



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DO GNV COMO
COMBUSTÍVEL PARA A COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

CRISTIANE SOARES DE ABREU
QUÍMICO INDUSTRIAL E LICENCIADO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre
Novembro, 2013



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE

MATERIAIS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DO GNV COMO
COMBUSTÍVEL PARA A COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

CRISTIANE SOARES DE ABREU
QUÍMICO INDUSTRIAL E LICENCIADO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Seferin.

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Convênio de Pesquisa SULGAS-PUCRS – AGT 2012-2013

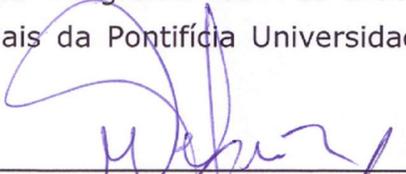
Porto Alegre
Novembro, 2013



ANÁLISE DO DESEMPENHO AMBIENTAL DO GNV COMO COMBUSTÍVEL PARA A COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

CANDIDATA: CRISTIANE SOARES DE ABREU

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE 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. MARCUS SEFERIN - ORIENTADOR

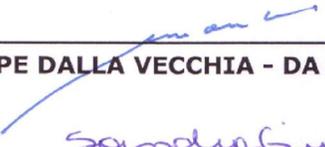


DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



**DR. LUIZ FERNANDO DE ABREU CYBIS - DO INSTITUTO DE PESQUISAS
HIDRÁULICAS - UFRGS**



DR. FELIPE DALLA VECCHIA - DA FACULDADE DE ENGENHARIA - PUCRS



DRA. SANDRA MARA OLIVEIRA EINLOFT - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas participaram e tiveram, cada uma, um importante papel nessa conquista.

Aos meus pais Neusa e Manoel e minhas irmãs Simone e Sabrina, que estiverem sempre ao meu lado, por me incentivar e acreditar no meu potencial.

Ao meu namorado, Áberth Medeiros, pelo amor, compreensão, carinho e apoio durante a realização desse trabalho.

Aos professores Marcus Seferin e Carlos Alexandre, pela orientação, apoio e amizade em todos os momentos.

À Sulgás pelo fomento do projeto.

Às empresas Revita e Iveco, parceiras do projeto, pelo apoio técnico.

Ao colega Ronaldo Silvestre pela parceria e colaboração no projeto.

Aos colegas do Laboratório, em especial Wagner Menezes e Martina Paim, pelo apoio, amizade e por tornar o ambiente de trabalho tão agradável.

Aos professores do Senai-RS Paulo Podorodeczki e Joel de Oliveira Costa pelo apoio técnico.

A tantas outras pessoas, não mencionadas, mas que tiveram fundamental importância na realização desse trabalho.

O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.

(Guimarães Rosa)

RESUMO

ABREU, Cristiane Soares. **Análise do desempenho ambiental do GNV como combustível para a coleta de resíduos sólidos urbanos.** Porto Alegre. 2013. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Devido às crescentes preocupações com os problemas ambientais causados pelo uso de combustíveis pesados, é cada vez maior o incentivo aos combustíveis limpos, principalmente no setor de transportes. Nesse trabalho, foram monitoradas as emissões de um caminhão de coleta de lixo em rota na cidade de Porto Alegre abastecido com GNV e biogás. Um caminhão da base de dados ELCD[®] movido a diesel foi utilizado para comparação desse combustível. A metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi utilizada para avaliar os impactos ambientais do GNV e do biogás na fase de uso nesse veículo. Para a maior parte das situações analisadas para o GNV, o potencial de aquecimento global foi de aproximadamente 10 kg CO₂-Eq./km rodado, os potenciais de acidificação e eutrofização terrestre foram de 0,5 e 0,04 m²/km rodado, respectivamente. O caminhão da base de dados movido a diesel teve menor potencial de aquecimento global e acidificação e maior potencial de eutrofização terrestre, quando comparado ao GNV; e melhor desempenho em todas as categorias frente ao biogás. O estudo possibilitou identificar os principais responsáveis pelos impactos, e observar o perfil das emissões em diferentes condições de tráfego.

Palavras-Chaves: Avaliação de impacto ambiental, Gás natural veicular, veículos de coleta de lixo.

ABSTRACT

ABREU, Cristiane Soares. **Analysis of the environmental performance of CNG as fuel for the collection of municipal solid waste.** Porto Alegre. 2013. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Due to the growing concerns with the environmental problems caused by the use of heavy fuel oil, is increasingly the incentive to clean fuels, mainly in the field of transport. In this study, emissions of a truck of garbage collection in route in the city of Porto Alegre fuelled with CNG and biogas were monitored. A truck from the ELCD[®] database moved by diesel was used for comparison of this fuel. Life Cycle Assessment (LCA) methodology was used to assess the environmental impacts of CNG and biogas in phase of use in this vehicle. For the majority analyzed situations for the CNG, the global warming potential was approximately 10 kg CO₂-Eq. /km rotated, the acidification potential and terrestrial eutrophication were 0.5 and 0.04 m² /km rotated, respectively. The database truck moved by diesel had less potential for global warming and acidification and greater potential for eutrophication terrestrial, when compared to CNG; and better performance in all categories front to biogas. The study enabled to identify the main responsible for impacts, and observe the emissions profile in different traffic conditions.

Key-words: Environmental impact assessment, Natural gas vehicle, refuse collection vehicles

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Oferta interna de energia por fonte | 16 |
| Figura 3.1 - Esquema geral da cadeia de processos a partir de uma fonte de carbono sólida em combustível sintético | 23 |
| Figura 3.2 - Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço: | 33 |
| Figura 3.3 - Procedimentos simplificados para análise de inventário | 35 |
| Figura 4.1 - Vista lateral do caminhão de coleta de lixo utilizado na medição dos gases emitidos | 41 |
| Figura 4.2 - Rotas de coleta de lixo percorrida pelo caminhão do projeto na cidade de Porto Alegre. 4.2a) Rota ID03 4.3b) Rota PD01 | 44 |
| Figura 4.3 - Planilha controle a ser preenchida pelos motoristas do caminhão para obtenção de dados | 45 |
| Figura 4.4 - Analisador de gases utilizado na obtenção dos dados de emissão. 4.4a) Instrumento isolado e 4.4b) Sonda instalada no escapamento | 46 |
| Figura 4.5 - Diagrama esquemático do funcionamento do analisador de gases | 47 |
| Figura 5.1 - Distribuição de impacto para aquecimento global do caminhão abastecido à GNV em rota | 57 |
| Figura 5.2 - Distribuições de impacto para acidificação do caminhão abastecido à GNV em rota | 59 |
| Figura 5.3 - Distribuição de impacto para Potencial de Aquecimento Global na comparação entre combustíveis | 61 |
| Figura 5.4 - Distribuição de impacto para Potencial de Acidificação na comparação entre combustíveis | 62 |
| Figura 5.5 - Emissão de gases de exaustão em função do fator lambda | 63 |
| Figura 5.6 - Análise de sensibilidade para o potencial de aquecimento global em função da variação percentual de CH ₄ | 65 |
| Figura 5.7 - Análise de sensibilidade para o potencial de acidificação em função da variação percentual de SO ₂ | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1.1 - Setor de transporte - Rodoviário (%)..... | 17 |
| Tabela 3.1 - Composição típica do gás natural proveniente da Bacia de Campos ... | 22 |
| Tabela 3.2 - Panorama mundial da frota de ônibus total e abastecido a GNV..... | 28 |
| Tabela 3.3 - Limite máximos de emissão para motores de veículos pesados e programa corresponde na Europa..... | 31 |
| Tabela 3.4 - Valores limites - ensaios ESC e ELR. | 32 |
| Tabela 3.5 - Valores limites - ensaios ETC (1). | 33 |
| Tabela 4.1- Composição dos gases utilizados no caminhão..... | 42 |
| Tabela 4.2 - Faixa de medição e resolução dos parâmetros medidos do analisador Testo 350 | 46 |
| Tabela 4.3 - Equações obtidas para estimativa dos teores de SO ₂ a partir do teor de O ₂ | 48 |
| Tabela 5.1 - Resultados para Potencial de Aquecimento Global do caminhão abastecido à GNV em rota | 57 |
| Tabela 5.2 - Resultados para Potencial de Acidificação do caminhão abastecido à GNV em rota | 58 |
| Tabela 5.3 - Resultados para Potencial de Eutrofização terrestre do caminhão abastecido à GNV em rota | 59 |
| Tabela 5.4 - Resultados para Potencial de Aquecimento Global na comparação entre combustíveis | 60 |
| Tabela 5.5 - Resultados para Potencial de Acidificação na comparação entre combustíveis | 62 |
| Tabela 5.6 - Resultados para Potencial de Eutrofização Terrestre na comparação entre combustíveis | 64 |

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

| | |
|---------------------|---|
| TWh | Terawatt hora |
| GNV | Gás Natural Veicular |
| GVR | Gas Vehicles Report |
| PUCRS | Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul |
| SULGÁS | Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul |
| DMLU | Departamento Municipal de Limpeza Urbana |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| Gm ³ | Gigametros cúbicos |
| Mm ³ | Megametros cúbicos |
| km | Quilômetro |
| GNS | Gás natural sintético |
| U\$ | Dólar |
| CEG | Companhia Distribuidora de Gás do Rio de Janeiro – |
| SETRANS | Secretaria de Estado de Transporte |
| ANP | Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| Inmetro | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente |
| PLANGAS | Plano de Antecipação da Produção de Gás |
| MINFRA | Ministério de Infra-Estrutura |
| MP | Material particulado |
| NO _x | Óxidos de Nitrogênio |
| HC | Hidrocarbonetos |
| NMHC | Hidrocarbonetos não-metânicos |
| CO ₂ eq. | CO ₂ equivalente |
| PROCONVE | Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores |
| kWh | Quilowatt hora |
| ESC | Ciclo Europeu em Regime Constante |

| | | |
|-----------------|--|-------------------------|
| ELR | Ciclo Europeu de Resposta em Carga | |
| ETC | Ciclo Europeu em Regime Transiente | |
| EGR | Recirculação de gases de escapamento | |
| ACV | Avaliação de Ciclo de Vida | |
| EPA | Environmental Protection Agency | |
| ISO | International Organization for Standardization | |
| UF | Unidade funcional | |
| ICV | Inventário do Ciclo de Vida | |
| AICV | Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida | |
| GEE | Gases do Efeito Estufa | |
| MJ | Megajoule | |
| WTP | well-to-pump | |
| WTW | well-to-wheels | |
| PTW | pump-to-wheels | |
| Gasbol | Gasoduto Bolívia-Brasil | |
| EDIP | Environmental Design of Industrial Products | |
| kW | Quilowatt | |
| rpm | rotações por minuto | |
| Nm | Newton metro | |
| PAG | Potencial de Aquecimento Global | |
| PA | Potencial de Acidificação | |
| V_a | Volume admitido no motor | $m^3.s^{-1}$ |
| Rotação | Rotação do motor | RPM |
| V_m | Volume do motor | m^3 |
| \dot{n}_t | Vazão molar de mistura injetada | $mol.s^{-1}$ |
| P | pressão de injeção | Pa |
| R | constante universal dos gases | $atm.L.mol^{-1}.K^{-1}$ |
| \dot{n}_{GNV} | Vazão molar de GNV | $mols.s^{-1}$ |
| \dot{n}_t | Vazão molar da mistura injetada | $mols.s^{-1}$ |
| \dot{n}_{AR} | Vazão molar de ar | $mols.s^{-1}$ |
| \dot{n}_{N_2} | Vazão molar de N_2 | $mols.s^{-1}$ |
| $\%N_2$ | Percentual de N_2 na saída | % |
| $\%O_2$ | Percentual de O_2 na saída | % |

| | | |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| $\%CO_2$ | Percentual de CO_2 na saída | % |
| $\%C_xH_y$ | Percentual de C_xH_y na saída | % |
| $\%NO_x$ | Percentual de NO_x na saída | % |
| $\%SO_2$ | Percentual de SO_2 na saída | % |
| \dot{n}_s | Vazão molar da saída | $\text{mols}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| $\dot{m}_{\text{poluente}}$ | Vazão mássica do poluente na saída | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| $\%_{\text{poluente}}$ | Percentual do poluente na saída | % |
| MM_{poluente} | Massa molar do poluente | $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| AGRADECIMENTOS | 3 |
| RESUMO | 5 |
| ABSTRACT | 6 |
| LISTA DE FIGURAS | 1 |
| LISTA DE TABELAS | 2 |
| LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS | 3 |
| SUMÁRIO | 6 |
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 20 |
| 2.1. Objetivos Específicos | 20 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 3.1. O Gás..... | 21 |
| 3.1.1. Gás natural | 21 |
| 3.1.2. Gás natural Sintético..... | 23 |
| 3.1.3. Biogás | 25 |
| 3.2. Fase de uso de combustíveis em veículo de transporte | 25 |
| 3.2.1. Motores | 26 |
| 3.2.1.1. Gás natural em motores a ciclo Otto..... | 26 |
| 3.2.1.2. Gás natural em motores a ciclo Diesel..... | 28 |
| 3.2.2. Regulação..... | 29 |
| 3.2.3. Emissões | 30 |
| 3.3. Metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida..... | 33 |
| 3.3.1. Definição dos objetivos e escopo..... | 34 |
| 3.3.2. Análise do Inventário..... | 34 |
| 3.3.3. Avaliação do Impacto Ambiental | 35 |
| 3.3.4. Principais categorias de impacto utilizadas na ACV de combustíveis..... | 36 |
| 3.3.4.1. Aquecimento Global..... | 36 |
| 3.3.4.2. Acidificação..... | 37 |
| 3.3.4.3. Eutrofização Terrestre..... | 37 |
| 3.3.5. Interpretação dos Resultados | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4. Estudos de ACV sobre uso do gás natural em veículos pesados | 38 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 4.1. Obtenção dos dados de emissão | 41 |
| 4.1.1. Especificações do veículo de coleta de lixo | 41 |
| 4.1.2. Especificações dos combustíveis utilizados..... | 42 |
| 4.1.3. Cenários de testes e monitoramento por satélite | 43 |
| 4.1.4. Registros operacionais..... | 44 |
| 4.1.5. Analisador de gases..... | 45 |
| 4.1.6. Sistema de aquisição de dados (<i>Datalogger</i>) | 49 |
| 4.2. Considerações Gerais para Avaliação do Impacto Ambiental | 49 |
| 4.2.1. Definição de objetivo e escopo do estudo..... | 49 |
| 4.2.1.1. Função e Unidade funcional | 50 |
| 4.2.1.2. Fluxo de referência | 50 |
| 4.2.2. Análise do Inventário..... | 50 |
| 4.2.2.1. Balanço de massa da queima do biogás e gás natural..... | 50 |
| 4.2.2.2. Construção do Inventário | 53 |
| 4.2.3. Método de cálculo | 54 |
| 4.2.4. Categorias de Impacto | 55 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 56 |
| 5.1. Avaliação do Impacto Ambiental do caminhão abastecido à GNV em rota | 56 |
| 5.1.1. Potencial de Aquecimento Global | 56 |
| 5.1.2. Potencial de Acidificação | 58 |
| 5.1.3. Potencial de Eutrofização terrestre | 59 |
| 5.2. Comparação entre combustíveis | 59 |
| 5.2.1. Potencial de Aquecimento Global | 60 |
| 5.2.2. Potencial de Acidificação | 62 |
| 5.2.3. Potencial de Eutrofização Terrestre | 63 |
| 5.3. Análise de sensibilidade | 64 |
| 5.3.1. Análise de sensibilidade para Potencial de Aquecimento Global..... | 64 |
| 5.3.2. Análise de sensibilidade para Potencial de Acidificação..... | 65 |
| 6. CONCLUSÃO | 67 |
| 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 68 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 69 |

| | |
|----------------------|-----------|
| ANEXO A | 74 |
|----------------------|-----------|

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado grande preocupação das organizações governamentais e da sociedade em geral frente aos problemas ambientais causados pelo uso indevido de recursos naturais. É cada vez mais comum o incentivo pelo uso de formas limpas e renováveis de energia.

