

Determinação da linha de base e adicionalidade de um projeto de MDL a partir da emissão de poluentes utilizando diferentes combustíveis

Determination of the baseline and additionality of a project for CDM from the emission of using different fuels

Lucas Bischof Pian

Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste
PR 153 Km 7, Riozinho, 84500-000, Irati, PR, Brasil
lucasbpian@gmail.com

Waldir Nagel Schirmer

Prof. da Universidade Estadual do Centro-Oeste. Doutor em Eng. Ambiental
pela Universidade Federal de Santa Catarina
PR 153 Km 7, Riozinho, 84500-000, Irati, PR, Brasil
wanasch@yahoo.com.br

Rafaelo Balbinot

Prof. Universidade Estadual do Centro-Oeste
Mestre em Eng. Florestal pela Universidade Federal do Paraná
PR 153 Km 7, Riozinho, 84500-000, Irati, PR, Brasil
rbalbinot@yahoo.com.br

Marins Danczuk

Prof. da Universidade Estadual do Centro-oeste. Mestre em Química pela Universidade Estadual de São Paulo
PR 153 Km 7, Riozinho, 84500-000, Irati, PR, Brasil
marinsdk@yahoo.com.br

Resumo

Em muitos centros urbanos, ônibus e microônibus estão entre os principais meios de transporte da população, tornando o transporte público uma fonte potencial da emissão de poluentes e de gases do efeito estufa. Sabendo-se que é possível estimar e comparar a quantidade de poluentes emitidos por esses veículos utilizando combustíveis alternativos, este trabalho objetiva estimar o combustível menos poluidor, tomando-se como parâmetro os principais gases provenientes de sua combustão, considerando diesel, biodiesel (100%) e gás natural, bem como determinar o potencial de Cascavel (cidade avaliada) em gerar um projeto de MDL. No cálculo das emissões foram utilizados os métodos *bottom-up* e balanço de massa, de modo a se comparar as

Abstract

In many urban centers, bus and minibus usually are the main means of transport of the population, making public transport a potential source of emission of polluting and greenhouse gases. As it is well known that it is possible to estimate and compare the amount of pollutants emitted by such vehicles using alternative fuels, this study aims to estimate the less polluter fuel, taking as a parameter the main gases from their burning, considering diesel, biodiesel (100%) and natural gas, as well to determine the potential of Cascavel (assessed city) to elaborate a CDM project. To estimate the emission, it was used the methods "bottom-up" and mass balance, in order to compare the gaseous emissions found in the two methodologies. Among the fuel measured, which showed higher emissions it was the diesel, concerned to

emissões gasosas encontradas nas duas metodologias. Dentre os combustíveis avaliados, o que apresentou maiores emissões foi o diesel, em termos de material particulado, dióxido de carbono e hidrocarbonetos. No que se refere ao projeto de MDL, foi encontrado um potencial de redução de 8.000 t/CO₂.ano ao se substituir o diesel pelo biodiesel. Este estudo representa apenas uma estimativa da emissão de poluentes, todavia já demonstra a necessidade de se buscar alternativas à utilização do diesel.

Palavras-chave: *biodiesel, diesel, gás natural, mecanismos de desenvolvimento limpo, transporte coletivo.*

particulate matter, carbon dioxide and hydrocarbons. Regarding the CDM project, it was found a potential reduction of 8,000 t/CO₂.year when one replaces the diesel by biodiesel. This work only represents an estimate of emissions, however already demonstrates the need to seek alternatives to the diesel use.

Key words: *biodiesel, diesel, natural gas, clean development mechanism, collective transport.*

1. Introdução

A população dos grandes centros urbanos está constantemente exposta aos efeitos da poluição atmosférica, tal fato provoca impactos negativos sobre o bem-estar e a saúde dos indivíduos a ela exposta. Dentre as principais fontes de poluição do ar destacam-se as emissões veiculares e, destas, as emissões provenientes do transporte coletivo, os quais atendem aos centros urbanos. A emissão de tais poluentes está associada, atualmente, ao uso exclusivo de combustíveis fósseis, como é o caso do diesel, principal combustível utilizado no transporte coletivo.

Além dos efeitos diretos sobre a população, há ainda os efeitos sobre o meio ambiente, verificados no aquecimento global e demais mudanças climáticas. Com o objetivo de reduzir as emissões atmosféricas de gases do efeito estufa (GEE), foi elaborado o Protocolo de Quioto, em 1997, no qual se estabeleceu metas de redução dessas emissões. As medidas de redução previstas no referido documento prevêem a substituição de combustíveis da matriz energética atual por outros com menor potencial poluente.

