

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE QUÍMICA E BIOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA TECNOLÓGICA

RAFAEL NASCIMENTO
WILSON ZIMMERMAM SANTOS JUNIOR

**COMPARAÇÃO DE EMISSÕES PROVENIENTES DA COMBUSTÃO
DE BIODIESEL E DE SUAS MISTURAS COM O DIESEL EM MOTOR
DO CICLO DIESEL E ASPECTOS ECONÔMICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2012

RAFAEL NASCIMENTO
WILSON ZIMMERMAM SANTOS JUNIOR

**COMPARAÇÃO DE EMISSÕES PROVENIENTES DA COMBUSTÃO
DE BIODIESEL E DE SUAS MISTURAS COM O DIESEL EM MOTOR
DO CICLO DIESEL E ASPECTOS ECONÔMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel, do Curso de Bacharelado em Química Tecnológica, do Departamento Acadêmico de Química e Biologia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Ramos da Costa Neto

Co-orientador: Giuliano Fernandes Zagonel

Co-orientador: Wellington W. D. Vechiatto

CURITIBA

2012

**RAFAEL NASCIMENTO
WILSON Z. SANTO JUNIOR**

**COMPARAÇÃO DE EMISSÕES PROVENIENTES DA COMBUSTÃO
DE BIODIESEL E DE SUAS MISTURAS COM O DIESEL EM MOTOR
DO CICLO DIESEL E ASPECTOS ECONÔMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de BACHAREL EM QUÍMICA TECNOLÓGICA pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

Membro 1 – PROF^a. DR^a. ÉRIKA PEREIRA FELIX
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Membro 2 – PROF^a. DR^a. VALMA MARTINS BARBOSA
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Orientador – PROF. DR. PEDRO RAMOS DA COSTA NETO
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Coordenador de Curso – PROF. DR. JOÃO BATISTA FLORIANO

Curitiba, 22 de junho de 2012.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), principalmente ao setor de biocombustíveis (CERBIO), por toda a estrutura e atenção oferecida, e a distribuidora RDP pela doação do óleo diesel e biodiesel metílico utilizados nos estudos.

Agradecemos também ao professor, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dr. Pedro Ramos da Costa Neto que tornou possível o contato com a distribuidora RDP, forneceu o equipamento analisador de gases *ECIL* 6000 e nos orientou durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

NASCIMENTO, Rafael; JUNIOR, Wilson Zimmermam Santos. Comparação de emissões provenientes da combustão de biodiesel e de suas misturas com o diesel em motor do ciclo diesel e aspectos econômicos. 2012. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Tecnológica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

A utilização de biodiesel é uma alternativa para substituir o diesel em motores do ciclo diesel sem modificar a operacionalidade e o desempenho desses equipamentos. Isso com o intuito de reduzir as emissões de poluentes danosos ao meio ambiente e a dependência pelo óleo diesel. Este trabalho teve como objetivo quantificar e comparar as emissões (NO_x , CO, e SO_2) e os consumos provenientes da combustão do biodiesel, de misturas biodiesel-diesel e do diesel puro em motor do ciclo diesel estacionário para mostrar as vantagens e as desvantagens econômicas e ambientais com o uso de biodiesel como combustível. As misturas biodiesel-diesel foram feitas com diesel S500 e S1800 e biodiesel etílico de nabo forrageiro nas proporções B5, B10, B20, B40 e B80. O motor usado foi um moto gerador da marca Maquigeral, através do qual foi quantificada a energia elétrica gerada para cada combustível utilizado e, assim, comparou-se o custo para obter energia com moto gerador com o custo para obter energia da rede de distribuição da COPEL em horário de ponta. Os resultados mostraram que o biodiesel puro foi o combustível que mais gerou NO_x e o B20 com diesel S1800 foi o que menos gerou. Já no caso da emissão de CO, o diesel S500 foi o combustível que mais emitiu e o B80 com diesel S500 foi o que menos emitiu. O diesel S500 e o B80 com diesel S500 foram os combustíveis com maior e menor viabilidade econômica, respectivamente, usados no moto gerador. As misturas B10 e B20 apresentaram as maiores vantagens ambientais e econômicas quando usadas como combustíveis no motor diesel.

Palavras-chave: Comparação. Emissões. Biodiesel. Diesel. Aspectos econômicos.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Rafael; JUNIOR, Wilson Zimmermam Santos. Comparison of emissions from the combustion of biodiesel and its blends with diesel in diesel engine cycle and economic aspects. 2012. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Tecnológica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

The use of biodiesel is an alternative to replace diesel in diesel engines without modifying the operation and performance of such equipment. This in order to reduce emissions of pollutants harmful to the environment and dependence on diesel. This study aimed to quantify and compare the emissions (NO_x , CO, e SO_2) and fuel consumption from the combustion of biodiesel, biodiesel-diesel blends and pure diesel in stationary diesel engine cycle to demonstrate the advantages and disadvantages environmental and economic due to the use of biodiesel as fuel. The biodiesel-diesel blends were made with S500 and S1800 diesel and forage turnip ethyl biodiesel in proportions B5, B10, B20, B40 and B80. The engine used that study was a motor generator brand Maquigeral, by which it was quantified the electric energy generated for each fuel used and, then, the cost to obtain electric energy using motor generator was compared with the cost to obtain electric energy from the distribution network of COPEL in peak time. The results showed that pure biodiesel was the fuel that generated more NO_x and the B20 with S1800 diesel was the fuel that produced less NO_x . Already the S500 diesel was the fuel that generated more CO and the B80 with S500 diesel was the fuel that produced less CO. The S500 diesel and the B80 with S500 diesel were the fuels with higher and lower economic viability, respectively, used in the motor generator. The B10 and B20 blends had the highest environmental and economic advantages when used as fuels in the diesel engine.

Keywords: Comparison. Emissions. Biodiesel. Diesel. Economic aspects.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA BÁSICO DO PROCESSO DE TRANSESTERIFICAÇÃO.....	14
FIGURA 2 – REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO.....	15
FIGURA 3 – ALTERAÇÕES PERCENTUAIS NAS EMISSÕES DE NO _x , CO, PM E HC EM DIFERENTES PERCENTUAIS DE BIODIESEL NA MISTURA COM O DIESEL.....	18
FIGURA 4 – PERFIL DE CONSUMO DE DIESEL, DE MISTURAS DIESEL-BIODIESEL E DE DIESEL EM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA.....	22
FIGURA 5 – FOTOGRAFIA DA USINA PILOTO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL.....	24
FIGURA 6 – ESQUEMA DA REAÇÃO DE FORMAÇÃO DO CATALISADOR METILATO DE SÓDIO.....	25
FIGURA 7 – FOTOGRAFIA DO ANALISADOR PORTÁTIL DE EMISSÕES.....	27
FIGURA 8 – FOTOGRAFIA DO MOTO GERADOR.....	28
FIGURA 9 – FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE EXAUSTÃO ADAPTADO.....	29
FIGURA 10 – FOTOGRAFIA DO SISTEMA PARA MUDANÇA DE COMBUSTÍVEL.....	30
FIGURA 11 – PERFIL DE EMISSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO DO BIODIESEL ETÍLICO E DO BIODIESEL METÍLICO DURANTE O TEMPO DE ANÁLISE.....	36
FIGURA 12 – GERAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO PROVENIENTE DA COMBUSTÃO DO BIODIESEL ETÍLICO, DO DIESEL S1800 E DAS MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	37
FIGURA 13 – GERAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO BIODIESEL ETÍLICO, DO DIESEL S1800 E DAS MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	39
FIGURA 14 – GERAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO PROVENIENTE DA COMBUSTÃO DO BIODIESEL ETÍLICO, DO DIESEL S500 E DAS MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	41
FIGURA 15 – GERAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DO BIODIESEL ETÍLICO, DO DIESEL S500 E DAS MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	42
FIGURA 16 – CONSUMO VOLUMÉTRICO ESPECÍFICO DO BIODIESEL ETÍLICO, DO DIESEL S1800 E DAS MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	44
FIGURA 17 – CONSUMO VOLUMÉTRICO ESPECÍFICO DO BIODIESEL ETÍLICO, DO DIESEL S500 E DAS MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	45
FIGURA 18 – CUSTO PARA A OBTENÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BIODIESEL ETÍLICO, DIESEL S1800 E MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	48
FIGURA 19 – CUSTO PARA A OBTENÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BIODIESEL ETÍLICO, DIESEL S500 E MISTURAS DESSES DOIS COMBUSTÍVEIS.....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARATIVO ENTRE METANOL E ETANOL VISANDO A PRODUÇÃO DE BIODIESEL.....	15
TABELA 2 – COMPARATIVO ENTRE ÉSTER METÍLICO E ÉSTER ETÍLICO OBTIDOS NA TRANSESTERIFICAÇÃO.....	15
TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO BIODIESEL.....	17
TABELA 4 – EMISSÕES MÉDIAS DO BIODIESEL COMPARADAS AO DIESEL.....	19
TABELA 5 – TAXA DE EMISSÃO DE PM _{2,5} , THC, NO _x E CO.....	20
TABELA 6 – QUANTIDADES DE DIESEL E BIODIESEL ETÍLICOS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS.....	26
TABELA 7 – POTÊNCIA DO MOTOR DURANTE AS MEDIÇÕES.....	30
TABELA 8 – CUSTO ESTIMADO DE CADA COMBUSTÍVEL UTILIZADO NESSE ESTUDO.....	33
TABELA 9 – VALORES OBTIDOS NA CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL DE NABO FORRAGEIRO VIA ROTA ETÍLICA E NORMAS UTILIZADAS.....	34
TABELA 10 – CUSTO PARA A OBTENÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO MOTO GERADOR E DA REDE DA COPEL.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	11
1.1.2 Objetivos Específicos.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 ÓLEO DIESEL.....	13
2.2 MOTOR DO CICLO DIESEL.....	13
2.3 BIODIESEL.....	13
2.4 EMISSÕES.....	17
2.5 LEGISLAÇÃO REFERENTE À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	21
2.6 CONSUMO EM GERADOR DE ENERGIA E PREÇOS DE COMERCIALIZAÇÃO.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL ETÍLICO.....	23
3.2 PREPARO DOS COMBUSTÍVEIS ANALISADOS.....	26
3.3 ANALISADOR DE EMISSÕES.....	26
3.4 MOTO GERADOR.....	28
3.5 MEDIÇÕES DAS EMISSÕES E DO CONSUMO DE CADA COMBUSTÍVEL.....	28
3.5.1 Emissões.....	28
3.5.2 Consumo.....	32
3.6 VIABILIDADE ECONÔMICA.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL ETÍLICO.....	34
4.2 EMISSÕES.....	35
4.2.1 Comparação entre o biodiesel etílico e o biodiesel metílico.....	35
4.2.2 Misturas com Diesel S1800.....	36
4.2.2.1 <i>Emissão de Monóxido de Carbono (CO)</i>	36
4.2.2.2 <i>Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NO_x)</i>	38
4.2.3 Misturas com Diesel S500.....	40
4.2.3.1 <i>Emissão de Monóxido de Carbono (CO)</i>	40
4.2.3.2 <i>Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NO_x)</i>	42
4.3 CONSUMO.....	43
4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
6 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXOS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética, imposta por uma sociedade consumista, vem causando impactos negativos ao meio ambiente, principalmente pela queima de combustíveis fósseis, como o óleo diesel, e controles ineficientes das emissões de poluentes originados pela combustão desses combustíveis. É neste contexto que estudos em novas tecnologias, que visem reduzir emissões danosas ao meio ambiente, se tornam imprescindíveis.

Os combustíveis fósseis, quando sofrem o processo de combustão, liberam substâncias como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x = NO + NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), material particulado (MP), entre outras. Tais substâncias, principalmente quando em excesso no ambiente, podem causar danos a saúde humana, aquecimento global, chuva ácida, danos à vegetação e às estruturas materiais, com significativas perdas econômicas (QUINTELLA, 2009).

É neste cenário preocupante que surge o biodiesel, como tentativa de substituição do óleo diesel por biomassa. Esse biocombustível é obtido, principalmente, através da reação de óleo vegetal ou gordura animal com um álcool de cadeia curta (normalmente metanol) na presença de um catalisador (usualmente uma base, podendo ser um ácido), resultando em um éster de alquila (biodiesel) e glicerol; processo conhecido como transesterificação (KNOTHE et al., 2005).

