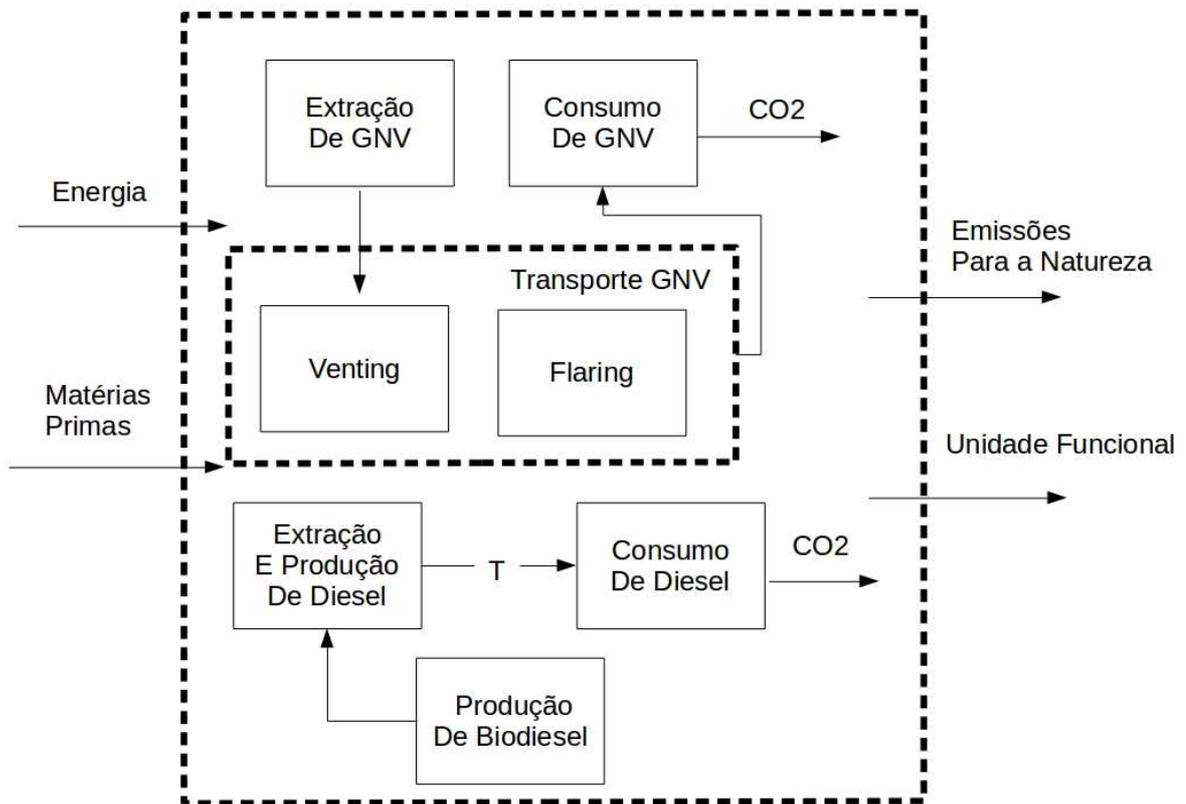


Figura 0.10. Fronteiras definidas do sistema em estudo.

Cabe salientar que para o inventário construído nesse estudo, não foram considerados fluxos associados a construção, manutenção dos caminhões e infraestruturas presente em todo o sistema de produto.

Os resultados do inventário referente à etapa de uso estão vinculados às particularidades do veículo utilizado, com o escopo geográfico e temporal. No entanto, para expandir as possíveis aplicações desse estudo por tomadores de decisão, os dados utilizados para a construção do inventário são médios para várias rotas, distâncias, intervalos de tempo necessários para a coleta de 1 tonelada de lixo e cargas. O perfil de distribuição dos dados de uso foram contabilizados para a construção do inventário com o intuito de estabelecerem-se estimativas de suas incertezas, buscando transparência dos resultados para futuras comparações.

Os dados de extração são referentes à base de dados Ecoinvent v 2.2 (Hischier et al, 2007), onde são contabilizadas também as entradas de matéria e energia que estejam associadas à emissão de GEE para GNV e diesel – B5, apresentadas na Quadro 4.1.

Quadro 4.1. Especificações utilizadas da base de dados Ecoinvent v2.2.

<b>Entrada</b>	<b>Base de dados Ecoinvent v 2.2</b>	<b>Combustível</b>
<b>Transporte</b>	Transporte, navio cargueiro transoceânico / GLO	<i>Diesel</i>
<b>Diesel</b>	Diesel, na refinaria /RER U	<i>Diesel</i>
<b>Biodiesel</b>	Ester metílico de óleo vegetal / BR	<i>Diesel</i>
<b>GNV</b>	Gas Natural / RU	GNV

#### 4.2.2.1. Transporte do GNV

O GNV utilizado no Brasil é originário da Bolívia e é transportado por gasodutos desde a origem até os pontos de distribuição. O transporte do GNV, da Bolívia até a cidade de Porto Alegre-RS foi contabilizado com dados primários a partir de médias mensais obtidas do boletim estatístico 2012 Boliviano (YPBF, 2013). O boletim apresenta os valores de gás entregues a duto no Brasil, bem como informações sobre a comercialização do gás natural da Bolívia para o Brasil. Na Figura 4.11 pode ser observado o gasoduto Bolívia-Brasil com várias informações das características, suas estações de compressão, pontos de entrega e outros.

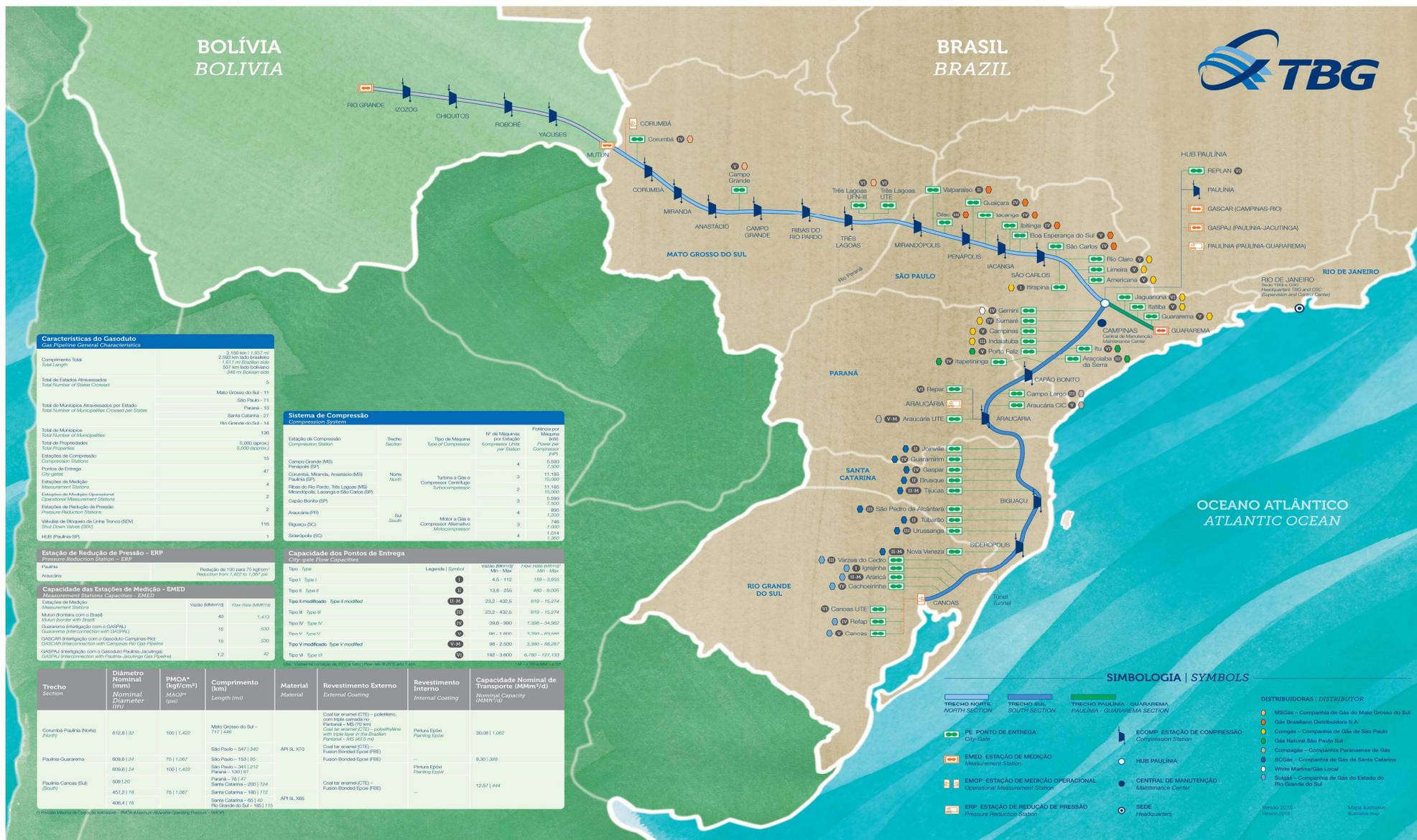


Figura 4.11. Gasoduto Bolívia-Brasil ([http://www.tbg.com.br/pt\\_br/o-gasoduto/tracado.htm](http://www.tbg.com.br/pt_br/o-gasoduto/tracado.htm)).

A energia requerida para o processo de transporte de GNV provém da combustão de parte do gás que é transportado, emitindo CO<sub>2</sub>. No processo de transporte também há perdas do gás nas estações de compressão por purgas, sendo liberado gás majoritariamente composto por CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Esse processo é conhecido como *venting*, e será assim denominado no presente trabalho. Como estratégia de mitigação de impacto ambiental, parte desse gás liberado é queimado nas estações emitindo dióxido de carbono como gás de efeito estufa. Esse processo é chamado de *flaring*, e será assim denominado neste trabalho.

Na construção do inventário o balanço mássico do GNV envolvendo os processos atribuídos acima foi contabilizado e normalizado em função da quantidade de GNV necessário para coletar 1 tonelada de resíduo domiciliar. Os dados são provenientes de dez meses em 2012, período considerado para a obtenção dos valores médios utilizados na construção do inventário, assim como para os demais dados necessários para o perfil de distribuição estatística (mediana, máximo, mínimo, desvio).

O transporte do óleo diesel – B5 foi considerado o modal hidroviário, a partir do porto de Houston nos Estados Unidos da América até o porto de Rio Grande-RS no Brasil, baseado na representatividade desta origem para as importações de óleo diesel – B5 feitas pelo Brasil, dado obtido para o mesmo período utilizado para o transporte de GNV da Bolívia até Porto Alegre através de consulta ao portal AliceWeb, mantido pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (consultado em 08/2016) que disponibiliza a movimentação da balança comercial do Brasil.

#### 4.2.2.2. Fase de Uso

Foram consideradas as emissões de CO<sub>2</sub> em função da combustão do GNV e do Diesel consumido pelos caminhões para a coleta de lixo. As informações de consumo de GNV foram obtidas para a coleta de lixo para vários dias, quando houve variação na carga de lixo coletada, tempo de percurso, número de viagens, rota e distância percorrida.

Especialmente para o cenário do GNV, os gases de exaustão direta foram analisados como especificado no Capítulo 4.1.5, sendo comparados diretamente entre as rotas analisadas. As emissões de CO foram estudadas através das medições de sua concentração na exaustão do motor do caminhão, também para vários dias de coleta. A concentração dada em ppm foi convertida em Nm<sup>3</sup> a partir das medidas de concentração de oxigênio nas emissões e do oxigênio de referência considerado para GNV de acordo com as Equações 4.1 e 4.2. Depois as emissões de CO foram convertidas para fluxo mássico e comparados com o fluxo mássico de CO<sub>2</sub>, para estimar valores mais representativos de emissões de CO para o consumo de GNV. A relação entre CO emitida por CO<sub>2</sub> foi definida pela razão entre as médias apresentadas na Tabela 4.2.

Usando as informações dos perfis de distribuições estudadas acima, foram aplicados modelos de regressão linear entre as vazões mássicas de CO e CO<sub>2</sub> para a construção de inventário, utilizando a concentração de uma das substâncias para estimar as vazões mássicas dos poluentes. Assim, uma relação entre as duas propriedades foi obtida a Equação 4.3 com valor de p 0,00012 e R<sup>2</sup> de 0,9488.

$$M_{gás} = ppm_{gás} \cdot F_{gás} \cdot \rho_{gás} \cdot Z \quad (4.1)$$

$$Z = \frac{273,15 \cdot p_{atm}}{(273,15 + T) \cdot 1013} \cdot V \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \quad (4.2)$$

$$e^{(-660^{1/f_s})} = \frac{0,24042}{CO_2} - 0,11109 \quad (4.3)$$

Foi utilizada a Equação 4.3 para os dados de emissão de CO<sub>2</sub> no processo de coleta de resíduo domiciliar para estimar os respectivos fluxos de CO. Na normalização dos fluxos pela UF temos que a razão de massa CO por massa de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de lixo recolhido é de menos de 0,05%.

Tabela 0.2. Distribuição dos dados do analisador de gases dos processos de combustão de GNV no caminhão.

<b>Estatísticas</b>	<b>% O<sub>2</sub></b>	<b>ppm CO</b>	<b>%CO<sub>2</sub></b>	<b>CO (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CO kg/h</b>	<b>CO<sub>2</sub> kg/h</b>
<b>Mínimo</b>	4,01	9,68	1,650	69,62	0,000	0,2200
<b>1º Quartil</b>	5,04	430,31	6,680	766,79	0,025	0,8850
<b>Mediana</b>	5,43	649,83	8,550	863,18	0,030	1,1300
<b>Média</b>	7,901	1433,87	7,167	1919,27	0,05571	0,9443
<b>3º Quartil</b>	8,875	1495,31	8,800	2029,26	0,060	1,1550
<b>Máximo</b>	18,04	5526,34	9,010	6909,97	0,190	1,1800
<b>Desvio</b>	5,2	1891,40	2,814	2315,88	0,0629	0,3678

Uma vez que a fração mássica de CO nas emissões de gases em veículo abastecido com GNV representam 0,097% dos gases exaustos e que não tenha sido possível sua determinação experimental para veículo abastecido com diesel-B5, os fluxos de CO não foram considerados no estudo.

Os dados médios mensais de consumo de combustível, massa de resíduos recolhidos, distância percorrida, número de viagens, e horas percorridas para a coleta de resíduos usando GNV e diesel-B5 foram acompanhados para a construção do inventário da etapa de uso dos combustíveis. As emissões de CO<sub>2</sub> no consumo de GNV e diesel-B5 no processo de recolhimento de resíduos urbanos foram contabilizadas considerando os dados de consumo dos combustíveis nos trajetos onde o sistema desempenhou a sua função. Um balanço mássico foi utilizado para que se estabelecesse uma equivalência entre o consumo dos combustíveis e os respectivos fluxos mássicos de CO<sub>2</sub>. Para isso, foi considerada uma combustão completa (Eq 3.1), não sendo considerada formação de CO como foi explicado nesta seção 4.2.2.2, e informações físicas e químicas do combustível, como conteúdo de carbono e densidade. Os dados da composição média do metano, de onde é retirado o seu conteúdo de carbono, e massa específica foram obtidos em relatório referente à qualidade do GNV transportado nos gasodutos (Silva, Moraes e Assis, 2010). Para Diesel-B5 as informações de conteúdo de carbono e massa específica são referentes a Agarwal et al (2007).