O Protocolo de Quioto prevê três mecanismos de flexibilização para ajudar os países do Anexo-I a alcançarem suas metas definidas de redução. São eles: Comércio de Emissões, *Joint Implementation* e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Para o caso brasileiro são de grande importância os projetos de MDL, o único aplicável ao Brasil, uma vez que o país não está incluso nos chamados países do Anexo-I, que são aqueles com metas definidas de redução de emissões (CGEE, 2008). Assim, os projetos de MDL são realizados em países intitulados não-Anexo I, ou em desenvolvimento, que uma vez aplicados promoverão redução nas emissões de GEE, ou a remoção do CO₂ presente na atmosfera. Nesse caso, cada tonelada de CO₂ equivalente que não for emitida ou for retirada da atmosfera pela realização de um projeto de MDL poderá ser negociada no mercado mundial (com os países do Anexo-1). Os países constantes do Anexo-I que não conseguirem reduzir suas emissões poderão comprar créditos de carbono, ou seja, as Reduções Certificadas de Emissões (RCE) de países em desenvolvimento, desde que estes projetos resultem também em desenvolvimento sustentável. Num projeto de MDL, dois parâmetros principais devem ser estimados de forma segura: a Linha de base e a Adicionalidade do projeto. A Linha de base representa as emissões de

GEE na ausência do projeto. Um projeto pode ser ou não considerado adicional, desde que possa comprovar que suas emissões antrópicas de CO₂ serão menores do que as que ocorreriam na ausência do projeto. O valor encontrado para a magnitude da adicionalidade é o considerado para a certificação das emissões. Vale destacar também que, para obtenção das RCE, a entidade responsável pelo projeto deve provar que sem os recursos financeiros provenientes da venda dos créditos este seria economicamente inviável (Rocha, 2004).

Ônibus e microônibus ainda são os principais meios de transporte público utilizados nas cidades brasileiras, chegando a transportar, por mês, só nas capitais, mais de 550 milhões de passageiros, correspondendo a uma frota de aproximadamente 55 mil veículos que percorrem cerca de 250 milhões de quilômetros (NTU, 2003 *in* Lobkov, 2005).

No Brasil, a maioria dos meios de transporte, mesmo os de carga ou os coletivos, utilizam motores de ciclo diesel, o qual é um combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos de cadeia longa e, em menores proporções, por enxofre, nitrogênio e oxigênio. Cerca de 34% do petróleo consumido no país é processado para a produção de diesel, devido ao grande consumo do mercado nacional (Ferrari *et al.*, 2005; PETROBRAS, 2006; Postali, 2002 *in* Kozerski e Hess, 2006). Para Bueno (2006), os motores do ciclo diesel possuem uma elevada taxa de eficiência quando comparados a outros motores, o que leva a um menor consumo desse combustível. Entretanto, apresentam elevadas taxas de emissão atmosférica, em especial no que se refere aos óxidos de nitrogênio e material particulado. Em se tratando deste último, por exemplo, cerca de 0,002% da massa de combustível injetada no cilindro é expelida sob a forma de particulados.

Contudo, nos últimos anos dois combustíveis vêm se apresentando como alternativa para redução das emissões dos gases provenientes desse tipo de transporte: o biodiesel e o gás natural (Kozerski e Hess, 2006; Lobkov, 2005; Santos, 2001; Oliveira Filho, 2006). O biodiesel possui propriedades físico-químicas próximas às do diesel, tal fato facilita sua mistura ou mesmo substituição. No caso do Brasil, o biodiesel tem grande potencial, pois o país apresenta uma grande variedade de culturas com capacidade de fornecer óleos vegetais para sua produção. Deve-se levar em conta ainda a experiência brasileira na produção de etanol a partir da cana de açúcar. Quando adicionado ao diesel, na devida proporção, o biodiesel aumenta o desempenho do motor, reduz o consumo específico de combustível e a emissão de material particulado, além de reduzir o consumo de um recurso não-renovável, o petróleo (Ferrari *et al.*, 2005; Kozerski e Hess, 2006; Bueno, 2006). O gás natural, por sua vez, é um combustível fóssil composto por hidrocarbonetos, principalmente metano, seguido por etano, propano e butano. Para sua comercialização em território nacional, suas especificações técnicas são regulamentadas pela portaria ANP nº 104, de 08 de julho de 2002 (Brasil, 2002). A utilização do gás natural em substituição ao diesel vem sendo adotada em diversos países, devido aos benefícios alcançados economicamente, exemplo disso é a diversificação da matriz energética do país, e ambientalmente, por apresentar uma redução nas emissões de poluentes (Oliveira Filho, 2006). Cabe citar que o crescente consumo desse combustível, de acordo com as estatísticas da EIA/DOE (2003), pode chegar em 2025 a ser três vezes maior que em 2001. Isto representará um desafio para inúmeros países, inclusive o Brasil, que já vem enfrentando problemas com relação ao abastecimento de gás natural (Lobkov, 2005).