O biodiesel possui características físico-químicas semelhantes às do diesel, o que possibilita a sua utilização nos motores do ciclo Diesel (ignição por compressão), sem necessitar de adaptações nesses motores (TOLMASQUIM, 2003, p. 133). Devido a essas semelhanças, o biodiesel pode substituir totalmente ou parcialmente (mistura) o óleo diesel usado em caminhões, tratores, automóveis, geradores, entre outros. Além disso, pode ser misturado ao diesel em diferentes porções, sendo que a mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é chamada de B2 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100 (PORTAL BODIESEL, 2011).

Em 2010 o Brasil produziu 2,4 bilhões de litros de biodiesel, com uma capacidade instalada, no mesmo ano, de 5,8 bilhões de litros. Além disso, em 1º de Janeiro de 2010, através da resolução nº6/2009 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), publicada no Diário Oficial da União (DOU), em 26 de outubro

de 2009, ficou estabelecido o percentual de 5% biodiesel em misturas com o óleo diesel (ANP, 2011).

A indústria de biocombustíveis no Brasil está ganhando cada vez mais força, tendo em vista que a utilização de biodiesel e etanol equilibra o balanço de CO₂ na atmosfera, pois a quantidade que é emitida na combustão nos motores é absorvida, totalmente ou parcialmente, no cultivo de cana-de-açúcar e de oleaginosas. Além disso, a obrigatoriedade da adição de álcool anidro na gasolina e biodiesel no diesel também contribuiu para impulsionar o desenvolvimento das indústrias de biocombustíveis (ROCHA; GNOATTO, 2008).

A produção e a utilização do biodiesel no Brasil proporcionam o desenvolvimento de aspectos ambientais, econômicos e sociais. Assim, o país reduz as importações de óleo diesel, fortalece as economias locais e regionais e beneficia muitos agricultores que investem no plantio de oleaginosas, estas que são fontes de óleos precursores do biodiesel. Além disso, o aumento do uso de biodiesel favorece a diminuição de emissões que poluem o ar (ANP, 2011).

Atualmente o uso de biodiesel em substituição, parcial ou integral, ao diesel está ganhando grande importância, sendo até mesmo usado como *marketing* por algumas empresas de transporte, pois se trata, na teoria, de um combustível ecologicamente correto. No entanto, são necessários estudos que mostrem o real impacto ambiental (produção e consumo) causado por esse biocombustível, levando em consideração parâmetros que podem desqualificar ou qualificar o uso desse combustível como, a origem do biodiesel, o tipo de motor que será usado (injeção eletrônica ou mecânica, estacionário ou móvel, entre outros) e a potência do motor. Outro fator de extrema importância ambiental, e que está diretamente ligado aos parâmetros citados anteriormente, é a quantificação das emissões provenientes do biodiesel e misturas biodiesel-diesel. Desta forma, é possível inferir se há emissão de outros gases prejudiciais ao ambiente, além do dióxido de carbono, que é o mais citado quando se fala de emissões de combustíveis e aquecimento global.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo quantificar as emissões (NO_x , CO, e SO_2) e os consumos provenientes da combustão do biodiesel e de misturas biodiesel-diesel em motor do ciclo diesel estacionário. Isto, a fim de comparar os resultados obtidos com as emissões e o consumo provenientes da queima do óleo diesel puro e, então, mostrar as vantagens e/ou desvantagens da utilização do biodiesel ou misturas entre biodiesel e diesel de petróleo como combustível.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Conhecer as rotinas de uma indústria piloto de produção de biodiesel.
- Realizar a caracterização do biodiesel produzido.
- Quantificar e comparar emissões e consumos provenientes da combustão de biodiesel, misturas biodiesel-diesel S1800, misturas biodiesel-diesel S500 e diesel puro (S1800 e S500).
- Comparar o custo da produção de energia elétrica utilizando biodiesel, misturas biodiesel-diesel S1800, misturas biodiesel-diesel S500 e diesel puro (S1800 e S500) em moto gerador, com o valor do quilowatt-hora cobrado pela Companhia Paranaense de Energia no horário de maior consumo.
- Mostrar vantagens e/ou desvantagens econômicas e ambientais com a utilização do biodiesel em motores do ciclo diesel.

1.2 JUSTIFICATIVA

A preocupação ambiental, devido às emissões de poluentes provenientes de combustíveis fósseis, está fazendo com que surjam combustíveis alternativos menos danosos ao ambiente (biocombustíveis). Além disso, outra forte razão para o desenvolvimento tecnológico dos biocombustíveis é “diminuir a dependência externa de petróleo, por razões de segurança de suprimento ou impacto na balança de pagamentos” (LEITE; LEAL, 2007).

Ademais, estudos que envolvam biocombustíveis, como biodiesel e etanol, são extremamente importantes para a otimização dos processos, tanto de produção desses combustíveis, quanto de adequação de motores para receber essas matrizes energéticas, e para o controle de emissões atmosféricas originadas em sua combustão.

Uma questão interessante abordada nesse trabalho é a verificação da viabilidade econômica ao utilizar biodiesel, misturas biodiesel-diesel e diesel puro como fonte de energia elétrica, nos horários de maior consumo (18 às 21 horas), tendo como base de comparação o valor do quilowatt-hora cobrado neste horário. Além disso, a comparação das emissões provenientes dos combustíveis com diferentes teores de biodiesel e as emissões de combustíveis puros é de grande importância para ratificar ou não o termo combustível “verde”, este referente ao biodiesel.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÓLEO DIESEL

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, composto por átomos de hidrogênio e carbono e, em pequenas quantidades, por enxofre, nitrogênio e oxigênio (PORTAL BR, 2011). Além disso, o diesel possui uma série de padrões de especificação, sendo que os que mais afetam a emissão de poluentes são: número de cetano, teor de enxofre, teor de aromáticos e densidade (FERREIRA et al., 2008). Atualmente, no Brasil, são comercializados os diesel S50, S500 e S1800, que são combustíveis com teores máximos de enxofre de 50 ppm, 500 ppm e 1800 ppm, respectivamente (PETROBRAS DISTRIBUIDORA, 2012).

2.2 MOTOR DO CICLO DIESEL

Os motores do ciclo diesel são usados para gerar energia em equipamentos que necessitem de elevada potência, como ônibus, grandes caminhões, tratores, máquinas para mineração, geradores (motores estacionários), entre outros. Esses motores apresentam características como durabilidade, segurança e eficiência, as quais favorecem a sua utilização em muitas máquinas, mesmo havendo problemas relacionados com a complexidade das emissões e dos níveis de poluentes emitidos (BRAUN et al., 2003).

Nesses motores a ignição ocorre por auto-ignição do combustível, sem utilizar uma centelha, como no caso de motores à gasolina ou álcool. Para o funcionamento do motor diesel, o ar é aspirado para o interior do cilindro e, então, é comprimido pelo pistão até atingir aproximadamente 500°C. Na sequência, o combustível é injetado para dentro da câmara de combustão, mistura-se com o ar aquecido e entra em auto-ignição (PETROBRAS DISTRIBUIDORA, 2012).

2.3 BIODIESEL

O biodiesel pode ser produzido a partir de gordura animal ou de óleos vegetais, os quais podem ser de mamona, dendê, girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso, soja, entre outros (QUINTELLA et al., 2009). Outra fonte de matéria-

prima para o biodiesel é o óleo de fritura residual, o qual é economicamente mais interessante em relação aos óleos vegetais virgens, bem como sua utilização reduz a poluição de corpos hídricos, as emissões de gases do efeito estufa e contaminações do solo (TOLMASQUIM, 2003, p. 138).

A obtenção do biodiesel pode ser feita através da reação de esterificação de ácidos graxos com metanol ou etanol e do hidrotratamento e refino do bio-óleo, originado a partir da pirólise da biomassa lignocelulósica (QUINTELLA et al., 2009). Porém, o principal processo para obter o biodiesel é chamado de transesterificação (ou alcoólise) alcalina homogênea, no qual ocorre a reação de óleo vegetal ou gordura animal, que são compostos basicamente de tri-ésteres da glicerina com ácidos graxos, com metanol ou etanol na presença de um catalisador, resultando no biodiesel (mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos) e glicerol (SUAREZ et al., 2009). As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, o fluxograma básico do processo de transesterificação e a reação de transesterificação.

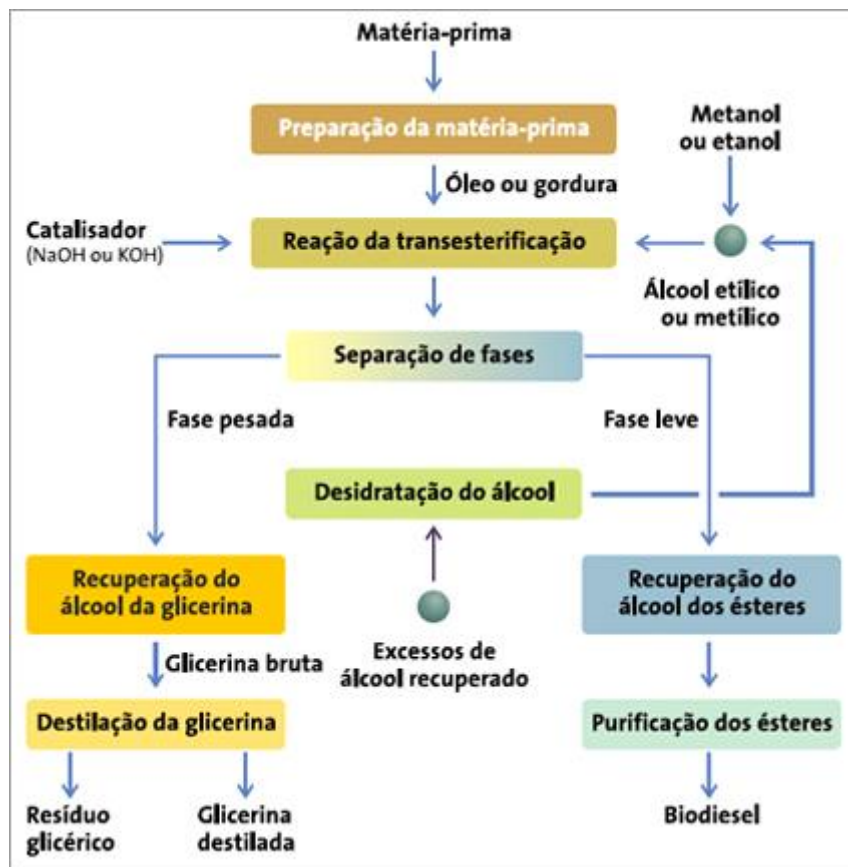


Figura 1 – Fluxograma básico do processo de transesterificação
Fonte: Tn sustentável (2011).

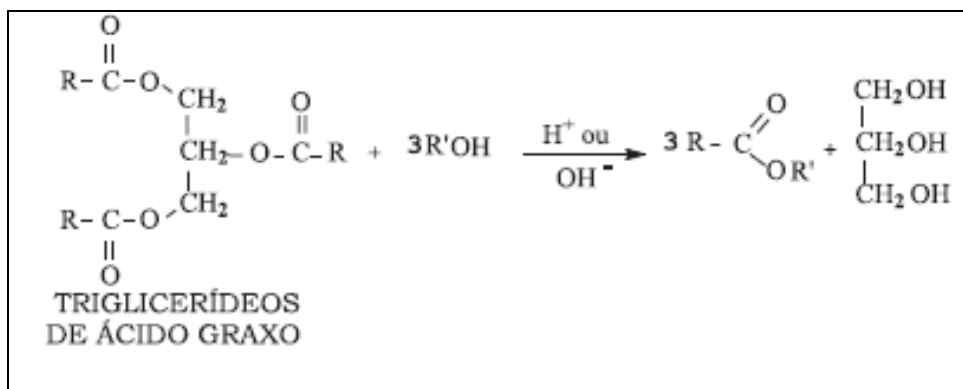


Figura 2 – Reação de transesterificação

Fonte: Ferreira et al. (2008).

Os alcoóis mais utilizados na reação são o etanol e o metanol. Este último apresenta maior eficiência no processo de transesterificação (PARENTE et al., 2003 apud HIROSE; FACHINETTO, 2009). As Tabelas 1 e 2 mostram dados comparativos entre a utilização do metanol e do etanol, visando à produção de biodiesel.

Tabela 1 – Comparativo entre Metanol e Etanol visando à produção de biodiesel.