A validação dos dados de inventário foi por meio da análise estatística descritiva e inferencial das médias mensais de consumo de combustível, massa de resíduos recolhidos, distância percorrida, número de viagens, e horas percorridas para a coleta de resíduos usando GNV e Diesel do inventário da etapa de uso dos combustíveis. Foi dada preferência na construção do inventário as variáveis estudadas que fornecessem a possibilidade de terem sua distribuição reconstruída, de forma que a representatividade dos dados pudesse ser verificada somente com os valores de estatística descritiva. Os principais critérios analisados foram o Coeficiente de Variação (CV), que indica a dispersabilidade relativa, e a diferença entre média e a mediana. O CV é dado em percentagem, indicando a dispersabilidade total dos dados em relação ao seu valor médio (Equação 4.4). Além disso, os gráficos da distribuição de frequência foram levados em consideração. Em segundo plano a presente abordagem de análise de dados também é aplicada para a identificação de dados anômalos.

$$CV = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{média}} \times 100 \quad (4.4)$$

### 4.3. Análise de Incertezas

Devido às diversas fontes de variação dos dados utilizados, assim como as incertezas nas medidas, os valores de emissões caracterizadas em uma avaliação de ciclo de vida tendem a ser representados de melhor forma por uma distribuição de valores possíveis. A análise de incertezas fornece as estatísticas para a caracterização do perfil estatístico, como os limites inferiores e superiores que compreendem 95% de todos os valores possíveis, desvio padrão, mediana e média. Através desses dados é possível comparar a precisão de uma ACV a partir de um ICV em particular, e fornece meios de comparação de diferentes cenários, e sistemas de produto que desempenham a mesma função.

Para o ACV realizado nesse estudo, tanto para o cenário que utiliza GNV como combustível para veículo pesado quanto para o que utiliza diesel – B5, foi

quantificada as incertezas através do método Simulação Estocástico Monte Carlo com 1000 ciclos e parâmetros de distribuição retirados das estatísticas dos valores de saída, o tipo de distribuição da análise dos gráficos de densidade de frequência . Para cada ciclo da simulação, um dado de cada valor de saída é gerado, estando dentro dos intervalos de dados possíveis e em função da distribuição, caracterizado e somado, obtendo um valor final de emissão para a categoria de impacto para o correspondente ciclo (Lloyd et al, 2007).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados apresentados a seguir foram agrupados da seguinte forma:

5.1. Monitoramento das Emissões de Gases e Consumos de Combustíveis

5.2. Inventário de Ciclo de Vida

5.3. Resultados Caracterizados pelo Método IPCC

5.4. Análise de Contribuição de Processo

### **5.1. Monitoramento das Emissões de Gases e Consumos de Combustíveis**

Para os resultados das análises de emissões de gases de exaustão dos veículos monitorados durante os testes, inicialmente serão apresentados exemplos dos dados obtidos nas diferentes condições analisadas: com os veículos à GNV e diesel-B5 parados variando rotação do motor; e com o veículo à GNV operando nas rotas PD-01 e ID-03.

#### **5.1.1. Emissões de Gases para os Veículos Parados**

Os testes de monitoramento dos veículos parados foram realizados nos pátios das empresas REVITA e BIVEL, e ocorreram em novembro de 2012, fevereiro e abril de 2013. Durante os testes, o caminhão ficou em marcha lenta (800 rpm) e teve sua rotação variada em intervalos de 500 rpm até 2800 rpm por período de até 5 minutos em cada rotação, durante seu incremento. Foram realizadas 9 análises com o veículo parado (3 em cada data) em função do tempo de uso do veículo, totalizando aproximadamente 4,5 horas de aquisição de dados para cada veículo. Os resultados médios das emissões dos gases foram plotados de

forma individual, em termos de % e ppm, o que facilita a comparação nos diversos testes. A Figura 5.1 apresenta um exemplo dos resultados obtidos em uma condição de teste. Em todas as análises, os dados foram obtidos em triplicada, sendo os valores médios apresentados posteriormente em função das rotações na Figura 5.2. Para estas condições foram utilizadas as células para detecção dos seguintes gases: O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e HC, intercalando algumas em função da limitação dos *slots* disponíveis no equipamento.

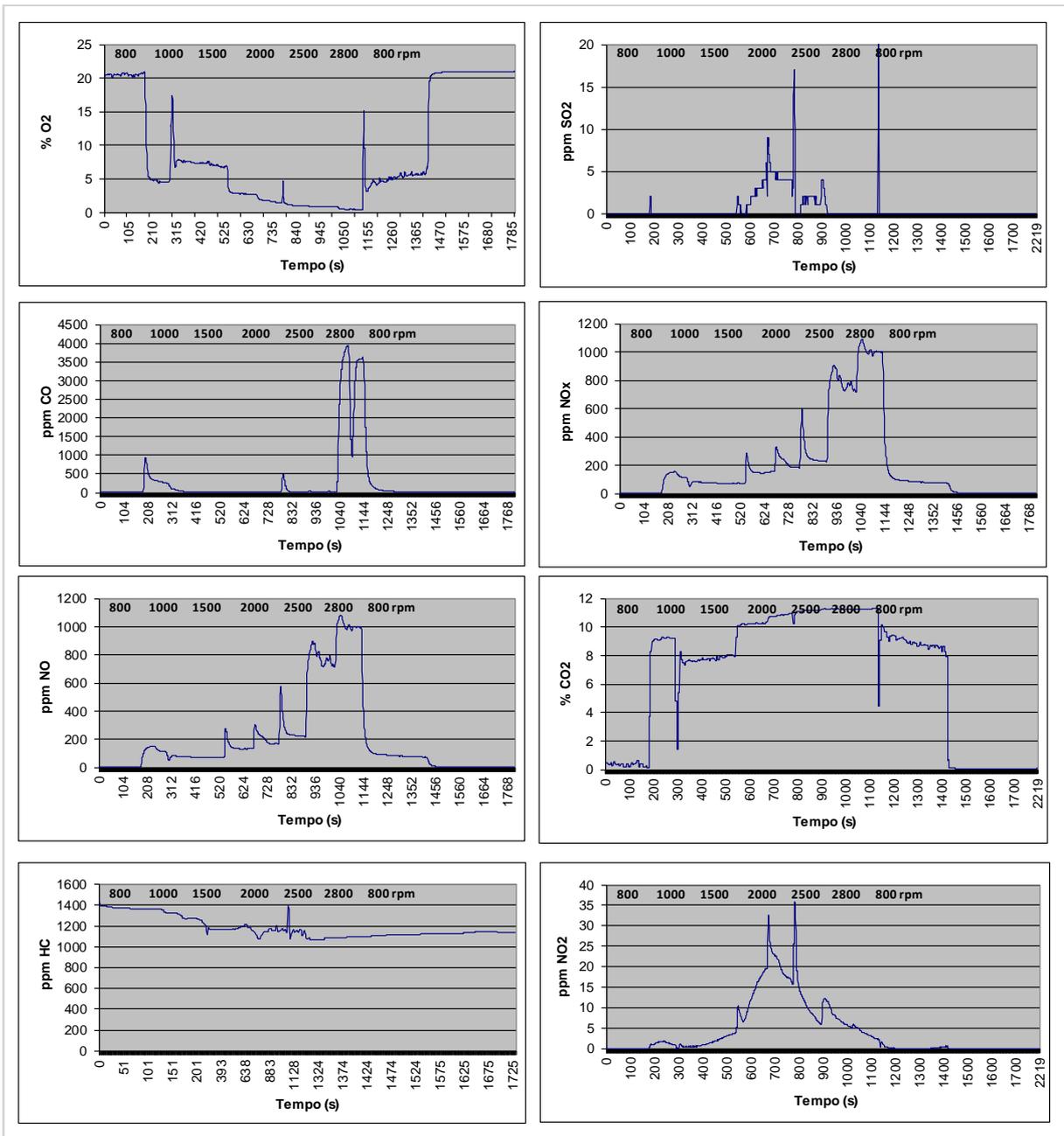


Figura 5.1 Monitoramento do veículo a GNV na condição parado. Data: 24/03/2013.

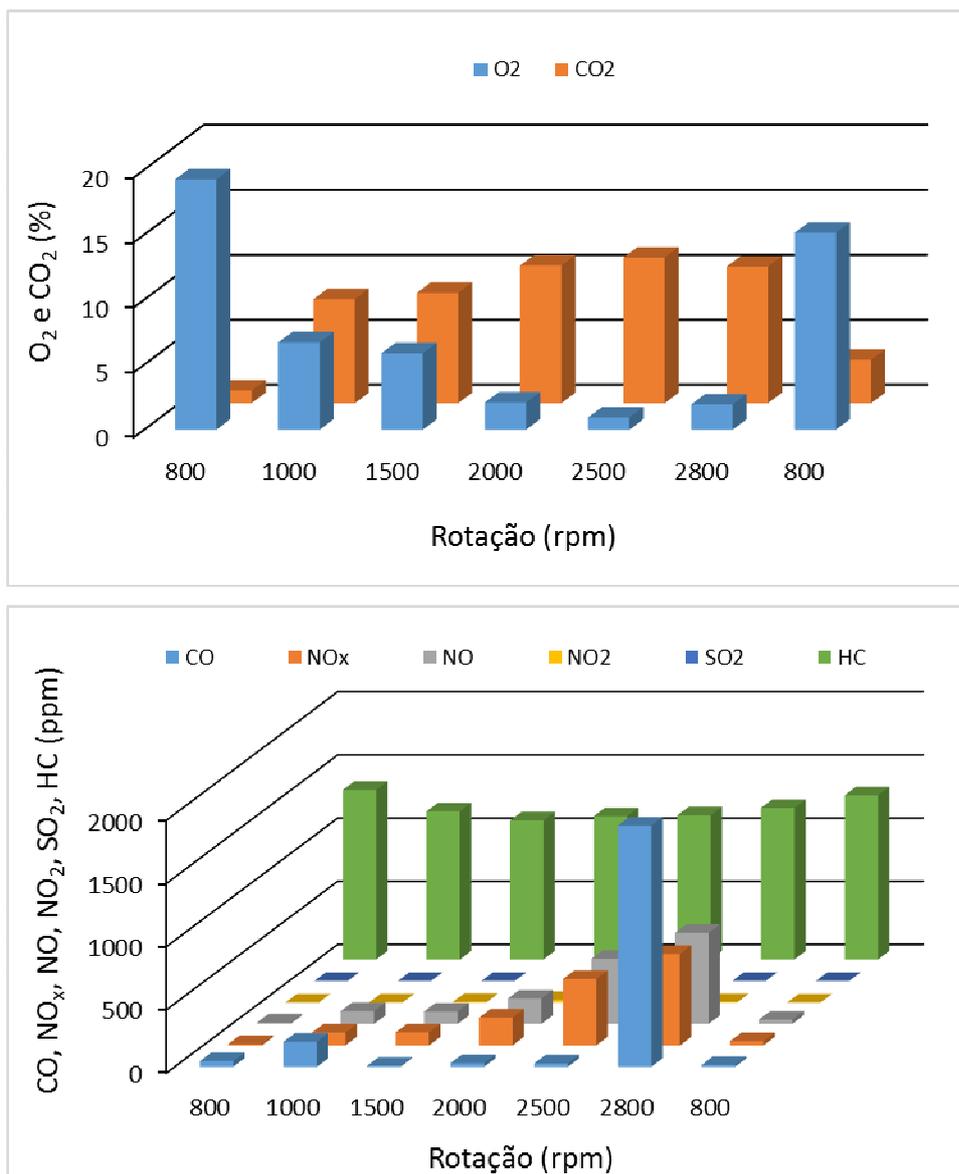


Figura 5.2 Comparação dos gases para o veículo à GNV na condição parado. Data: 24/03/2013.

Conforme se observa na Figura 5.2, os níveis de O<sub>2</sub> iniciaram em aproximadamente 21%, diminuindo a níveis de 5% para rotações entre 1000 e 1500 rpm, e atingindo valores menores que 1% durante os aumentos de rotação até o valor máximo de 2800 rpm. Durante o período de desaceleração do motor (diminuição da rotação para 800 rpm), os valores voltaram a 21%, permanecendo constante até o final do ensaio. O CO<sub>2</sub> apresentou comportamento oposto, com média inicial de 0,5% em marcha lenta (800 rpm), aumentando gradualmente durante aumento de rotação até picos de aproximadamente 11% para 2800 rpm, e decaindo durante desaceleração até a média de 0,5%. O comportamento de CO apresentou estabilidade durante todo o período de aumento de rotação, com

aumento significativo nos níveis durante o período de desaceleração até 800 rpm. NO e NO<sub>x</sub> apresentaram comportamentos similares, com aumento gradual à medida que foi incrementada a rotação do motor, com valores médios na faixa de 25 ppm para 800 rpm e pico de 1000 ppm na rotação máxima. NO<sub>2</sub> partiu de 0,1 ppm no início do ensaio, variando à medida que foi incrementada a rotação entre 30 e 35 ppm, contribuindo pouco para as emissões dos óxidos nitrosos. As emissões de hidrocarbonetos (HC) ficaram com valores médios em torno de 1200 ppm, com máximo de 1400 ppm para os instantes iniciais de operação do motor.

Para o veículo à diesel-B5, a Figura 5.3 apresenta exemplo dos resultados obtidos durante análise com o veículo parado. As principais diferenças observadas em relação ao veículo a GNV foram observadas para os gases SO<sub>2</sub>, CO, e HC, com valores maiores para o diesel-B5, enquanto os gases NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> apresentaram valores menores para o diesel-B5. Com o aumento das rotações, os níveis de O<sub>2</sub> diminuíram à medida que a rotação aumentou, iniciando com valores próximos de 21% e apresentando seus mínimos em 1% para a máxima rotação de 2800 rpm. Os valores de SO<sub>2</sub> foram máximos para as menores rotações, em torno de 70 ppm, e diminuíram para valores aproximados de 10 ppm à medida que a rotação aumentou até 2800 rpm. Comportamento similar também foi observado para o CO. Os gases NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> apresentaram valores quase metade dos observados no GNV, incluindo uma diminuição à medida que a rotação aumentou. Os níveis de CO<sub>2</sub> iniciaram em valores próximos a 0,5% para a rotação de 800 rpm, com aumento para 3,5% a 1000 rpm, e leve decréscimo à medida que a rotação aumentou. Com a desaceleração, os valores diminuíram para os níveis de marcha lenta. Já os HC apresentaram aumento significativo com o aumento de rotação de 800 para 1000 rpm, mantendo-se quase constante entre 4000 e 5000 ppm para os outros acréscimos até a rotação máxima.