Sabendo-se que é possível estimar e comparar a quantidade de poluentes emitidos por esses veículos, ônibus e microônibus, utilizando combustíveis alternativos em diferentes condições de manutenção e uso, esse trabalho tem como objetivos:

- Determinar o combustível menos poluidor, tomando como parâmetro os principais gases provenientes de sua combustão. Para isso, foram considerados três tipos de combustíveis: diesel, biodiesel (puro, ou seja, 100%) e gás natural e suas respectivas emissões de gás carbônico (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP) e hidrocarbonetos (HC), todos tipicamente emitidos a partir desses combustíveis, e
- Estimar a linha de base e determinar a magnitude da adicionalidade do sistema de transporte coletivo do município de Cascavel, demonstrando seu potencial em gerar um projeto de MDL referente à substituição de combustíveis, substituindo o diesel por gás natural ou pelo biodiesel, preferencialmente.

2. Materiais e Métodos

Para estimar a linha de base e determinar a magnitude da adicionalidade do projeto de MDL foram utilizadas duas metodologias, *bottom-up* e balanço de massa. Ambas serviram para determinar as emissões veiculares de CO₂, quando utilizados os mesmos combustíveis em condições equivalentes de uso fazendo-se, desse modo, uma comparação entre as emissões de carbono. Nota-se que a metodologia *bottom-up* também foi utilizada para determinação da emissão de outros poluentes, além do CO₂, enquanto que pelo balanço de massa consideraram-se somente emissões de CO₂. As duas metodologias são descritas abaixo.

2.1. Bottom-up

Para o cálculo das emissões dos poluentes, foi utilizado o método de *bottom-up* descrito por Álvares Jr. e Linke (2001), Mattos (2001) e Kozerski e Hess (2006). Esse método é comumente usado no cálculo de emissões dessa natureza (Siqueira *et al.*, 2007; Landmann, 2004; Santos, 2001) e permite calcular as emissões a partir dos fatores de emissão de cada gás, quilometragem média percorrida ou combustível consumido. Para os cálculos foram utilizados dados obtidos junto ao órgão municipal de Regulamentação e Fiscalização do Transporte Coletivo de Cascavel/PR (CETTRANS). Os dados, apresentados na Tabela 1, foram obtidos durante o ano de 2008, compreendendo: números de veículos, quilometragem rodada (média mensal), combustível consumido (média mensal) e idade média da frota.

Tabela 1: Dados obtidos junto ao órgão municipal de transporte coletivo de Cascavel (PR) (CETTRANS, 2008).

Nº de veículos	136
Média Km rodados.mês ⁻¹	819.351,7
Consumo médio de diesel (L.mês ⁻¹)	280.239,9
Idade média da frota (anos)	5,8

O método consiste basicamente de duas equações: a primeira leva em conta o consumo energético de certa atividade da fonte móvel. Já a segunda equação considera a quantidade em massa de poluente emitido por quilômetro rodado.

As massas de cada poluente emitido foram calculadas pela Equação (1):

$$\text{Emissões}_i = F_{abc} \times \text{Atividade}_{abc} \quad (1)$$

onde: Emissões_i – emissão de um gás i; FE_i – fator de emissão do gás i; Atividade - quantidade de energia consumida ou distância percorrida por uma determinada atividade de uma fonte móvel; i - gás (CO₂, CO, NO_x, MP, HC e COV); a – tipo de combustível (diesel, gás natural, biodiesel 100%); b – tipo de veículo; c – controles de emissão.

Levando em consideração a quilometragem rodada foi utilizada a Equação (2):

$$\text{Emissões}_i = F \times FE_i \times \text{km}_{\text{média}} \quad (2)$$

onde: Emissões_i – emissão de um gás i; F – número de veículos; FE_i – fator de emissão do gás i; km_{média} – quilometragem média percorrida pela frota.

Os fatores de emissão de cada combustível foram encontrados na literatura e são apresentados na Tabela 2. Para o diesel, foram adotados fatores de emissão descritos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2006). Esses fatores foram determinados para motores do ciclo diesel comumente utilizados no estado de São Paulo. Os fatores de emissão utilizados para o biodiesel e o gás natural foram descritos por Siqueira *et al.* (2007), enquanto que os fatores de emissão de CO₂, tanto para o diesel quanto para o gás natural, foram encontrados em Álvares Jr. e Linke (2001).

Tabela 2: Fatores de emissão adotados para os cinco poluentes avaliados.

Combustível	CO (g.KWh ⁻¹)	HC (g.KWh ⁻¹)	NOx (g.KWh ⁻¹)	MP (g.KWh ⁻¹)	CO ₂ (g.Km ⁻¹)
Diesel	0,85 ⁽¹⁾	0,15 ⁽¹⁾	4,66 ⁽¹⁾	0,082 ⁽¹⁾	770 ⁽²⁾
Biodiesel 100%	0,86 ⁽³⁾	0,09 ⁽³⁾	7,0 ⁽³⁾	0,03 ⁽³⁾	N.d.
Gás natural	0,87 ⁽³⁾	0,09 ⁽³⁾	1,10 ⁽³⁾	N.d ⁽³⁾	550 ⁽²⁾

Notas: N.d. - Não determinado. (1) CETESB (2006); (2) Álvares Jr. e Linke (2001); (3) Siqueira *et al.* (2007).