Quantidades e condições médias aproximadas	Rotas de Processo	
	Metílico	Étilico
Quantidade (metanol/etanol) utilizada por 1000 litros de biodiesel (kg)	90	130
Temperatura para reação (°C)	60	85
Tempo de reação (min)	45	90

Fonte: Parente, 2003 (apud HIROSE; FACHINETTO, 2009, p. 33).

Tabela 2 – Comparativo entre Éster Metílico e Éster Étilico obtidos na transesterificação.

Propriedades	Éster Metílico	Éster Étilico
Taxa de conversão	97,5%	94,3%
Glicerina total no Biodiesel	0,87%	1,40%
Potência frente ao Diesel	-2,5%	-4,0%
Consumo frente ao Diesel	+10%	+12%

Fonte: Macedo; Nogueira, 2004 (apud HIROSE; FACHINETTO, 2009, p. 33).

Além do óleo vegetal (ou gordura animal) e do álcool, há a necessidade de um catalisador para a reação de transesterificação ocorrer com êxito. Os catalisadores podem ser ácidos, básicos ou enzimáticos. Estes possuem menor sensibilidade à presença de água, melhor recuperação e facilidade na separação do biodiesel, porém é uma tecnologia que ainda se encontra em estudo. Os catalisadores ácidos proporcionam uma velocidade de reação muito lenta em relação aos básicos, os quais, como o hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio, são os mais utilizados nos processos de obtenção do biodiesel, pois geram rendimentos superiores a 90%, velocidade de reação muito rápida e são economicamente favoráveis. No entanto, são muito sensíveis à água e a ácidos graxos livres (VIANNA, 2006).

Segundo Ramos et al. (2000), o biodiesel, enquanto produto, tem as seguintes características:

- É virtualmente livre de enxofre e aromáticos;
- Tem alto número de cetano;
- Possui teor médio de oxigênio em torno de 11%;
- Possui maior viscosidade e maior ponto de fulgor que o diesel convencional;
- Possui nicho de mercado específico, diretamente associado a atividades agrícolas;
- Tem preço de mercado relativamente superior ao diesel comercial.

Outro parâmetro importante a ser considerado é a eficiência energética do biodiesel, a qual corresponde a 90% do diesel mineral, resultado de um balanço entre o maior número de cetano e menor poder calorífico do biodiesel (TOLMASQUIM, 2003, p. 140). A Tabela 3 mostra as especificações técnicas do biodiesel, segundo a Resolução ANP nº 7 de 2008.

Tabela 3 – Especificações técnicas do biodiesel.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE
Massa específica a 20° C	kg/m ³	850-900
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	3,0-6,0
Teor de Água, máx.	mg/kg	500
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24
Ponto de fulgor, mín.	°C	100,0
Teor de éster, mín	% massa	96,5
Resíduo de carbono	% massa	0,050
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020
Enxofre total, máx.	mg/kg	50
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5
Fósforo, máx.	mg/kg	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02
Glicerol total, máx.	% massa	0,25
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,20
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	horas	6

Fonte: ANP (2008).

2.4 EMISSÕES

Os principais compostos emitidos durante a combustão do óleo diesel são: monóxido de carbono; dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, óxidos de enxofre, material particulado e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Além desses, é possível encontrar nas emissões aldeídos, cianetos, benzeno, entre outros (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2003). Esses compostos podem ser extremamente prejudiciais ao meio ambiente e aos seres humanos, ou seja, são poluentes atmosféricos. Entretanto, podem ser emitidos em menores quantidades ou até mesmo não emitidos com a utilização do biodiesel puro ou em misturas com o diesel. O contexto em questão é fonte de estudo de muitos pesquisadores que vem tentando mostrar a viabilidade ou não da utilização do biodiesel.

Queiroz (2006 apud GONÇALVES, 2008, p. 31) mostrou que a utilização de biodiesel puro resultou nas reduções das emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e material particulado em 78%, 48%, 67% e 47%, respectivamente, eliminação das emissões de enxofre e aumento de 10% na emissão de NO_x . A Figura 3 mostra a alteração percentual nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) com a utilização de diferentes quantidades de biodiesel misturadas ao diesel.

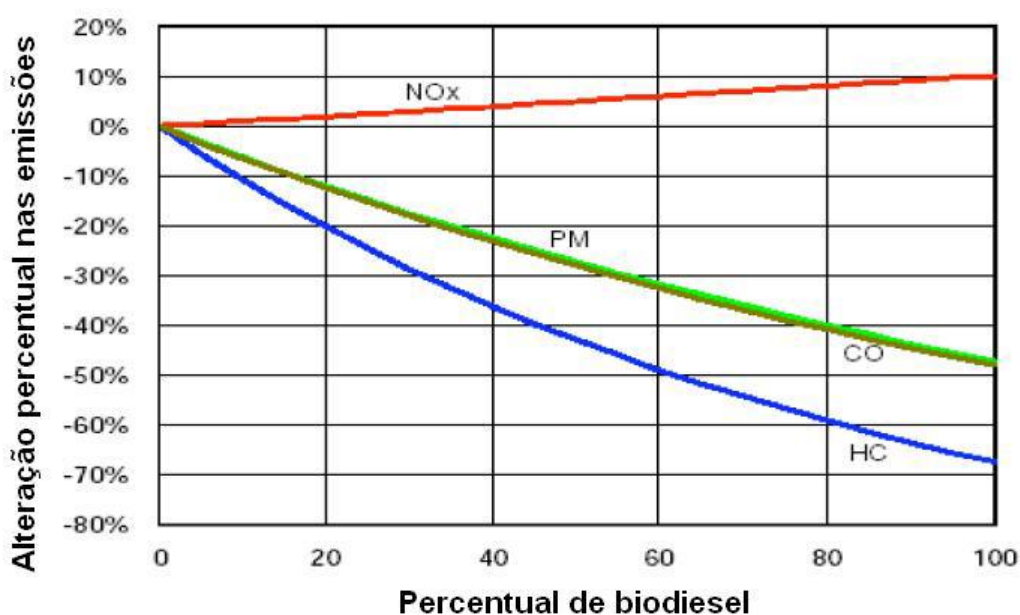


Figura 3 – Alterações percentuais nas emissões de NO_x , CO, PM e HC em diferentes percentuais de biodiesel na mistura com o diesel

Fonte: Queiroz, 2006 (apud GONÇALVES, 2008, p. 32).

Se utilizado puro, o biodiesel pode reduzir em 98% as emissões de enxofre e em 50% as emissões de material particulado, quando comparadas às do óleo diesel. No entanto, com a utilização do biodiesel, há aumento nas emissões de NO_x em torno de 13% e este é precursor do ozônio troposférico, o qual pode causar o *smog* fotoquímico e pode acarretar o surgimento e agravamento de doenças respiratórias (TOLMASQUIM, 2003, p. 142).

Além dos compostos já citados, outros também podem ser emitidos em menores quantidades com a utilização do biodiesel. Isto está demonstrado na Tabela 4, que apresenta uma comparação de emissões do biodiesel puro (B100) e do biodiesel a 20% (B20) na mistura com o óleo diesel.

Tabela 4 – Emissões médias do biodiesel comparadas ao diesel

Tipo de Emissões	B100	B20
Hidrocarbonetos totais não queimados	-67%	-20%
Monóxido de carbono	-48%	-12%
Material particulado	-47%	-12%
NO _x	+10%	+2%
Sulfatos	-100%	-20%
Hidrocarbonetos policíclicos Aromáticos (HPA)	-80%	-13%
HPA Nitrados	-90%	-50%

Fonte: Ferreira et al. (2008).

He et al. (2011) revela que há muitos estudos sobre emissões gasosas, como CO, NO_x, THC (Hidrocarbonetos totais), provenientes do diesel, do biodiesel e de suas misturas, mas há pouco sobre a emissão de particulados, tanto na forma de carbono orgânico, como na forma de carbono elementar. Esses particulados contribuem para a formação de HPA em meio urbano e estão intimamente ligados a doenças respiratórias. Os resultados dos testes realizados por He et al. (2011) para o material particulado com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (PM_{2,5}), CO, NO_x, e THC, com óleo diesel de petróleo (D), biodiesel de óleo de soja (BS) e biodiesel de óleo de fritura (BW), estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Taxa de emissão de PM_{2,5}, THC, NO_x e CO

Combustível	Rotação do motor (rpm)	Carga (%)	Taxa de emissão (mg/min)			
			PM _{2,5}	THC	NO _x	CO
D	1400	50	24,9	300	4466	445
	1400	100	84,2	328	6972	3148
	2300	25	121,0	787	2197	2327
	2300	75	201,4	924	6100	2070
BS	1400	50	58,1	218	5272	430
	1400	100	68,5	382	8011	1816
	2300	25	148,4	381	2607	2460
	2300	75	126,3	683	7179	1827
BW	1400	50	53,0	251	5118	389
	1400	100	65,2	386	8119	1788
	2300	25	204,4	330	2438	1991
	2300	75	137,6	656	7227	1879

Fonte: He et al. (2011).

Como era esperado, houve um aumento na emissão de NO_x e uma redução nas emissões de CO e THC do biodiesel, em relação ao diesel de petróleo. Em relação ao material particulado, a emissão do diesel foi maior em velocidades de rotação do motor maiores, sendo que cerca de 80% de todo PM_{2,5} é carbono elementar e carbono orgânico (HE et al., 2011).

Wang et al. (2004 apud ANDRADE et al., 2005) realizaram testes de emissões em veículos pesados, movidos com óleo diesel e mistura de 35% de biodiesel no diesel (B35). Os resultados dos testes apontaram uma redução de 12% de CO e de 25% para o THC e para o material particulado, com a utilização do B35 em relação ao óleo diesel. Fatos explicados pela maior quantidade de oxigênio e maior número de cetano e, também, menores quantidades de hidrocarbonetos aromáticos e teores de enxofre do B35 em relação ao óleo diesel. O estudo também constatou o aumento de NO_x liberado com a utilização do biodiesel. Estes óxidos (NO_x) são altamente dependentes da pressão e temperatura na câmara de combustão, as quais são elevadas com o uso do biodiesel em relação ao diesel e, juntamente, com o teor de oxigênio no B35 facilitam a formação de NO_x.

Existem, também, estudos que analisaram emissões provenientes de óleos vegetais puros, os quais são fontes para a obtenção do biodiesel. Um estudo, realizado por Gonçalves (2008), quantificou as emissões de CO, NO_x, CO₂, SO₂ e O₂, usando um analisador de gás portátil da marca *ECIL*. Neste estudo, verificou-se que na combustão de óleos vegetais, em relação ao diesel, houve uma maior formação de NO_x e CO₂, aquele devido a uma temperatura de combustão maior. Para o SO₂, os níveis ficaram abaixo do limite de detecção do equipamento e o CO ocorreu em menor quantidade na queima do óleo de soja, seguido do diesel comum de petróleo, do óleo de fritura e por último do óleo de girassol.

2.5 LEGISLAÇÃO REFERENTE À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A legislação nacional, que define os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, é a Resolução nº 382 de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (CONAMA, 2006).

No Estado do Paraná, a legislação referente a emissões atmosféricas está baseada na Lei Estadual nº 13.806 de 2002, a qual “dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, conforme especifica e adota outras providências” (LEI ESTADUAL nº 13.806, 2002), e na Resolução da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) nº 54 de 2006, a qual “define critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida” (SEMA, 2006).

2.6 CONSUMO EM GERADOR DE ENERGIA E PREÇOS DE COMERCIALIZAÇÃO

O consumo do biodiesel ou das misturas com o diesel, juntamente com o custo da comercialização desses combustíveis, são fatores de grande importância para a realização de um estudo de viabilidade econômica na geração de energia elétrica. Segundo a ANP (2012), o preço médio do óleo diesel no Estado do Paraná, no mês de janeiro de 2012, foi de R\$ 1,761 por litro, na distribuidora, enquanto que o biodiesel custou, no último leilão realizado em dezembro de 2011, R\$ 2,460 por litro em média no Paraná.

Um estudo realizado por Ferrari, Oliveira e Scabio (2005) mostrou que a adição de até 20% de biodiesel etílico no diesel resulta na redução do consumo de combustível pelo gerador de energia, quando comparado com o diesel puro. Esta constatação está demonstrada na Figura 4, a qual mostra o perfil de consumo de diferentes combustíveis em um gerador de energia elétrica.