O Brasil se destaca por utilizar cerca de 40% de energia renovável em sua matriz energética e esse índice atinge apenas 10% a nível mundial (Brasil, 2013). Energia hidráulica e eletricidade, produtos da cana-de-açúcar e lenha e carvão vegetal são os principais constituintes da matriz energética renovável nacional, conforme Figura 1.1.

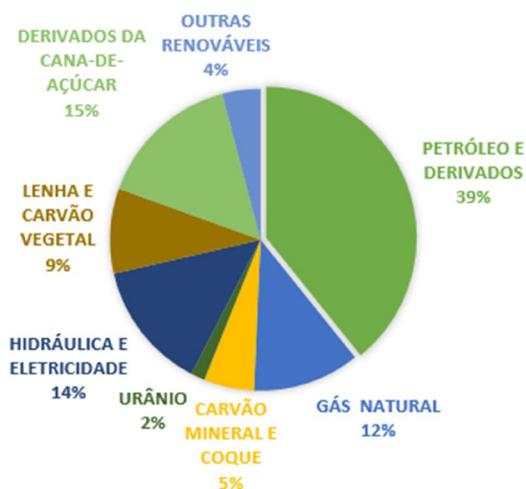


Figura 1.1 - Oferta interna de energia por fonte

Fonte: Brasil, 2013.

A geração de energia elétrica no Brasil alcançou 509,2 TWh em 2010 e a principal fonte é a hidráulica, com 74,0% (Brasil, 2011). Nesse cenário, cabe destacar o aumento de 180% na geração térmica a gás natural (Brasil, 2011) devido à crescente demanda de energia e das condições hidrológicas desfavoráveis nesse ano.

O setor de transporte brasileiro, assim como os demais, possui matriz energética diversificada, com várias possibilidades de produção de combustíveis fósseis e renováveis. Os programas de incentivos ao uso do álcool e do biodiesel consolidaram o mercado de combustíveis renováveis no país, e possibilitam que novos sejam desenvolvidos (Teixeira, 2003).

Apesar do sucesso dos programas do álcool e do biodiesel, o setor ainda é muito dependente dos derivados de petróleo (diesel e gasolina), como pode ser observado na Tabela 1.1. No Brasil, não há programas que incentivem o uso de outras fontes de combustíveis em veículos pesados (como gás natural e células a combustível de Hidrogênio, por exemplo). A grande maioria desses veículos utiliza motores de combustão interna a óleo diesel, fato que justifica a grande participação desse combustível no setor (Silva, 2006).

Tabela 1.1 - Setor de transporte - Rodoviário (%)

| Fontes | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Gás natural | 2,6 | 2,9 | 3,6 | 4,1 | 4,3 | 3,8 | 3,2 | 2,8 | 2,6 | 2,3 |
| Óleo diesel | 54,7 | 54,8 | 53,7 | 53,4 | 52,4 | 51,7 | 50,9 | 51,0 | 50,9 | 50,4 |
| Gasolina automotiva | 29,6 | 28,6 | 28,3 | 29,4 | 27,0 | 25,3 | 25,4 | 27,4 | 30,7 | 33,6 |
| Álcool etílico anidro | 8,7 | 8,4 | 8,5 | 5,7 | 6,3 | 6,2 | 5,9 | 5,9 | 6,6 | 5,7 |
| Álcool etílico hidratado | 4,3 | 5,2 | 6,0 | 7,4 | 10,0 | 13,0 | 14,6 | 12,9 | 9,2 | 7,9 |

Fonte: Brasil, 2013

As grandes variações no preço do álcool e a incerteza quanto à garantia da sua oferta são fatores que limitam o seu crescimento e conseqüentemente, mantém a dependência da gasolina nos veículos leves.

O número de veículos abastecidos com gás natural veicular (GNV) tem aumentado significativamente na América e na Ásia, em função, principalmente, do aumento da demanda com descobertas de novos poços, da preocupação com as emissões dos combustíveis tradicionais e dos subsídios estatais, que reduzem impostos sobre vendas para estes veículos.

Em 2011, existiam 15,1 milhões de veículos movidos a gás natural em todo o mundo, o que corresponde a uma quota de 1,18% da população total de veículos (GVR Gas Vehicles Report, 2011). Os países com o maior número de veículos a gás natural no final de 2011 foram o Paquistão (2,85 milhões), Irã (2,85 milhões), Argentina (1,90 milhões), Brasil (1,69 milhões) e Índia (1,10 milhões). Estes cinco países juntos têm mais da metade da quantidade mundial existente de veículos a gás natural. A frota brasileira compreende-se predominantemente de carros convertidos (táxis particulares).

Bolívia, Brasil e Argentina são os países da América Latina que usam amplamente o gás natural como combustível para veículos e que ao mesmo tempo têm grandes reservas de gás natural (Bolívia - 750 Gm³, Argentina 446 Gm³ e no Brasil 354 Gm³) (Engerer e Horn, 2010). Em 2010, O Brasil importou 12.647 Mm³ de gás natural, cerca de metade de sua produção de gás natural (22.938 Mm³) (Brasil, 2011).

No Brasil, os veículos que utilizam gás natural como combustível são quase que exclusivamente veículos leves e em sua maioria, na frota de taxi. Alguns projetos foram executados nos últimos anos, conforme descrito por Silva (2006), avaliando a conversão de motores ciclo diesel para ciclo Otto (“Ottolização”) ou motores *dual-fuel*, onde é utilizada uma mistura de GNV+diesel como combustível, em veículos de transporte urbano.

Recentemente, a ferramenta da Análise de Ciclo de Vida (ACV) teve crescente interesse por parte de analistas políticos e tomadores de decisão. A ACV

pode ser eficazmente utilizada para analisar os combustíveis utilizados em sistemas de transportes, incluindo veículos pesados (Arteconi et al, 2010).

Muitos estudos que utilizam a ACV para avaliar o impacto ambiental dos sistemas de combustíveis no setor de transporte já foram publicados (Ally e Pryor, 2007; Arteconi et al, 2010; Burnham et al, 2012; Kliucininkas et al, 2012; López et al, 2009; Rose et al, 2013). As bases dessas comparações e seus resultados variam significativamente. A maioria desses estudos utilizam base de dados e modelos matemáticos para estimar as emissões dos veículos (Ally e Pryor, 2007; Arteconi et al, 2010; Burnham et al, 2012; Kliucininkas et al, 2012; Rose et al, 2013) e poucos são os estudos que utilizam instrumentação embarcada para medir essas emissões (López et al, 2009).

Diante desse contexto, esse trabalho visa avaliar o impacto ambiental de diferentes combustíveis na fase de uso, a partir de dados de emissão medidos em rota.

Em 2012, a PUCRS iniciou sua participação em um projeto, do qual esse trabalho faz parte, de desenvolvimento do mercado de gás natural veicular para veículos pesados, promovido pela Iveco, Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul (Sulgás), Revita Engenharia Ambiental e Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU). A Iveco desenvolveu e forneceu o primeiro caminhão movido a gás natural veicular para aplicação em coleta de lixo no Brasil. A Sulgás financiou o projeto e forneceu os combustíveis utilizados. A Revita e o DMLU utilizaram o caminhão no serviço de coletar e forneceram dados relativos ao uso do caminhão em serviço. À PUCRS, coube monitorar as emissões de poluentes na atmosfera e o desempenho do caminhão nas rotas de coleta.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto ambiental do uso do GNV em um caminhão de coleta de lixo da cidade de Porto Alegre, utilizando a caracterização de impacto da metodologia da Análise de Ciclo de Vida.

2.1. Objetivos Específicos

- Analisar as emissões de gases do caminhão abastecido com GNV e biogás;
- Avaliar os impactos da fase de uso do GNV em caminhão de coleta de lixo utilizando a metodologia da ACV;
- Comparar os impactos ambientais de um caminhão a diesel fornecidos pela base de dados ELCD[®] com os resultados obtidos pelo caminhão;
- Avaliar o desempenho ambiental dos combustíveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentadas questões referentes ao gás natural: composição, exploração e produção desse combustível; considerações sobre a fase de uso no transporte, envolvendo aspectos de motores, regulação e emissões e por fim, conceitos e revisão da ferramenta da análise de ciclo de vida utilizada para avaliar a fase de uso do gás natural em transporte de veículos pesados.

3.1. O Gás

Gás Natural ou Gás é todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gaseíferos, cuja composição poderá conter gases úmidos, secos e residuais (Brasil, 2009).

3.1.1. Gás natural

O gás natural é resultante da decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos; podendo estar associado ou não ao petróleo. É encontrado em rochas porosas no subsolo, isoladas por uma camada impermeável. O elemento predominante é o metano, mas também há, em proporções variadas etano, propano, butano, gás carbônico, nitrogênio, água, ácido clorídrico e metanol, além de outros (ANEEL, 2008).

A Tabela 3.1 mostra a composição típica do gás natural proveniente da Bacia de Campos, no Estado do Rio de Janeiro, que é um dos maiores produtores de gás do Brasil.

Tabela 3.1 - Composição típica do gás natural proveniente da Bacia de Campos

| | Composto Gás associado (% molar) | Gás não-associado (% molar) |
|---------------------------|---|--|
| Metano | 80,2 | 97,2 |
| Etano | 10,0 | 1,3 |
| Propano | 5,4 | 0,4 |
| Iso Butano | 0,9 | 0,1 |
| Normal Butano | 1,4 | 0,1 |
| Iso Pentano | 0 | 0 |
| Normal Pentano | 0,25 | 0,02 |
| Hexano | 0,12 | 0,03 |
| Heptano (C7+) | 0,1 | 0,0 |
| Nitrogênio | 1,0 | 0,7 |
| Dióxido de Carbono | 0,5 | 0,1 |

Fonte: Petrobras, 2012.

Trata-se de um combustível não renovável, mas bastante versátil. Pode ser usado na geração de energia elétrica, em motores de combustão e na geração de calor e vapor. Comparado com outros combustíveis como derivados de petróleo e carvão, é menos agressivo ao meio ambiente na fase de utilização, pois possui baixas quantidades de contaminantes (como compostos a base de enxofre) e processamento relativamente simples (ANEEL, 2008).

A produção do gás natural é composta por seis etapas. A primeira é a exploração, na qual a ocorrência do gás é investigada. A segunda etapa consiste na instalação da infraestrutura necessária nos poços. A terceira é a produção e processamento em campo (separação do petróleo, em caso de gás associado). A quarta etapa é o processamento, no qual se retiram os contaminantes e frações pesadas e realiza-se a compressão do gás para a terra ou para a estação de tratamento. A quinta é o transporte e, em alguns países (que não inclui o Brasil), o armazenamento. E, na sexta e última etapa, ocorre a distribuição, que é a entrega ao consumidor final (ANEEL, 2008).

O transporte do poço às unidades de consumo pode ser realizado através de gasodutos dimensionados para grandes volumes a elevada pressão, ou, em outros casos, pode passar por um processo de liquefação, no qual atinge 160 graus Celsius

abaixo de zero, reduzindo o volume 600 vezes (ANEEL, 2008). A malha de gás natural no Brasil cresceu significativamente: 1.599 km em 2010, atingindo um total de 9.295 km em 2010 (Brasil, 2011).

3.1.2. Gás natural Sintético

Apesar das vantagens já mencionadas do gás natural, trata-se de um combustível não renovável. A conversão de matéria-prima sólida em gás natural sintético (GNS) tem sido investigada. Carvão e biomassa sólida têm sido convertidos em GNS por processos termo-químicos via gaseificação e subsequente metanação, atingindo altos rendimentos (Kopyscinski et al., 2010)

A produção de GNS por meio de um processo de termo-químico requer vários passos de conversão, como representado na Figura 3.1(Kopyscinski et al., 2010).

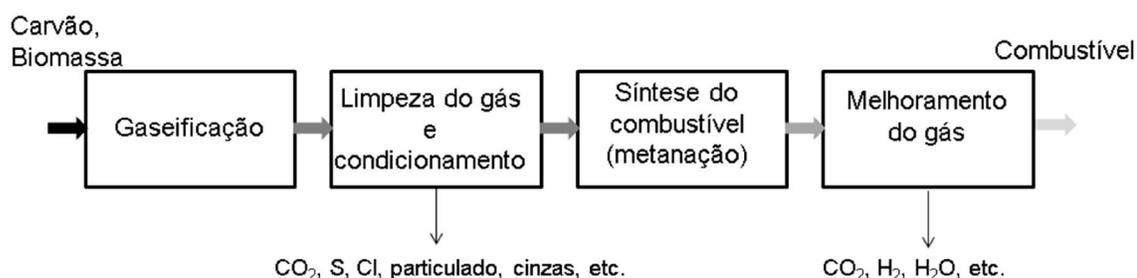


Figura 3.1 - Esquema geral da cadeia de processos a partir de uma fonte de carbono sólida em combustível sintético

Fonte: Kopyscinski et al., 2010.

O primeiro passo é a gaseificação da fonte de carbono sólido (carvão, biomassa) com vapor e/ou oxigênio e a produção de gás, uma mistura de gás contendo principalmente hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O), metano (CH₄), alguns hidrocarbonetos superiores e impurezas tais como enxofre e cloro (Kopyscinski et al., 2010).

O segundo processo é a limpeza do gás produzido e deve ser entendido como as operações unitárias que removem impurezas e catalisadores. O

condicionamento de gás resume todos os processos em que o componente do gás produzido é convertido no combustível. Os passos de condicionamento mais comuns são a reforma a vapor e água conforme mostrado na Equação (3.1).



A síntese de combustível em si é um processo catalisado heterogeneamente, consistindo na hidrogenação dos óxidos de carbono para o metano, chamada metanação, juntamente com a formação de água (Eq. (3.2)). Duas outras reações independentes são importantes (Eqs. (3.3) e (3.4)) (Kopyscinski et al., 2010).



O melhoramento do combustível final consiste na remoção de todas as substâncias como água e dióxido de carbono, a fim de satisfazer as especificações de qualidade do combustível (Kopyscinski et al., 2010).

Todos os quatro processos dependem uns dos outros, do tipo de síntese de combustível que define a qualidade de gás produzido, e da tecnologia de gaseificação que define a composição do gás combustível. Kopyscinski et al., 2010, mostram as principais tecnologias que tem sido desenvolvidas nos últimos 60 anos, e os principais fatores que afetam a conversão e qualidade do gás natural sintético.

As vantagens do GNS são a alta eficiência de conversão, a infra-estrutura de distribuição já existente, como dutos de gás e as tecnologias de uso bem estabelecidas e eficientes, por exemplo, carros GNV e centrais de cogeração (produção combinada de calor e eletricidade) (Teixeira, 2003).

3.1.3. Biogás

Entre os combustíveis renováveis, o biogás é um interessante candidato para substituir parcialmente o gás natural. O biogás é obtido da biomassa contida em dejetos (urbanos, industriais e agropecuários) e em esgotos. Essa biomassa passa naturalmente do estado sólido para o gasoso por meio da ação de microorganismos que decompõem a matéria orgânica em um ambiente anaeróbico (sem ar) (ANEEL, 2008).

Além de gerar energia, o biogás é uma interessante solução para o gerenciamento de resíduos sólidos, pois além de permitir a recuperação de energia através do aproveitamento do biogás e nutrientes, previne a poluição ambiental (IEA, 2005).

A digestão anaeróbica da biomassa produz, além do principal constituinte do biogás, o metano (CH_4), quantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S). Para ser utilizado como combustível, o biogás deve ser purificado, para cumprir as diretrizes atuais de combustíveis (ANEEL, 2008).