De posse dos fatores de emissão, dados relativos ao transporte coletivo e características dos diferentes combustíveis, foram efetuados os cálculos das emissões. Nesse caso, é necessário o consumo em massa de combustível, obtido pelo produto do consumo em volume (m³.mês⁻¹) de cada combustível pela sua densidade (Kg.m⁻³). A partir do consumo mássico (Kg.mês⁻¹) é obtida a energia consumida (Kcal.mês⁻¹), levando-se em conta o poder calorífico inferior (PCI) correspondente ao respectivo combustível. É necessário ainda que seja feita a correção de unidades da energia consumida, de Kcal para KWh, pois os fatores de emissão dos poluentes encontram-se em g.KWh⁻¹. Esses cálculos devem ser feitos de modo a se obter as emissões de poluentes a partir da energia consumida (pela Equação 1), utilizada na obtenção das emissões

de CO, MP, NOx e HC. Os valores obtidos do cálculo da energia consumida encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Energia consumida pelo transporte coletivo utilizando diferentes combustíveis.

Combustível	Consumo (m ³ .mês ⁻¹)	Densidade (Kg.m ⁻³)	Consumo (Kg.mês ⁻¹)	PCI (Kcal.Kg ⁻¹)	Energia consumida (Kcal.mês ⁻¹)	Energia consumida (KWh.mês ⁻¹)
Diesel	280,2	850	238.183	11.393	2.713.626.139	3.155.947,2
Biodiesel 100%	280,2	876	240.985	8.825	2.126.796.027	2.473.463,7
Gás Natural	372.432	0,607	226.066	14.896	3.367.487.816	3.916.388,3

No caso do gás natural, para determinação do consumo de combustível pela frota do transporte coletivo de Cascavel, adotou-se como padrão o motor Mercedes-Benz M366LAG, fabricado no Brasil para atender ao mercado nacional. Esse motor apresenta potência de 231 cv e consumo de 1,8 Km.m⁻³. Nota-se que há outros motores fabricados no Brasil, mas para exportação (Machado *et al.*, 2008).

No caso das emissões de CO₂, como os fatores de emissão se encontram em g.Km⁻¹, a obtenção da energia consumida é desnecessária, bastando apenas a multiplicação da quilometragem média rodada pelo fator de emissão de CO₂, aplicando-se a Equação (2).

2.2. Balanço de massa

Em contrapartida à metodologia *bottom-up*, será utilizada uma segunda metodologia de determinação das emissões de cada combustível, descrita por ECEN (2008). Esta será utilizada somente para determinação das emissões de CO₂ para os diferentes combustíveis, e servirá para determinar uma nova linha de base e adicionalidade do projeto, passível de comparação com a linha de base encontrada pelo método *bottom-up*.

Essa metodologia é baseada no princípio da conservação de massa dos combustíveis, no qual o número de átomos de carbono do combustível equivale ao número de átomos das substâncias emitidas. Pelo balanço determina-se que para cada átomo de carbono do combustível será emitido um átomo de CO₂ para a atmosfera, considerando que a combustão é completa e que o combustível não apresenta qualquer impureza.

Assim, para se determinar as emissões é necessário saber o teor de carbono em cada combustível: diesel, biodiesel e gás natural. Suas composições foram encontradas na literatura, e a partir disso foi determinado o carbono percentual (C%) de cada um. A composição e o C% se encontram na Tabela 4.

Tabela 4: Composição dos diferentes combustíveis e seus percentuais de carbono.

Combustível	Composição	C%
Diesel ⁽¹⁾	C ₁₆ H ₃₄ (42%) e C ₁₁ H ₁₀ (58%)	89,59
Biodiesel 100% ^{(2)*}	C (77,4%), H (12,0%) e O (11,2%)	77,40
Gás natural ⁽³⁾	Metano (90,8%), Etano (6,17%) e Propano (1,2%)	74,31

Notas: (1) ECEN (2008); (2) Costa Neto *et al.* (2000); (3) GÁSNET (2008). (*) Dados do biodiesel de óleo de fritura.

Para encontrar as emissões de CO₂ em massa multiplica-se o valor de C% de cada combustível pelo seu consumo (real) em massa descrito na Tabela 3. Desse modo, obtém-se a quantidade de carbono emitida ao longo de um mês. Utilizando o fator de correção referente ao peso molecular do CO₂ (44/12), chega-se ao total de emissões de CO₂ do transporte coletivo de Cascavel.

3. Resultados e Discussão

3.1. Bottom-up

A Tabela 5 apresenta os valores de emissão dos poluentes com base na energia consumida por cada combustível.

Tabela 5: Cálculo da emissão de poluentes utilizando diferentes combustíveis.