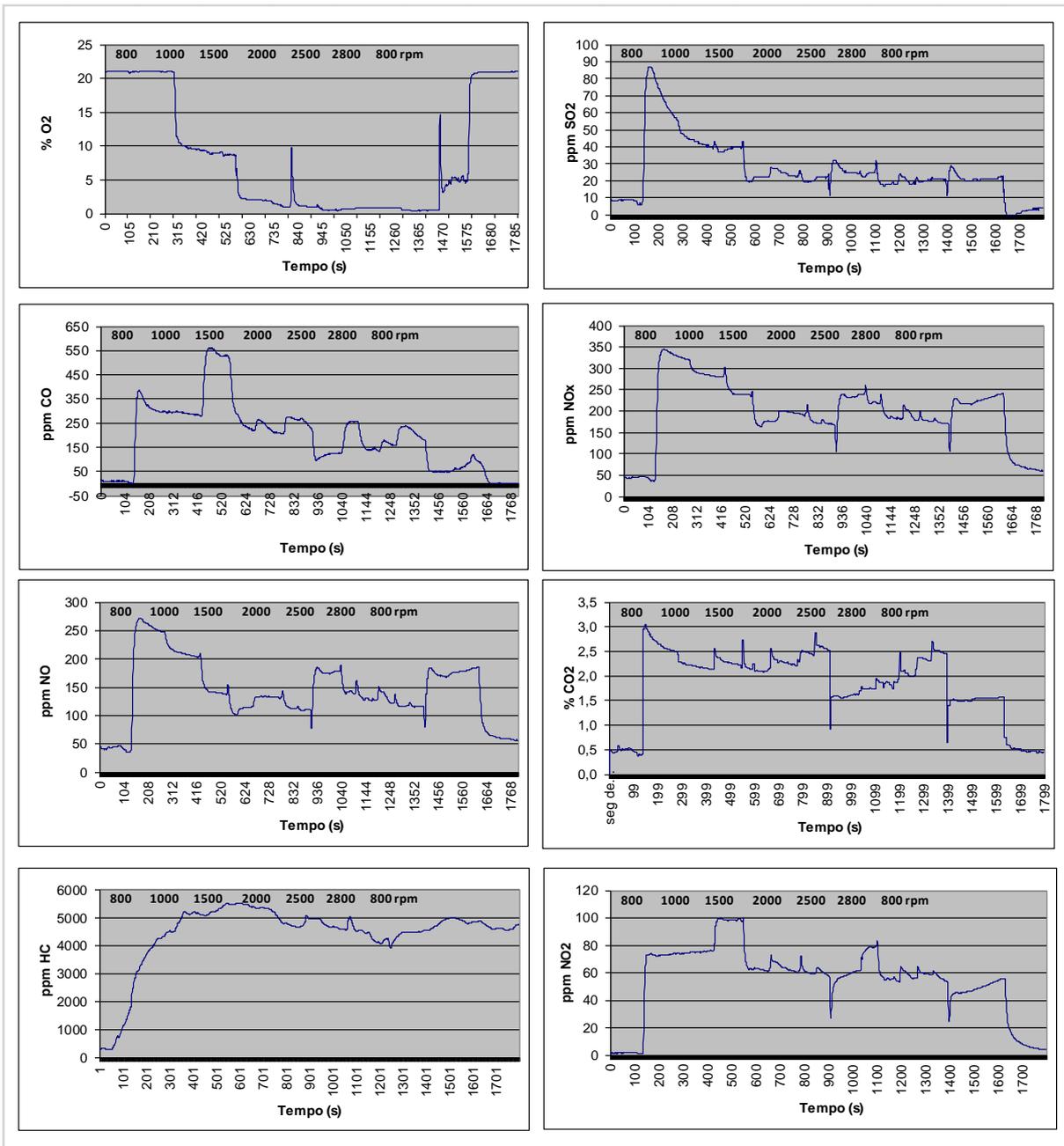


Figura 5.3 Monitoramento do veículo a diesel-B5 na condição parado. Data: 26/04/2013.

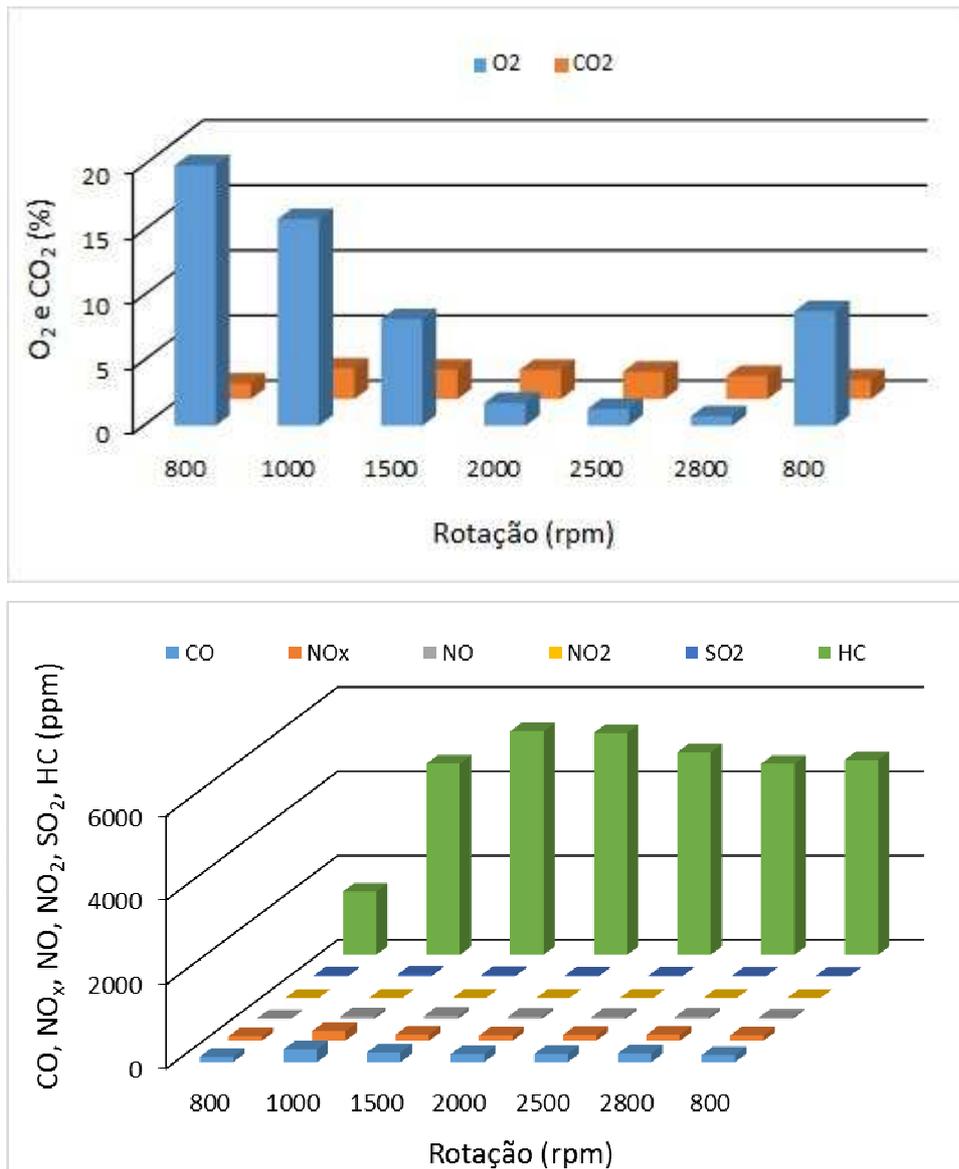


Figura 5.4. Comparação dos gases para o veículo a diesel-B5 na condição parado. Data: 26/04/2013.

A Figura 5.5 mostra comparações entre os dois combustíveis para os veículos nas condições parados, apresentando os valores médios, os desvios padrão, e os valores máximos e mínimos observados em todos os testes realizados e em todas as rotações. Para o O<sub>2</sub> os comportamentos foram idênticos. Para o CO observa-se menor valor médio para o GNV, bem como menor variação quando comparado ao diesel-B5. Em relação aos gases NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, apesar das maiores variações e dos maiores valores máximos observados para o GNV, quando comparados os valores médios, o diesel-B5 apresentou valores maiores. O nível de CO<sub>2</sub> para o GNV apresentou maiores valores médios e variações, enquanto SO<sub>2</sub> e HC foram superiores para o diesel-B5.

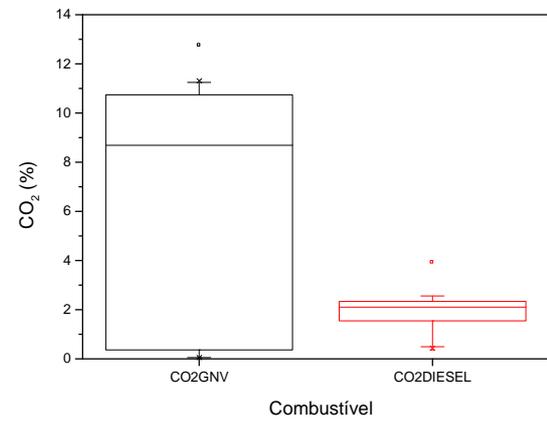
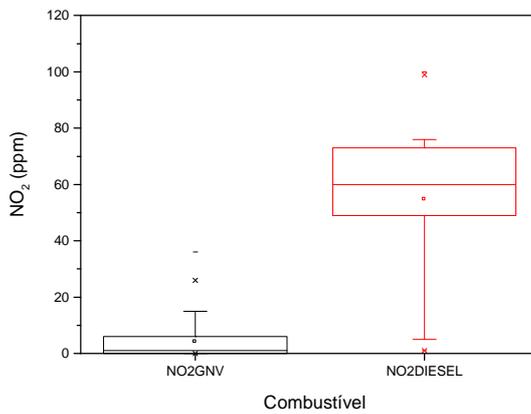
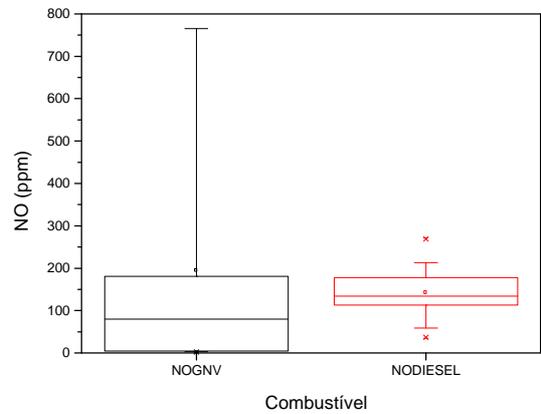
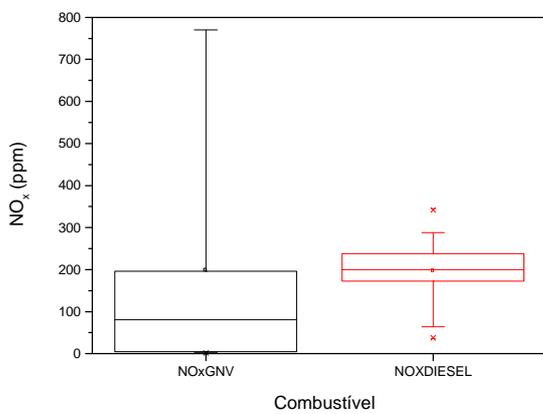
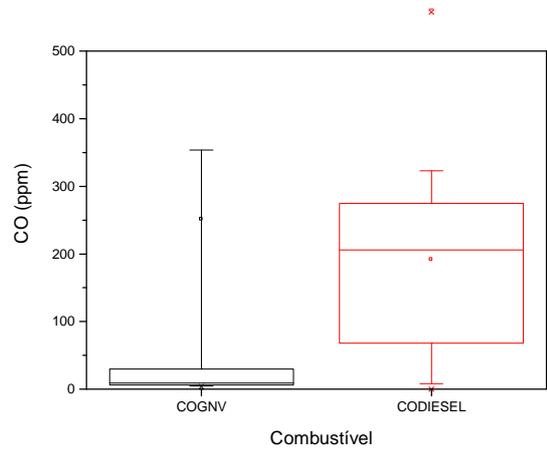
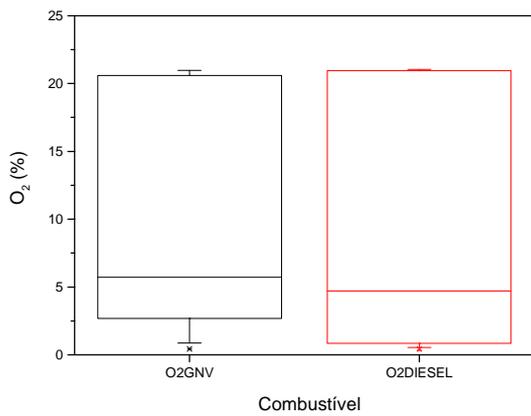




Figura 5.5. Comparação dos gases para os combustíveis GNV e diesel-B5 para as análises com os veículos parados.

### 5.1.2. Emissões de Gases para o Veículo em Rota

Para a condição do veículo em rota, são apresentados exemplos dos dados obtidos para as duas rotas. Destaca-se que as medições foram realizadas durante 10 meses, totalizando mais de 80 dias úteis de análises, com períodos médios de 8 horas por dia, o que acarretou em mais de 208 horas de dados obtidos.

A Figura 5.6 mostra parte das informações da rota ID-03, com o veículo entrando em operação às 7h30min e finalizando às 22h43min. Durante o processo de coleta foram observadas as seguintes condições: - Aquisição de dados no analisador; - Tempo de uso das baterias; - Comportamento das células. Os gráficos foram separados em lotes, com aproximadamente 1 hora de aquisição, em função do tempo de bateria não sobrecarregar as células do equipamento e não se correr risco de perda das informações. Os intervalos de monitoramento em cada período estão indicados na legenda superior dos gráficos.

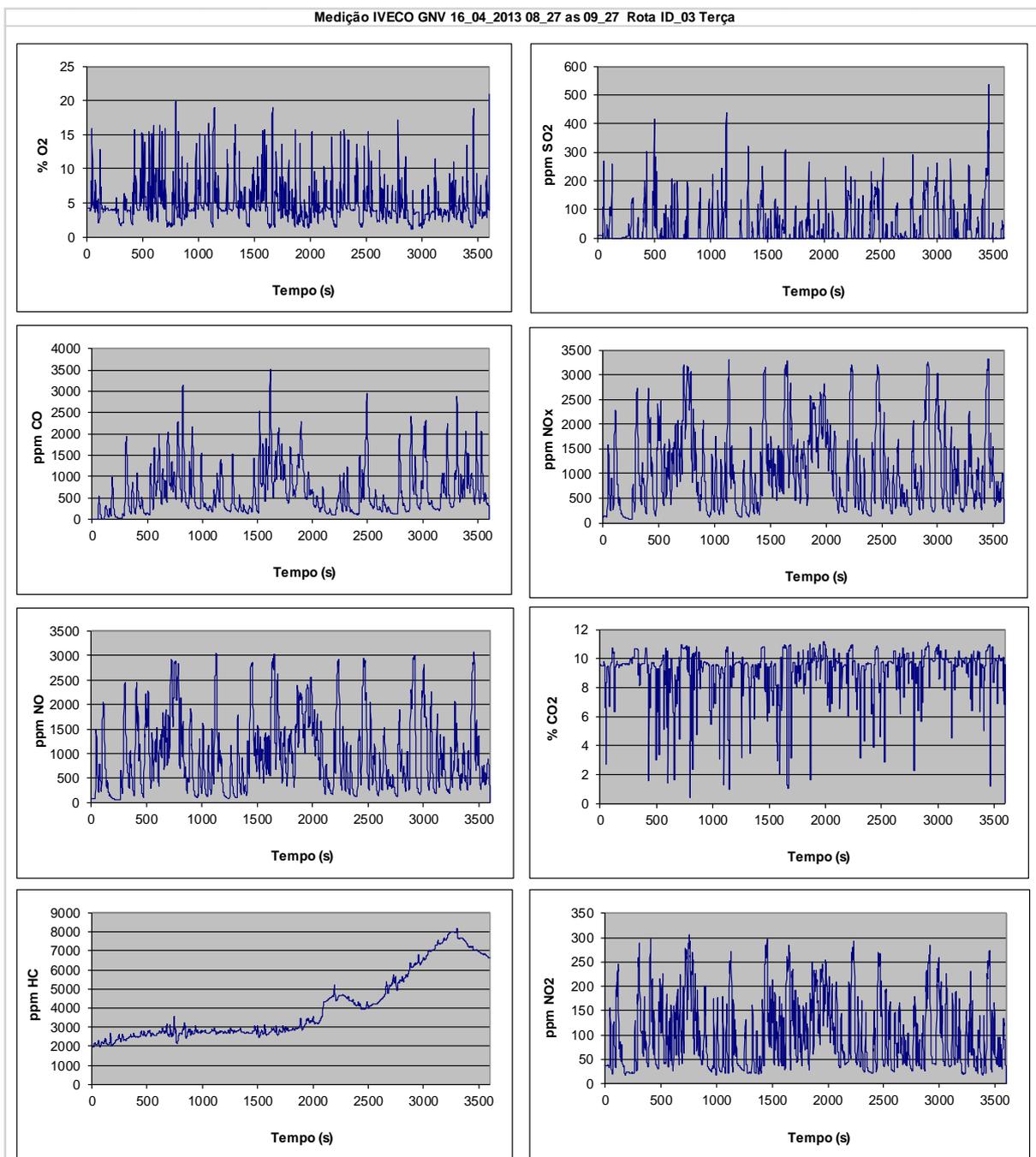


Figura 5.6. Monitoramento do veículo a GNV na rota ID 03 – 8h:27m às 09h:27m. 16/04/2016.