Existem diferentes alternativas de purificação do biogás. Lacour et al. (2012), sugere um processo de purificação compreendendo quatro etapas: (1) filtração por filtro biológico, (2) eliminação de vapor de água por um processo térmico, (3) filtração por carvão ativado para remover vestígios de amônia e gás sulfídrico, e (4) eliminação de dióxido de carbono por um processo de adsorção. Após a purificação, o biogás pode ser usado como combustível ou ainda pode ser injetado na rede de gás.

3.2. Fase de uso de combustíveis em veículo de transporte

A maior relação de Hidrogênio/Carbono no gás natural, comparado a diesel e gasolina, proporciona queima mais limpa, menor formação de depósitos e

menor desgaste do motor. O fato de estar no estado gasoso em condições normais faz com que a carburação seja mais simples, a distribuição mais homogênea para os cilindros e a partida a frio mais fácil. Além disso, sua característica anti-detonante permite taxas de compressão mais elevadas (Costa, 2012).

A seguir, são apresentadas as adaptações que necessitam ser efetuadas nos motores convencionais para utilizar gás natural como combustível, as leis e decretos que regulamentam o uso desse combustível no Brasil e as diferenças das emissões de diferentes combustíveis e motores.

3.2.1. Motores

Veículos movidos a GNV podem vir preparados de fábrica para seu uso e há os que são convertidos posteriormente. Entre os veículos convertidos, é importante destacar que podem se tratar tanto de motores de combustão interna a ciclo Otto quanto operar com ciclo Diesel (Costa, 2012).

No Brasil, a maioria dos veículos da categoria leves, como os automóveis, táxis, e caminhonetes utilizam motores de ciclo Otto. Os veículos com motores a ciclo Diesel tendem a se enquadrar nas categorias de médios e de pesados, como os ônibus e caminhões (Teixeira, 2003).

3.2.1.1. Gás natural em motores a ciclo Otto

Motores de combustão interna, conhecidos popularmente como motor Otto, funcionam através da ignição por centelhamento, onde uma faísca inicia a combustão. O funcionamento desse motor com combustíveis líquidos ou gasosos se dá de forma análoga, de modo que a conversão ao GNV não requer modificações no motor original, embora se recomende o aumento da taxa de compressão do motor visando alcançar melhor desempenho (Teixeira, 2003).

Os motores a ciclo Otto podem apresentar a forma bi-combustível ou dedicado exclusivamente ao GNV. O motor dedicado utiliza o gás natural como sua única fonte de combustível e a vantagem de ser 'otimizado' a funcionar com gás

natural, garantindo assim a máxima eficiência e os melhores resultados de emissões (NGV, 2012). Motores bi-combustível operam em gás natural ou gasolina (ou etanol), geralmente dependem de gasolina para a ignição quando o motor é ligado, portanto, uma pequena quantidade de gasolina é sempre necessária (NGV, 2012).

A conversão dos veículos a ciclo Otto é realizada através dos “kits de conversão”. O conjunto é formado, basicamente, pelos reservatórios para armazenar o GNV, denominados de cilindros de alta pressão, redes de tubos de alta e baixa pressão, dispositivo regulador de pressão, válvula de abastecimento, válvula de cilindro, manômetro e regulador de pressão. Os kits de conversão para veículos leves estão atualmente na quinta geração, equipados com injeção eletrônica multiponto, que aumenta o desempenho do motor e, conseqüentemente, reduz as emissões (Teixeira, 2003).

O custo dos kits (cerca de U\$ 2000 para o kit da quinta geração dos veículos leves) e o preço dos veículos novos vindos de fábrica a GNV são as principais barreiras para o crescimento do mercado de GNV no sistema de transporte. No Brasil, ainda não há previsão de produção de veículos dedicados exclusivamente a GNV. Além disso, a maioria dos kits de conversão é de primeira e segunda geração, que não atende às legislações de emissões. Teme-se que, com novos limites de emissões e a obrigatoriedade dos kits da quinta geração, a frota de veículos a GNV no Brasil pode ser reduzida (Teixeira, 2003).

Em relação aos veículos pesados, o Brasil ainda é incipiente quanto à aplicação do GNV, tanto no motor Otto a GNV original de fábrica quanto em veículos originalmente dotados a motores de ciclo Diesel. Com exceção de experiências passadas (década de 80 e 90) que esbarraram na qualidade do combustível ofertado na época e na tecnologia disponibilizada nos motores (Silva, 2006), pode-se dizer que não há frota significativa de veículos pesados a GNV no Brasil.

As experiências em nível mundial com veículos pesados têm crescido na última década, ainda que discretas. A Tabela 3.2 mostra o panorama da frota de ônibus a GNV em diversos países. O Brasil possui uma frota de 95.000 ônibus, dos

quais 35.000 circulam em cidades com disponibilidade de gás natural (Petrobras, 2012).

Tabela 3.2 - Panorama mundial da frota de ônibus total e abastecido a GNV.

| País | Frota Total | Frota GNV | Correspondência (%) |
|-----------------------|--------------------|------------------|----------------------------|
| Estados Unidos | 75.800 | 9.745 | 12,9 |
| Itália | 9.800 | 2.300 | 23,5 |
| Austrália | 8.600 | 1.830 | 21,3 |
| China | 100.000 | 1.600 | 1,6 |
| França | 6.800 | 1.100 | 16,2 |
| Grécia | 1.500 | 300 | 20,0 |
| Espanha | 1.958 | 125 | 6,4 |

Fonte: Petrobras, 2012.

Os principais desafios para o desenvolvimento do mercado de veículos pesados a GNV são a necessidade de uma política estruturada para a substituição do Diesel pelo GNV em ônibus urbanos e priorização dos fabricantes para reduzir os custos e atingir os limites de emissões determinados.

3.2.1.2. Gás natural em motores a ciclo Diesel

Nos motores a ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível, sem necessidade da centelha para dar início à combustão. O GNV não tem as propriedades adequadas para ser utilizado nos motores de ciclo Diesel. A conversão desses motores é mais complexa e cara quando comparada à conversão dos veículos leves (Teixeira, 2003).

Duas rotas tecnológicas podem ser adotadas em veículos pesados equipados com motor diesel: a “Ottolização” e o sistema Diesel-gás. Na primeira rota, a transformação do ciclo Diesel em Otto é realizada com uso dos kits de conversão, que reduz a taxa de compressão, instala sistema de alimentação e ignição do GNV e elimina o sistema de alimentação de diesel. A “ottolização” possibilita a reconversão, tem baixo nível de ruído, e pode atuar no mercado de veículos usados. No entanto,

o custo é mais elevado e não há muita disponibilidade de “kits” que se enquadrem nos limites de emissões de poluentes (Teixeira, 2003).

Silva (2006) descreve o projeto piloto GASBUS e analisa o uso do GNV em ônibus urbano “ottolizado” operando em linha comercial em Porto Alegre. Os resultados econômicos foram favoráveis, com ganhos ambientais e redução da vibração e ruídos no interior do ônibus, concluiu-se que a rota tecnológica de “ottolização” é viável.

Na segunda rota, o motor funciona alimentado a GNV misturado com uma percentagem menor de óleo diesel. A adaptação também é feita através de “kits”, no entanto, não é preciso instalar sistemas de ignição, pois o diesel passa a funcionar apenas com essa função. Esse sistema é bem flexível, pois pode atuar com ambos os sistemas de alimentação, apresenta elevada eficiência, baixo nível de ruído e também pode atuar no mercado de veículos usados. Assim como os motores que sofreram “ottolização”, persistem os problemas de custo e disponibilidade de “kits”.

Um ônibus diesel/gás está em teste nas ruas do Rio desde 2011, através de uma parceria entre Governo do Estado e Companhia distribuidora de gás do Rio de Janeiro – CEG, MAN Latin America e Bosch (SETRANS, 2012). O ônibus tem capacidade de rodar com até 90% de GNV e a intenção é ter uma frota regular até 2016.

3.2.2. Regulação

Várias são as agências reguladoras e normativas que são responsáveis sobre o gás natural no Brasil. A Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) e o Ministério de Minas e Energia (MME) regem sobre a exploração, produção, comércio, transporte e, juntamente com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), a distribuição e abastecimento de GNV. As questões relativas aos cilindros, “kits” de conversão e inspeção são atribuídas ao Inmetro e à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Por fim, os veículos a GNV e

suas emissões são regidos pelo CONAMA e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA).

A primeira regulação que incentivava o uso de gás natural no Brasil teve início em 1987 com o programa brasileiro de GN, o PLANGAS (Plano de Antecipação da Produção de Gás), que tinha o objetivo de substituir total ou parcialmente o óleo diesel usado em ônibus e caminhões, após serem realizadas as primeiras experiências com uso de GNV em motores duais diesel/GNV a partir de 1982, com o início da produção de gás natural na Bacia de Campos.

O elevado preço do gás, a falta de infraestrutura de abastecimento e a deficiência de tecnologia de conversão foram os principais motivos que frearam o avanço do programa. Somente dez anos depois, através da Portaria Ministério de Infra-Estrutura (MINFRA) nº 222, foi liberado o uso do GNV para táxis e veículos de frota e em 1996 foi liberado o uso do GNV para frota.

3.2.3. Emissões

Segundo o NGV, (2001), as principais emissões que são regulamentadas mundialmente são:

- Monóxido de Carbono (CO): gás que, em altas concentrações, pode levar a asfixia;
- Material particulado (MP): todos os materiais que ficam retidos em filtros de gases; podem ser partículas de fuligem ou aerossóis líquidos que forem capturados;
- Óxidos de Nitrogênio (NO_x): são um dos constituintes do *smog* fotoquímico e tem sido o foco principal das recentes normas de emissões internacionais;
- Hidrocarbonetos (HC): reagem com o NO_x para formar o *smog*. Quando não inclui metano, são chamados NMHC;
- E ainda os gases de efeito estufa, que não são regulamentados, mas geram grande preocupação. Como o CO₂ é geralmente o gás de efeito

estufa predominante, os fatores de emissões de efeito estufa são geralmente quantificados em CO₂ equivalente (CO₂eq.).

No Brasil, o controle de emissões por veículos automotores existe desde 1986, quando o CONAMA criou o Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores (PROCONVE) através da Resolução CONAMA nº18, que além de possuir metas de reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, visava ainda promover o desenvolvimento tecnológico nacional através de incentivos e criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso. Essa legislação apresenta limites e procedimentos de testes diferenciados para veículos leves e veículos pesados.

A Resolução CONAMA nº 8/93 complementa a Resolução CONAMA nº18 e estabelece limites de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados. Define ainda prazos para implementação de quatro fases, que diminuem progressivamente esses limites (Tabela 3.3). No entanto, não estabelece limites para conversões de motores pesados do ciclo Diesel para operar como Diesel-gás, nem contempla a “Ottolização”, gerando preocupação em desenvolver essas tecnologias sem contemplar as emissões.

Tabela 3.3 - Limite máximos de emissão para motores de veículos pesados e programa correspondente na Europa

| PROCONVE | Programa Europeu Correspondente | CO (g/kWh) | HC (g/kWh) | NO (g/kWh) | Fumaça (k) (1) | Partículas (g/kWh) (1) |
|------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|----------------|------------------------|
| Fase I (1993) | - | - | - | - | 2,5 | - |
| Fase II (1994) | Euro I (1992) | 11,2 | 2,5 | 14,4 | 2,5 | - |
| Fase III (1996) | Euro II (1996) | 4,9 | 1,2 | 9 | 2,5 | 0,7/0,4(2) |
| Fase IV (2000) | Euro III (2000) | 4 | 1,1 | 7 | - | 0,15 |

(1) Aplicável somente para motores de ciclo Diesel

(2) 0,7 g/kWh, para motores até 85 kW e 0,4 g/kWh para motores com mais de 85kW.

Fonte: Brasil, 1993.

A Resolução CONAMA nº315 de 2002 dispõe sobre as novas etapas do programa de Controle de Emissões veiculares para serem atendidas nas homologações dos veículos automotores novos, nacionais e importados, leves e pesados. A etapa L-4/P-5 (2005) corresponde ao programa Euro IV e L-5/P-6 (2009) corresponde ao programa Euro V (2009), e foram definidas nessa resolução, mas a especificação do óleo diesel adequado para a fase L-5/P-6 foi publicada somente em 9/11/2007 na Resolução da ANP nº 35 de 2007, gerando atraso na homologação da mesma.

A Resolução nº 315 estabelece os limites máximos de emissão para os motores destinados a veículos automotores pesados, nacionais e importados, segundo os ciclos padrão de ensaio ESC (Ciclo Europeu em Regime Constante), ELR (Ciclo Europeu de Resposta em Carga) e ETC (Ciclo Europeu em Regime Transiente). Os limites e os prazos de implantação são definidos a partir dos equipamentos que equipam os motores, como equipamentos de injeção eletrônica de combustível, recirculação de gases de escapamento (EGR) e/ou catalisadores de oxidação deverão atender aos limites de emissão (ensaios ESC e ELR – Tabela 3.4) e ainda os motores equipados com sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento ou motores à gás natural (ensaio ETC - Tabela 3.5), embora ainda reste ao IBAMA confirmar os limites de emissão para os motores a gás natural.

Tabela 3.4 - Valores limites - ensaios ESC e ELR.

| PROCONVE | Programa europeu Correspondente | CO (g/kWh) | HC totais (g/kWh) | NOX (g/kWh) | MP (g/kWh) | Opacidade (ELR) (m ⁻¹) |
|------------------------------|---------------------------------|------------|-------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------------|
| P5 - ESC e ELR (2006) | Euro IV (2006) | 2,1 | 0,7 | 5,0 | 0,10 ou 0,13 ⁽¹⁾ | 0,8 |
| P6 - ESC e ELR (2009) | - | 1,5 | 0,5 | 3,5 | 0,02 | 0,5 |

(1) Para motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3000 min⁻¹.

Fonte: Brasil, 2002.

Tabela 3.5 - Valores limites - ensaios ETC (1).

| PROCONVE | Programa europeu Correspondente | CO (g/kWh) | HC não metano (g/kWh) | Metano (g/kWh) ⁽²⁾ | NOX (g/kWh) | MP (g/kWh) ⁽³⁾ |
|-----------------|---------------------------------|------------|-----------------------|-------------------------------|-------------|-----------------------------|
| P5 - ETC (2006) | - | 5,45 | 0,78 | 1,6 | 5 | 0,16 ou 0,21 ⁽⁴⁾ |
| P6 - ETC (2009) | Euro V | 4,0 | 0,55 | 1,1 | 3,5 | 0,03 |

(1) Para motores a gás natural, as condições de ensaio, segundo o ciclo ETC, e os valores limites estabelecidos deverão ser confirmados pelo IBAMA até 31 de dezembro de 2004; (2) Apenas para motores a gás natural; (3) Não é aplicável a motores alimentados a gás natural; (4) Para motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3000 min⁻¹.

Fonte: Brasil, 2002.

3.3. Metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma importante ferramenta utilizada para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto. A ACV é definida como uma compilação e avaliação de entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2009a). O termo “ciclo de vida” refere-se aos estágios de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima até a disposição final, conforme mostrado na Figura 3.2 (EPA, 2006).

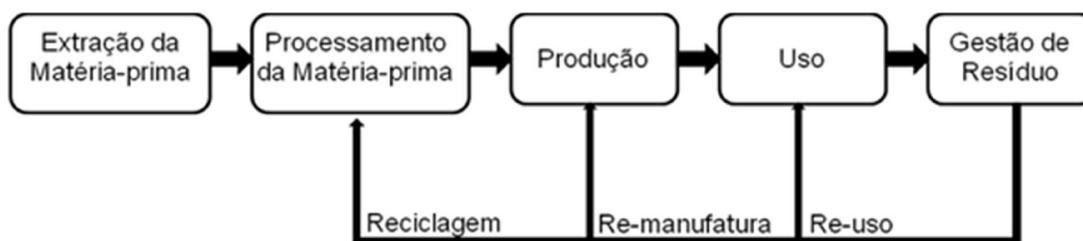


Figura 3.2 - Estágios do ciclo de vida de um produto ou serviço:

Fonte: EPA, 2006.