Combustíveis	Emissão de poluentes				
	CO (Mg.mês ⁻¹)	HC (Mg.mês ⁻¹)	NOx (Mg.mês ⁻¹)	MP (Mg.mês ⁻¹)	CO ₂ (Mg.mês ⁻¹)
Diesel	2,682	0,473	14,706	0,258	630
Biodiesel 100%	2,127	0,222	17,314	0,074	N.d.
Gás natural	3,407	0,352	4,308	N.d.	450

Nota: N.d. - Não determinado.

Pela tabela acima se vê que, dentre os combustíveis avaliados, o que apresentou maiores emissões foi o diesel, principalmente para HC, MP e CO₂. Resultados similares foram encontrados em estudos realizados por Kozerski e Hess (2006) e Siqueira *et al.* (2007), os quais também apontaram uma maior contribuição de gases e particulados por parte do óleo diesel. A maior contribuição de monóxido de carbono, no presente estudo, ficou por conta do gás natural, devido à adoção de um fator de emissão de 0,85 g.KWh⁻¹ para o diesel, de acordo com CETESB (2006), ao passo que autores como Siqueira *et al.* (2007) utilizaram 4,0 g.KWh⁻¹, fazendo com que a contribuição do CO a partir do diesel evidentemente fosse bem superior comparada ao gás.

Para o gás natural a emissão de MP é considerada nula, devido à ausência de impurezas no combustível capazes de originar esse tipo de poluente durante a combustão.

É importante reduzir a concentração de tais compostos, uma vez que os hidrocarbonetos, por

exemplo, estão relacionados a alguns tipos de câncer pela sua exposição, mesmo à baixas concentrações. Além disso, são precursores do *smog fotoquímico*, juntamente com os NO_x. Materiais particulados, por sua vez, são responsáveis pela redução da visibilidade do meio, corrosão de materiais e problemas de irritação das vias respiratórias. Já o CO₂ está mais relacionado às mudanças climáticas, por ser um dos gases do efeito estufa. No caso dos NO_x, um dos principais problemas está relacionado à formação do ozônio troposférico (quando em reação com HC e na presença de luz) sofrendo oxidação fotoquímica, além de contribuir para a formação da chuva ácida (Álvares Jr *et al.*, 2002; Schirmer, 2004).

Apesar de não se conseguir determinar a emissão de CO₂ para o biodiesel, esse combustível é o único que não provém de material fóssil. Assim, mesmo se suas emissões forem maiores que a dos outros combustíveis durante o uso, estas acabam sendo menos significativas devido à fixação de CO₂ durante sua produção. Ou seja, apesar de emitir quantidade significativa de CO₂ durante a queima, a biomassa (precursora do biodiesel) apresenta a vantagem de promover a recaptura desse carbono por meio da fotossíntese, absorvendo CO₂ da atmosfera, criando um ciclo fechado absorção-liberação ("emissão zero").

Peterson e Hustrulid (1998 *in* Kucek *et al.*, 2004), determinam que quando se faz a substituição do diesel pelo biodiesel, a cada quilograma de diesel não utilizado, uma taxa equivalente de 3,11 kg de CO₂ não será emitido, além de um adicional de 15 a 20% devido à energia utilizada na sua produção. A adoção de tais valores de "não-emissão", para esse trabalho, equivale a aproximadamente 8.800 toneladas de carbono ao ano que deixam de ser emitidos, mesmo sem contabilizar o adicional referente à sua energia de produção. Percebe-se assim o potencial gerador de projetos de MDL apresentado pela substituição do diesel pelo biodiesel, potencial este ainda pouco utilizado no Brasil em se tratando do transporte coletivo.

Além da questão ambiental, evidenciada pela redução das emissões, há também o fator socioeconômico ligado ao ciclo produtivo do biodiesel. A indústria do biodiesel tem um potencial maior que a dos outros combustíveis para distribuir renda entre as mais variadas classes sociais, principalmente num país com grande potencial agrícola como o Brasil. Esse fato pode ser constatado devido à possibilidade de se obter biodiesel não só a partir da cultura de grãos em larga escala, como o biodiesel de soja, mas também da possibilidade de se utilizar culturas locais ligadas à atividade de pequenos agricultores, como a da mamona, dendê e o pinhão manso (Bueno, 2006).

No que diz respeito à parte técnica, a substituição do diesel pelo biodiesel pode ser feita sem a necessidade de alterações mecânicas no veículo, em especial quando este for adicionado ao diesel em certa porcentagem conhecida, como prevê a legislação brasileira na lei n.º 11.097 de 13 de janeiro de 2005 (Brasil, 2005), no qual a partir de 2008 todo diesel comercializado no Brasil deve ter 5% de biodiesel na sua constituição, assim a linha de base do projeto seria menor. Alguns problemas podem ocorrer devido ao fato do biodiesel possuir poder calorífico inferior ao diesel, que resultaria num maior consumo específico de combustível, mas devido à presença de maior quantidade de moléculas de oxigênio em sua composição seu rendimento é maior, compensando essa diferença (Laurindo e Bussyguin, 1992 *in* Kozerski e Hess, 2006).