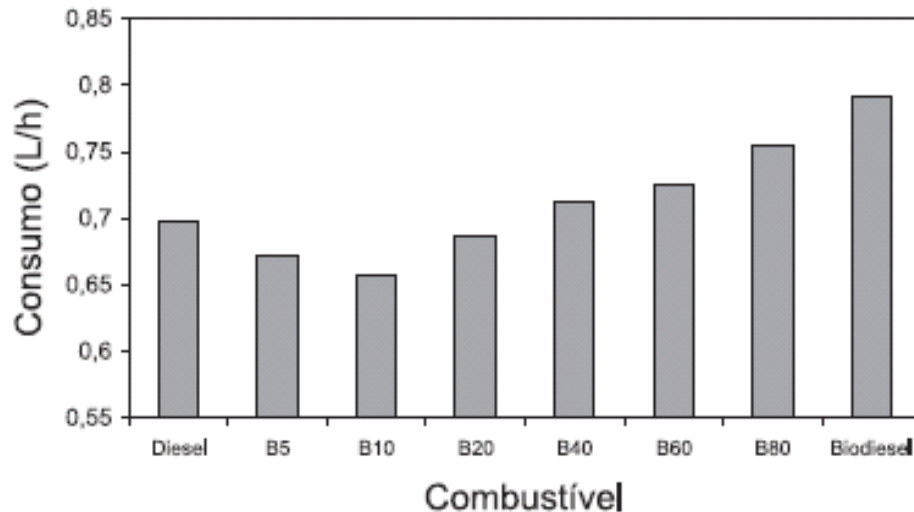


Figura 4 – Perfil de consumo de diesel, de misturas diesel - biodiesel e de biodiesel em gerador de energia elétrica

Fonte: Ferrari; Oliveira; Scabio (2005).

No entanto, mesmo havendo diferenças no consumo de diesel, biodiesel e misturas biodiesel-diesel, segundo Monyem e Van Gespen (2001 apud FERRARI; OLIVEIRA; SCABIO, 2005), a eficiência térmica e a performance de um motor, utilizando biodiesel puro e misturas, são muito similares com as observadas para o diesel puro.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esse trabalho foi realizado no Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), localizado na Rua Professor Algacyr Munhoz Mader, 2400 - Cidade Industrial, Curitiba. O TECPAR forneceu toda a estrutura necessária para o desenvolvimento das análises, as quais requisitaram o uso de óleo diesel comercial e biodiesel, sendo este produzido na usina piloto do TECPAR e aquele obtido junto à distribuidora RDP, que forneceu óleo diesel S1800 e S500. Para comparar as emissões liberadas durante a queima em um moto gerador (motor do ciclo diesel), utilizaram-se os combustíveis puros e misturas destes. Além das emissões, o consumo foi registrado, com o intuito de analisar a viabilidade econômica do uso do biodiesel.

O biodiesel produzido na usina piloto e usado nas misturas foi proveniente do óleo de nabo forrageiro via rota etílica. No entanto, com o objetivo de enriquecer o trabalho, foram analisadas as emissões e o consumo de um biodiesel obtido a partir de óleo de soja via rota metílica, o qual também foi fornecido pela RDP. As emissões e o consumo do biodiesel metílico foram comparados com os do biodiesel etílico.

3.1 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL ETÍLICO

O biodiesel de nabo forrageiro via rota etílica foi produzido na usina piloto mostrada na Figura 5.



Figura 5 – Fotografia da usina piloto para produção de biodiesel

Fonte: CERBIO (2012).

Para a produção de 205 litros de biodiesel de nabo forrageiro foram utilizados 280 litros de óleo vegetal, 117, 8 litros de etanol puro misturado ao óleo e 16,3 litros de etanol para fazer a diluição de 8,8 litros de catalisador, metilato de sódio, de 30% para 12%.

A produção do biodiesel iniciou-se com a neutralização do óleo vegetal, com o intuito de deixar o óleo com índice de acidez abaixo de 1 mgKOH/g de amostra. Nesse processo, foram adicionados, ao óleo vegetal, hidróxido de sódio e água a 50°C. Após 30 minutos de neutralização, deixou-se toda a borra formada decantar por algumas horas, removendo-a na sequência. Então, o óleo foi lavado 3 vezes com volume de 15% de água para cada lavagem, em relação ao volume de óleo, a 90°C para a remoção de mais borra e resíduos de NaOH presentes no óleo. Posteriormente, para finalizar o tratamento do óleo visando utilizá-lo na reação de transesterificação, ele foi seco sob vácuo de 50 mmHg e temperatura de 85°C, durante 40 minutos, e filtrado com o auxílio de um filtro prensa (TECBIO, 2007).

Para a realização da reação de transesterificação, o óleo foi transferido para os reatores e aquecido até 60°C, sendo, então, adicionado etanol com excesso de 200% em relação à quantidade estequiométrica necessária. Como a reação de transesterificação é reversível, necessitou-se desse excesso de etanol para favorecer a formação do biodiesel e melhorar a eficiência do processo. Após toda essa mistura atingir novamente 60°C, inseriu-se o catalisador BASF metilato de

sódio, o qual é obtido como mostrado na Figura 6. Realizou-se a reação de transesterificação durante 1 hora e 30 minutos sob agitação.

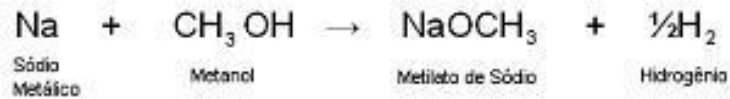


Figura 6 – Esquema da reação de formação do catalisador metilato de sódio

Fonte: DUPONT (2012).

Após a reação, não houve separação da glicerina formada, devido ao excesso de etanol presente na mistura. Então, evaporou-se o etanol em excesso, sendo verificada, na sequência, a separação da glicerina, a qual foi rapidamente removida. Posteriormente, o biodiesel foi lavado 4 vezes com água, 10% em relação ao volume de biodiesel, para remover metais, principalmente sódio proveniente do catalisador, resíduo de glicerina e etanol e metanol residuais. Para finalizar a purificação do biodiesel, este foi seco durante 1 hora a temperatura de 80°C, sob vácuo de 50 mmHg, e filtrado por meio de um filtro prensa (TECBIO, 2007).

O biodiesel produzido foi caracterizado em doze parâmetros, os quais foram: teor de umidade feito por um equipamento *Karl Fischer Metrohm 756 KF Coulometer*, segundo a NBR 11348; viscosidade cinemática obtida através do equipamento *Viscosímetro AKV-202* da marca *TANAKA*, segundo a NBR 10441; índice de iodo (parâmetro não obrigatório), segundo a EN 14111; ponto de fulgor segundo a NBR 14598; glicerina livre e total foi realizada por um cromatógrafo *Bruker CP 3800*, segundo a EN 14105; densidade obtida utilizando um densímetro, segundo a NBR 7148; teor de éster também foi realizado no cromatógrafo *Bruker CP 3800*, segundo a EN 14103; índice de acidez foi feito segundo a NBR 14248; teores de sódio, potássio, cálcio, magnésio e fósforo foram obtidos através de um equipamento de plasma, segundo a EN 14107.

O biodiesel metílico obtido junto à distribuidora RDP não foi caracterizado, pelo fato de estar dentro da especificação da ANP.

3.2 PREPARO DOS COMBUSTÍVEIS ANALISADOS

Para a realização das análises de emissões, de consumo e de viabilidade econômica, utilizaram-se como combustíveis o óleo diesel puro (S1800 e S500), B0, o biodiesel puro (rota etílica e metílica), B100, e as misturas biodiesel-diesel (B5, B10, B20, B40 e B80). Estas misturas foram feitas com ambos os tipos de diesel, ou seja, misturas com S1800 e misturas com S500, e com o biodiesel produzido na usina piloto. Para cada combustível, preparou-se um volume de 10 litros para ser utilizado no moto gerador. A Tabela 6 mostra as proporções dos combustíveis utilizados nas análises.

Tabela 6 – Quantidades de diesel e biodiesel etílico utilizados na preparação dos combustíveis

Combustível	Volume (L)	
	Diesel*	Biodiesel
B0	10,0	0
B5	9,50	0,50
B10	9,00	1,00
B20	8,00	2,00
B40	6,00	4,00
B80	2,00	8,00
B100	0	10,0

* S1800 e S500

O biodiesel de soja via rota metílica, não foi usado para preparar misturas, sendo, por isso, utilizado para comparar suas emissões e consumo com o biodiesel de nabo via rota etílica.

Os combustíveis puros e as misturas foram armazenados em recipientes de 10 litros e, após 24 horas, foram usados no moto gerador.

3.3 ANALISADOR DE EMISSÕES

Para o desenvolvimento do trabalho, utilizou-se um analisador portátil de emissões da marca *ECIL* e modelo *Ecoline 6000*, o qual foi disponibilizado pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI), da Universidade

Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O certificado de calibração do equipamento está no Anexo A.

O equipamento usado é um analisador clássico de gases do tipo eletroquímico. Nesse aparelho, o gás é captado e enviado por uma sonda para dentro do sistema, passando, primeiramente, por um conjunto de membranas e filtros para remover gases interferentes e, principalmente, água. No interior do equipamento existe uma célula eletroquímica para cada gás que se quer analisar. Em cada célula há dois eletrodos, o primeiro é um eletrodo reagente, no qual ocorre uma reação de oxirredução com o gás a ser analisado, gerando uma corrente elétrica diretamente proporcional a concentração do gás. Esta corrente gerada permeia pela solução eletrolítica e chega ao segundo eletrodo, denominado eletrodo de detecção, que quantifica a corrente elétrica e a converte em concentração (CHOU, 2000 apud PONZONI, 2007). Esse tipo de equipamento não é sensível a grandes variações de pressão, mas, por se tratar de componentes elétricos, é muito sensível a variações de temperatura, por isso foi mantido ao abrigo do sol durante as análises.

O modelo *Ecoline* 6000, mostrado na Figura 7, apresenta células para analisar os seguintes gases: O₂ livre, NO_x (NO + NO₂), SO₂ e CO, e apresenta a capacidade de calcular a quantidade de CO₂ liberado. Outra característica importante do equipamento é a sua capacidade de emitir relatórios impressos e armazenar dados na memória.



Figura 7 – Fotografia do analisador portátil de emissões

3.4 MOTO GERADOR

Para o desenvolvimento do estudo, utilizou-se um moto gerador, fabricado em 2004, da marca Maquigeral, que possui motor 4 tempos de injeção mecânica da marca MWM, modelo 6.10TCA e com potência de 158,0 kW a 1780 rpm. A Figura 8 mostra o moto gerador usado no trabalho.



Figura 8 – Fotografia do moto gerador

3.5 MEDIÇÕES DAS EMISSÕES E DO CONSUMO DE CADA COMBUSTÍVEL

3.5.1 Emissões

As medições das emissões (NO_x e CO) provenientes da combustão do diesel (S1800 e S500), biodiesel puro e, também, misturas em diferentes proporções de biodiesel-diesel, foram realizadas em um sistema de exaustão adaptado. Neste sistema, o sensor do equipamento de medição foi posicionado perpendicularmente ao fluxo de gases, como mostrado na Figura 9.



Figura 9 – Fotografia do sistema de exaustão adaptado

Antes da realização das medições, o motor foi acionado em máxima potência possível (72 kW), até ocorrer a estabilização da temperatura do sistema, em torno de 80°C. Após este procedimento, as medições começaram a ser realizadas; porém, nas medições do B10 e B20 com diesel S1800, constatou-se que a potência do motor tinha reduzido inesperadamente para 64 kW. Devido a este fato, para as misturas com o diesel S500, a potência foi reduzida para 62 kW, com o intuito de evitar essa flutuação da potência durante o experimento. Na Tabela 7 está mostrada a potência do motor durante as medições para cada combustível analisado. Além disso, usou-se um sistema para fazer a mudança de combustível sem que o motor fosse desligado. Porém, este sistema, mostrado na Figura 10, foi aplicado apenas para as misturas com o diesel S500.