A ACV tem uma grande variedade de aplicações, como tomada de decisão, melhorias ou alternativas para produto e processo, identificação de etapas do ciclo de vida que têm maior impacto ambiental, indicadores ambientais, subsídio às estratégias de *marketing*, entre outras (Chehebe, 2002).

A ISO 14040 estabelece que a ACV deva incluir a definição do objetivo e do escopo do trabalho, uma análise do inventário, uma avaliação de impacto e a interpretação dos resultados. É importante ressaltar o caráter iterativo dessas etapas, que podem ser revistas ao longo do estudo sempre que necessário.

3.3.1. Definição dos objetivos e escopo

A primeira fase da ACV consiste na definição dos objetivos e do escopo, e deve apresentar claramente a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo e o público alvo. Além da razão principal para a condução do estudo, sua abrangência e limites, a unidade funcional (UF), a metodologia e os procedimentos necessários para a garantia da qualidade do estudo são definidos nessa etapa (Chehebe, 2002).

A UF é a medida do desempenho da saída funcional de um sistema de produto e deve descrever apropriadamente a função do produto ou processo. A UF é uma referência para a coleta dos dados do inventário, de forma a assegurar que esses dados sejam comparados sob as mesmas bases.

3.3.2. Análise do Inventário

A segunda fase da ACV é a Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que consiste na coleta e quantificação dos fluxos mássicos e energéticos das entradas e saídas do sistema de um produto. Esses dados são compilados e as cargas ambientais dos sistemas são calculadas e relacionadas à unidade funcional (Coltro, 2007b).

Os procedimentos necessários para a confecção do inventário do ciclo de vida estão ilustrados na Figura 3.3.

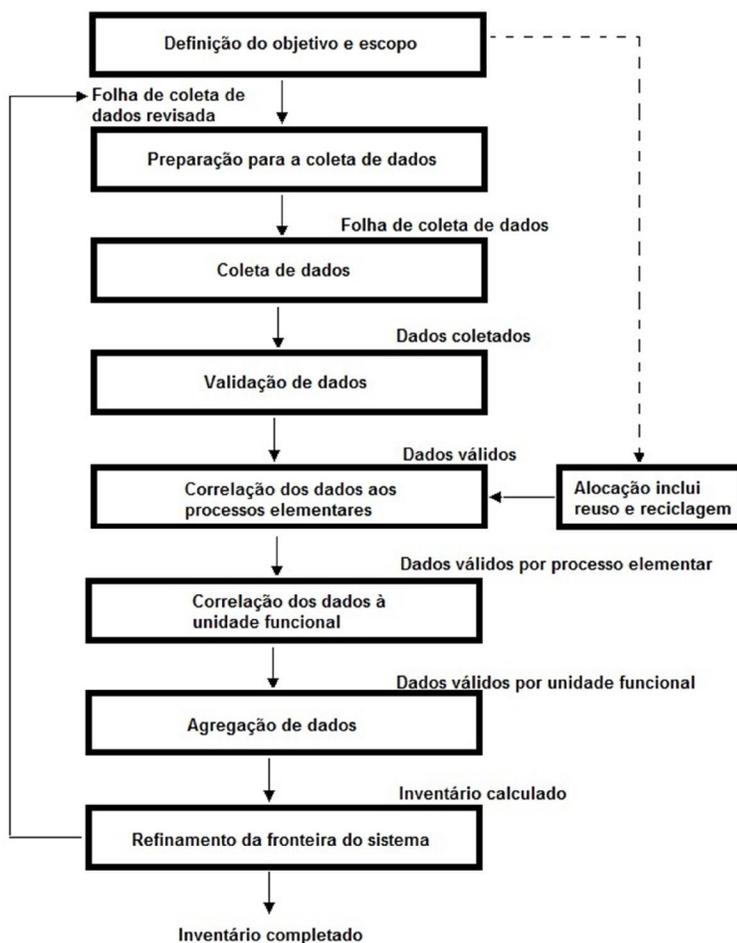


Figura 3.3 - Procedimentos simplificados para análise de inventário

(Fonte: ABNT, 2009)

3.3.3. Avaliação do Impacto Ambiental

A terceira etapa trata-se da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), na qual os dados levantados no ICV resultam em potenciais impactos ambientais e à saúde humana. A avaliação de impacto não fornece os impactos reais, devido a limitações do próprio sistema e também dos dados do inventário (ABNT, 2009b).

A AICV pode ser subdividida em três fases: classificação, caracterização e atribuição de pesos. Na classificação, os dados do inventário são classificados e agrupados nas categorias de impacto (aquecimento global, exaustão de recursos

naturais, saúde humana, etc.) definidas no objetivo e escopo do estudo. Na caracterização, os dados são modelados visando obter um indicador numérico. Vários modelos existentes utilizam diferentes fatores científicos, chamados fatores de caracterização. Por fim, pesos podem ser atribuídos aos resultados da avaliação de impacto. Trata-se de uma etapa muito discutida. Como a ponderação é um processo baseado em valores e pode envolver critérios subjetivos, essa etapa é considerada por grande parte dos especialistas como não-científica, altamente subjetiva e sujeita a distorções de caráter político-ideológico (Chehebe, 2002).

3.3.4. Principais categorias de impacto utilizadas na ACV de combustíveis

3.3.4.1. Aquecimento Global

A atmosfera da Terra absorve parte da energia emitida na forma de radiação infravermelha da Terra para o espaço, e é assim aquecida. Esse efeito estufa natural tem sido aumentado ao longo dos últimos séculos pelas atividades humanas que levam ao acúmulo de compostos tais como CO₂, N₂O, CH₄ e hidrocarbonetos halogenados na atmosfera. As consequências do aquecimento global causado pelo homem podem incluir o aumento da temperatura média global e as mudanças climáticas regionais repentinas. O aquecimento global é um impacto que afeta o meio ambiente em escala global e a contribuição humana mais importante para esse impacto é atribuída ao uso de combustíveis fósseis, como o carvão, petróleo e gás natural (Wenzel et al., 1997).

O cálculo do potencial de aquecimento global é realizado, decidindo a escala de tempo, encontrando o fator de equivalência da substância para a escala de tempo escolhido e por fim, calculando o potencial de aquecimento global, multiplicando a magnitude da emissão, com o fator de equivalência encontrado. O resultado do indicador é expresso em quantidade de dióxido de carbono equivalente (CO₂-Eqv.) (Wenzel et al., 1997).

3.3.4.2. Acidificação

Quando ácidos e compostos que podem ser convertidos a ácidos são emitidos para a atmosfera e depositados em água e do solo, a adição de íons de hidrogênio pode resultar num aumento da acidez, com efeito tanto sobre a fauna quanto sobre a flora. (Wenzel et al., 1997).

Fontes artificiais mais significativas na acidificação são os processos de combustão em produção de calor e energia elétrica e de transporte. A contribuição para a acidificação é maior quando os combustíveis utilizados contêm enxofre. A acidificação é um impacto que afeta, principalmente, o meio ambiente em escala regional.

Atualmente, os fatores típicos de caracterização para a acidificação são baseadas no potencial de substâncias para liberar íons de hidrogênio e expressos como o equivalente das emissões de enxofre (SO₂) (Wenzel et al., 1997). No entanto, a unidade m² de área de ecossistema afetada tem sido utilizada, pois leva em consideração fatores, como dispersão e disposição, que relacionam as emissões com o impacto no ecossistema (Hauschild e Potting, 2005).

3.3.4.3. Eutrofização Terrestre

A eutrofização é um impacto sobre os ecossistemas causada pelo enriquecimento de nutrientes, a partir de substâncias que contêm nitrogênio (N) e fósforo (P). A disponibilidade de um destes nutrientes será um fator limitante para o crescimento de algas ou plantas, que pode não ser benéfico, pois pode, por exemplo, acarretar na diminuição do teor de oxigênio. Emissões de nitrogênio para o ambiente são causados especialmente pelo uso agrícola de fertilizantes, mas óxidos de nitrogênio provenientes de processos de combustão também são de fundamental importância. Esta categoria é expressa em m² (Wenzel et al., 1997).

3.3.5. Interpretação dos Resultados

A última fase é a interpretação dos resultados, onde devem ser identificadas as questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV; realizar uma avaliação do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência e ainda, conclusões, limitações e recomendações (ABNT, 2009b).

3.4. Estudos de ACV sobre uso do gás natural em veículos pesados

Vários estudos que comparam o gás natural com outros combustíveis em veículos pesados têm sido publicados, principalmente em países europeus. (Ally e Pryor, 2007; Burnham et al., 2012; Kliucininkas et al., 2012; López et al., 2009). A base para estas comparações, a escolha de veículos e até mesmo os resultados podem variar significativamente.

Ally e Pryor (2007) publicaram um estudo realizado na Austrália, onde exploram a tecnologia de célula combustível de hidrogênio como uma alternativa ao diesel e ao gás natural existente na infraestrutura de transporte público. O limite desse sistema inclui a infra-estrutura de combustível, e adota como critério de corte processos que contribuam em mais de 1% do impacto. A unidade funcional foi definida como 1 kWh entregue ao cliente. As categorias de impacto avaliadas foram: potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização e potencial de criação ozônio-fotoquímico. Os resultados mostram que essa tecnologia é competitiva com ônibus movidos a diesel e gás natural em termos de potencial de aquecimento global e eutrofização, no entanto as emissões que contribuem para a acidificação e o ozônio fotoquímico são maiores para os ônibus de célula de combustível. O estudo mostra ainda uma análise de cenários que sugere melhoramentos que podem ser realizados no desenvolvimento dessa tecnologia.

Burnham et al. (2012) examinam o estado atual do conhecimento sobre as principais fontes de emissão de gás de xisto, GN convencional, carvão e petróleo

para estimar emissões de gases do efeito estufa (GEE) no seu ciclo de vida. O limite do sistema abrange o estabelecimento de infraestrutura, incluindo a perfuração de poço de gás. As unidades funcionais utilizadas foram: MJ de combustível queimado, kWh de eletricidade produzida, e quilômetro percorrido, para os serviços de transporte. Relatórios da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos forneceram os dados para o inventário do ciclo de vida e o modelo GREET (*Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation*) foi utilizado na simulação das emissões. Os resultados mostraram que as emissões do ciclo de vida do gás de xisto são 6, 23 e 33% menores que o gás natural convencional, gasolina e carvão, respectivamente. Além disso, o estudo fornece uma discussão sobre quais seriam as etapas críticas da indústria do gás natural, que podem auxiliar no seu desenvolvimento e diminuir as emissões de GEE.

O artigo publicado por Kliucininkas et al. (2012) compara ônibus abastecidos a diesel, gás natural comprimido, biogás comprimido e trólebus (ônibus elétricos) movidos a eletricidade produzida a partir de qualquer gás natural ou óleo combustível pesado, na Lituânia. Os limites do sistema vão da extração à queima dos combustíveis, mas não incorpora os processos relacionados à produção, manutenção e eliminação dos ônibus e trólebus, nem processos ligados à construção de estradas e infraestrutura. A ACV foi dividida em fases: da fonte a bomba, nomeada de WTP (“well-to-pump”), que corresponde à exploração de recursos até a entrega do combustível utilizável para o tanque do veículo, bomba a roda, nomeada de PTW (“pump-to-wheels”) que corresponde a utilização do combustível nos veículos e a fase completa, que combina as etapas anteriores, fonte a roda nomeada de WTW (“well-to-wheels”). A unidade funcional utilizada foi 1 km de viagem de um ônibus ou trólebus em condições urbanas. Foram utilizados o modelo de cálculo COPERT 4 (Laboratório de Termodinâmica Aplicada, Universidade Aristotélica de Thessaloniki, Grécia) para estimar as emissões dos ônibus e trólebus e o método ReCiPe na avaliação dos impactos, que abrange as categorias saúde humana, ecossistemas e recursos. Os resultados do estudo indicam que os impactos do gás natural e do diesel são semelhantes e os mais elevados e sugerem o ônibus movido a biogás e trólebus elétricos como as melhores alternativas para usar na modernização da frota de transporte público na cidade de Kaunas, Lituânia.

López et al., 2009 mostram os resultados dos testes feitos na cidade de Madri, Espanha, em três veículos de coleta de lixo no que diz respeito ao seu consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa. Cada um dos três veículos foi abastecido com um combustível diferente: diesel, biodiesel e gás natural. A mesma divisão das fases WTP, PTW e WTW utilizada por Kliucininkas et al (2012) foi utilizada nesse estudo. As unidades funcionais utilizadas foram MJ/MJcomb (energia requerida) e g ou L/Km rodado. O estudo mostra que os veículos de coleta de lixo a GNV são aqueles que emitem as mais baixas emissões de CO₂ durante todo o ciclo de vida (WTW), o que significa que o seu potencial de aquecimento global é o menor entre os três combustíveis analisados.

O artigo publicado recentemente por Rose et al. (2013) realiza uma análise do ciclo de vida de um caminhão de coleta de lixo alimentado a GNV e compara-o com um caminhão a diesel. O estudo foi feito na cidade de Surrey, em British Columbia, Canada e abrange todas as etapas do ciclo de vida (“berço ao túmulo”), sendo divididas em ciclo do veículo, ciclo do combustível e fase de uso, para melhores interpretações. As unidades funcionais usadas para descrever os resultados são: energia usada (MJ por km de viagem), gases de efeito estufa emitidos (em g CO₂-equivalente por km) e as emissões de gases gerados (g por km). A ferramenta canadense de modelagem GHGenius para transporte de combustíveis e tecnologias de veículos desenvolvidos e mantidos pela área de Recursos Naturais do Canadá (Delucchi, 1998) foi utilizada e é baseada em dados reais de coleta. O modelo é compatível com ISO 14040 e 14044 e tem disponível um abrangente banco de dados canadense, incluindo todas as etapas do ciclo de vida, que geram dados de saída do modelo de simulações muito detalhados. As categorias de impacto avaliadas foram a destruição do ozônio, acidificação, eutrofização, saúde humana e o uso da terra. Esse estudo mostrou que não há ganho líquido na utilização de energia quando o diesel é substituído por GNV no caminhão de coleta. No entanto, há reduções significativas (cerca de 24% de CO₂-equivalente) em gases de efeito estufa. Além disso, as estimativas de custo de combustível revelam que consideráveis economias podem ser alcançadas na mudança dos veículos para GNV.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em duas etapas: a primeira corresponde à obtenção dos dados de emissões de gases de combustão da queima do GNV no caminhão de coleta de lixo, que foi monitorado em condições reais de trânsito urbano, trânsito estrada e também com o veículo parado, variando a rotação; a segunda corresponde à avaliação do impacto ambiental do uso do GNV, aplicando a metodologia da ACV.

4.1. Obtenção dos dados de emissão

4.1.1. Especificações do veículo de coleta de lixo

O caminhão cedido pela IVECO ao projeto é do modelo Tector (Figura 4.1), e possui motor dedicado a GNV (ciclo Otto) de 6 cilindros, sendo 2 válvulas por cilindro, com gerenciamento eletrônico, comando de válvula no cabeçote e injeção eletrônica. O motor de 5,88L possui potência máxima de 147 kW em 2500 rpm e torque máximo de 650 N.m a 1200 rpm.