Para o exemplo da rota PD-01, cujos dados parciais são apresentados na Figura 5.7, o veículo entrou em operação às 8h55min e finalizou às 19h03min. Comparando as duas rotas, observa-se uma maior variação dos dados para a rota ID-03 em função do maior número de paradas durante a coleta, acarretando maiores números de acelerações e desacelerações, e conseqüentemente um regime de operação do motor mais forçado que o da rota PD-01.

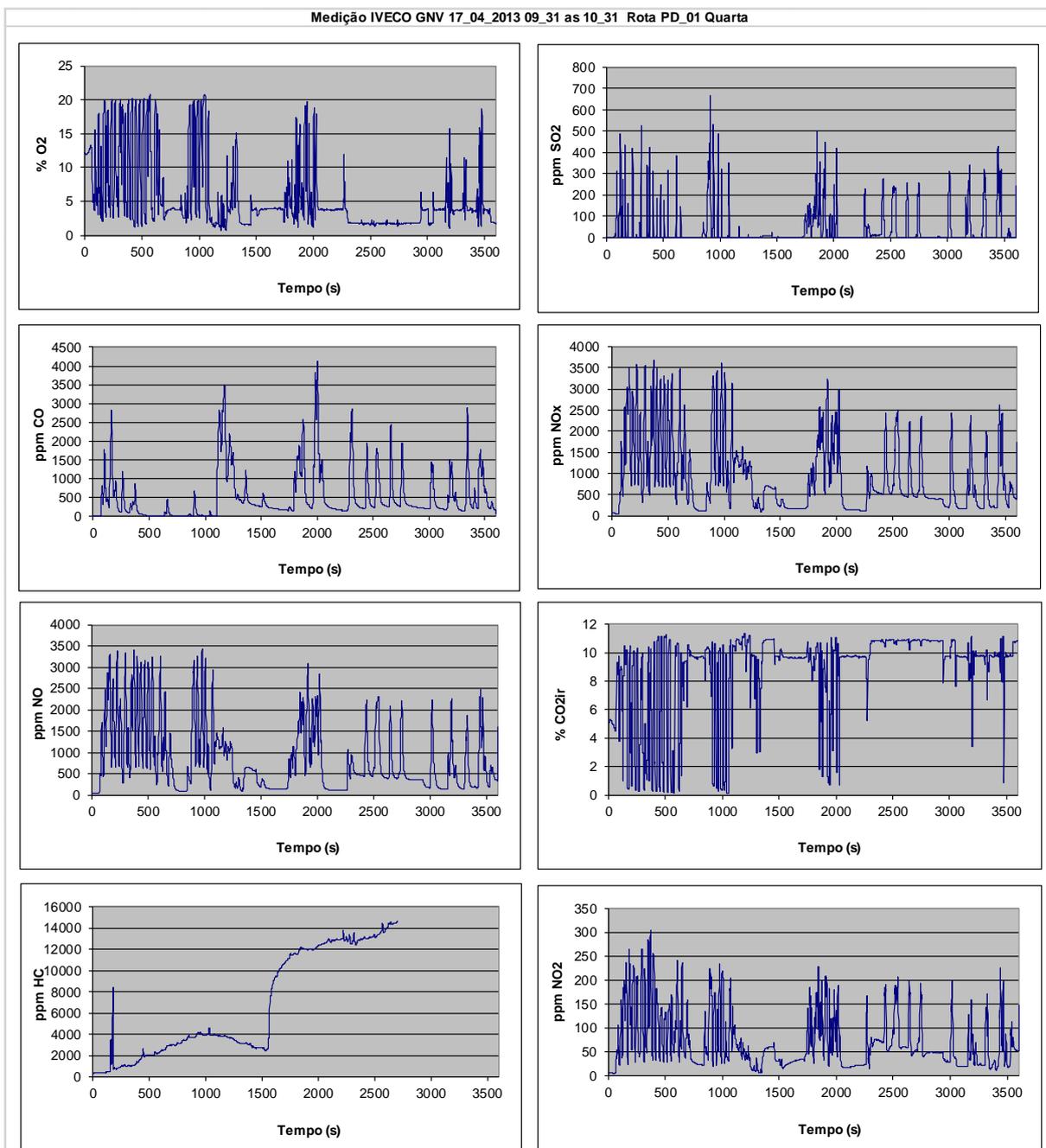


Figura 5.7. Monitoramento do veículo a GNV na rota PD-01.– 9h:31m às 10h:31m. 17/04/2013.

### 5.1.3. Dados Globais das Emissões de Gases em Rota

Os gráficos das Figuras 5.8 a 5.12 apresentam os comparativos entre as emissões de gases para as duas rotas analisadas: ID-03 e PD-01. Em todos os gráficos, são apresentados os valores médios, os valores máximos e mínimos, e o desvio padrão.

A distribuição do teor de gás oxigênio na exaustão da queima de GNV para as diferentes rotas está apresentada na Figura 5.8. Os valores para as duas rotas foram comparados por Análise de Variância (ANOVA) testando a hipótese nula da igualdade das variâncias. Não há diferença significativa entre as duas rotas para o teor de O<sub>2</sub> no nível de  $p < 0,05$  [ $F(1,57)=1,42$ ,  $p=0,238$ ]. No entanto, é importante ressaltar que a Rota PD-01 apresenta maior variação dos trechos planos e trechos com alicive-declive, o que induz o funcionamento do motor em condições alternadas durante o trajeto, justificando a maior variação dos níveis de O<sub>2</sub> global.

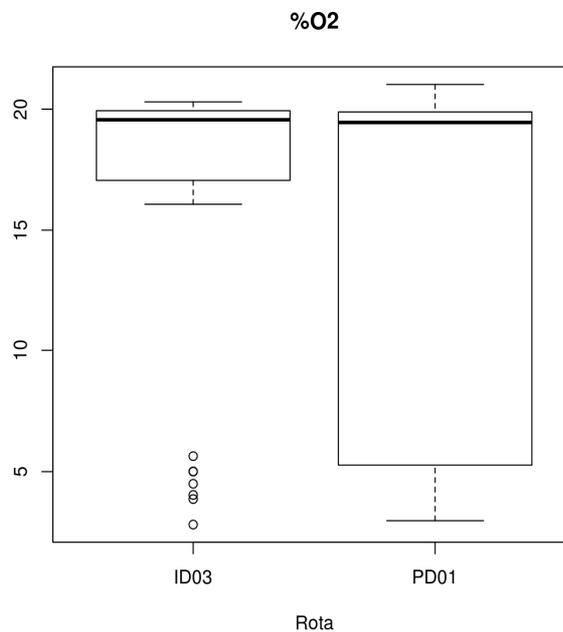


Figura 5.8. Distribuição dos valores de teor de O<sub>2</sub> na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.

A distribuição do teor em ppm de CO na exaustão da queima de GNV para as diferentes rotas está apresentada na Figura 5.9. Os valores para as duas rotas foram comparados por Análise de Variância (ANOVA), testando a hipótese nula da igualdade das variâncias. Não há diferença significativa entre as duas rotas para o teor de CO, no nível de  $p < 0,05$  [ $F(1,59)=0,933$ ,  $p=0,338$ ]. Similar aos resultados obtidos para o O<sub>2</sub>, o CO também apresentou uma variação maior para a Rota PD-01 em função dos trechos irregulares durante trajeto.

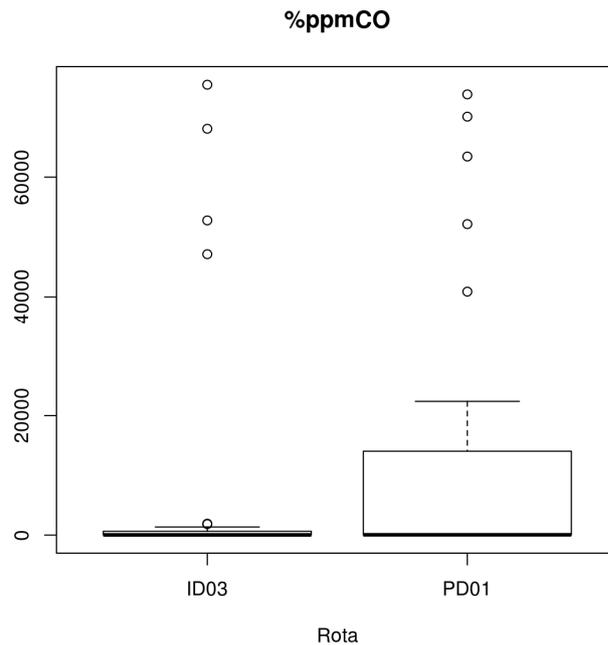


Figura 5.9. Distribuição dos valores de teor em ppm de CO na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.

A distribuição do teor em ppm de gás  $\text{NO}_x$  na exaustão da queima de GNV para as diferentes rotas está apresentada na Figura 5.10. Os valores para as duas rotas foram comparados por Análise de Variância (ANOVA) testando a hipótese nula da igualdade das variâncias. Não há diferença significativa entre as duas rotas para o teor de ppm de  $\text{NO}_x$ , no nível de  $p < 0,05$  [ $F(1,60) = 0,092$ ,  $p = 0,763$ ]. Para as duas rotas, os valores médios das emissões de  $\text{NO}_x$  ficaram em torno de 120 ppm, com um pequeno decréscimo para a rota PD-01 para valores aproximados de 100 ppm. Estes dados permitem afirmar que as condições de operação do motor em termos de temperatura da câmara de combustão foram similares, já que não houve variação significativa para as emissões de  $\text{NO}_x$ . Comportamentos similares também foram observados para os gases NO e  $\text{NO}_2$ , conforme se observa nas Figuras 5.11 e 5.12.

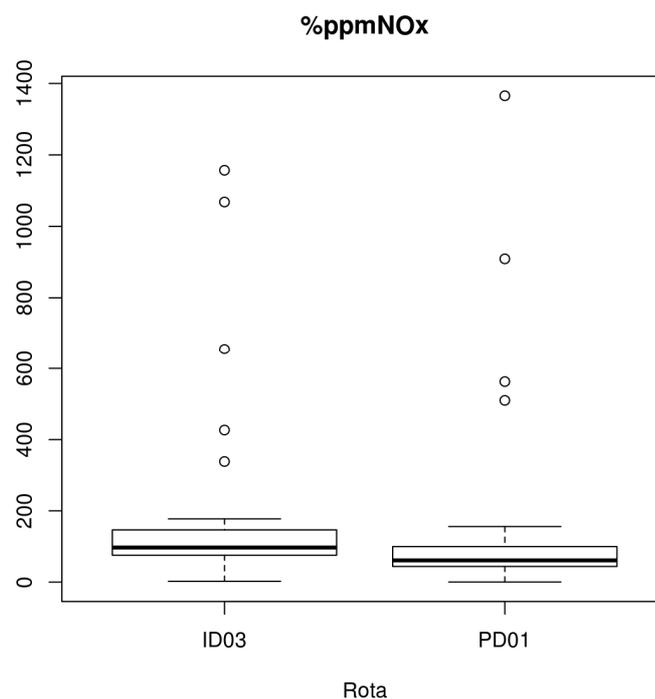


Figura 5.10. Distribuição dos valores de teor em ppm de  $\text{NO}_x$  na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.

A distribuição do teor em ppm de gás NO na exaustão da queima de GNV para as diferentes rotas está apresentada na Figura 5.11. Os valores para as duas rotas foram comparados por Análise de Variância (ANOVA) testando a hipótese nula da igualdade das variâncias. Não há diferença significativa entre as duas rotas para o teor de ppm de NO, no nível de  $p < 0,05$  [ $F(1,60)=0,079$ ,  $p=0,78$ ].

Conforme observa-se na Figura 5.10, a maior contribuição para as emissões de  $\text{NO}_x$  deve-se ao percentual de NO que atinge valores que correspondem a quase totalidade de  $\text{NO}_x$ , sendo a parcela de  $\text{NO}_2$  muito pequena e pouco contributiva, conforme observa-se na Figura 5.12 (menor que 10% do total das emissões de  $\text{NO}_x$ ).

Os valores para as duas rotas foram comparados por Análise de Variância (ANOVA) testando a hipótese nula da igualdade das variâncias. Não há diferença significativa entre as duas rotas para o teor de ppm de  $\text{NO}_2$  no nível de  $p < 0,05$  [ $F(1,60)=0,323$ ,  $p=0,572$ ].

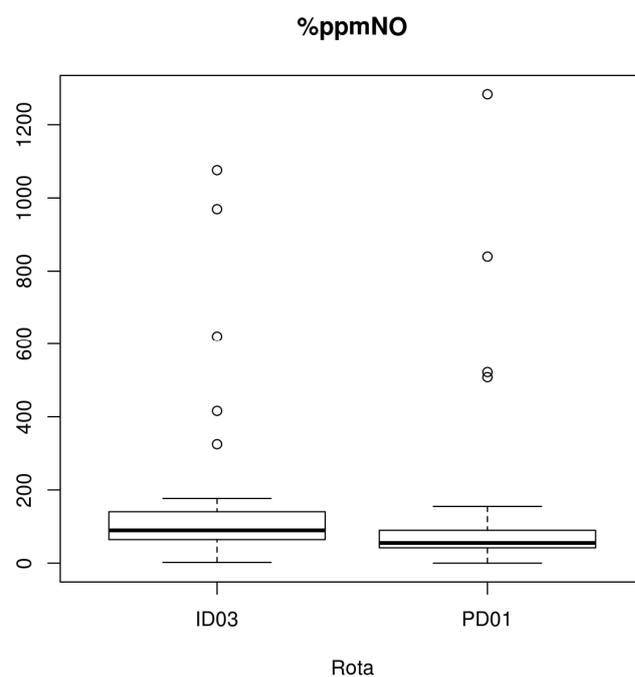


Figura 5.11. Distribuição dos valores de teor em ppm de NO na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.