Tabela 7 – Potência do motor durante as medições

Combustível	Potência (kW)
B100 Metílico	72
B100 Etílico	72
B0 S1800	72
B0 S500	72
B5 S1800	72
B10 S1800	64
B20 S1800	64
B40 S1800	72
B80 S1800	72
B10 S500	62
B20 S500	62
B40 S500	62
B80 S500	62



Figura 10 – Fotografia do sistema para mudança de combustível

Para cada combustível, o tempo total de análise foi de 12 minutos, sendo registradas 6 medidas nesse período. Antes de iniciar as medições, 2 litros (quantidade que permanece no sistema interno do motor) de cada combustível

foram queimados, para que não houvesse contaminação pelo combustível anteriormente utilizado no motor. As 6 medidas de cada combustível foram feitas de tal forma que o sensor do equipamento de análise ficasse 2 minutos no sistema de exaustão, registrando 2 medidas (1 por minuto), sendo, em seguida, retirado e mantido longe da exaustão por 3 minutos. Posteriormente, o sensor foi colocado novamente durante 2 minutos fazendo-se o registro de mais 2 medidas, retirando-o, na sequência, por mais 3 minutos e, por fim, realizou-se o procedimento de medição mais uma vez, totalizando 6 medidas. Porém, foram usadas as médias dessas medidas para serem trabalhadas nos resultados e discussão, com exceção da comparação entre o biodiesel etílico e o biodiesel metílico, em que se utilizaram os valores exatos das 6 medidas efetuadas.

Com o objetivo de diminuir a influência das diferentes potências em que foram feitas as medições e, assim, fazer comparações menos errôneas entre os combustíveis, os valores das emissões (médias das 6 medições realizadas) foram divididos pelas potências em que foram medidos, ou seja, expressaram-se os valores em ppm (v/v) por quilowatt (ppm/kW). No entanto, a comparação entre o biodiesel etílico e o biodiesel metílico foi realizada sem a correção da potência, visto que ambos foram medidos na mesma potência. Além disso, a quantificação das emissões não foi comparada com os padrões de emissão para motores estacionários, que constam na Resolução nº 54/06 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pois esses padrões não se aplicam nesse estudo, devido à baixa potência do moto gerador utilizado (SEMA, 2006).

Durante as análises não foi possível quantificar as emissões de dióxido de enxofre (SO₂) dos combustíveis utilizados, fato que provavelmente ocorreu devido à existência de algum problema com a célula eletroquímica, possivelmente a célula estava saturada, responsável pela quantificação deste gás. Outro problema com o equipamento de análise ocorreu durante a medição das emissões do B5 com diesel S500, impossibilitando que essa mistura fosse analisada. Além disso, a falta de óleo diesel não permitiu que algumas medições fossem refeitas, com o objetivo de manter uma potência fixa durante as medições, como foi feito com as misturas biodiesel-diesel S500.

3.5.2 Consumo

O levantamento do consumo de cada combustível foi feito em termos do volume gasto durante o tempo total em que ficou sendo queimado no moto gerador. No entanto, como a potência do motor não foi igual para todos os combustíveis, o consumo foi expresso em litro por quilowatt-hora (L/kWh), ou seja, dividiu-se o consumo em uma hora pela energia gerada nesse período, obtendo-se, assim, o consumo volumétrico específico. Tendo em vista a falta de combustível, os estudos do consumo não foram feitos em replicatas.

3.6 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a realização do estudo de viabilidade econômica da utilização de biodiesel em geradores de energia, foram usados os valores de consumo volumétrico específico (L/kWh), os preços por litro do óleo diesel, na distribuidora, e do biodiesel em janeiro de 2012 no estado do Paraná, segundo a ANP; e o valor do quilowatt-hora (kWh) cobrado pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) em horário de ponta seca, ou seja, das 18:00 horas às 21:00 horas (fora do horário de verão) e nos meses de maio a novembro. Os valores, cobrados pela COPEL, usados no estudo foram de R\$ 0,3535 e de R\$ 1,603 o kWh que correspondem a tarifação A4 horossazonal azul e A4 horossazonal verde, respectivamente. O termo A4 refere-se ao nível de tensão entre 2,3 kV e 25 kV e o termo horossazonal refere-se a um modelo tarifário que “têm preços diferenciados em relação às horas do dia (ponta e fora de ponta) e aos períodos do ano (úmido e seco)” (COPEL, 2012).

Para estimar o valor do litro de cada mistura, foram utilizados os valores por litro dos combustíveis puros, R\$ 1,761 e R\$ 2,460 para o diesel (S1800 e S500) e para o biodiesel (metílico e etílico), respectivamente e a proporção de cada combustível nas misturas. A Tabela 8 mostra o custo do litro de cada combustível utilizado nesse estudo.

Tabela 8 – Custo estimado de cada combustível utilizado nesse estudo

Combustível	Custo (R\$/L)
B0	1,761
B5	1,796
B10	1,830
B20	1,900
B40	2,041
B80	2,320
B100	2,460

Com esses dados, comparou-se o custo para gerar um quilowatt-hora, usando o moto gerador, com o custo para obter essa mesma quantidade de energia da rede de distribuição da COPEL.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL ETÍLICO

Na Tabela 9 estão os resultados das análises de caracterização realizadas para o biodiesel etílico, com as respectivas normas e limites estabelecidos pela ANP.

Tabela 9 – Valores obtidos na caracterização do biodiesel de nabo forrageiro via rota etílica e normas utilizadas

Parâmetro	Especificação*	Obtido	Norma
Teor de umidade, máx	500 ppm	347,1 ppm	NBR 11348
Viscosidade cinemática 40°C	3,0 – 6,0 mm ² /s	5,573 mm ² /s	NBR 10441
Índice de lodo	---	114,47 g/100g	EN 14111
Glicerina livre, máx.	0,020% massa	0,021% massa	EN 14105
Glicerina Total, máx.	0,25% massa	1,36% massa	EN 14105
Densidade a 20°C	850 - 900 kg/ m ³	880,79 kg/ m ³	NBR 7148
Teor de Éster, mín.	96,5% massa	89,0% massa	EN 14103
Ponto de Fulgor, mín.	100°C	178,5°C	NBR 14598
Índice de acidez, máx.	0,5 mgKOH/g	0,496 mgKOH/g	NBR 14248
Sódio + Potássio, máx	5 mg/kg	2,983 mg/kg	EN 14538
Cálcio e Magnésio, máx	5 mg/kg	3,085 mg/kg	EN 14538
Fósforo, máx	10 mg/kg	4,970 mg/kg	EN 14107

* Especificações segundo a ANP (2008).

Observou-se através destes resultados que o teor de éster, glicerina livre e glicerina total ficaram em desacordo com a especificação. O valor elevado da

glicerina total pode diminuir a eficiência da combustão (BOWMAN; HILLIGOSS; RASMUSSEN, 2006 apud LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009) e gerar emissões de aldeídos (LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009). Já o baixo valor do teor de éster, está diretamente relacionado com a grande quantidade de glicerina total no biodiesel produzido.

4.2 EMISSÕES

4.2.1 Comparação entre o biodiesel etílico e o biodiesel metílico

Depois de feita a caracterização do biodiesel etílico de nabo forrageiro e a constatação de que parâmetros importantes ficaram fora da especificação, realizou-se um teste com biodiesel metílico de soja especificado. Isto para verificar a interferência, desses parâmetros não enquadrados na especificação, no comportamento da combustão do biodiesel etílico. Tendo em vista a possibilidade de haver diferença na eficiência da combustão entre os biodieseis, devido ao alto teor de glicerina total do biodiesel etílico, utilizou-se a emissão de monóxido de carbono (CO) neste teste comparativo.

Verifica-se, na Figura 11, a qual mostra o perfil de emissão de CO durante o tempo de análise, que o biodiesel etílico (BE) gerou, em média, mais CO que o biodiesel metílico (BM). Porém, nota-se, também, que o comportamento de ambos, durante a análise, foi similar, mostrando, assim, que o alto teor de glicerina total, de fato, interferiu na eficiência da combustão, mas não no perfil de emissão.

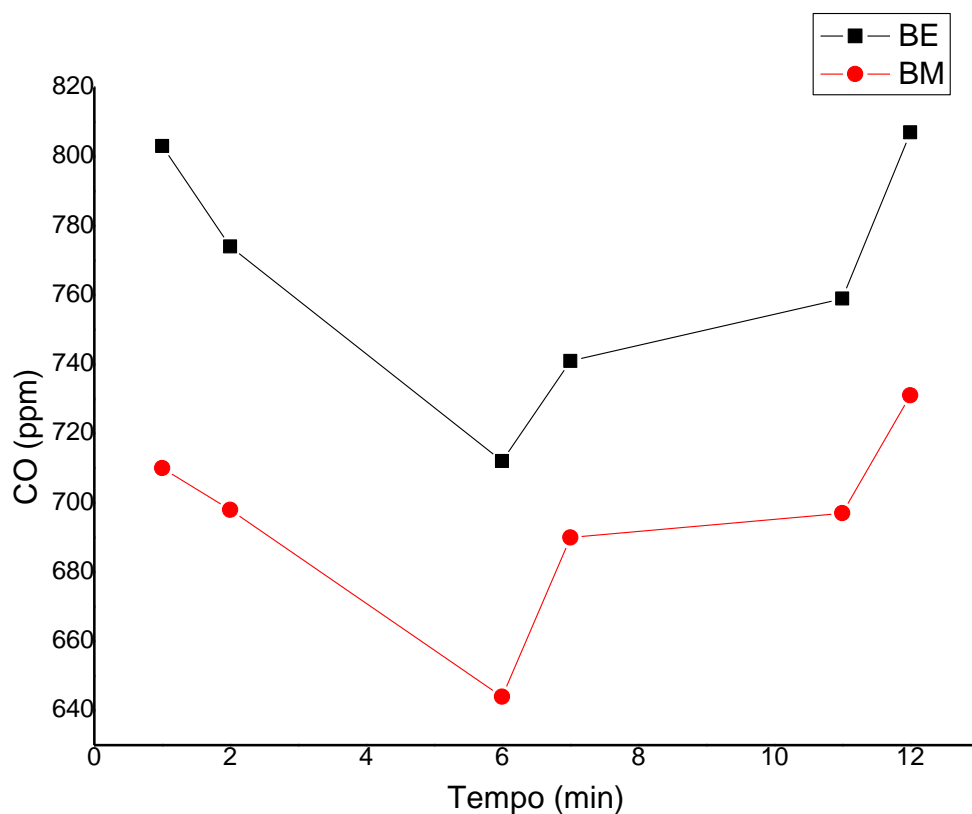


Figura 11 – Perfil de emissão de monóxido de carbono do biodiesel etílico e do biodiesel metílico durante o tempo de análise

4.2.2 Misturas com Diesel S1800

4.2.2.1 Emissão de Monóxido de Carbono (CO)

A formação de CO durante a combustão ocorre quando a mistura ar/combustível está com deficiência de oxigênio, resultando na oxidação incompleta do carbono existente na câmara de combustão e gerando, assim, CO ao invés de CO₂, este produzido em uma combustão completa (RANDAZZO, 2009).

A Figura 12 mostra a geração de monóxido de carbono proveniente da combustão do biodiesel etílico, do diesel S1800 e das misturas desses dois combustíveis.