Figura 4.1 - Vista lateral do caminhão de coleta de lixo utilizado na medição dos gases emitidos

Fonte: O autor (2013)

O caminhão é equipado com 6 cilindros de GNV de 20m³ cada, num total de 120m³, sendo três cilindros dispostos em cada lado. Sua capacidade de carga é de 7,5 a 8,0 toneladas de lixo.

O veículo conta com um catalisador de três vias para tratamento dos gases da pós-combustão, que pode reduzir eficazmente os três compostos nocivos do gás de escape: CO, C_xH_y e NO_x. Os dois primeiros são oxidados e geram CO₂ e CO₂ e H₂O, respectivamente; enquanto o terceiro é reduzido a N₂.

4.1.2. Especificações dos combustíveis utilizados

O gás natural utilizado no abastecimento do caminhão foi fornecido pela Sulgás e foi importado da Bolívia através do Gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol). Com 3.150 km de comprimento total, o gasoduto chega ao Brasil pelo Mato Grosso e vai até a cidade de Canoas, no Rio Grande do Sul (Sulgás, 2013).

A composição média do GNV foi calculada a partir de dados diários durante o ano de 2012 fornecidos pela Sulgás e são mostrados na Tabela 4.1. Além da quantidade de hidrocarbonetos, também são monitoradas as concentrações de nitrogênio (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S).

Tabela 4.1- Composição dos gases utilizados no caminhão.

| | GNV | Biogás |
|---------------------------------------|--------------|--------------|
| CH ₄ (%) | 89,2 | 94 |
| C ₂ H ₆ (%) | 5,91 | ^a |
| C ₃ H ₈ (%) | 1,81 | ^a |
| C ₄ H ₁₀ (%) | 0,97 | ^a |
| CO ₂ (%) | 1,39 | 0,2 |
| N ₂ (%) | 0,71 | 4,2 |
| O ₂ (%) | ^a | 1,6 |
| H ₂ S (mg/m ³) | 2,7 | <1 |

^a não detectado

Alternativamente ao GNV, o biogás também foi utilizado no mesmo veículo, na cidade de Montenegro (RS), onde é produzido. O biogás é produzido na usina de compostagem, através da biodigestão de dejetos de aves poedeiras na planta piloto das empresas ECOCITRUS – NATUROVOS em parceria com a Sulgás, que

forneceu o combustível para testes e os dados de composição do mesmo, mostrados na Tabela 4.1.

4.1.3. Cenários de testes e monitoramento por satélite

O caminhão esteve em serviço na empresa Revita (credenciada pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre - DMLU) durante o monitoramento. Os resíduos sólidos domiciliares são coletados porta-a-porta nas vias públicas, com caminhões equipados com compactadores, transferidos para Estação de Transbordo Lomba do Pinheiro (ETLP), Bairro Lomba do Pinheiro, na zona leste da cidade, de onde posteriormente são transportadas por carreta rodoviária até um aterro sanitário situado no município de Minas do Leão (Prefeitura de Porto Alegre, 2013).

Os testes em campo foram realizados em quatro diferentes situações. Foram duas situações durante a coleta do lixo, em rotas definidas pela empresa Revita na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, executadas em dois turnos, de segunda a sábado. A Figura 4.2a mostra a rota ID03 na região norte da cidade e a Figura 4.2b mostra a rota PD01 na região leste. As outras duas situações referem-se ao deslocamento do caminhão a partir de um ponto da região de coleta até a estação de transbordo, sendo a ida até a estação com o caminhão com a máxima capacidade de carga e a volta até a rota de coleta apenas com a carga da tara do caminhão.

A Revita permitiu acesso ao sistema de monitoramento por satélite (GPS - GIS EYES), que fornece dados em tempo real de posicionamento, velocidade e horário do veículo; também é possível acessar os relatórios estatísticos de datas anteriores. Esses dados foram utilizados para estimar a distância percorrida durante as análises, bem como observar se o caminhão estava em coleta ou no trecho de transbordo.

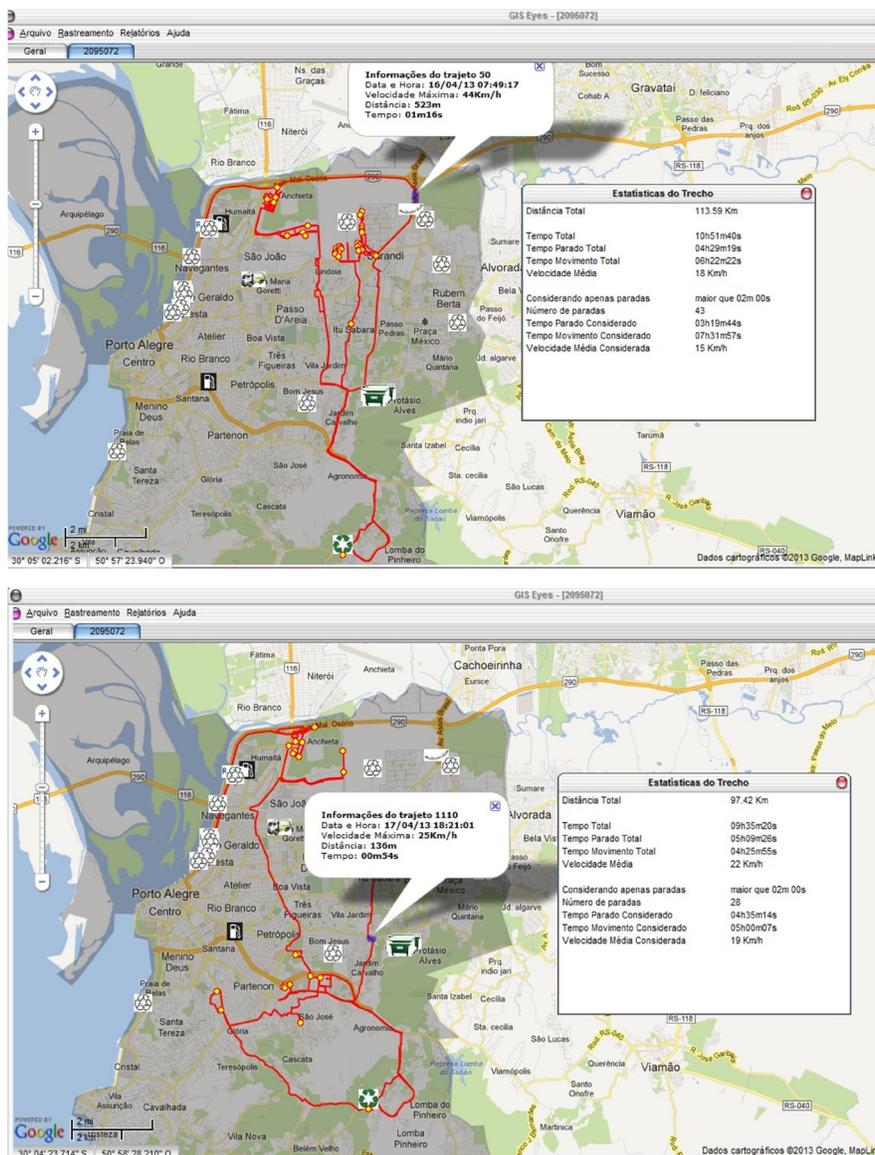


Figura 4.2 - Rotas de coleta de lixo percorrida pelo caminhão do projeto na cidade de Porto Alegre. 4.2a) Rota ID03 4.3b) Rota PD01

Fonte: Costa, 2013.

4.1.4. Registros operacionais

Visando a obtenção de dados como: distância percorrida pelo caminhão, quantidade de lixo recolhido, tempo da coleta, entre outros, uma planilha de controle do monitoramento do veículo (Figura 4.3) foi desenvolvida e preenchida diariamente por um integrante do grupo de pesquisa e recolhida juntamente com os dados do analisador de gases.

| PLANILHA DE CONTROLE DE MONITORAMENTO DE VEÍCULO GNV | | | | | | n.º: | | | |
|--|--|----------------|-----|-----------------------|-------|-------|------------|----------|--|
| ANALISADOR DE GASES | | | | | | | | | |
| RESPONSÁVEL: | | | | DATA: | | | | | |
| CÉLULAS USADAS: | | | | | | | | | |
| INÍCIO LEITURA: | | | | FIM LEITURA: | | | | | |
| NOME ARQUIVO: | | | | TEMPO MEDIÇÃO: | | | | | |
| CAMINHÃO IVECO | | | | | | | | | |
| MOTORISTA: | | | | | | | | | |
| ABASTECIMENTO: | | m ³ | | Início: | | Fim: | | Duração: | |
| ROTA: | | | | INÍCIO: | | FIM: | | | |
| KM início: | | KM fim: | | DISTÂNCIA PERCORRIDA: | | | | | |
| CARGA início: | | | | CARGA fim: | | | | | |
| COMPACTAÇÕES: | | Início | Fim | Duração | Carga | Local | Observação | | |
| 1a | | | | | | | | | |
| 2a | | | | | | | | | |
| 3a | | | | | | | | | |
| 4a | | | | | | | | | |

Figura 4.3 - Planilha controle a ser preenchida pelos motoristas do caminhão para obtenção de dados

Fonte: Costa, 2013.

4.1.5. Analisador de gases

As concentrações de O₂, CO, CO₂, NO_x, SO₂ e C_xH_y no escapamento do caminhão foram medidas utilizando um analisador de gases Testo, modelo 350 (Figura 4.4a). A unidade de controle é um instrumento de medição portátil para medições *in situ*. Está equipado com uma unidade de sonda de pressão diferencial integrada, que mede temperatura, velocidade, pressão e diferença de potencial elétrico. Os dados podem ser acompanhados em tempo real na unidade de controle ou armazenados.

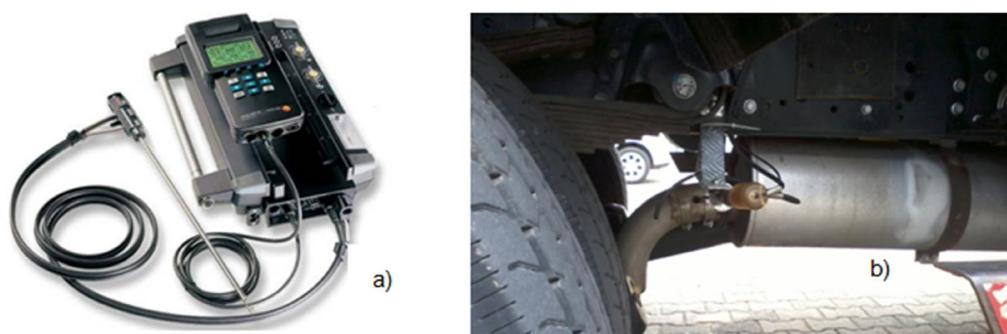


Figura 4.4 - Analisador de gases utilizado na obtenção dos dados de emissão. 4.4a) Instrumento isolado e 4.4b) Sonda instalada no escapamento

Fonte: Costa, 2013.

A sonda foi instalada no escapamento do caminhão (Figura 4.4b) e a unidade de controle armazenada em uma caixa instalada especialmente na carroceria. As faixas de medição e resolução do analisador são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Faixa de medição e resolução dos parâmetros medidos do analisador Testo 350

| Parâmetro de medição | Faixa de Medição | Resolução |
|----------------------|--------------------------------|---|
| O ₂ | 0...25vol.% | 0,01vol.% |
| CO | 0...10000ppm | 1ppm |
| NO | 0...4000ppm | 1ppm |
| NO ₂ | 0...500ppm | 0,1ppm |
| SO ₂ | 0...5000ppm | 1ppm |
| CO ₂ | 0...50vol.% | 0,01Vol.%(0...25Vol.%) 0,1Vol.%(> 25Vol.%) |
| HC | Gás Natural: 100...40000ppm | 10ppm |
| | Propano: 100...21000ppm | 10ppm |
| | Butano: 100...18000ppm | 10ppm |

Fonte: Manual de Instruções Testo, 2012

A Figura 4.5 mostra o diagrama esquemático do funcionamento do analisador. Os gases de combustão resfriados e filtrados são bombeados e misturados em uma câmara com ar limpo para diluição para então passarem nos sensores.

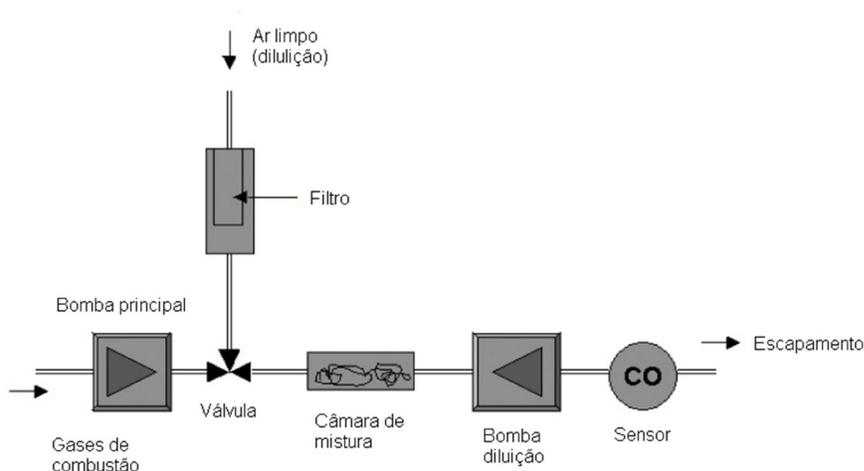


Figura 4.5 - Diagrama esquemático do funcionamento do analisador de gases

Fonte: Manual de Instruções Testo, 2012

Uma variedade de princípios de medição é utilizada para determinar a concentração de gases diferentes numa mistura gasosa no analisador de gases.

Os sensores utilizados na determinação de O_2 , CO , SO_2 e NO_x trabalham de acordo com o princípio de potenciometria eletroquímica seletiva de íons. Os sensores são preenchidos com uma solução eletrolítica aquosa, onde dois ou três eletrodos são colocados na solução com um campo elétrico aplicado a eles. A corrente gerada é convertida em medida de concentração (Practical Guide for Emission and Process Measurements, 2013).

O sensor de CO_2 utiliza um sensor fotométrico, onde o gás absorve radiação infravermelha (IV) do espectro eletromagnético, no comprimento de onda que é específico para o gás. O aumento da concentração de gás provoca um aumento correspondente na absorção de infravermelho e, assim, uma diminuição na intensidade da radiação recebida pelo detector de IV (Practical Guide for Emission and Process Measurements, 2013).

Já o funcionamento da célula de hidrocarbonetos é baseado no método de filamento catalítico. O gás reage com um material catalítico pré-aquecido e o aumento de temperatura, através do seu calor de combustão, resulta numa alteração da sua condutividade elétrica. Este processo funciona apenas com oxigênio suficiente disponível nos gases de combustão. Quando o teor de O₂ atinge níveis inferiores a 3%, a célula desliga automaticamente (Practical Guide for Emission and Process Measurements, 2013).