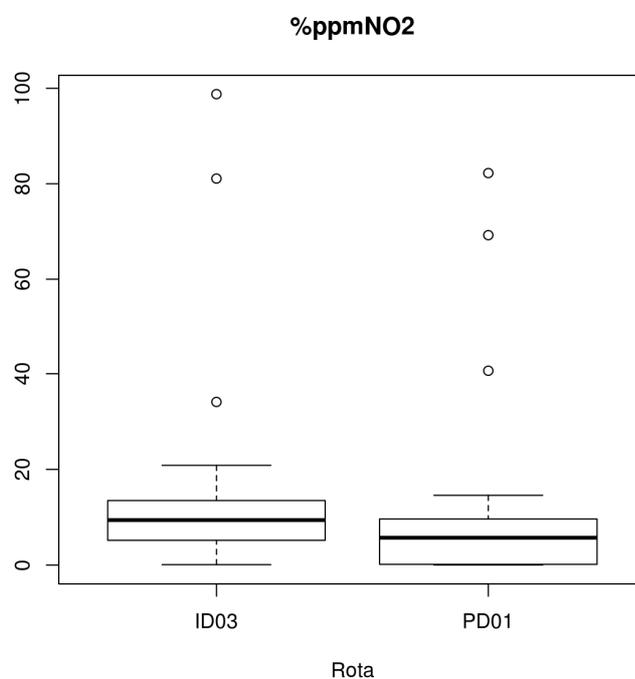


Figura 5.12. Distribuição dos valores de teor em ppm de NO<sub>2</sub> na exaustão da queima do GNV no caminhão nas duas rotas estudadas.

#### 5.1.4. Consumos e Autonomias de Combustíveis em Rota

Os dados obtidos para os consumos de combustíveis para o GNV e diesel-B5 para os veículos nas rotas ID-03 e PD-01 durante quatro (4) meses no ano de 2013 são apresentados na Tabela 5.1, onde são mostradas informações referentes ao peso total transportado do resíduo coletado, o número de viagens realizadas, a distância total percorrida pelos veículos, e a média de combustível consumido por quilômetro rodado. Observa-se que o veículo a GNV realizou menos viagens e transportou menores cargas em função da menor capacidade do veículo e do tanque de combustível. As distâncias percorridas também foram menores, e os consumos médios por quilômetro rodado ficaram em torno de 1,52 km/m<sup>3</sup> para o GNV e 1,65 km/l para o diesel-B5.

Tabela 5.1. Dados dos consumos de combustíveis para os veículos em rotas com GNV e diesel-B5 durante 4 meses em 2013.

##### GNV

Mês	Peso Total	Viagens	KM Serviço	KM Desloc	Km total real	Consumo (m <sup>3</sup> )	Média Km/m <sup>3</sup>
1	206,140	33	506	1,205	2,031	1,414,00	1,44
2	233,930	46	443	1,693	2,523	1,613,92	1,56
3	283,182	44	622	1,783	2,737	1,771,12	1,55
4	203,107	33	511	1,266	2,254	1,470,23	1,53
<b>MÉDIA</b>	231,590	39	521	1,487	2,386	1,567,32	1,52

##### Diesel

Mês	Peso Total	Viagens	KM Serviço	KM Desloc	Km total real	Consumo (l)	Média Km/l
1	575,100	82	934	2,605	4,037	2,189,50	1,84
2	309,410	46	513	1,471	1,986	1,448,13	1,37
3	697,694	98	1,074	3,316	4,447	2,673,70	1,66
4	718,590	98	1,099	3,371	4,529	2,613,49	1,73
<b>MÉDIA</b>	575,199	81	905	2,691	3,750	2,231,21	1,65

A Figura 5.13 apresenta um comparativo entre os dados referentes às autonomias dos veículos a GNV e diesel-B5 em função do peso total transportado, onde se verifica as diferenças entre as capacidades de transporte de carga coletada, sendo menor para o GNV. Destaca-se o maior aumento de consumo de combustível à medida que se aumenta o peso da carga transportada para o GNV, comportamento menos perceptível para o diesel-B5.

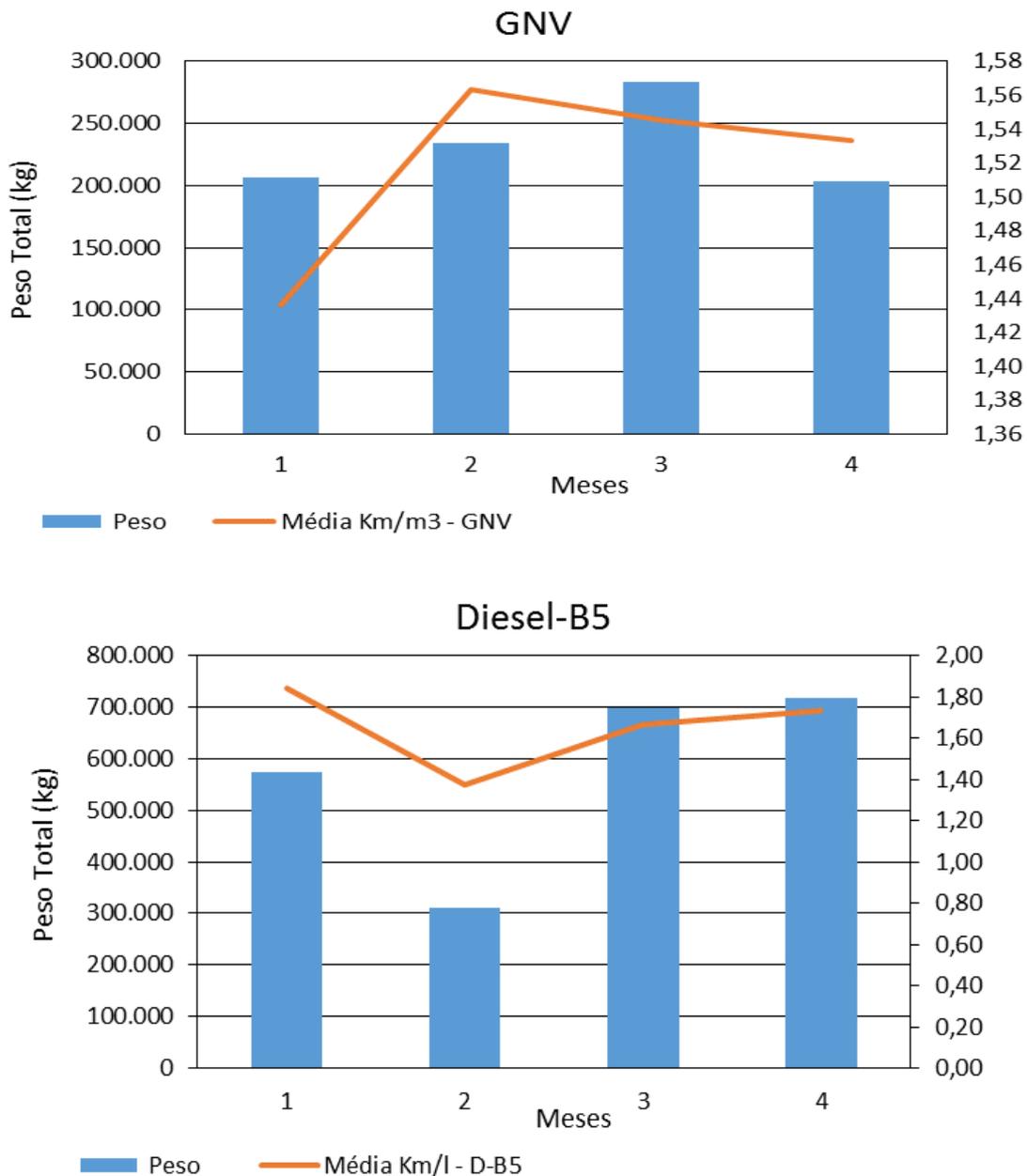


Figura 5.13. Comparativo entre os dados referentes às autonomias dos veículos a GNV e Diesel-B5 em função do peso total transportado.

## 5.2. Inventário de Ciclo de Vida

O principal resultado do processo de construção do inventário foi o registro dos fluxos de produto normalizados pela unidade de função do sistema de produto e que cruzam as fronteiras do mesmo. Resultados das análises de dados (para a validação) na etapa de refinamento das fronteiras do sistema foram utilizadas para a

definição da unidade funcional (UF) de forma que a representatividade dos dados fosse incorporada. Para isso estatísticas descritivas apresentadas nas Tabelas 5.2 e 5.3, e perfis de distribuição na Figura 5.14 à 5.16 foram utilizados para escolha dos dados a representar os processos da coleta de resíduos utilizando GNV no inventário e para a validação dos dados. Para os dados dos mesmos processos de coleta de resíduos com caminhão movido a diesel-B5, as estatísticas descritivas estão apresentadas nas Tabelas 5.4 e 5.5 e nas Figuras 5.17 e 5.18 para os perfis de distribuição desses dados. (Tkm = tonelada x km). O tipo de distribuição e os parâmetros estatísticos obtidos nessa etapa foram utilizados nos parâmetros de entrada das simulações de Monte Carlo para a análise de incerteza.

As tabelas que apresentam as estatísticas para o recolhimento de resíduos com caminhão movido a GNV são as Tabelas 5.2 e 5.3. As variáveis GNV (m<sup>3</sup>), Carga total (T), Total de Viagens, Distância percorrida (km) e Tempo (h), apresentaram valores de CV entre 0.38 e 0.5, e valores de mediana acima dos valores de média. Isso indica que os valores amostrados estão bem distribuídos e que os valores acima da média são ligeiramente mais frequentes. A representação gráfica das distribuições indica que, com exceção do número total de viagens, a distribuição de todas é normal. A variável Tkm, comumente utilizada como unidade funcional em ACV de serviços de transporte, apresentou um CV de 0.723, o que é quase o dobro comparando com as outras.

Tabela 5.2. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.

<b>Estatísticas</b>	<b>GNV (m³)</b>	<b>Carga total (t)</b>	<b>Total de Viagens</b>	<b>Distância Percorrida (km)</b>	<b>Tempo (horas)</b>	<b>Tkm</b>	<b>Tkm/Viagem</b>
<b>Mínimo</b>	191,9	32,640	6	458	42	14949	2492
<b>1º Quartil</b>	994,7	115,108	23	1432	129,5	168582	7197
<b>Mediana</b>	1442,1	204,396	33	2142	155,5	438237	12759
<b>Média</b>	1313,7	182,767	31,50	2046	144,7	441556	11984
<b>3º Quartil</b>	1731,8	226,982	41	2684	175,0	677136	16000
<b>Máximo</b>	2057,9	319,309	58	3433	218,0	969103	21397
<b>Desvio</b>	585	894	15,4	943	54,8	319408	5890
<b>CV</b>	0,445	0,489	0,49	0,46	0,379	0,723	0.49

Tabela 5.3. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.

<b>Estatísticas</b>	<b>GNV (kg)</b>	<b>GNV (kg/km)</b>	<b>GNV (kg/viagem)</b>	<b>GNV (kg/Tkm)</b>	<b>GNV (kg/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kg/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kg/Tkm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kg/T)</b>
<b>Mínimo</b>	146,5	0,30	24,40	0,0016	3,50	8,8	0	11,3
<b>1º Quartil</b>	759,5	0,50	27,82	0,0021	6,10	15,5	0	12,45
<b>Mediana</b>	1101,2	0,50	31,70	0,0025	7,0	17,85	0	13,25
<b>Média</b>	1003,1	0,49	32,22	0,0037	6,65	16,81	0	14,08
<b>3º Quartil</b>	1322,4	0,50	34,15	0,0048	7,275	18,38	0	15,10
<b>Máximo</b>	1571,4	0,60	44,30	0,0098	8,30	20,80	0	18,70
<b>Desvio</b>	446,7	0,085	5,87	0,0026	3,36	1,33	0	2,5
<b>CV</b>	0,44	0,182	0,178	0,721	0,201	0,19	0	0,17

Na Figura 5.14 a densidade de frequência dos valores de seis das variáveis inventariadas é apresentada.

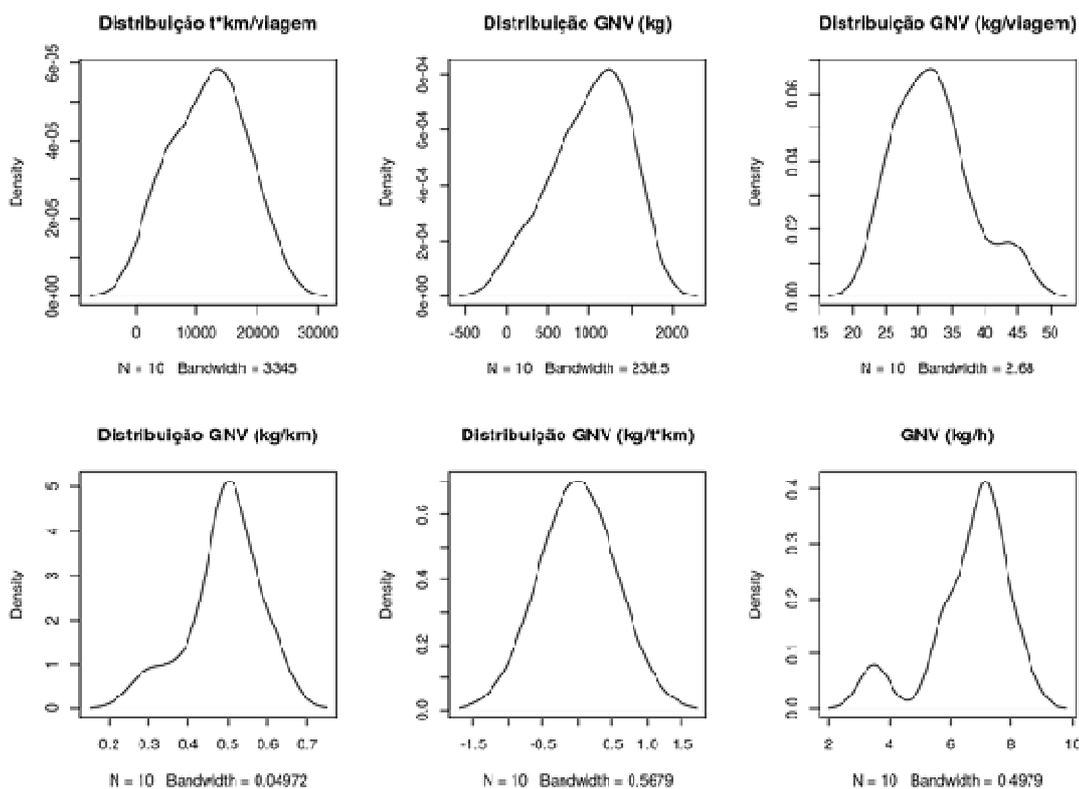


Figura 5.14. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.