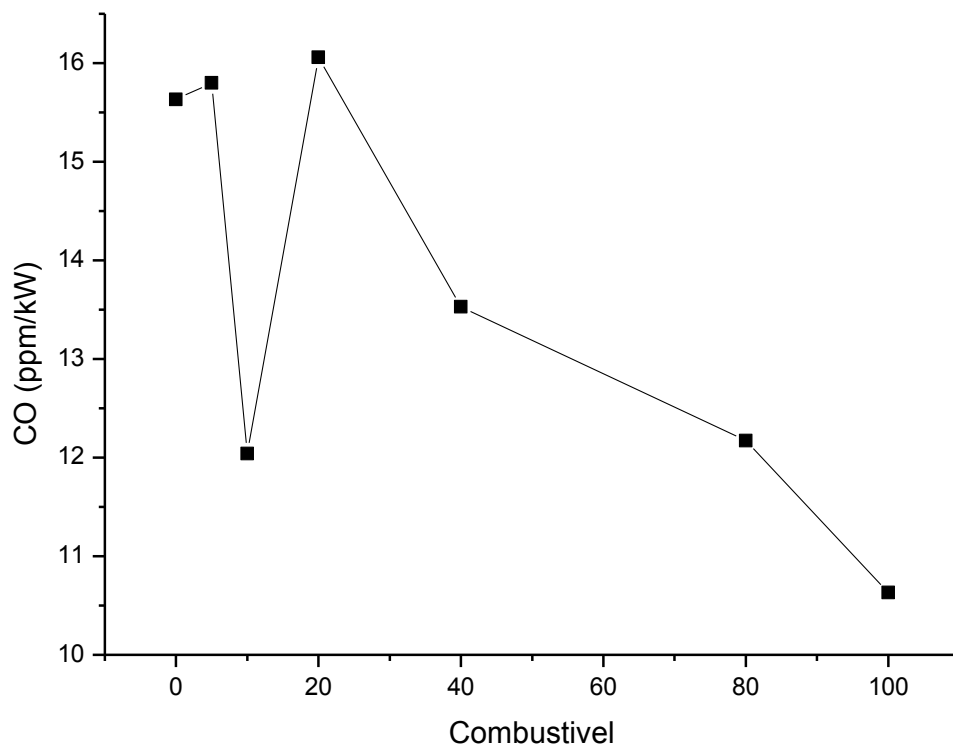


Figura 12 – Geração de monóxido de carbono proveniente da combustão do biodiesel etílico, do diesel S1800 e das misturas desses dois combustíveis

Pode-se notar que os combustíveis B10, B40, B80 e B100 tiveram uma melhor eficiência de combustão em relação ao diesel S1800, pois geraram uma menor quantidade de monóxido de carbono, sendo esta redução de, aproximadamente, 22%, 13%, 22% e 32%, respectivamente. Isso se deve a presença de oxigênio no biodiesel, visto que nas moléculas desse combustível existem átomos de oxigênio constituindo a estrutura química (ENWEREMADU, 2010), e ao maior número de cetano do biodiesel, em relação ao diesel, que proporciona uma melhor combustão em motor diesel (PETROBRAS, 2000 apud RANDAZZO, 2009). Desta forma, quanto maior for o teor de biodiesel em uma mistura biodiesel-diesel, mais oxigênio estará presente e maior será o número de cetano desta mistura.

No entanto, os valores encontrados para o B40, B80 e B100 são baixos em relação à literatura, principalmente para o B100, tendo em vista que a maioria dos trabalhos consultados cita redução de aproximadamente 50% na emissão de CO, quando se utiliza biodiesel puro. Com isso, nota-se que o teor de oxigênio no biodiesel e o número de cetano não foram os únicos fatores que influenciaram na

emissão de CO. Isto também pode ser verificado pelo fato do B10 ter emitido menos CO que o B20 e o B40, apesar de possuir uma menor quantidade de biodiesel. Além disso, observa-se que ocorreu uma discrepância muito grande entre os resultados do B10 e do B5, fato que não era esperado, tendo em vista que o teor de biodiesel desses combustíveis era muito próximo. Esses resultados inesperados, bem como as diferenças observadas em relação aos dados da literatura, podem ter ocorrido devido à quantidade e as características do ar admitido para o interior da câmara de combustão e do ar que estava em contato com o sistema de exaustão durante as análises. Neste contexto, durante a medição do B10 existe a possibilidade do motor ter admitido um ar mais “puro”, ou seja, com menor quantidade de poluentes, principalmente CO, gerando, assim, maior disponibilidade de oxigênio na câmara de combustão e, conseqüentemente, melhorando a eficiência da queima. Entretanto, o resultado real da emissão do B10 pode ter sido influenciado pelo sistema de exaustão. Neste caso, durante a medição desse combustível, há a possibilidade do sistema de exaustão adaptado, no qual estava o sensor de medição, ter tido uma quantidade maior de ar em relação aos demais combustíveis, devido à intensidade e direção do vento, o que pode ter diluído a concentração real de CO. Ademais, o fato do B5 e do B20 apresentarem resultados parecidos com o B0, reforça a possível interferência, de fatores diferentes do teor de oxigênio no combustível, no resultado encontrado para o B10.

4.2.2.2 Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são gerados no interior das câmaras de combustão devido a grande presença de nitrogênio e de oxigênio no ar utilizado para a combustão e as altas temperaturas de combustão, as quais favorecem a formação dos NO_x . No caso do motor de ciclo diesel, alguns parâmetros podem favorecer o aumento de temperatura de combustão e, conseqüentemente, proporcionar maior geração de NO_x . Dentre eles estão a forma de operação do motor, a manutenção, as tecnologias de injeção do combustível, o número de cetano, a compressibilidade e o índice de iodo, sendo que os três últimos são características do combustível (YUAN, 2005 apud MAGÍN, 2007).

A Figura 13 mostra a geração de óxidos de nitrogênio provenientes da combustão do biodiesel etílico, do diesel S1800 e das misturas desses dois combustíveis.

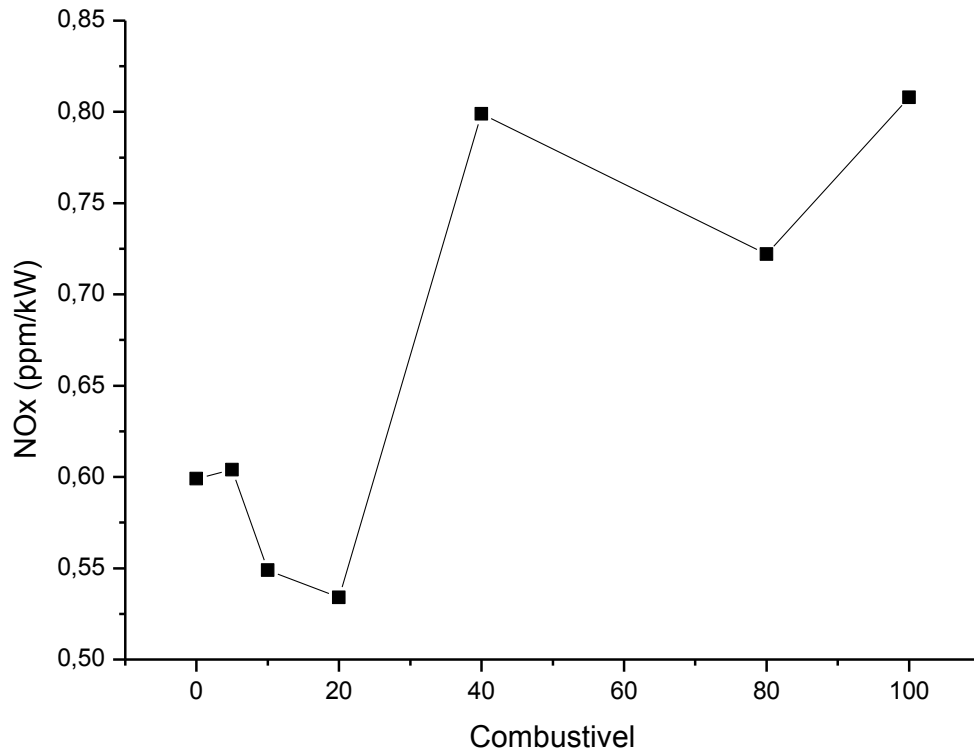


Figura 13 – Geração de óxidos de nitrogênio provenientes da combustão do biodiesel etílico, do diesel S1800 e das misturas desses dois combustíveis

Nota-se que houve um aumento na geração de NO_x , em relação ao diesel S1800, quando utilizaram-se os combustíveis B5, B40, B80 e B100, sendo este aumento de 0,83%, 33%, 20% e 35%, respectivamente. Este comportamento pode ser relacionado com a menor compressibilidade (MAGÍN, 2007) e o maior número de cetano do biodiesel, em relação ao diesel, que elevam a temperatura de combustão e, juntamente com a presença de oxigênio na molécula do biodiesel, favorecem a formação de NO_x (RANDAZZO, 2009).

A pequena variação entre o B0 e o B5 já era esperada, devido à pequena quantidade de biodiesel presente na mistura. No entanto, os combustíveis B10, B20 e B80 apresentaram resultados inesperados, que se contrapõem aos dados da literatura, pois o B80 gerou menos NO_x que o B40, mesmo possuindo um teor de biodiesel superior, assim como o B10 e o B20 que emitiram menos NO_x que o B0 e o

B5. Além disso, os valores obtidos para o B40, B80 e B100 são muito altos em relação aos dados da literatura, pois a maioria dos estudos cita aumento em torno de 10% na emissão de NO_x , quando se utiliza biodiesel puro. Isso tudo mostra que a compressibilidade, o número de cetano e a presença de oxigênio na molécula do biodiesel não foram os únicos fatores que influenciaram na emissão de NO_x . Um fator de grande importância na geração de NO_x , a temperatura, pode ter sido a responsável por esses comportamentos anômalos de alguns combustíveis, tendo em vista que o motor foi desligado para fazer a substituição de cada combustível. Então, quando o motor era novamente ligado, com outro combustível, a temperatura estava abaixo da análise anterior e mesmo após ter ficado aquecendo durante o período de retirada dos 2 litros de combustível, para que o combustível anteriormente analisado não influenciasse na análise, o motor pode, ainda assim, ter operado com uma temperatura inferior. Isso pode ter resultado na redução de emissão de NO_x para o B10, B20 e B80, este quando comparado com o B40 e aqueles com o B0 e o B5.

4.2.3 Misturas com Diesel S500

4.2.3.1 *Emissão de Monóxido de Carbono (CO)*

A Figura 14 mostra a geração de monóxido de carbono proveniente da combustão do biodiesel etílico, do diesel S500 e das misturas desses dois combustíveis.

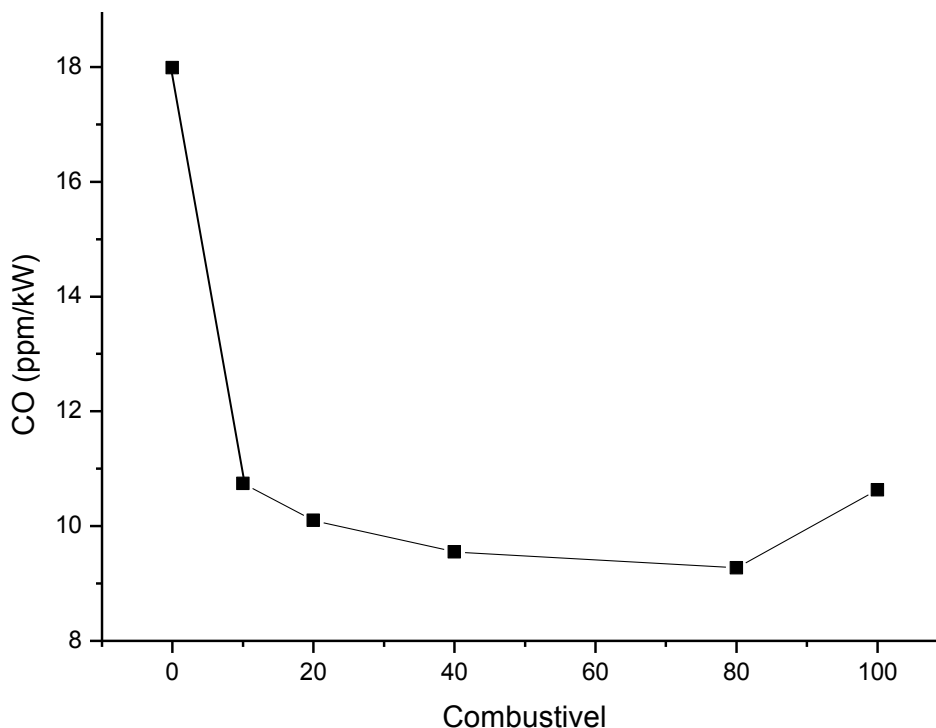


Figura 14 – Geração de monóxido de carbono proveniente da combustão do biodiesel etílico, do diesel S500 e das misturas desses dois combustíveis

Observa-se que houve redução na emissão de CO à medida que se aumentou o teor de biodiesel na mistura com o diesel, com exceção do B100. Este gerou 41% a menos de CO em relação ao diesel S500, porém emitiu mais que o B20, o B40 e o B80, mesmo sendo biodiesel puro. Já os combustíveis B10, B20, B40 e B80 apresentaram redução de 40%, 44%, 47% e 48%, respectivamente, em relação ao diesel S500.

Nota-se que a redução de CO do B0 para o B10 foi muito grande, mesmo o B10 tendo apenas 10% de biodiesel. Isto pode ter acontecido porque apenas os combustíveis B10, B20, B40 e B80 foram analisados sem que o motor fosse desligado para a troca de combustível. Já para o B0, assim como para o B100, o motor foi desligado para que os tanques destes combustíveis fossem acoplados ao motor, o que pode de alguma forma, ter interferido nas emissões do B0 e do B100. Por isso, neste estudo com o diesel S500, os resultados mais relevantes são os das misturas, pois, para elas, as condições de análise foram mantidas praticamente constantes durante as medições.