Nos testes em campo, esse limite foi atingido várias vezes e não foi possível obter os teores de hidrocarbonetos. Para que fosse possível obter as concentrações de hidrocarbonetos (assumidos como metano) a partir do monitoramento das emissões dos demais componentes dos gases exaustos, foram realizados ensaios com o caminhão parado e com o sensor posicionado no final do escapamento, onde há uma desconhecida diluição com o ar, mas que permite a leitura dos teores de metano. Foi observada que a relação entre as emissões de O₂ e C_xH_y se mostraram inversamente proporcionais. Dessa forma, as quantidades relativas de C_xH_y para todas as medidas foram estimadas a partir da relação com O₂ através de regressão linear, de onde obteve-se a Equação 4.1 mostrada a seguir:

$$\%CH_4 = -0,499\ln(\%O_2) + 1,5442 \quad (R^2 = 0,9518) \quad (4.1)$$

Já os teores de SO₂ não foram monitorados nas análises, pois o analisador não tem compartimento para todas as células simultaneamente. Dessa forma, as quantidades relativas de SO₂ para todas as medidas foram estimadas a partir da relação com O₂, da mesma forma que os hidrocarbonetos, através de regressão linear em três faixas distintas de O₂, conforme a Tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Equações obtidas para estimativa dos teores de SO₂ a partir do teor de O₂.

| Condição | Equação | Coefficiente de correlação |
|----------------------------|---|----------------------------|
| O ₂ <3,78 | %SO ₂ = -0,0121(%O ₂) + 0,0559 | R ² = 0,95 |
| 3,78 <O ₂ <9,56 | %SO ₂ = -0,0011(%O ₂) + 0,0128 | R ² = 1 |
| O ₂ >9,56 | %SO ₂ = -0,0002(%O ₂) + 0,0035 | R ² = 0,998 |

4.1.6. Sistema de aquisição de dados (*Datalogger*)

Um aquisitor de dados da marca Fuel Tech® modelo Pro24 foi instalado para obtenção de dados do sistema eletrônico de controle do motor. O FuelTech Pro24 *Datalogger* efetua a leitura e o armazenamento de dados de qualquer sensor analógico com sinal de saída na faixa de 0 a 5V, além da leitura de sinais de frequência, possibilitando uma análise detalhada do funcionamento do motor e informações externas do veículo. Este equipamento possui quatro canais para captura de sinais de rotação e 16 canais analógicos, configuráveis, além de um canal interno que informa a tensão da bateria e possui conexão USB que possibilita fácil ligação em qualquer notebook ou computador (Manual de Instalação e Operação Fueltech, 2012).

A temperatura do ar e rotação do motor foram os parâmetros utilizados no cálculo das emissões. Os dados foram consultados e extraídos através do software FuelTech Datalogger 3.58.

Os dados obtidos no analisador de gases foram correlacionados com os dados da planilha controle, do sistema GPS e do aquisitor de dados a fim de gerar todas as informações necessárias na construção do inventário das emissões gasosas.

4.2. Considerações Gerais para Avaliação do Impacto Ambiental

4.2.1. Definição de objetivo e escopo do estudo

O objetivo desse estudo é avaliar o impacto das emissões gasosas do caminhão abastecido a GNV e biogás, aplicando um método de avaliação de impactos ambientais usualmente empregado em ACV e utilizando a série de normas ISO14040-14044. Em um trabalho futuro, esse inventário poderá ser utilizado em uma ACV completa desses combustíveis.

A fronteira do sistema envolve a utilização do combustível no veículo de coleta de lixo e representa a fase de uso do combustível conhecida como tanque-a-roda.

Os públicos-alvo do estudo são pesquisadores e consultores que busquem informações sobre o uso de gás em veículos pesados. A principal razão para a realização do estudo é devido ao pequeno número de estudos que monitorem as emissões em condições reais de trânsito no país.

4.2.1.1. Função e Unidade funcional

Como este estudo tem por objetivo avaliar o impacto das emissões gasosas somente na fase de uso do gás no veículo de coleta de lixo, tanto a função como a unidade funcional não serão aqui definidas.

4.2.1.2. Fluxo de referência

A base de cálculo necessita ser utilizada para remeter todos os aspectos finais encontrados. O valor escolhido foi de 1 km percorrido pelo caminhão, por ser o valor do fluxo de referência mais utilizado nos principais trabalhos previamente analisados. A quantidade de lixo coletada não pode ser utilizada como fluxo de referência, pois não foi possível relacionar a quantidade de lixo com a respectiva análise de gases, visto que a análise era realizada em pequenos intervalos de tempo e os dados de quantidade de lixo eram diários. O fluxo de referência também não pode ser definido em função de energia requerida por falta de dados coletados, como consumo de combustível, por exemplo.

4.2.2. Análise do Inventário

4.2.2.1. Balanço de massa da queima do biogás e gás natural

Tanto o resultado das concentrações relativas dos gases exaustos medidos no analisador, quanto os dados de rotação e temperatura obtidos no *datalogger* foram coletados a cada segundo. Como essas concentrações apresentaram

variações consideráveis em rotas de coleta, decidiu-se aplicar balanços de massa para obter, a cada segundo, as quantidades absolutas de gases emitidos pelo caminhão em uso. Depois se integrou os valores obtidos para levantar as quantidades absolutas emitidas em cada rota, para posterior análise de impacto.

As considerações e equações no cálculo são descritas em seis passos para melhor entendimento, a seguir.

1º Passo: Por se tratar de um motor quatro tempos, cada ciclo corresponde a duas rotações. Considerando a rotação obtida no aquisitor de dados; calculou-se a vazão de volume admitido por segundo, utilizando a Equação 4.1.

$$V_a = \frac{\text{Rotação}}{2} \times V_m \times \frac{1\text{min}}{60\text{s}} \quad (4.1)$$

onde V_a é o volume admitido em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Rotação é a rotação do motor em rpm, V_m corresponde ao volume do motor ($5,88 \times 10^{-3} \text{m}^3$) e o terceiro termo corresponde a conversão de minutos a segundos.

2º Passo: A vazão molar de mistura injetada foi calculada utilizando a equação de estado para gases ideais (Equação 4.2), considerando a pressão como a de injeção fornecida pela IVECO ($9,12 \times 10^5 \text{Pa}$) e temperatura obtida no aquisitor de dados;

$$\dot{n}t = \frac{PV_a}{RT} \quad (4.2)$$

onde $\dot{n}t$ é a vazão molar de mistura injetada em mol/s, P é a pressão de injeção (Pa), V_a é o volume admitido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), R é a constante universal dos gases ($8,31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e T é a temperatura da mistura na injeção em K.

As vazões molares de GNV e ar são calculadas conforme as Equações 4.3 e 4.4, levando em consideração a relação de 1 mol GNV para 17 de ar (fornecida pela IVECO);

$$\dot{n}_{GNV} = \dot{n}t \times 0,055 \quad (4.3)$$

onde \dot{n}_{GNV} é vazão molar de GNV em mols.s^{-1} , $\dot{n}t$ é a vazão molar da mistura em mols.s^{-1} e o termo 0,055 (mol GNV. mol^{-1}) corresponde a fração de GNV na mistura.

$$\dot{n}_{AR} = \dot{n}t \times 0,945 \quad (4.4)$$

onde \dot{n}_{AR} é vazão molar de ar em mols.s^{-1} , $\dot{n}t$ é a vazão molar da mistura em mols.s^{-1} e o termo 0,945 (mol ar. mol^{-1}) corresponde a fração de ar na mistura.

3º Passo: O balanço de massa foi feito em função do Nitrogênio, considerando que a fração desse gás que reage é desprezível. Portanto a vazão molar de Nitrogênio que entra no motor é igual na saída e foi calculada conforme Equação 4.5.

$$\dot{n}_{N_2} = (\dot{n}_{GNV} \times 0,0071) + (\dot{n}_{AR} \times 0,79) \quad (4.5)$$

onde \dot{n}_{N_2} é a vazão molar de N_2 (mols.s^{-1}), \dot{n}_{GNV} é vazão molar de GNV (mols.s^{-1}), 0,0071 é fração de N_2 no GNV, \dot{n}_{AR} é a vazão molar de ar em mols.s^{-1} e 0,79 é a fração de N_2 no ar.

4º Passo: Na saída, a composição de N_2 foi determinada por diferença (Equação 4.6):

$$\%N_2 = 100 - (\%O_2 + \%CO_2 + \%CO + \%C_xH_y + \%NO_x + \%SO_2) \quad (4.6)$$

onde $\%N_2$ corresponde ao percentual de N_2 na saída, $\%O_2$, $\%CO_2$, $\%CO$, $\%C_xH_y$, $\%NO_x$ e $\%SO_2$ são os percentuais de O_2 , CO_2 , CO , C_xH_y , NO_x e SO_2 , respectivamente.

5º Passo: a vazão molar da saída foi, por fim, calculada conforme Equação 4.7, em função do N₂:

$$\dot{n}_s = \left(\frac{\dot{n}_{N_2} \times 100}{\% N_2} \right) \quad (4.7)$$

onde \dot{n}_s corresponde a vazão molar da saída (mols.s⁻¹), \dot{n}_{N_2} é a vazão molar de N₂ (mols.s⁻¹) e %N₂ corresponde ao percentual de N₂ na saída.

6º Passo: As quantidades de cada espécie produzida foram calculadas utilizando a composição da saída conforme Equação 4.8.

$$\dot{m}_{poluente} = \dot{n}_s \times \%_{poluente} \times MM_{poluente} \quad (4.8)$$

onde $\dot{m}_{poluente}$ é vazão mássica do poluente na saída (g.s⁻¹), \dot{n}_s é a vazão molar da saída (mol.s⁻¹), %_{poluente} é o percentual do poluente na saída e MM_{poluente} é a massa molar do poluente (g.mol⁻¹).

4.2.2.2. Construção do Inventário

O resultado do balanço de massa da queima deu origem aos valores de emissões gasosas. Além das emissões e a distância correspondente, foi anotado o perfil do trecho observado no GPS, que indica se o caminhão estava em coleta ou em transbordo (cheio ou vazio), além da distância percorrida no período.

A partir da observação do perfil das análises, essas foram agrupadas e separadas. Todas as análises de mesmo perfil tiveram seus valores de emissão e distância somadas, dando origem a quatro perfis: transbordo cheio (TB Cheio), transbordo vazio (TB Vazio), coleta na rota ID03 (ID03) e coleta na rota PD01 (PD01). Para os trechos em transbordo, o inventário foi construído a partir do balanço de uma análise de trinta minutos cada; enquanto que para a rota ID03 foram

realizadas cinco análises, totalizando cento e setenta minutos de medição e para a rota PD01 esse total foi de três análises, totalizando sessenta minutos de medição.

Um segundo inventário foi construído com as emissões referentes ao caminhão abastecido com GNV e biogás em autoestrada, com o intuito de comparar emissões para diferentes combustíveis. A esses dados, foram adicionados os valores das emissões estimadas para um caminhão da base de dados ELCD[®], abastecido com uma mistura de 95% diesel e 5% biodiesel, de 3,3 toneladas de peso, com capacidade de 7,5 toneladas de carga, a uma velocidade de 27km/h.

Diante da impossibilidade de medição já explicada anteriormente dos teores de CH₄ e SO₂, que foram estimados a partir de correlações com o Oxigênio, foi realizada uma análise de sensibilidade nas categorias de impacto de aquecimento global e acidificação, onde esses poluentes podem contribuir de forma significativa. Os potenciais de aquecimento global e acidificação foram calculados levando em consideração uma variação de -100 a 100% dos valores estimados de CH₄ e SO₂, respectivamente e então foi plotado a variação no potencial em função da variação dos teores estimados. A análise de sensibilidade para a categoria Eutrofização terrestre não foi realizada pois seu único contribuinte (NO) não foi estimado como os teores de CH₄ e SO₂.

As tabelas com os valores desses inventários estão disponíveis no Anexo A.

4.2.3. Método de cálculo

O software utilizado para modelagem é o Simapro 7.2.4v, e o método EDIP (Environmental Design of Industrial Products) 2003 1.02v foram utilizados para efetuar o cálculo da avaliação do impacto.

4.2.4. Categorias de Impacto

As categorias de impacto ambiental, os modelos de caracterização e os indicadores de categorias utilizados nesse trabalho, baseiam-se no método EDIP, descrito por Wenzel et al. (1997).

Dentre as categorias de impacto fornecidas pelo método, foram escolhidas as seguintes:

- Potencial de Aquecimento Global (PAG);
- Potencial de Acidificação (PA);
- Eutrofização terrestre.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em duas comparações e uma análise de sensibilidade. A primeira comparação avalia o desempenho ambiental do caminhão em diferentes perfis de movimentação, a segunda compara o caminhão abastecido com GNV e biogás, além de um caminhão de base de dados abastecido a diesel. Por fim, é mostrada a análise de sensibilidade nas categorias potencial de aquecimento global e acidificação.

5.1. Avaliação do Impacto Ambiental do caminhão abastecido à GNV em rota

5.1.1. Potencial de Aquecimento Global

Nesse item, são apresentados os resultados das emissões de gases de efeito estufa do caminhão nas duas rotas (ID03 e PD01) e em transbordo (TB cheio e TB vazio).

A Tabela 5.1 mostra que há uma discrepância elevada entre as rotas ID03 e PD01 (421 e 8 kg CO₂-Eq./km rodado, respectivamente). Foi observado durante as análises e na construção do inventário, que o caminhão percorria pouca distância para uma grande quantidade de lixo coletada na rota ID03, enquanto que na rota PD01 essa distância era bem superior. Fatores como dia da semana, horário e perfil da região de coleta influenciam de maneira significativa as emissões, por isso há essa grande diferença. Em relação às emissões no trecho de Transbordo (TB), cabe destacar que o impacto do veículo carregado é 2,5 vezes superior ao veículo vazio.

Tabela 5.1 - Resultados para Potencial de Aquecimento Global do caminhão abastecido à GNV em rota

| Rota | Global Warming (kg CO ₂ -Eq./km rodado) |
|----------|--|
| ID03 | 421 |
| PD01 | 8 |
| TB Cheio | 15 |
| TB vazio | 6 |

Costa (2007) analisou as emissões em função da potência do motor e constatou que há um aumento acentuado nas emissões de CO e C_xH_y quando o motor está operando com mistura diesel e gás natural, em comparação ao diesel puro, até uma potência intermediária, com posterior decréscimo. Já para os teores de NO_x e CO₂ as emissões aumentam conforme aumenta a potência do motor. Diante dessas observações, acredita-se que nas constantes paradas e arrancadas e devido às vias de menor capacidade de circulação de tráfego na rota ID03, a potência aplicada no motor tenha sido elevada, por isso seu impacto superior às demais condições.

Observando a contribuição de cada espécie nessa categoria de impacto na Figura 5.1, destaca-se o fato de que em todas as rotas, cerca de 30% do impacto é causado pelo CO₂ e os 70% restante causados por CH₄ e CO.

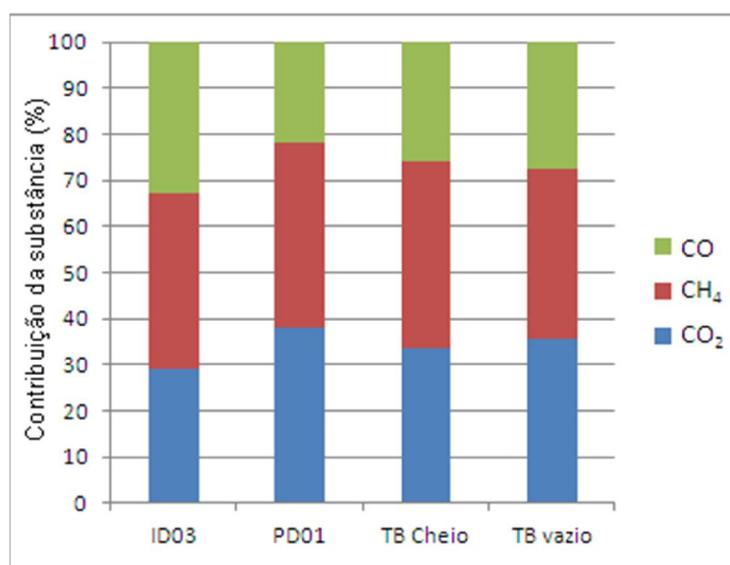


Figura 5.1 - Distribuição de impacto para aquecimento global do caminhão abastecido à GNV em rota

Rose et al. (2013) estimaram as emissões de um caminhão de coleta de lixo no Canadá abastecido com GNV, utilizando uma ferramenta de modelagem para transporte de combustíveis em 4,5kg de CO₂-Eq./km rodado. López et al. (2009) mediram as emissões de CO₂ utilizando um analisador e o consumo de GNV de um caminhão de coleta de lixo na cidade de Madri, Espanha, e encontraram o valor de 1,75 kg de CO₂-Eq./km. Arteconi et al. também estimaram a emissão de um veículo pesado na Europa abastecido com GNV em 1,5 kg de CO₂-Eq./km. Com exceção da rota ID03, os valores encontrados são coerentes com a literatura citada, principalmente levando em consideração que a maioria dos trabalhos estimaram, sem medir, as emissões dos veículos.