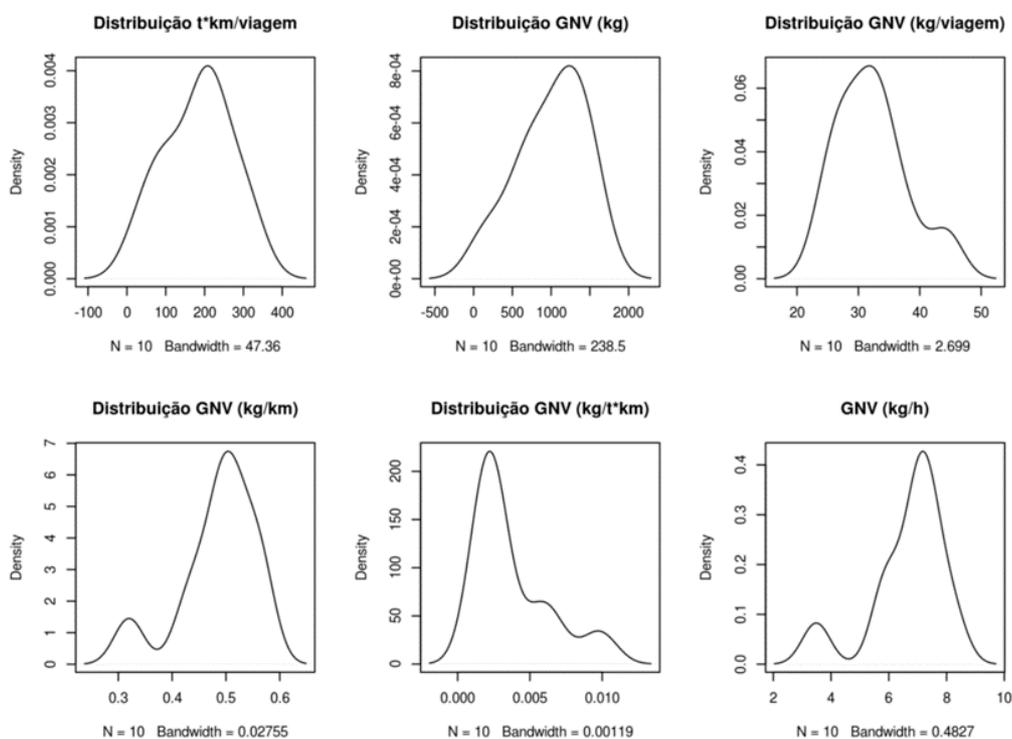


Figura 5.15. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV

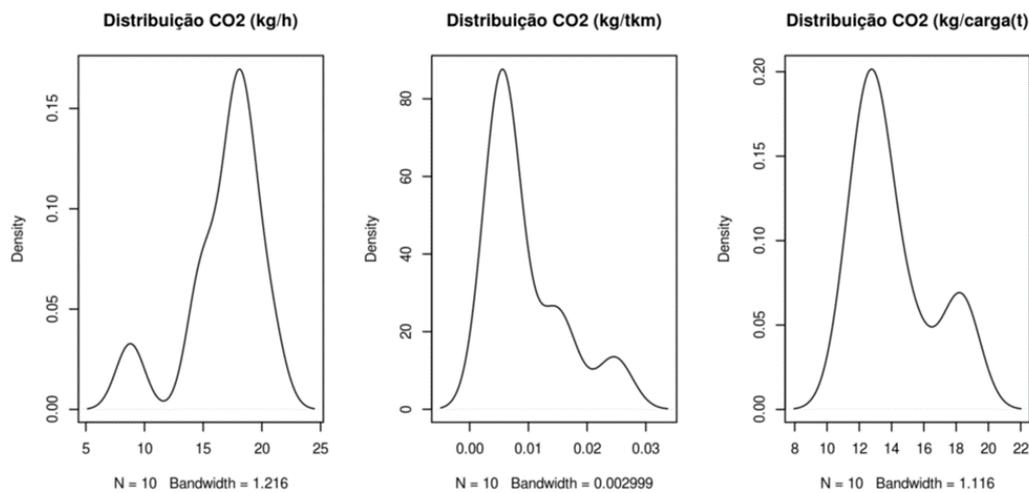


Figura 5.16. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do GNV.

A forma de sua distribuição também demonstra a predominância de uma distribuição homogênea. No entanto, quando Tkm é escalada pelo número total de viagens a distribuição desses valores se torna semelhante ao dos outros citados acima. As emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de lixo recolhida apresentou o menor CV, tanto para o caminhão movido a GNV (0,17) quanto o movido por diesel – B5 (0,117) (Tabela 5.5).

Tabela 5.4. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.

<b>Estatísticas</b>	<b>Diesel (L)</b>	<b>Carga total (T)</b>	<b>Total de Viagens</b>	<b>Distância Percorrida (km)</b>	<b>Tempo (horas)</b>	<b>Tkm</b>	<b>Tkm/Viagem</b>
<b>Mínimo</b>	1448	309,410	46	1986	216,0	614488	13358
<b>1º Quartil</b>	2004	508,678	73	3524	336	1894881	24574
<b>Mediana</b>	2401	636,397	90	4242	409	2712162	29986
<b>Média</b>	2231	575,198	81	3750	378	2323327	26635
<b>3º Quartil</b>	2629	702,918	98	4468	451	3140607	32047
<b>Máximo</b>	2674	718,590	98	4529	480	3254494	33209
<b>Desvio</b>	564	188,15	24,5	1195,3	116,5	1210309	9083
<b>CV</b>	0,2531	0,327	0,302	0,31	0,307	0,52	0,341

Tabela 5.5. Estatísticas descritivas para dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.

<b>Estátística s</b>	<b>Diesel (kg)</b>	<b>Diesel (kg/km)</b>	<b>Diesel (kg/viagem)</b>	<b>Diesel (kg/Tkm)</b>	<b>Diesel (kg/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kg/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kg/Tkm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (kg/T)</b>
<b>Mínimo</b>	1240	0,4643	22,83	0,000687	4,768	14,93	0,0021	0,0097
<b>1º Quartil</b>	1716	0,4865	22,85	0,000725	4,930	15,44	0,0022	0,0100
<b>Mediana</b>	2056	0,5043	23,11	0,000772	5,023	15,73	0,0024	0,0102
<b>Média</b>	1910	0,5243	24,00	0,001062	5,138	16,09	0,0033	0,0106
<b>3º Quartil</b>	2250	0,5420	24,25	0,001109	5,231	16,38	0,0034	0,0108
<b>Máximo</b>	2289	0,6242	26,95	0,002017	5,739	17,97	0,0063	0,0125
<b>Desvio</b>	483,4	697	1,98	0,0006	0,4192	1,31	0,0019	0,0012
<b>CV</b>	0,253	0,133	0,082	0,60	0,081	0,081	0,60	0,117

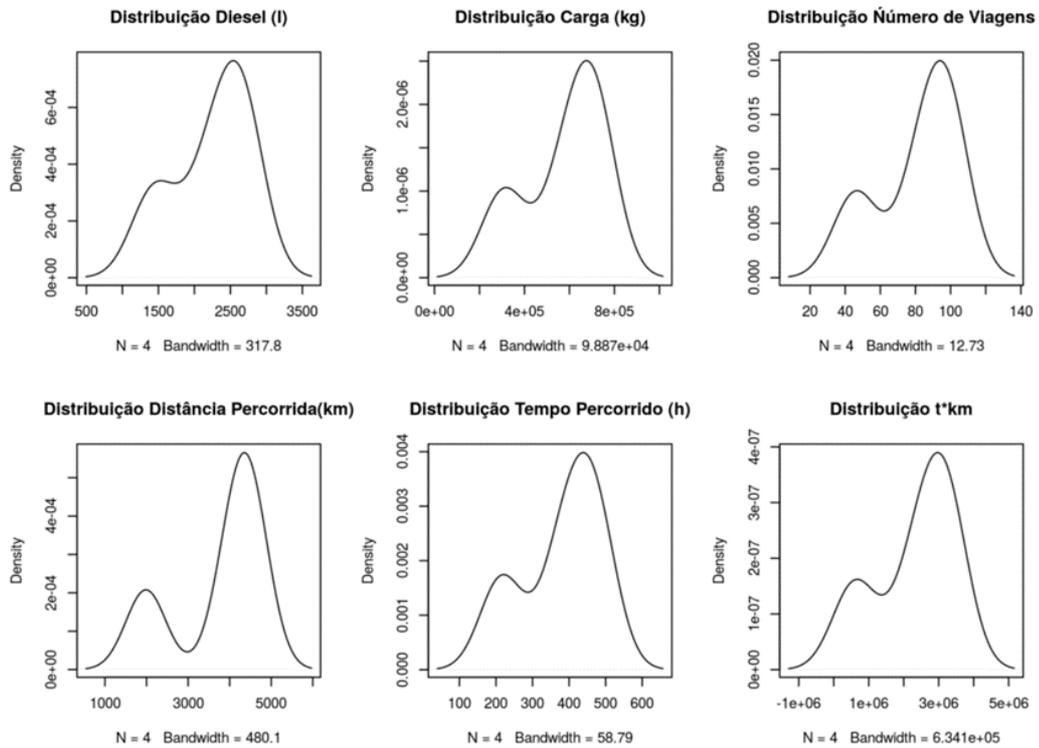


Figura 5.17. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.

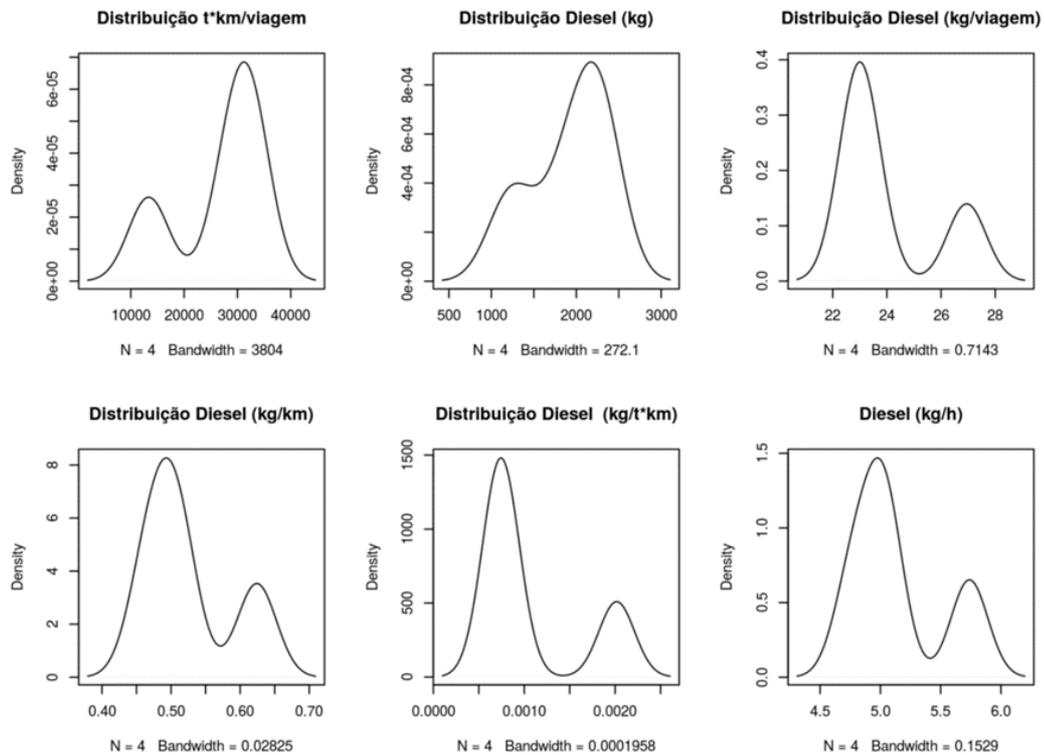


Figura 5.18. Perfis de distribuição dos dados coletados e possíveis fluxos de referência para os dados coletados na construção do inventário para a etapa de uso do Diesel-B5.

Os dados utilizados no inventário para representar os processos de coleta de resíduos para o cenário com caminhão movido a diesel – B5 estão na Tabela 5.6 e para o cenário com caminhão movido a GNV estão na Tabela 5.7. Os resultados de inventários mostram que o mínimo de uso de GNV (kg) para o recolhimento de 1 tonelada de resíduos domiciliares é maior que o máximo do uso de Diesel-B5 (kg) para a mesma função.

Tabela 5.6. Entradas e Saídas Gerais considerados para o sistema de produto de coleta de resíduos do caminhão movido a Diesel-B5

<b>Diesel-B5 Entradas</b>	<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio</b>	<b>Unidade</b>
<b>Diesel na Refinaria</b>	3,2439	2,9570	3,8060	0,3812	kg/UF
<b>Éster de óleo de Soja na planta</b>	0,1707	0,1500	0,2000	0,0200	kg/UF
<b>Transporte</b>	36,245	34,785	44,763	13,819	Tkm/UF
<b>Diesel-B5 saídas</b>	Média	Mínimo	Máximo	Desvio	Unidade
<b>Resíduos Recolhidos</b>	1				Tonelada
<b>Dióxido de Carbono</b>	10,6950	9,7500	12,5478	1,2560	kg/UF

Tabela 5.7. Entradas e Saídas Gerais consideradas para o sistema de produto de coleta de resíduos do caminhão movido a GNV

<b>GNV entradas</b>	<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio</b>	<b>Unidade</b>
<b>GNV, em sítio de extração</b>	5,600	4,489	7,406	0,988	kg/UF
<b>GNV Saídas</b>	Média	Mínimo	Máximo	Desvio	Unidade
<b>Resíduos Recolhidos</b>	1				Tonelada
<b>Dióxido de Carbono, da combustão no transporte do GNV</b>	0,1260	0,0740	0,1926	0,0360	kg/UF
<b>Dióxido de Carbono, da combustão na fase de uso do GNV</b>	14,084	11,313	18,663	2,491	kg/UF
<b>Metano, emitido no transporte do GNV</b>	0,019	0,009	0,037	0,009	kg/UF

### 5.3. Resultados Caracterizados pelo Método IPCC

Os resultados caracterizados para a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) para o método de caracterização IPCC 2007 estão na Tabela 5.8 e representados graficamente na Figura 5.19.

Tabela 5.8. Resultados do aquecimento global (horizonte temporal de 20, 100 e 500 anos IPCC 2007) para o GNV e Diesel-B5.

	<b>PAG 20a (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>	<b>PAG 100a (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>	<b>PAG 500a (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>
<b>GNV</b>	30,281	20,4891	16,8621
<b>Diesel-B5</b>	11,702	11,6450	11,5780

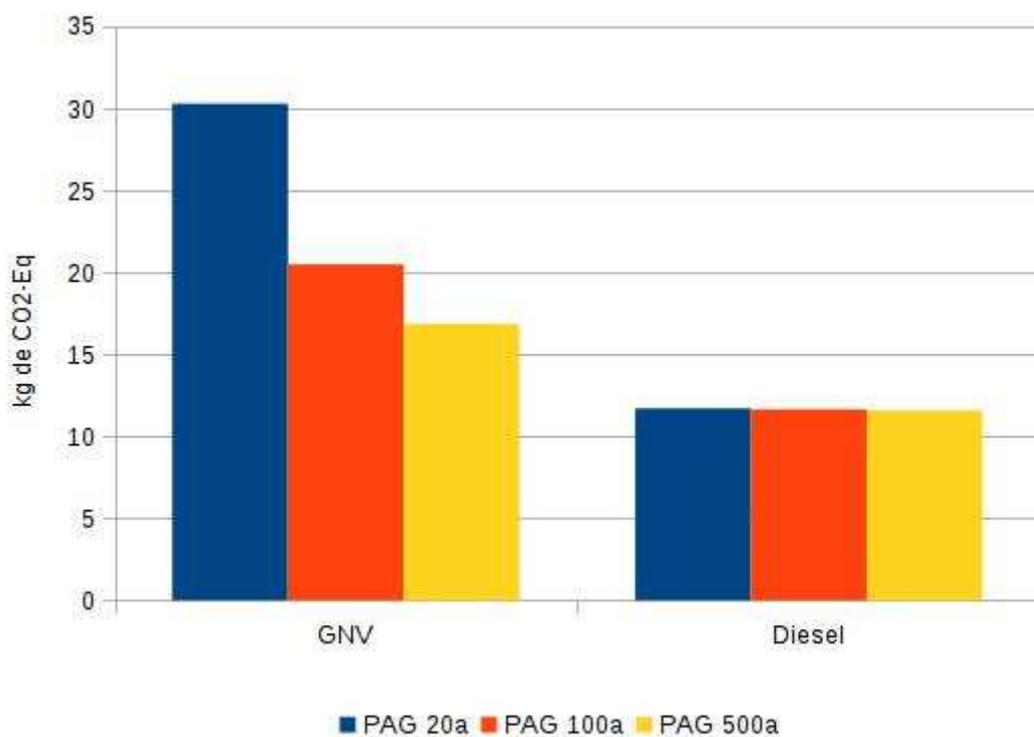


Figura 5.19. Comparação entre resultados caracterizados entre coleta de resíduos com caminhão movido a GNV e a Diesel-B5 para o cálculo do aquecimento global (IPCC 2007) para três horizontes temporais.