Analisando apenas os resultados das misturas, percebem-se que o B10 e o B20 mostraram reduções nas emissões de CO próximas as encontradas para o B40

e para o B80, mesmo possuindo teores de biodiesel muito inferior. Isto, de certa forma, diverge da literatura, pois esta cita dados que mostram diferenças maiores na emissão de CO entre combustíveis com essas frações de biodiesel. Através disso, é possível inferir que o motor utilizado nesse estudo possui boa eficiência de combustão, acima da esperada, com o uso do B10 e do B20.

4.2.3.2 Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

A Figura 15 mostra a geração de óxidos de nitrogênio provenientes da combustão do biodiesel etílico, do diesel S500 e das misturas desses dois combustíveis.

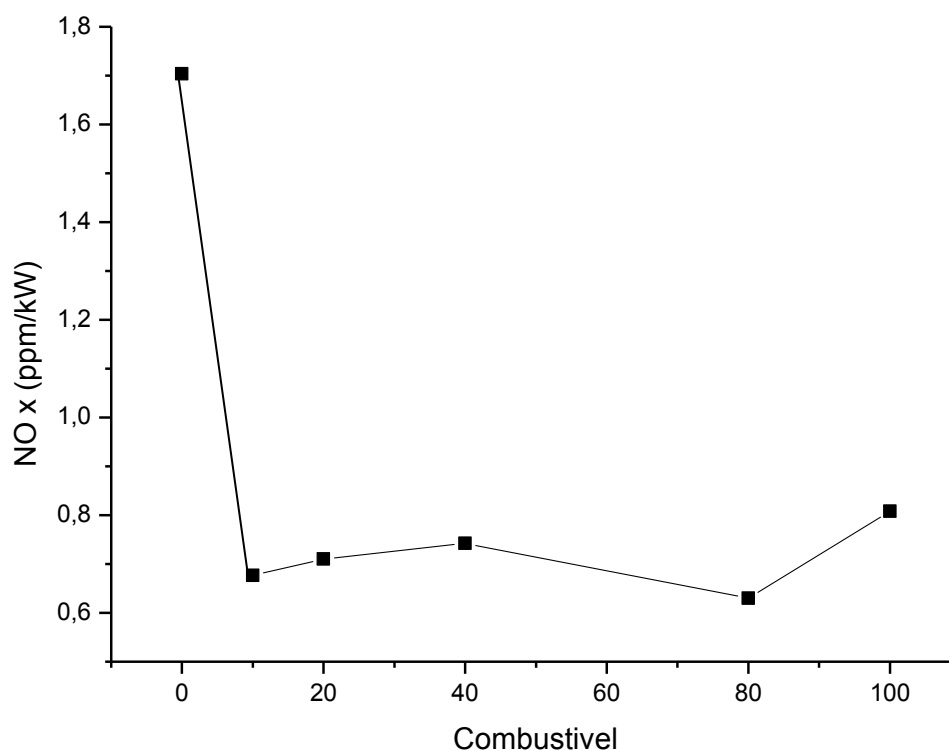


Figura 15 – Geração de óxidos de nitrogênio provenientes da combustão do biodiesel etílico, do diesel S500 e das misturas desses dois combustíveis

Primeiramente, nota-se que o diesel S500 apresentou um resultado totalmente inesperado, pois gerou muito mais NO_x que os combustíveis contendo biodiesel, mostrando, assim, que ocorreu algum problema não identificado durante a

medição desse combustível. Isto é reforçado quando se compara o diesel S500 com o diesel S1800, pois este gerou em torno de 0,6 ppm/kW e aquele em torno de 1,7 ppm/kW de NO_x. Por esses motivos o resultado do diesel S500 para a geração de NO_x foi desprezado deste estudo e, então, utilizou-se o B10 como referência para analisar as variações de emissão de NO_x entre os combustíveis.

Feitas essas considerações, observa-se que o B20, o B40 e o B100 emitiram 5%, 10% e 19%, respectivamente, mais NO_x que o B10. No entanto, o B80 gerou 7% menos NO_x que o B10, mesmo tendo um teor de biodiesel muito superior. Isto ocorreu por algum motivo não identificado, tendo em vista que a temperatura, que é um parâmetro muito influente na geração de NO_x, foi mantida praticamente constante durante as medições das misturas com o diesel S500. É importante salientar que, para a medição do B100, o motor foi desligado para que o tanque deste combustível fosse acoplado ao motor, podendo, este procedimento, ter interferido na geração de NO_x, apesar do resultado obtido ter sido considerado aceitável.

Contudo, apesar dos valores obtidos referentes à emissão de NO_x estarem acima dos dados encontrados na literatura, o perfil de aumento na geração de NO_x, à medida que o teor de biodiesel é aumentado no combustível, está condizente com o observado na literatura.

4.3 CONSUMO

A Figura 16 mostra o consumo volumétrico específico do biodiesel etílico, do diesel S1800 e das misturas desses dois combustíveis pelo moto gerador.

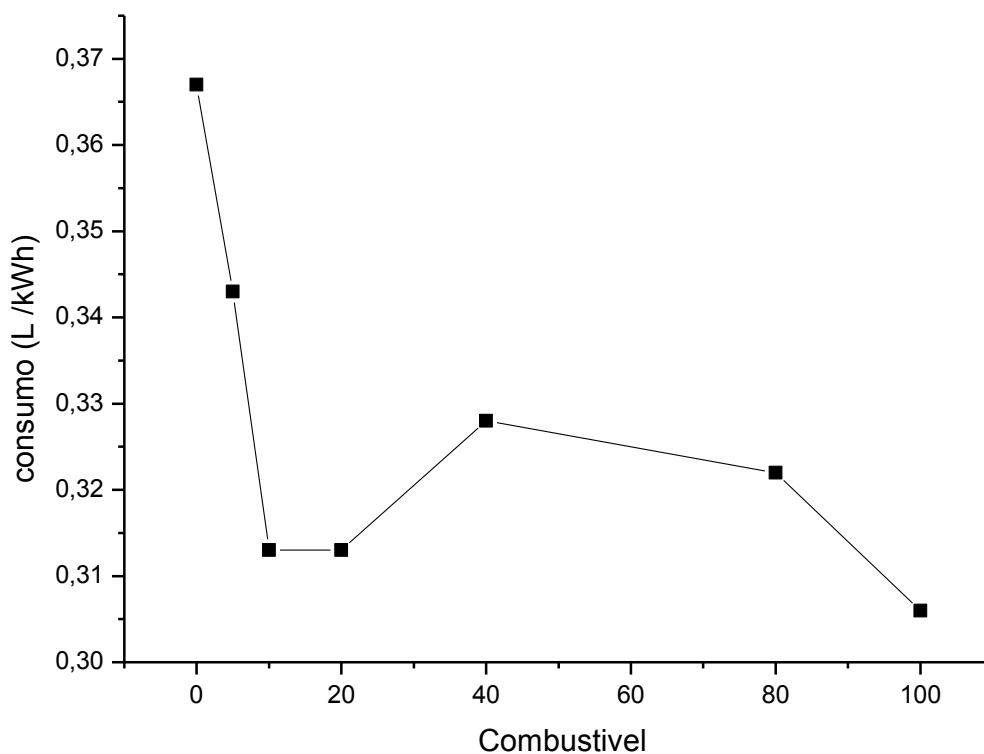


Figura 16 – Consumo volumétrico específico do biodiesel etílico, do diesel S1800 e das misturas desses dois combustíveis

Em teoria, com o aumento do teor de biodiesel na mistura, o consumo seria maior, porém este fato não foi observado neste estudo com o diesel S1800, visto que o B0 apresentou o maior consumo entre todos os combustíveis usados. Além disso, o B100 foi o combustível menos consumido pelo motor, sendo este consumo 16,7% menor em relação ao B0. Esta discrepância com a teoria pode ter ocorrido devido a alguma irregularidade não detectada no funcionamento do moto gerador. Analisando apenas as misturas biodiesel-diesel S1800, observa-se que o B10 e o B20 apresentaram o menor consumo.

A Figura 17 mostra o consumo volumétrico específico do biodiesel etílico, do diesel S500 e das misturas desses dois combustíveis pelo moto gerador.

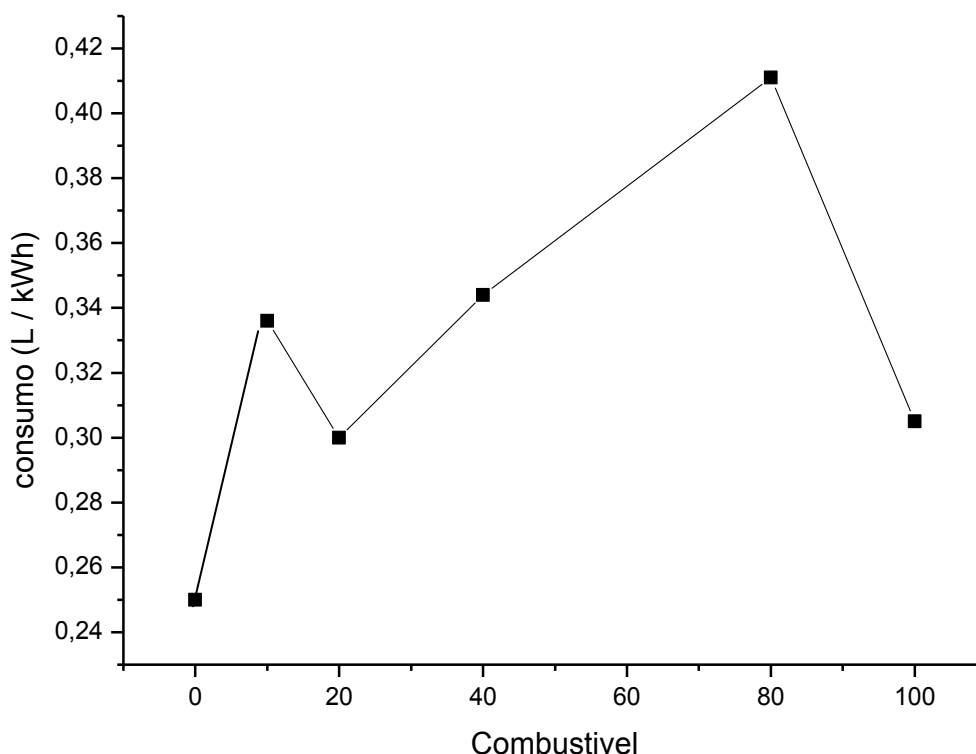


Figura 17 – Consumo volumétrico específico do biodiesel etílico, do diesel S500 e das misturas desses dois combustíveis

Usando o diesel S500, como era esperado, o B0 apresentou um consumo menor que todos os outros combustíveis, porém, em relação ao diesel S1800, mostrou um consumo 31,8% menor. Esta diferença entre os dois diesel não era esperada, mas que também pode ter sido consequência de alguma irregularidade no funcionamento do motor, provavelmente com o uso do B0 do diesel S1800. Já em relação às misturas com diesel S500, o B20 foi o menos consumido, seguido do B10.

Observando-se apenas os resultados das misturas com diesel S500 e com diesel S1800, o B10 e o B20 foram os combustíveis mais viáveis, em termos de consumo, utilizados no moto gerador. No entanto, quando se analisa o conjunto global de dados, o diesel S500 mostrou uma maior viabilidade, pois foi o combustível menos consumido pelo motor.

Comparando-se o B100 etílico e o B100 metílico, verifica-se que este consumiu 0,3444 L/kWh e aquele 0,3055 L/kWh. Desta forma, conclui-se que os parâmetros não especificados do B100 etílico (glicerina e teor de éster) não afetaram, de forma negativa, o consumo desse combustível.

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

É importante enfatizar que neste estudo de viabilidade econômica, foi considerada apenas a tarifa cobrada referente ao consumo (R\$/kWh), tanto para o modelo tarifário horossazonal azul, quanto para o modelo horossazonal verde. Esses modelos de tarifação possuem uma tarifa referente à demanda (R\$/kW), a qual está relacionada com o “investimento que a COPEL fez no sistema elétrico para fornecer a demanda de potência (kW) estimada pelo consumidor”. Essa tarifa de demanda é que distingue o modelo horossazonal azul e o modelo horossazonal verde, pois este possui apenas uma tarifa para a demanda, ou seja, não leva em consideração o horário, e aquele diferencia a tarifa de demanda em horário de ponta e fora de ponta (COPEL, 2012). Porém, o custo de demanda não foi incluído no trabalho, pois é específico para cada consumidor, sendo ideal estudar um caso real para se fazer uma análise econômica completa.