Apesar dos benefícios da substituição do diesel pelo gás natural, esse é um processo oneroso que por muitas vezes pode inviabilizar economicamente a troca de combustível, pois acarretaria na substituição

dos atuais motores do ciclo diesel por motores do ciclo otto em toda frota de transporte coletivo (Kozerski e Hess, 2006).

3.2. Balanço de massa

A Tabela 6 apresenta as emissões do transporte coletivo de Cascavel utilizando diferentes combustíveis, encontradas pelo balanço de massa.

Tabela 6: Emissão de CO₂ determinada pelo balanço de massa, utilizando diferentes combustíveis.

Combustíveis	Emissões CO ₂ (Mg.mês ⁻¹)
Diesel	782
Biodiesel 100%	683
Gás natural	615

Novamente o diesel foi o combustível com maiores valores de emissão. Utilizando esta metodologia conseguiu-se determinar a emissão de CO₂ para o biodiesel, mas essas emissões podem ser consideradas zero, pois durante a produção do biodiesel há fixação de CO₂ atmosférico no crescimento da biomassa, a qual será convertida em combustível.

Comparando os resultados encontrados nas duas metodologias, apesar da diferença entre eles (no caso do diesel 24% e do gás natural 36,59%), esses valores podem ser considerados próximos devido aos fatores que foram desconsiderados durante a realização dos cálculos (como no caso do balanço de massa que desconsiderou as emissões de CO e HC pela queima incompleta do combustível). Assim, pode-se ressaltar a importância da metodologia *bottom-up* na elaboração de projetos de MDL, comprovando a eficácia dos inventários de emissões já realizados utilizando esta metodologia.

3.3. Linha de Base e Adicionalidade

A Tabela 7 apresenta a comparação entre as linhas de base e adicionalidades encontradas para cada metodologia utilizada, considerando dois cenários: substituição do diesel por gás natural e substituição do diesel por biodiesel.

Tabela 7: Linha de base e adicionalidade para substituição de diesel por gás natural e biodiesel, abordando metodologia *bottom-up* e balanço de massa.

Metodologia	Linha de base (MgCO ₂ .mês ⁻¹)	Adicionalidade, gás natural (MgCO ₂ .mês ⁻¹)	Adicionalidade, biodiesel (MgCO ₂ .mês ⁻¹)
"Bottom-up"	630	180	N.d
Balanço de massa	782	166	98

Nota: N.d. - Não determinado.

Na Tabela 7 foram apresentados diferentes cenários para o transporte coletivo de Cascavel. Os valores da adicionalidade, do gás natural e do biodiesel foram determinados pela diferença entre as emissões de CO₂ encontradas (Tabela 5 para o *bottom-up* e Tabela 6 para balanço de massa). Apesar dos valores de adicionalidade para o gás natural serem maiores, um projeto de MDL com a utilização do biodiesel sempre será mais adicional que um com gás natural. Isso por que o biodiesel é oriundo da biomassa, ou seja, uma fonte renovável de energia que apresenta ciclo de emissões fechado, tudo o que for emitido de carbono será removido da atmosfera durante o crescimento da biomassa. Enquanto o gás natural não tem essa vantagem por ser um combustível fóssil.

Os valores encontrados de adicionalidade da substituição do diesel pelo gás natural para ambas as metodologias apresentaram pouca variação, em torno de 8%. Assim, pode-se dizer que esses valores são representativos da realidade e podem ser utilizados na construção de um projeto de MDL. Considerando esse projeto com duração de sete anos, têm-se a redução de emissões de 15.141 MgCO₂ para o *bottom-up* e 14.014 MgCO₂ para o balanço de massa. Com esses valores, o projeto seria enquadrado na classificação de Projeto de Pequena Escala (redução menor que 60.000 MgCO₂.ano⁻¹) (CGEE, 2008). Porém, para a realização do projeto de MDL para substituição por gás natural, fatores como o custo da troca de motores ou adaptação destes deve ser levado em conta, a fim de se determinar a viabilidade do projeto, uma vez que os custos de implementação podem superar o recursos obtidos com as RCE. Há também a dificuldade de comprovar se esse projeto trará o desenvolvimento sustentável da região de Cascavel, visto que o combustível utilizado seria importado de outros países, diminuindo a geração de renda para a população local, e não deixa de ser um combustível fóssil.

Pelo método *bottom-up* não foi possível determinar a adicionalidade do projeto de MDL, pois não foi encontrado o fator de emissão na literatura. Entretanto, considerando o que Peterson e Hustrulid (1998) estipularam para projetos de MDL de substituição de combustíveis de diesel por biodiesel, a cada quilograma de diesel não utilizado, uma taxa equivalente de 3,11 kg de CO₂, além de um adicional de 15 a 20% devido à energia utilizada na sua produção, não será emitido. Assim, tem-se a emissão de 8.800 RCE ao ano, contando num período de projeto de sete anos tem-se 61.600 RCE, referente à quantidade de carbono que deixou de ser emitida, classificando o projeto como de grande escala (redução de mais de 60.000 MgCO₂.ano⁻¹). Mas para fins práticos de projeto, pode-se ignorar a emissão de 1.601 RCE para enquadrar o projeto como de pequena escala, o que reduz os custos de aprovação e elaboração do projeto, bem como as exigências da Organização das Nações Unidas (ONU). Mesmo assim, há a necessidade de se provar que o projeto será responsável pela distribuição de renda no município principalmente entre as comunidades menos favorecidas (CGEE, 2008).