Nas três categorias de impacto do IPCC, o cenário que utiliza GNV apresenta pior desempenho ambiental que o cenário que utiliza diesel – B5-B5 para a coleta

de resíduos. No caso do diesel – B5-B5 não há variação significativa dentre as categorias, isso por que a emissão majoritária de gases de efeito estufa nesse cenário é dióxido de carbono. Já no caso do GNV, a variação é bem sensível, pois há uma significativa emissão de metano no transporte que tem um tempo de vida 4 vezes menor, apresentando um impacto bem maior após um tempo de vida de 20 anos.

#### 5.4. Análise de Contribuição de Processo

A análise de contribuição de processos foi realizada nos resultados caracterizados da ACV para a identificação de gargalos de processo. Os resultados absolutos, para o Aquecimento Global (IPCC 2007) foram calculados em três horizontes temporais, divididos entre os processos associados com a devida parcela de CO<sub>2</sub>-Eq. Na Tabela 5.9 esses valores estão dispostos para o cenário do combustível GNV.

Tabela 5.9. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a GNV.

<b>Processo</b>	<b>PAG 20a (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>	<b>PAG 100a (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>	<b>PAG 500a (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>
<b>Coleta de Resíduos</b>	14,21	14,21	14,21
<b>Gás Natural (Produção)</b>	1,629	0,566	0,17
<b>Venting (Transporte)</b>	13,248	4,6	1,4
<b>Outros</b>	1,193	0,904	1,08

As mesmas informações são apresentadas no formato de gráfico na Figura 5.20. Através da observação dessas informações, é possível verificar que a maior fonte de variabilidade das emissões dentro das categorias de impacto é a fase de transporte, que consiste nos processos de *venting*, *flaring* e combustão. Quanto menor o tempo de vida considerado para a categoria de impacto maior é a contribuição dessa fase para os impactos totais.

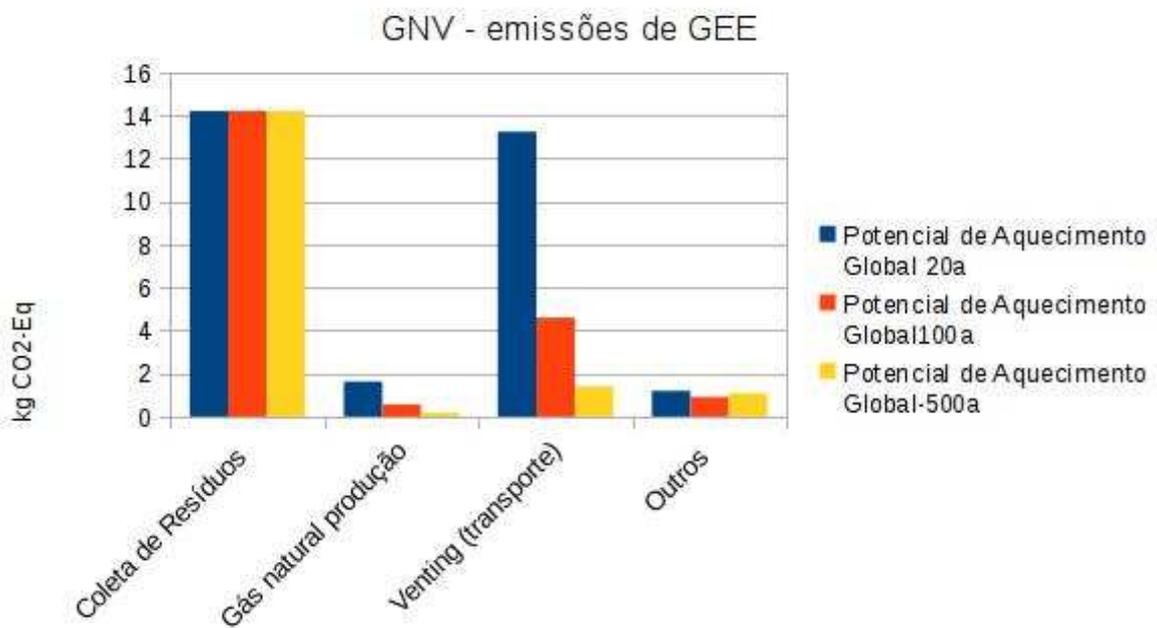


Figura 5.20. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a GNV.

Para PAG 20 anos, o processo de *Venting* tem praticamente a mesma contribuição que a fase de uso do combustível enquanto que para a categoria de impacto PAG 100 anos a contribuição é menor mas ainda aparenta significância. Pode-se dizer que o processo de venting no transporte do GNV por gasoduto da Bolívia até Porto Alegre-RS, para o devido processo avaliado, tem participação significativa. Portanto, são revelado indícios para questionamentos sobre o desempenho ambiental desse transporte para o uso em outras localidades do continente.

Para PAG 500 anos o processo de *flaring* não tem sua contribuição praticamente eliminada. Os outros processo associados ao cenário de GNV tem uma parcela considerada insignificante nos impactos calculados, o que tornaria ineficiente estratégias de mitigações voltadas para eles. Cabe salientar que atualmente não é amplamente utilizado o horizonte temporal de 500 anos para considerar PAG pelo IPCC. Por outro lado, os impactos globais considerados num horizonte de 20 anos são de grande relevância quando há emissões de metano, como é o caso do sistema em estudo.

A fase de uso para o cenário de GNV ainda domina nas três categorias de impacto aqui avaliadas e é suficiente para sozinha superar as emissões de GEE diesel – B5, no que se refere ao escopo desse estudo. Os resultados da análise de contribuição para o cenário de diesel-B5 encontra-se na Tabela 5.10 e na Figura 5.21.

Tabela 5.10. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a diesel – B5

Processo	PAG 20a (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	PAG 100a (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	PAG 500a (kg CO <sub>2</sub> -Eq)
Coleta de Resíduos	10,7	10,7	10,7
Transporte (Marítimo)	0,3	0,3	0,3
Outros	0,7	0,64	0,57

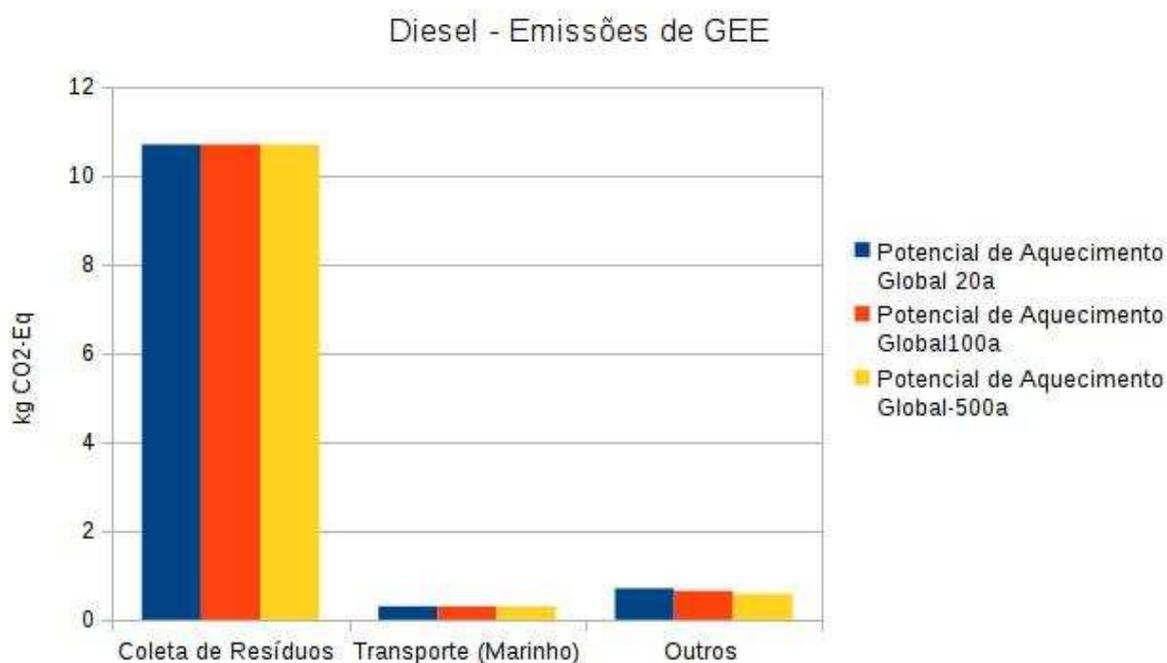


Figura 5.21. Resultados caracterizados para potencial de aquecimento global por processo do sistema de recolhimento de resíduos usando caminhão movido a diesel – B5.

Não há variação aparente nos valores caracterizados entre as diferentes categorias de impacto de aquecimento global. O principal processo de emissão de

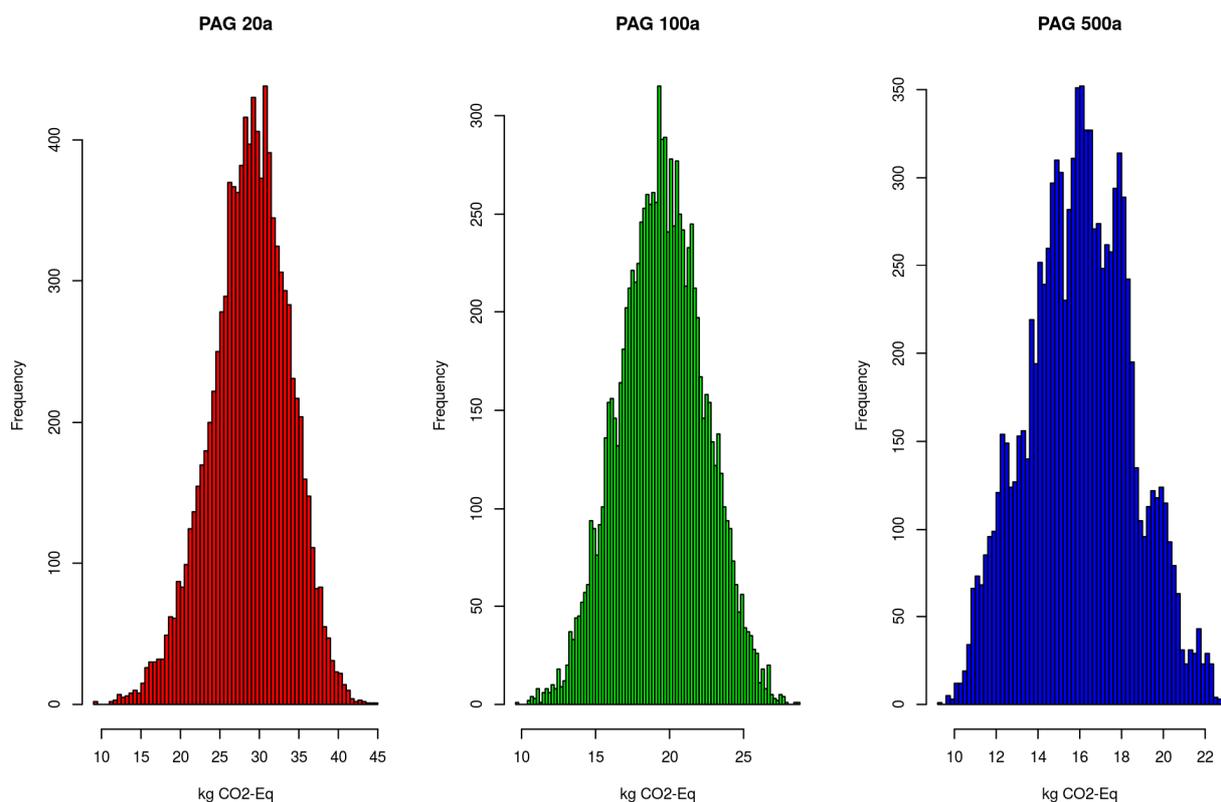
GEE para o caminhão movido a Diesel é a fase de uso, deixando apenas aproximadamente 3% para as emissões associadas ao transporte oceânico do combustível em questão, e aproximadamente 5,5% para todos os outros processos somados.

## 5.5. Análise de Incertezas

A análise de incerteza dos resultados caracterizados da ACV realizada nesse estudo está apresentada na tabela 5.11 em forma de estatísticas que caracterizam os perfis estatísticos das categorias consideradas. Essas estatísticas foram calculadas a partir dos valores simulados pelo Método Estocástico de Monte Carlo. Histogramas dos valores simulados estão na Figura 5.22, para o cenário do diesel – B5, e Figura 5.23 para o cenário do uso do combustível GNV nos três horizontes temporais. Na Figura 5.24 as distribuições das quatro categorias são comparadas com intenção de identificar intervalos onde os valores possíveis de emissões nas categorias são iguais.

Tabela 5.11. Análise de incerteza para os resultados caracterizados.

	<b>PAG Diesel 100a</b>	<b>PAG GNV 20a</b>	<b>PAG GNV 100a</b>	<b>PAG GNV 500a</b>
<b>Mínimo</b>	9,449	9,293	9,712	9,217
<b>1º quartil</b>	10,580	25,755	17,512	14,317
<b>Mediana</b>	11,130	29,041	19,474	16,036
<b>Média</b>	11,280	28,809	19,471	16,014
<b>3º quartil</b>	12,110	32,241	21,444	17,760
<b>Máximo</b>	14,610	44,637	28,694	22,669
<b>Desvio</b>	1,049	4,941	2,856	2,465
<b>CV (%)</b>	9,2	17,1	14,6	15,3



5.22 Histogramas dos valores simulados por Monte Carlo da categoria de Potencial de Aquecimento Global para os seus três horizontes temporais.

Os histogramas das figuras 5.22 e 5.23 mostram que o número de ciclos utilizados nas simulações de Monte Carlo foram suficientes para prover uma distribuição com o perfil similar à distribuição dos valores de saída do inventário reais. Como é possível observar na tabela 5.11, os valores de emissão de CO<sub>2</sub>-Eq para o cenário do Diesel-B5 mostrou a menor incerteza, com menos de 10% de desvio padrão em relação ao valor da média. Para o cenário do consumo de GNV, o horizonte temporal de 20 anos apresenta a maior CV, com 17,1%, consideravelmente acima do cenário do Diesel-B5.

Esses dados de dispersão dos valores simulados permitiram uma comparação entre os dois cenários, apresentada na Figura 24, mostrando que nenhum dos valores das médias das distribuições analisadas não apresentam valores dentro dos intervalos de máximo e mínimo das outras, podendo-se dizer que as médias dos valores são significativamente diferentes.