5.1.2. Potencial de Acidificação

A queima do GNV emite NO_x e SO₂ que são responsáveis pelo potencial de acidificação. Assim como no potencial de aquecimento global, a rota ID03 foi a que apresentou maior potencial de acidificação, muito superior às demais, como pode ser observado na Tabela 5.2. Da mesma maneira, o impacto do transbordo cheio é 2,5 vezes superior ao veículo vazio.

Tabela 5.2 - Resultados para Potencial de Acidificação do caminhão abastecido à GNV em rota

| Rota | Potencial de acidificação (m ² /km rodado) |
|----------|---|
| ID03 | 12,2 |
| PD01 | 0,2 |
| TB Cheio | 0,5 |
| TB vazio | 0,2 |

Através da análise da Figura 5.2, é possível observar que o SO₂ é responsável por pelo menos 90% do impacto em todas as rotas.

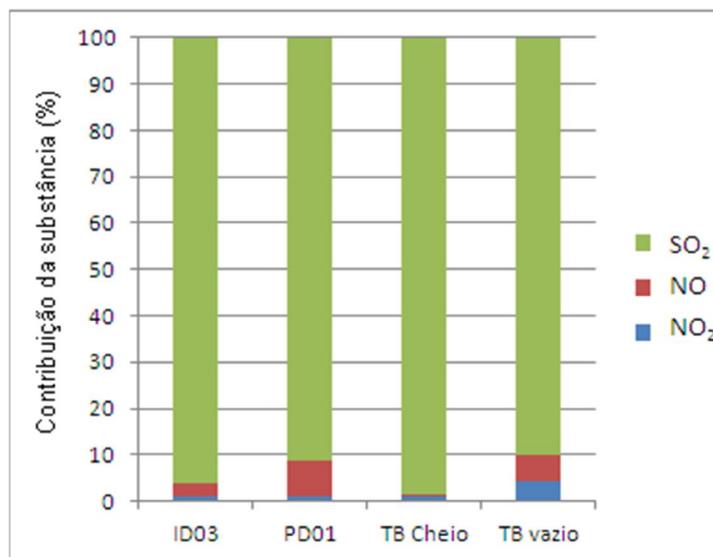


Figura 5.2 - Distribuições de impacto para acidificação do caminhão abastecido à GNV em rota

5.1.3. Potencial de Eutrofização terrestre

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados de Eutrofização terrestre. Seguindo o mesmo padrão das categorias anteriores, a rota ID apresentou impacto superior aos demais. No entanto, nessa categoria, o impacto do transbordo vazio é maior que do cheio. Segundo Costa (2007) vários fatores afetam a formação do monóxido de nitrogênio, entre eles, a temperatura, que pode ter ocasionado uma maior formação de NO_x no caminhão vazio do que no caminhão cheio.

Tabela 5.3 - Resultados para Potencial de Eutrofização terrestre do caminhão abastecido à GNV em rota

| Rota | Eutrofização terrestre (m ² /km rodado) |
|----------|--|
| ID03 | 1,01 |
| PD01 | 0,04 |
| TB Cheio | 0,00 |
| TB vazio | 0,03 |

5.2. Comparação entre combustíveis

A comparação do caminhão IVECO, abastecido com biogás circulando sem carga em autoestrada (Biogás); com gás natural em autoestrada também sem carga (GNV) e do caminhão da base de dados abastecido a diesel cheio e vazio (Diesel

Cheio e Diesel Vazio) são mostrados a seguir para as três categorias de impacto selecionadas.

5.2.1. Potencial de Aquecimento Global

Os resultados para o Potencial de Aquecimento Global são mostrados na Tabela 5.4. Entre os três combustíveis analisados, o caminhão abastecido a biogás obteve o maior potencial de aquecimento global (54,8 kg CO₂-Eq./km rodado), enquanto o veículo abastecido a diesel obteve os menores potenciais (0,35 e 1,14 kg CO₂-Eq./km rodado para o veículo vazio e cheio, respectivamente).

Tabela 5.4 - Resultados para Potencial de Aquecimento Global na comparação entre combustíveis

| Rota | Global Warming (kg CO ₂ -Eq./km rodado) |
|--------------|--|
| Biogás | 54,8 |
| GNV | 17,6 |
| Diesel Vazio | 0,35 |
| Diesel Cheio | 1,14 |

Para o caminhão movido a diesel, observa-se que o impacto é cerca de três vezes maior comparando a carga do veículo. O impacto do caminhão abastecido a biogás foi três vezes superior ao GNV em autoestrada.

Observando a distribuição do impacto para o Potencial de Aquecimento Global na Figura 5.3, nota-se que no caminhão a diesel, o principal responsável pelo impacto é o CO₂. No caminhão com gás natural, a contribuição de CO e CH₄ é de 52 e 25%, respectivamente, e juntos correspondem 78% do impacto. Já para o caminhão abastecido a biogás, o CH₄ não tem contribuição no impacto, sendo o CO responsável por 45% deste.

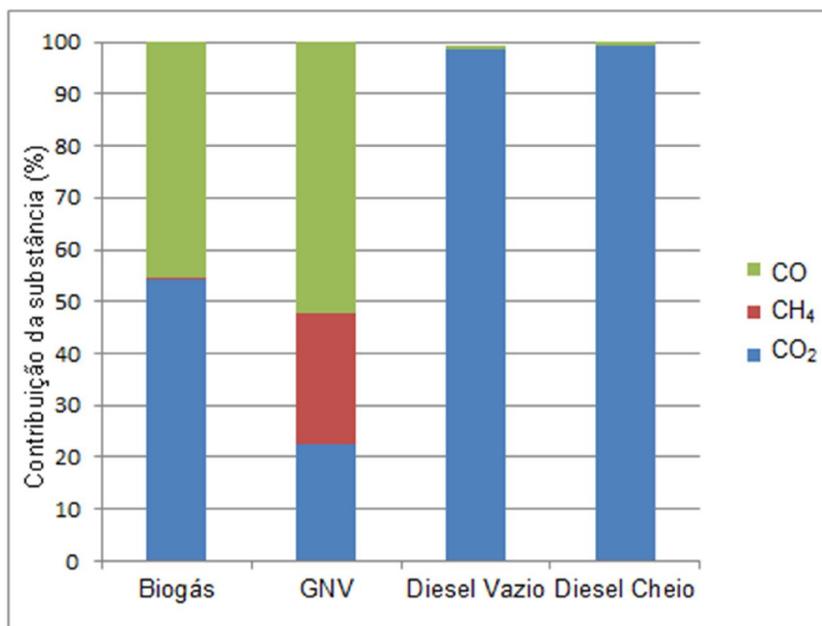


Figura 5.3 - Distribuição de impacto para Potencial de Aquecimento Global na comparação entre combustíveis

Sobre o fraco desempenho do biogás comparado ao gás natural, cabe destacar que Kliucininkas et al. (2012) também encontraram comportamento semelhante. Suas estimativas apontaram que o consumo de biogás é 100% maior que o de gás natural para um ônibus, o que aumenta consideravelmente as emissões de CO₂. Para esse autor, os valores das emissões de CO₂ do ônibus foram estimados em 1,0, 1,1 e 1,6 kg/km de viagem para diesel, gás natural e biogás, respectivamente. Entretanto, o desempenho foi o mesmo alcançado por esse autor, em que o melhor desempenho nessa categoria cabe ao diesel, e o pior, ao biogás.

Os elevados teores de CO e CH₄ para o caminhão em estudo pode ser um indicativo de baixa eficiência tanto do motor, quanto do catalisador de três vias, que pode estar acarretando em potenciais tão elevados. Estudos posteriores deverão ser realizados para uma investigação mais profunda desse aspecto.

5.2.2. Potencial de Acidificação

A Tabela 5.5 mostra os resultados para Potencial de Acidificação na comparação entre combustíveis. Assim como na categoria de Aquecimento Global, o caminhão movido a biogás apresentou maior impacto (29,6 m²/km rodado).

Tabela 5.5 - Resultados para Potencial de Acidificação na comparação entre combustíveis

| Rota | Potencial de acidificação (m ² /km rodado) |
|--------------|---|
| Biogás | 29,6 |
| GNV | 0,48 |
| Diesel Vazio | 0,03 |
| Diesel Cheio | 0,09 |

A Figura 5.4 mostra que o NO_x foi responsável por 99% do impacto de acidificação para biogás e apenas 6% para o GNV em autoestrada, respectivamente. O impacto foi superior, principalmente em relação ao biogás, ao caminhão a diesel, que se espera emitir maiores quantidades de NO_x e SO₂ na fase de uso do combustível (Kliucininkas et al., 2012; Rose et al., 2012).

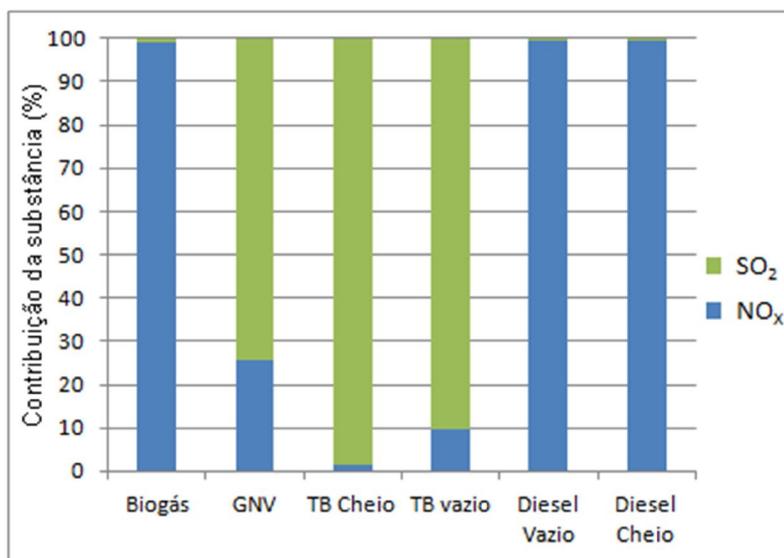


Figura 5.4 - Distribuição de impacto para Potencial de Acidificação na comparação entre combustíveis

Os elevados valores de NO_x para o biogás podem ser resultado da sua composição. Conforme mostrado anteriormente na Tabela 4.1, o biogás apresenta

4,2 e 1,6% de N_2 e O_2 , respectivamente, enquanto o GNV apresenta 0,71% de N_2 e é isento de O_2 , fazendo com que a contribuição desses elementos na formação de NO_x fosse maior para o biogás.

Além disso, o GNV apresenta além do metano, maior constituinte do biogás etano, propano e butano em sua composição. Acredita-se que essa diferença geraria uma quantidade maior de O_2 residual, por formar uma mistura mais pobre em combustível para o biogás e mais rica para o GNV em função da estequiometria de reação. Segundo Heisler (1995), um pequeno excesso de ar pode resultar em um considerável aumento de NO_x , como pode ser observado na Figura 5.5.

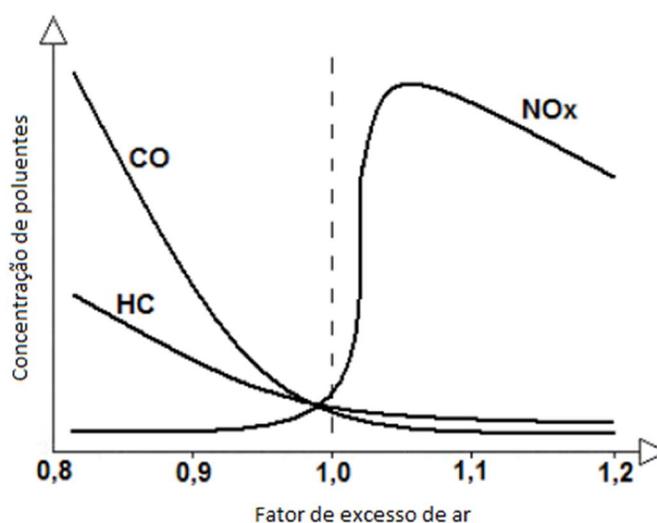


Figura 5.5 - Emissão de gases de exaustão em função do fator lambda

Fonte: Heisler, 1995.

Ainda de acordo com a Figura 5.5, o excesso de ar também geraria uma diminuição nas emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, o que de fato ocorreu para o biogás, como pode ser observado na Figura 5.3 mostrada anteriormente na categoria aquecimento global.

5.2.3. Potencial de Eutrofização Terrestre

O Potencial de Eutrofização Terrestre na comparação entre combustíveis é exibido na Tabela 5.6. O biogás, assim como nas outras categorias, apresentou o

maior impacto (12,8 m²/km rodado). Nessa categoria, todo impacto é causado pela emissão de NO. O impacto do caminhão a diesel foi superior ao movido a gás natural, indicando que o gás apresenta melhor desempenho nessa categoria.

Tabela 5.6 - Resultados para Potencial de Eutrofização Terrestre na comparação entre combustíveis

| Rota | Potencial de Eutrofização Terrestre (m ² /km rodado) |
|--------------|---|
| Biogás | 12,8 |
| GNV | 0,07 |
| Diesel Vazio | 0,08 |
| Diesel Cheio | 0,28 |

5.3. Análise de sensibilidade

5.3.1. Análise de sensibilidade para Potencial de Aquecimento Global

Para avaliar o quanto o erro dos teores estimados de CH₄ pode alterar o potencial de aquecimento global, já que esse gás possui um fator de equivalência de 25 vezes em relação ao CO₂ (Wenzel et al., 1997), foi realizada uma análise de sensibilidade, que calculou a variação do potencial de aquecimento global em função de diferentes variações nos teores.

A Figura 5.6 mostra a sensibilidade dos resultados para o potencial de aquecimento global. Pode-se observar que o caminhão abastecido a GNV na estrada foi a situação de maior sensibilidade, apresentando uma redução de 52% no potencial quando a variação de CH₄ foi de 100%, enquanto nas demais situações a redução foi de aproximadamente 40%.

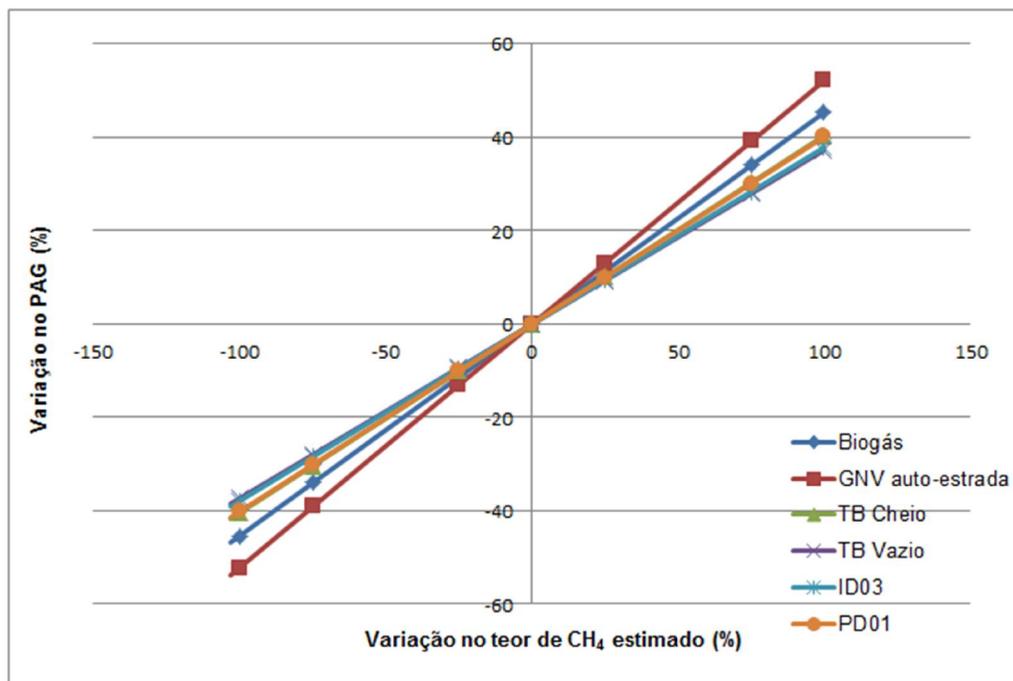


Figura 5.6 - Análise de sensibilidade para o potencial de aquecimento global em função da variação percentual de CH₄.