Como não são necessárias modificações estruturais no motor dos ônibus e microônibus, somente regulação para injeção de maior volume de oxigênio na câmara de combustão, os custos do projeto se limitam à produção e compra do biodiesel, também à divulgação do projeto e custos referentes a registro, validação, verificação e monitoramento do projeto pela Agencia Nacional Designada (AND), Entidade

Operacional Designada (EOD) e Conselho de Mudanças Climáticas (CEMC).

De modo geral, já existem ações com intuito de substituir o diesel, como a aplicação da lei do biodiesel (n.º 11.097 de 13 de janeiro de 2005) aliada a empresas que, movidas muitas vezes mais por interesse econômico que ambiental, vêm convertendo suas frotas de veículos à diesel em veículos à biodiesel ou mesmo gás natural. Entretanto, antes de se afirmar com convicção que o biodiesel é realmente um combustível mais limpo, com emissões menores, seria interessante a realização da Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos diferentes combustíveis, contabilizando suas emissões desde sua produção até o consumo final. Ainda no caso do biodiesel, a ACV deve incluir as emissões decorrentes da mudança de uso da terra, ou seja, da retirada de cobertura vegetal natural (floresta) durante o cultivo de culturas utilizadas na fabricação do biodiesel.

4. Conclusões

Visto que as emissões de poluentes foram maiores com a utilização do diesel, fica clara a necessidade de se adotar novos combustíveis em substituição a este, a fim de melhorar a qualidade do ar em ambientes urbanos. A substituição do diesel por outros combustíveis, além do ganho ambiental proporcionado, traria benefícios econômicos ao país, devido à diversificação da matriz energética, ao reduzir a dependência do país por petróleo, a geração de novos postos de trabalho para a produção de novos combustíveis e desenvolvimento de pesquisas para a melhoria do aproveitamento energético dos combustíveis fósseis e da biomassa.

O sistema de transporte coletivo de Cascavel apresentou grande potencial de aplicação de um projeto de MDL devido à substituição de combustíveis, diesel pelo biodiesel. Esse projeto fica mais importante quando consideramos o potencial agrícola da região Oeste do Estado do Paraná, o qual possibilitaria a obtenção de biodiesel das mais diferentes fontes de biomassa, desde a soja, o pinhão-mansão, e até mesmo do óleo de cozinha usado proveniente das habitações de Cascavel e cidades circunvizinhas.

É importante ressaltar que este trabalho representa apenas uma estimativa da emissão de poluentes, levando em consideração a grande quantidade de variáveis que alteram a composição dos gases de escape dos veículos, como manutenção dos motores, idade da frota, condições de uso do veículo, qualidade e procedência do combustível usado, etc. Para determinar com precisão estas emissões, seria necessário um estudo de campo com a mediação direta dos poluentes emitidos no escapamento dos veículos. Ainda assim, este estudo já demonstra a necessidade de se buscar alternativas à utilização de diesel como combustível do transporte coletivo, não só em Cascavel, mas em outras cidades que adotam tal sistema.

5. Agradecimentos

À equipe da Companhia de Engenharia de Transporte e Trânsito de Cascavel, pelo fornecimento dos dados necessários para realização deste trabalho.

Referências

- ÁLVARES JR., O.M.; LACAVAL, C.I.V.; FERNANDES, P.S. 2002. *Tecnologias e gestão ambiental – Emissões atmosféricas*. Brasília, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), 373 p.
- ÁLVARES JR., O.M.; LINKE, R.R.A. 2001. *Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil*. São Paulo, CETESB, 182 p.
- BRASIL. 2005. Lei n.º11.097 de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 14 jan. Disponível em: <http://www.soleis.com.br/L11097.htm>. Acesso em: 25/08/2008.
- BRASIL. 2002. Ministério de Minas e Energia. Agência nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 104, de 08 de julho de 2002.
- BUENO, A.V. 2006. *Análise da operação de motores diesel com misturas parciais de biodiesel*. Campinas, SP. Tese de Doutorado. UNICAMP, 120 p.
- CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. 2008. *Manual de capacitação sobre mudança do clima e projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)*. Brasília, CGEE, 276 p.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 2006. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2006*. São Paulo, CETESB, 167 p.
- CETTRANS - COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRANSPORTE E TRÂNSITO. 2008. Transporte Coletivo de Cascavel [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por transportecoletivo@cettrans.com.br em 04/03/2008.
- COSTA NETO, P.R.; ROSSI, L.F.S.; ZAGONEL, G.F.; RAMOS, L.P. 2000. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel, através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. *Química Nova*, **23**(4):531-537.
- ECEN – REVISTA ECONOMIA & ENERGIA. 2008. Avaliação das emissões de veículos pesados, **25**. Disponível em: <http://ecen.com/matriz/eee25/veiculp5.htm>. Acesso em: 23/09/2008.
- EIA/DOE – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY/ORGANISATION FOR CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. 2003. *Flexibility in natural gas supply and demand*. Paris, IEA Publications, 273 p.
- FERRARI, R.A.; OLIVEIRA, V.S.; SCABIO, A. 2005. Biodiesel de soja - Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físicoquímica e consumo em gerador de energia. *Química Nova*, **28**(1):19-23.
- GASNET. 2008. Gás Natural, O Gás. Disponível em: http://www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/gas_