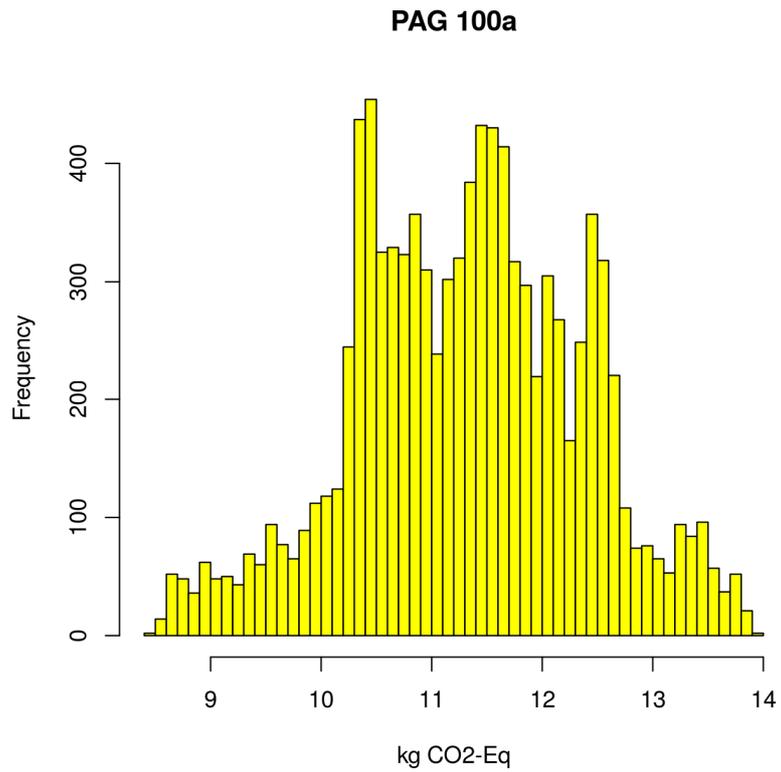


Figura 5.23: Histograma dos valores da simulação de Monte Carlo para o cenário de Diesel-B5 para a categoria de aquecimento global 100 anos.

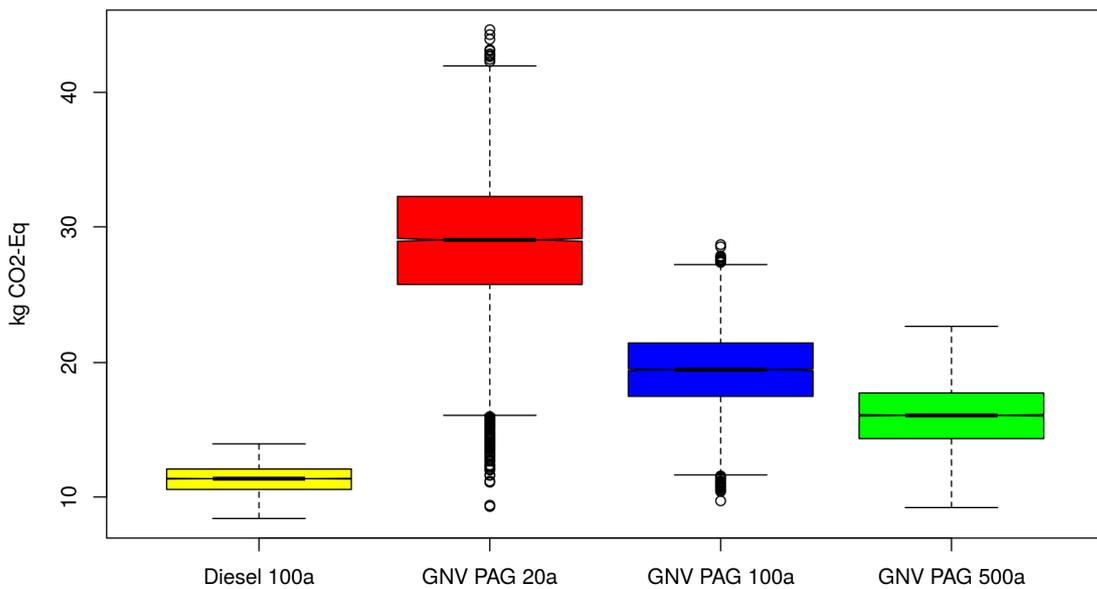


Figura 5.24. Distribuição dos valores simulados por Monte Carlo em gráficos de caixa.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no trabalho, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- As análises dos gases de exaustão realizadas nos veículos parados, com variações de rotações de 800 rpm até 2800 rpm, demonstraram que ocorreu diminuição nos níveis das emissões para os gases CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e HC, e aumento para o gás CO<sub>2</sub> quando utilizado GNV ao invés de diesel-B5. As diminuições foram de aproximadamente 800% para o CO, 1200% para o NO<sub>x</sub>, 250% para o SO<sub>2</sub> e 500% para o HC, e aumento de 450% para o CO<sub>2</sub>;
- Para o veículo a GNV em rota não foram observadas diferenças significativas em relação às duas rotas ID 03 e PD 01 monitoradas na cidade de Porto Alegre / RS, apesar das diferenças em relação ao número de paradas e a velocidade média do veículo durante os percursos;
- Em relação à autonomia dos veículos em rota, os consumos médios por quilômetro rodado ficaram em torno de 1,52 km/m<sup>3</sup> para o GNV e 1,65 km/L para o diesel-B5, sendo que o veículo a GNV sempre transportou menor carga coletada e percorreu menor distância em função de suas limitações de capacidade de peso e tanque de combustível. Considerando uma diferença de preços entre o GNV e o diesel-B5 em torno de 25% menor para o GNV, considerando as autonomies, o GNV apresenta uma redução de custos de aproximadamente 20%;
- A análise estatística realizada para definição do fluxo de referência sobre o qual foram calculados todos os fluxos para montagem de Inventário de Ciclo de Vida

(ICV) revelou ser a massa de resíduos urbanos coletada o dado mais significativo para representar a função do sistema de coleta de resíduos;

- -Considerando as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), e fatores de caracterização para potencial de aquecimento global do IPCC em diferentes horizontes temporais, observaram-se altos impactos associados ao transporte do gás natural desde a Bolívia até Canoas, RS. A conclusão mais relevante a esse respeito é que o principal gargalo tecnológico para o sistema de coleta de resíduos urbanos com veículos abastecidos com GNV recai na necessidade de um considerável número de pontos de emissão de metano por operações de purga, o que causa em curto prazo elevado potencial de aquecimento global;

- Para que o estudo possa subsidiar tomadas de decisão mais qualificadas, será importante que o trabalho de ACV seja complementado com a quantificação e caracterização de emissões associadas a impactos locais, já que foi construído somente o inventário de emissões que permitem a quantificação de impactos globais. Deste modo, será produtivo efetuar-se o estudo contemplando impactos locais, georreferenciar estes impactos e sugerir até que ponto da malha de gasoduto é ambientalmente proveitoso o uso de GNV como combustível para o sistema.

## **7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar os estudos de georrefenciamento para cada estação de compressão do gasoduto Bolívia-Brasil e associar as emissões locais de cada uma;

- Realizar análise dividida em impactos ambientais locais e globais, incluindo as emissões de material particulado (MP), ruídos e outros na análise de resultado, mesmo que seja por estimativas ou análise de cenários, visto que não foram medidas as emissões de material particulado, apresentando em conjunto com os resultados de aquecimento global;

- Realizar monitoramento de emissões diretas dos gases de exaustão de veículo de coleta de resíduo domiciliar abastecido com diesel-B5 e biodiesel-B100.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm> acesso 05/07/13.

AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n.3, p.233–271, 2007.

ALICE, WEB. Disponível em: < <http://aliceweb.mdic.gov.br/> >. Acesso em agosto de 2016.

ANDRADE, R. T. G.; SANTOS, E. M.; Quantificação das Emissões de Gases Efeito Estufa – GEEs – Segundo a Matriz Energética Diesel ou GNV no Transporte Público por Ônibus em Natal-RN. IFRN, **Holos**, Ano 25, v.3, p.3-15, 2009.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas a diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Química Nova**, v.27, n.3, p.472-482, 2003.

DA SILVA, S. N. Uso do GNV em ônibus urbano para operar em linha comercial – Projeto Piloto GASBUS. **Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, UFRGS, (2006).

DA SILVA, S. N.; BATISTA, V. J.; THOMAS, C.A.K.; FREIRE, L. G. M.; FIALHO, A. N. Projeto Piloto de Ônibus Urbano “Ottolizado” para Medir Desempenho com uso do Combustível GNV. In: **3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás: 2005**, Salvador. Anais..., 12p.

DE BRITO, H. P. Análise das emissões atmosféricas geradas por veículos automotores em Natal – RN. **Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, UFRN, (2005).

DE PAULO AA, DA COSTA RS, RAHDE SB, VECCHIA FD, SEFERIN M, DOS SANTOS CA. Performance and emission evaluations in a power generator fuelled with Brazilian diesel and additions of waste frying oil biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, v.98, p.288-297, 2016.

FARIA R, MARQUES P, MOURA P, FREIRE F, DELGADO J, DE ALMEIDA AT. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. **Renew Sustainable Energy Review**, v.24, p.271–87, 2013.

Fontaras G, Martini G, Manfredi U, Marotta A, Krasenbrink A, Maffioletti F, et al. Assessment of on-road emissions of four Euro V diesel and CNG waste collection trucks for supporting air-quality improvement initiatives in the city of Milan. **Science Total Environment**, v.426, p.65–72, 2012.

FPT INDUSTRIAL: “A decade of dedication to environmental protection: FPT partners with Beijing public transport for a green capital”, Beijing, June 2013 available in: [http://www.fptindustrial.com/FPTPressReleases/ENUK/2012/IAA\\_ENG](http://www.fptindustrial.com/FPTPressReleases/ENUK/2012/IAA_ENG)

FPT INDUSTRIAL: “FPT Industrial presents its full range of euro VI engines for automotive applications at IAA 2012”, Hannover, September 2012, available in:

<http://www.fptindustrial.com/FPTPressReleases/ptPT/2013/130628%20FPT%20Industrial%20-%20Beijing%20Public%20Transport%20ENG.pdf>

GARCIA S Sanchez JA, Lopez Martinez JM, Lumbreras Martin J, Flores Holgado MN. Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system. **Energy**, v.47, n.1, p.174–98, 2012.

GONÇALVES V, BATISTA R, MENEZES W, FERNANDO L, CYBIS DA, EINLOFT S, ET AL. Life Cycle Inventory for the agricultural stages of soybean production in the state of Rio Grande do Sul, **Brazilian Journal Clean Production**, v.93, p.65–74, 2015.

GUO, M.; MURPHY, R. J. LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis. **Science of the Total Environment**, v.435-436, p.230–243, 2012.

HESTERBERG, T.W.; LAPIN, C.A.; BUNN, W.B.; A comparison of emissions from vehicles fueled with diesel or compressed natural gas. **Environmental Science & Technology**, v.42, n.17, p.6437-6445, 2008.

HISCHIER, ROLAND. Life cycle inventories of packagings and graphical papers. **Ecoinvent report**, v. 11, 2007.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. “Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores - Proconve/Promot/Ibama”, 3ed. Brasília: **Ibama/Diqua**, 584 p., 2011.

KOZERSKI, G. R.; HESS, S.C. Estimativa dos Poluentes Emitidos pelos Ônibus e Microônibus de Campo Grande/MS, Empregando como Combustível Diesel, Biodiesel ou Gás Natural. Nota Técnica. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.II, n.2, p.113-117, 2006.

KRALISCH, D., OTT, D. & GERICKE, D. Rules and benefits of Life Cycle Assessment in green chemical process and synthesis design: a tutorial review. **Green Chemistry**, v.17, p.123–145, 2015.

KWON S, PARK Y, PARK J, KIM J, CHOI K-H, CHA J-S. Characteristics of on-road NOx emissions from Euro 6 light-duty diesel vehicles using a portable emissions measurement system. **Science Total Environment**, v.576, p.70–7, 2017.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; FERNÁNDEZ, J.R. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.34, p.198-223, 2008.

LLOYD, S. M., & RIES, R. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment A Survey of Quantitative Approaches. **Journal of Industrial Ecology**, v.11, n.1, p.161–181, 2007.

LOPES M, SERRANO L, RIBEIRO I, CASCÃO P, PIRES N, RAFAEL S, ET AL. Emissions characterization from EURO 5 diesel/biodiesel passenger car operating under the new European driving cycle. **Atmosphere Environment**, v.84, p.339–348, 2013.

LÓPEZ, J. M.; GÓMEZ, A.; APARÍCIO, F.; SÁNCHEZ, F. J. Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid. **Applied Energy**, v.86, p.610–615, 2009.

MALÇA, J.; FREIRE F. Environmental Impact of Biofuels, **Uncertainty Analysis of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Energy Renewability of Biofuels**, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.), ISBN: 978-953-307-479-5, InTech, Cap. 10, p.179-206, 2011. Available from: <http://www.intechopen.com/books/environmental-impact-of-biofuels/uncertainty-analysis-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-and-energy-renewability-of-biofuels>

MARTINS, K. C. R.; SOUZA, J.C.; Apostila de Motores Diesel, Laboratório de Mecânica Automotiva, Departamento de Mecânica de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão. São Luis - MA. 2009.

MMA, Ministério do Meio Ambiente, Inventário Nacional De Emissões Atmosféricas Por Veículos Automotores Rodoviários. 115p, 2013.

MONTEIRO, J. V. F.; DA SILVA, J. R. N. M.; Gás Natural Aplicado à Indústria e ao Grande Comércio. São Paulo: Blucher: Comgas, 182 p., 2010.

MORAES, A. K.; SILVA, A. V.; ASSIS, L. E.; Eficiência Energética Aplicada a Queima de Gases Combustíveis. FIERGS/SENAI-PETROBRAS SULGAS CTGAS-ER ESTADO DO RS, Esteio-RS, 2010.312p.

MUSZCAT, E. et al. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 3ª Ed., 2001.

OLIVEIRA, DE F. B.; VANDRESEN, M.; PEREIRA, M.; Desenvolvimento de kit para conversão de motores diesel estacionários de geradores para operar com mistura diesel-gás natural. **Cadernos de Publicações Acadêmicas 2**, IFSC, v.2, n.1, p.62–70, 2010.

ORSI F, Muratori M, Rocco M, Colombo E, Rizzoni G. A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption , CO 2 emissions , and economic cost. **Applied Energy**; v.169, p.197–209, 2016.

RAHDE, S. B. Apostila da Disciplina de Máquinas Térmicas do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da PUCRS. Porto Alegre – RS, 2012.

RESOLUÇÕES DO CONAMA. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legi.cfm>. Acesso em 30/10/2012.

SAFAEI A, FREIRE F, HENGGELER ANTUNES C. Life-cycle greenhouse gas assessment of nigerian liquefied natural gas addressing uncertainty. **Environment Science Technology**, v.49, n.6, p.3949–57, 2015.

SCHLOSSER, J.F.; CAMARGO, M.N.; MACHADO, P.R.M. Comportamento de um motor de ignição por compressão trabalhando com óleo diesel e gás natural. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p. 736-744, 2004.

SERRANO, L. M. V. Análise Comparativa do Desempenho de Motores de Combustão Interna Quando Utilizam Biocombustíveis. Coimbra. 2012. 256p. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Portugal.

SERRANO, L. M. V., CARREIRA, V. J. R.; CÂMARA, R. M.; GAMEIRO DA SILVA, M. C. On-road performance comparison of two identical cars consuming petrodiesel and biodiesel. **Fuel Processing Technology**, v.103, p.125-133, 2012.

SERRANO, L. M. V.; CÂMARA, R. M. O.; CARREIRA, V. J. R.; GAMEIRO DA SILVA, M. C. Performance study about biodiesel impact on buses engines using dynamometer tests and fleet consumption data. **Energy Conversion and Management**, v.60, p.2-9, 2012.

SUBRAMANIAN KA, MATHAD VC, VIJAY VK, SUBBARAO PM V, ROSE L, HUSSAIN M, ET AL. Determinação de metais em óleos lubrificantes, provenientes de motores de ônibus urbano, utilizando a faas. **Applied Energy**; v.44, n.1, p.3724–3731, 2013.

TEIXEIRA, E. C. FELTRES, S. SANTANA, E.R.R.; Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Química Nova**, v.31, n.2, p.244-248, 2008.

YPBF, YACIMIENTOS PETROLÍFEROS FISCALES BOLIVIANOS, Boletín Estadístico de 2012, La Paz, Bolívia, Marzo de 2013.