Esses resultados mostram que a variação nos teores estimados de CH₄ afeta de maneira semelhante e significativa em todas as situações analisadas.

5.3.2. Análise de sensibilidade para Potencial de Acidificação

Para a análise de sensibilidade no Potencial de Acidificação foram variados os teores estimados de SO₂, que é a substância referência nessa categoria (Wenzel et al., 1997), e medida a resposta do potencial.

Pode-se observar na Figura 5.7 que nessa categoria há uma maior diferença de sensibilidade nas situações analisadas. Para o caminhão abastecido com biogás em autoestrada e com GNV em transbordo cheio, que tiveram os maiores potenciais, a sensibilidade é menor. Além disso, cabe ressaltar que o maior responsável pela acidificação no uso do biogás é o NO_x, sendo assim, a variação de SO₂ afeta no máximo 1% o potencial de acidificação.

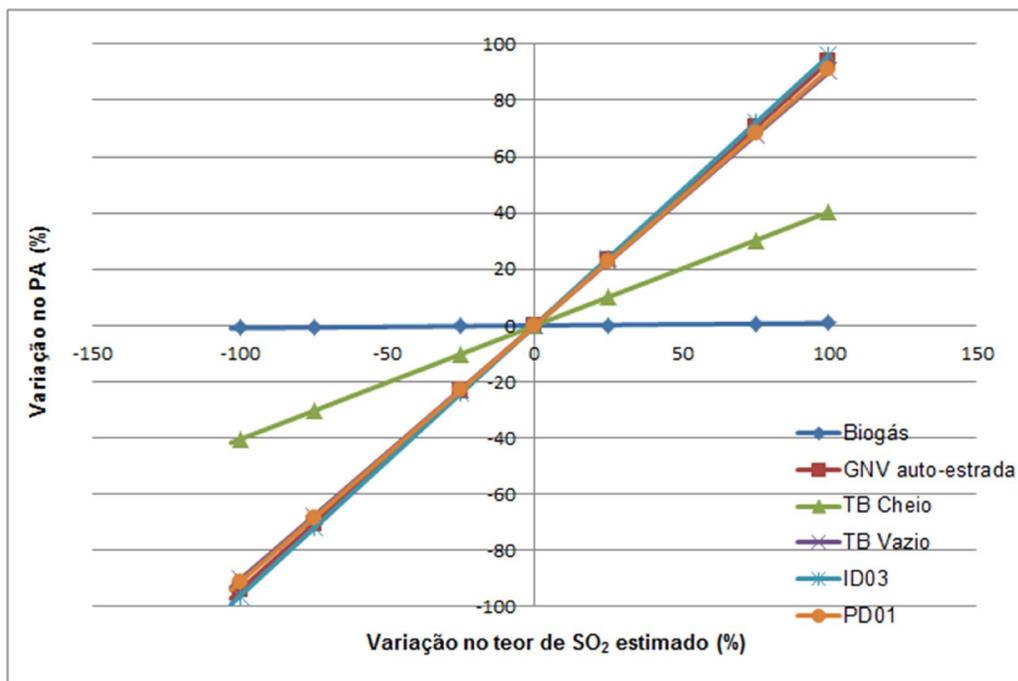


Figura 5.7 - Análise de sensibilidade para o potencial de acidificação em função da variação percentual de SO₂.

Esses resultados mostram que o erro nas estimativas de SO₂ pode alterar significativamente o potencial de acidificação. Em geral, para as condições urbanas com GNV, a variação no PA é de 100% quando o teor de SO₂ também varia essa magnitude.

6. CONCLUSÃO

O impacto em todas as categorias analisadas é pelo menos duas vezes maior quando o caminhão está em transbordo carregado frente ao caminhão em transbordo descarregado. Já uma das rotas de coleta, onde o caminhão percorria pequenas distâncias, com muitas paradas, houve um impacto discrepante, muito superior aos demais. Esses resultados mostram claramente que os impactos são maiores em elevadas rotações (e conseqüentemente, potência) do motor.

O caminhão abastecido a biogás obteve impacto muito superior em todas as categorias, muito provavelmente pelo fato da calibração do sistema de injeção eletrônica ter sido realizada para operar com a melhor relação estequiométrica ar/combustível para o GNV, mostrando que sua utilização como substituto ao GNV deve ser realizada juntamente com avaliação e ajustes no motor. O caminhão da base de dados movido a diesel teve menor potencial de aquecimento global e acidificação e maior potencial de eutrofização terrestre, quando comparado ao GNV; e melhor desempenho em todas as categorias frente ao biogás.

A metodologia mostrou-se uma ferramenta muito útil na avaliação do desempenho ambiental dos combustíveis, identificando os principais responsáveis pelos impactos, além de permitir observar os diferentes perfis de emissão do veículo em rota, vazio e cheio. No entanto, os resultados precisam ser avaliados com cautela, tendo em vista que as estimativas e considerações adotadas no estudo podem afetá-los.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, sugerem-se algumas propostas que podem ser utilizadas em trabalhos futuros:

- Monitoramento das emissões, levantando maior número de informações; como consumo de combustível, número de paradas no trecho, entre outras, para melhor entendimento dos resultados;
- Monitorar, para efeito de comparação, caminhão espelho movido a diesel e biodiesel;
- Realizar a ACV completa do GNV, da extração do combustível até a distribuição, juntamente com os dados monitorados na fase de uso, para avaliar quais etapas tem maior contribuição para o impacto ambiental.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLY, J.; PRYOR, T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. **Journal of Power Sources**, v. 170, p. 401-411, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (2009). NBR ISO 14040
Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil: ABNT. Agosto. 2p. (a)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (2009). NBR ISO 14044
Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Brasil: ABNT. Agosto. 24p. (b)

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas da Energia Elétrica do Brasil, 3ª ed. – Brasília: Aneel, 2008.

ARTECONI, A., BRANDONI, C., EVANGELISTA D., POLONARA, F. Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. **Applied Energy**, v. 87, p. 2005–2013, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 8, de 31 de agosto de 1993. Complementa a Resolução no 18/86, que institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 315, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de

Emissões veiculares – PROCONVE.

BRASIL. Lei n. 11.909, de 4 de março de 2009. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição Federal, bem como sobre as atividades de tratamento, processamento, estocagem, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; altera a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997; e dá outras providências.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. BEN - Balanço Energético Nacional 2011, Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. BEN - Balanço Energético Nacional 2013, Ano base 2012. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

BURNHAM, A.; HAN, J.; CLARK, C. E.; WANG, M.; DUNN, J. B., PALOU-RIVERA, I. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Shale Gas, Natural Gas, Coal, and Petroleum. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 619–627, 2012.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos**. 1ª Reimpressão ed. Qualitymark, 2002. 120p.

COLTRO, L. **Avaliação do Ciclo de Vida de Como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007a. 7p

COLTRO, L. **Avaliação do Ciclo de Vida de Como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007b. 10p

COSTA, R. S. **Análise das emissões de gases poluentes em veículos pesados abastecidos com GNV (Gás Natural Veicular), Diesel e Biodiesel**. Porto Alegre, 2013, 206p. Proposta de Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

COSTA, Y.J.R. **Análises energética e exergética de um motor de combustão interna operando com mistura de diesel e gás natural**. Campina Grande, 2007,

185p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

COSTA, Y.J.R, LIMA, A. G. B., FILHO, C.R.B., LIMA, L.A. Energetic and exergetic analyses of a dual-fuel diesel engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 4651–4660, 2012.

DELUCCHI, M.A.,1998. Life cycle energy use, greenhouse gás emissions, and air pollution from the use of transportation fuels and electricity. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. Disponível em: <http://www.its.ucdavis.edu/publications/2002/UCD-ITS-RR-02-02.pdf>, Acesso em: 2 abril 2012.

DINCA, C.; BADEA, A.; ROUSSEAU, P.; APOSTOL, T. A multi-criteria approach to evaluate the natural gas energy systems. **Energy Police**, v. 35, p. 5754-5765, 2007.

ENGERER, H.; HORN, M. Natural gas vehicles: An option for Europe. **Energy Policy**, v. 38, p. 1017–1029, 2010.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Risk Management Research Laboratory. Life cycle assessment: Principles and practice. Estados Unidos da América, 2006. 80 p.

GVR Gas Vehicles Report, 2011. GVR Gas Vehicles Report, 2009. Worldwide NGV statistics, 2011. Disponível em: <http://www.iangv.org/toolsresources/statistics.html>. Acesso em: 22 agosto 2012.

HAUSCHILD, M.; POTTING, J. **Spatial differentiation in life-cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology**. Environmental news no. 80, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2005.

HEISLER, H. **Advanced engine technology**. London: SAE International, 1995. 794p.

HOLANDA, R. A. **Análise das emissões gasosas de um veículo flex funcionando com diferentes combustíveis**. Natal, 2010. 101p. Dissertação (Mestrado Ciência e Engenharia de Petróleo). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

IEA BIOENERGY. A sustainable and reliable energy source. IEA Bioenergy. Disponível em: <www.ieabioenergy.com>. Acesso em setembro de 2012.

KLIUCININKAS, L., MATULEVICIUS, J.; MARTUZEVICIUS, D. The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolleybuses. **Journal of Environmental Management**, v. 99, p. 98-103, 2012.

KOPYSCINSKI, J.; Tilman J. SCHILDHAUER, T. J.; BIOLLAZ, S. M. A. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009. **Fuel**, v. 89, p. 1763–1783, 2010.

LACOUR, S.; Chinese, T.; Alkadee, D.; Perilhon, C; Descombes, G. Energy and environmental balance of biogas for dual-fuel mobile applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 1745– 1753, 2012.

LÓPEZ, J. M.; GÓMEZ,A.; APARICIO, 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.

Manual de Instruções Testo, TESTO 350 M/XL . TESTO 454. 2012

Manual de Instalação e Operação Fueltech, Fueltech Pro24 Datalogger. 2012

NGV, (2001a). NGV Institute. Website institucional. Disponível em: <<http://www.iangv.org>>. Acesso em: 30 agosto 2012.

Practical guide for Emission and Process Measurements. **Flue Gas Analysis**. 2. Edition. Disponível em: <<http://www.actoolsupply.com>>. Acesso em: 10 setembro 2013.

PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S/A. Website institucional. Disponível em:
<<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em: 30 agosto 2012.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2013. Prefeitura de Porto Alegre – Departamento Municipal de Limpeza Urbana. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. 2013.

ROSE, L.; HUSSAIN, M.; AHMED, S. ; MALEK, K.; COSTANZO, R.; KJEANG, E. A comparative life cycle assessment of diesel and compressed natural gas powered refuse collection vehicles in a Canadian city. **Energy Policy**, v. 52, p. 453-461, 2013.

SETRANS. Secretaria de Estado de Transporte. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Website institucional. Disponível em:
<<http://www.rj.gov.br/web/setrans>>. Acesso em: 03 novembro 2012.

SILVA, S. N. **Uso do GNV em ônibus urbano para operar em linha comercial – Projeto piloto GASBUS** –. Porto Alegre, 2006. 177p. Dissertação (Mestrado Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Brasil.

SULGÁS. Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul. Website institucional. Disponível em:
<<http://www.sulgas.rs.gov.br>>. Acesso em: 17 de janeiro de 2013.

TEIXEIRA, F. M. T. **O potencial do gás natural veicular no mercado gaúcho. Porto Alegre**. 2003. 177p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Brasil.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. Environmental **Assessment of Products**. Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publisehrs. v.1 (1997).

ANEXO A

Tabela A1 - Emissões gasosas da queima do combustível que deu origem ao inventário

| # | Rota | Distância (km) | Perfil | CO ₂ (g) | CO (g) | NO (g) | NO ₂ (g) | CH ₄ (g) | SO ₂ (g) |
|----|------|----------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | ID03 | 18 | TB (cheio) | 91215 | 35182 | 1,85 | 10,3 | 4763 | 452 |
| 2 | ID03 | 16,36 | TB (vazio) | 37246 | 14374 | 12,3 | 14,7 | 1705 | 151 |
| 3 | ID03 | 3,23 | Coleta | 195200 | 83003 | 160 | 70,7 | 10374 | 960 |
| 4 | ID03 | 1,08 | Coleta | 140781 | 84815 | 0,44 | 0,08 | 7862 | 801 |
| 5 | ID03 | 2,88 | Coleta | 226962 | 118012 | 23,8 | 16,1 | 13133 | 1200 |
| 6 | ID03 | 0,68 | Coleta | 131864 | 75169 | 9,68 | 14,8 | 7989 | 764 |
| 7 | ID03 | 4,28 | TB (vazio) /coleta | 272729 | 67115 | 84,1 | 235 | 16224 | 1409 |
| 8 | ID03 | 0,86 | Coleta | 378684 | 244006 | 34,7 | 43,0 | 21154 | 2071 |
| 9 | PD01 | 3,56 | Coleta | 5812 | 2800 | 0,96 | 0,00 | 331 | 29 |
| 10 | PD01 | 6,87 | Coleta | 8802 | 4862 | 0,26 | 0,00 | 473 | 44 |
| 11 | PD01 | 2,24 | Coleta | 23254 | 3122 | 13,2 | 3,33 | 928 | 52 |
| 12 | PD01 | 7,45 | Coleta /TB | 347852 | 256589 | 69,7 | 10,0 | 18925 | 1554 |

Tabela A2 - Emissões gasosas separadas por perfil de coleta

| Soma | Rota | Distância (km) | CO ₂ (g) | CO (g) | NO (g) | NO ₂ (g) | CH ₄ (g) | SO ₂ (g) |
|-------------|----------|----------------|---------------------|--------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | TB Cheio | 18 | 91215 | 35182 | 1,8 | 10,3 | 4763 | 452 |
| 2 | TB Vazio | 6,87 | 37246 | 14374 | 12,3 | 14,7 | 1705 | 151 |
| 3,4,5,6 e 8 | ID03 | 2,24 | 1073490 | 605005 | 228,2 | 144,6 | 60511 | 5796 |
| 9,10 e 11 | PD01 | 7,45 | 37868 | 10783 | 14,4 | 3,3 | 1732 | 126 |

Tabela A3 - Emissões gasosas separadas por combustível

| Rota | Distância (km) | CO₂ (g) | CO (g) | NO (g) | NO₂ (g) | CH₄ (g) | SO₂ (g) |
|--------------|-----------------------|---------------------------|---------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Biogás | 65,45 | 1939502 | 10498 | 21590 | 190485 | 70691 | 989 |
| GNV estrada | 61,69 | 242298 | 138147 | 118 | 24 | 24566 | 1247 |
| Diesel vazio | 60,2 | 21900 | 55,8 | 201 ^a | | 0,333 | 0,69 |
| Diesel cheio | 7,5 | 8937 | 22,7 | 82,1 ^a | | 0,136 | 0,282 |

^a Considerado como NO_x