completo.asp. Acesso em: 23/09/2008.

KOZERSKI, G.R.; HESS, S.C. 2006. Estimativa dos poluentes emitidos pelos ônibus e microônibus de Campo Grande/MS, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural. *Revista Engenharia Sanitária-Ambiental*, **11**(2):113-117.

KUCEK K.T.; DOMINGOS, A.K.; WILHELM, H.M.; RAMOS, L.P. 2004. Considerações sobre o uso de biodiesel como modelo para projetos de MDL. In: C.R. SANQUETA; R. BALBINOT; M.A.B. ZILIOOTTO, *Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas*. Curitiba, Ed. UFPR, p. 192-219.

LANDMANN, M. C. 2004. Estimativa das emissões de poluentes dos automóveis na rmsp considerando as rotas de tráfego. In: Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. São Paulo, ANPPAS, p. 1-11, Disponível em: http://www.anppas.org.br/encontro_anual/encontro2/GT/GT11/marcelo_camilli.pdf. Acesso em: 03/10/2008.

LAURINDO, J.C.; BUSSYGUIN, G. 1992. Estudo preliminar comparativo entre os combustíveis óleo diesel e éster metílico de óleo de soja. In: I Congresso Brasil-Alemanha sobre Energias Renováveis e Recursos Hídricos. Fortaleza, 1992. *Anais...* Fortaleza, GTZ, p. 207-231.

LOBKOV, D.D. 2005. *Análise econômica para a substituição do uso de combustível diesel por GNC no transporte público de passageiros*. Campinas, SP. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 125 p.

MACHADO, G.B.; MELO, T.C.C.; LASTRES, L.F.M. 2008. Utilização de Gás Natural em motores e cenário do uso no Brasil. Disponível em: www2.petrobras.com.br/minisite/premiotecnologia/pdf/TecnologiaGas_GasNatural_Motores.pdf. Acesso em: 15/05/2008.

MATTOS, L.B.R. 2001. *A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa – o caso do município do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ. Tese de Mestrado. UFRJ, 222 p.

NTU. 2003. Dados estatísticos da confederação nacional dos transportes urbanos – NTU. Brasília, Confederação Nacional dos Transportes Urbanos. Disponível em: www.ntu.org.br. Acesso em: 15/05/2008.

OLIVEIRA FILHO, A.D. 2006. *Substituição de diesel por gás natural em ônibus do transporte público urbano*. São Paulo, SP. Dissertação de Mestrado. USP, 193 p.

PETERSON, C. L.; HISTRULID, T. 1998. Carbon cycle for rapeseed oil biodiesel fuel. *Biomass and Bioenergy*, **14**(2):91-101.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A. 2006. Óleo diesel. Disponível em <http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf#http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf/0/FC04353360FFF67603256DAD004D0E47?OpenDocument&SGrandes+Consumidores>. Acesso em: 15/05/2008.

POSTALI, F.A.S. 2002. *Renda mineral, divisão de riscos e benefícios governamentais na exploração de petróleo no Brasil*. Rio de Janeiro, BNDES, 96 p.

ROCHA, M.T. 2004. Mudanças climáticas e mercado de carbono. In: C.R. SANQUETA; R. BALBINOT; M.A.B. ZILIOOTTO, *Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas*. Curitiba, Ed. UFPR, p. 39-54.

SANTOS, S.M. 2001. *Análise comparativa das alternativas energéticas em corredores de transporte público*.

Campinas, SP. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 90 p.

SCHIRMER, W.N. 2004. *Amostragem, análise e proposta de tratamento de compostos orgânicos voláteis (COV) e odorantes em estação de despejos industriais de refinaria de petróleo*. Florianópolis, SC. Dissertação de Mestrado. UFSC, 140 p.

SIQUEIRA, M.R.D.; PAES, R.P.; FIGUEIREDO, G.S.; LESMO, R.F.; SATO, M.C.S. 2007. Estimativa dos poluentes emitidos pelos ônibus e microônibus de Cuiabá e Várzea Grande – MT, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural. *In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Belo Horizonte, 2007. *Anais...* Belo Horizonte, 8 p.

Submissão: 30/11/2008

Aceite: 30/08/2009