A Tabela 10 mostra o consumo volumétrico específico de cada combustível pelo moto gerador em uma hora de operação, o custo por kWh referente ao combustível consumido e o custo da energia da rede da COPEL. O resultado para o B5 com diesel S500 não está apresentado, porque este combustível não teve o consumo quantificado.

Tabela 10 – Custo para a obtenção de energia a partir do moto gerador e da rede da COPEL

Combustível	Consumo (L/kWh)	Custo (R\$/kWh)	Custo da energia da rede (R\$/kWh)	
			Horossazonal Azul	Horossazonal Verde
B100 Etílico	0,3055	0,7515		
B100 Metílico	0,3444	0,8447		
B0 S1800	0,3667	0,6457		
B5 S1800	0,3333	0,5986		
B10 S1800	0,3125	0,5719		
B20 S1800	0,3125	0,5937		
B40 S1800	0,3278	0,6690	0,3535	1,603
B80 S1800	0,3222	0,7475		
B0 S500	0,2500	0,4402		
B10 S500	0,3371	0,6169		
B20 S500	0,3000	0,5700		
B40 S500	0,3435	0,7011		
B80 S500	0,4113	0,9542		

Através dos dados existentes na Tabela 10, infere-se que, utilizando-se a tarifação horossazonal azul, é mais viável economicamente obter a energia elétrica da rede de distribuição da COPEL, ao invés de utilizar um moto gerador. Porém, quando se usa a tarifação horossazonal verde, a obtenção de energia a partir do moto gerador mostra-se ser mais viável. Para todos os combustíveis utilizados no moto gerador, o custo do quilowatt-hora gerado ficou acima do valor de R\$ 0,3535 e abaixo do valor de R\$ 1,603 cobrados pela companhia de energia, referentes a tarifação horossazonal azul e a tarifação horossazonal verde, respectivamente. O combustível que se mostrou mais viável foi o diesel S500 e o menos viável foi o B80 com diesel S500, R\$ 0,4402 e R\$ 0,9542 o quilowatt-hora, respectivamente. A grande diferença observada no custo do quilowatt-hora entre o diesel S1800 e o diesel S500 ocorreu devido ao consumo daquele ter sido muito maior que o deste.

A Figura 18 mostra o custo para a obtenção de energia elétrica usando biodiesel etílico, diesel S1800 e misturas desses dois combustíveis. Nesse caso, o combustível B10 se mostrou mais viável economicamente para ser usado em moto gerador, seguido do B20.

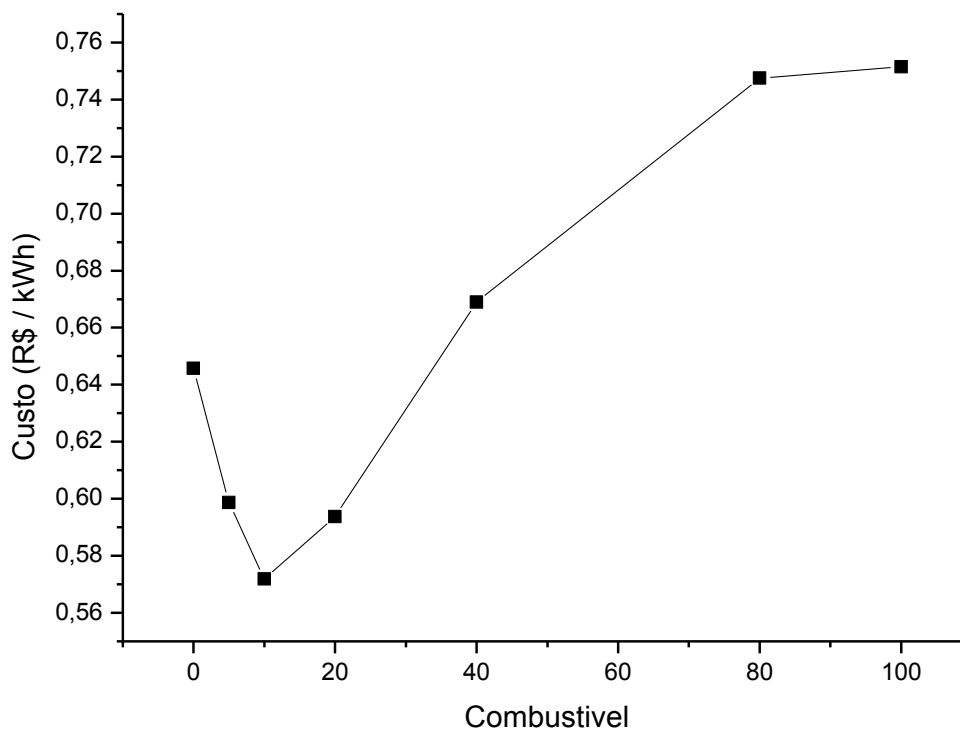


Figura 18 – Custo para a obtenção de energia elétrica usando biodiesel etílico, diesel S1800 e misturas desses dois combustíveis

A Figura 19 mostra o custo para a obtenção de energia elétrica usando biodiesel etílico, diesel S500 e misturas desses dois combustíveis. Nesse caso, o diesel se mostrou mais viável economicamente para ser usado. No entanto, considerando apenas as misturas e o biodiesel puro, o combustível B20 foi o que obteve o menor custo para ser utilizado em moto gerador, seguido do B10.

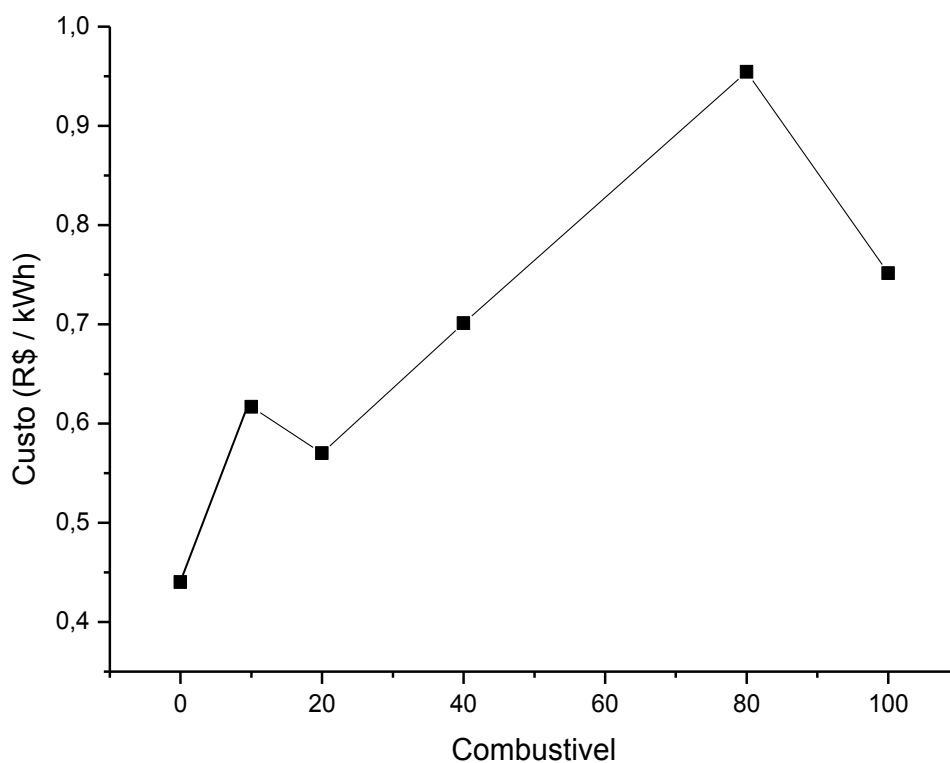


Figura 19 – Custo para a obtenção de energia elétrica usando biodiesel etílico, diesel S500 e misturas desses dois combustíveis

Contudo, constata-se que, assim como verificado no estudo de consumo, o B10 e o B20 foram os combustíveis com melhor desempenho, ou seja, os que apresentaram a maior viabilidade econômica para a geração de energia elétrica. Isso, desconsiderando o uso de diesel puro, tendo em vista que o diesel S500 apresentou o melhor desempenho econômico entre todos os combustíveis usados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biodiesel etílico produzido na usina piloto e utilizado para fazer as misturas com o diesel S1800 e o diesel S500 não se enquadraram em três parâmetros da especificação, glicerina livre, glicerina total e teor de éster. Porém, quando este biodiesel foi comparado com o biodiesel metílico especificado, em termos de emissão de CO, constatou-se que esses parâmetros não especificados, principalmente a glicerina total, interferiram na eficiência de combustão, mas não no perfil de emissão, sendo que o biodiesel etílico gerou mais CO durante o tempo de análise.

No estudo comparativo de emissões usando o diesel S1800, verificou-se que os combustíveis B10, B40, B80 e B100 reduziram a geração de CO em 22%, 13%, 22% e 32%, respectivamente, em relação ao B0, fato atribuído à presença de oxigênio na molécula do biodiesel e ao maior número de cetano desse biocombustível em relação ao diesel. No entanto, fatores externos como a quantidade e a qualidade do ar admitido para o interior da câmara de combustão e em contato com o sistema de exaustão podem ter interferido, principalmente, no resultado do B10, pois este combustível apresentou uma discrepância muito grande na geração de CO em relação ao B5 e ao B20. Já em relação à emissão de NO_x, observou-se que os combustíveis B5, B40, B80 e B100 geraram 0,83%, 33%, 20% e 35%, respectivamente, mais NO_x que o B0, devido a menor compressibilidade e o maior número de cetano do biodiesel, em relação ao diesel, e a presença de oxigênio na molécula do biodiesel. Porém ocorreram resultados inesperados, como nos casos do B10 e do B20, os quais emitiram menos NO_x que o B5 e o B0, e do B80 que gerou menos NO_x que o B40. Isto pode ter acontecido pelo fato do motor ser desligado para a troca de combustível e, assim, o parâmetro temperatura pode ter interferido de forma significativa nos resultados.

Com relação ao estudo com o diesel S500, constatou-se que os combustíveis B10, B20, B40, B80 e B100 apresentaram redução de CO de 40%, 44%, 47%, 48% e 41%, respectivamente, em relação ao B0. Com isto, é possível concluir que o aumento do teor de biodiesel nas misturas resultou em uma melhor eficiência de combustão, com exceção do B100. No entanto, os resultados mais relevantes foram os das misturas, pois o B0 e o B100 foram medidos sem a utilização do sistema de mudança de combustível, o qual permitiu, para as misturas, a manutenção das

condições de análise. Já em relação à emissão de NO_x , utilizou-se o B10 como referência nas comparações, pois o resultado do B0 foi descartado, visto que certamente ocorreu algum problema durante a medição ocasionando, assim, uma geração de NO_x totalmente equivocada. Desta forma, o B20, o B40 e o B100 tiveram um aumento na geração de NO_x de 5%, 10% e 19%, respectivamente, em relação ao B10. Através disto, conclui-se que o aumento do teor de biodiesel nas misturas favoreceu a geração de uma quantidade maior de NO_x , com exceção do B80, o qual não teve a causa da redução na geração de NO_x identificada. Contudo, os resultados obtidos com as misturas biodiesel-diesel S500, foram os que mais se assemelharam com os resultados e justificativas da literatura, provavelmente devido às condições de análise, proporcionadas pelo sistema de mudança de combustível, em que essas misturas foram submetidas.

Na análise de consumo dos combustíveis pelo moto gerador, verificou-se que os combustíveis B10 e B20 apresentaram o menor consumo volumétrico específico, tanto no estudo com diesel S1800 quanto com o diesel S500, isto levando em consideração apenas as misturas e não os combustíveis puros. Já se analisando todos os combustíveis, observou-se que o diesel S500 foi o menos consumido e o B80 com diesel S500 o mais consumido. No entanto, alguns resultados não seguiram a teoria, principalmente no estudo com diesel S1800, pois o B0 teve um consumo muito maior que os demais combustíveis, inclusive o B100. Assim como nas emissões, o fato do sistema de mudança de combustível não ter sido usado para o estudo com diesel S1800, deve ter interferido nas análises, gerando resultados inesperados. Além dessa possível interferência, outro fator não identificado deve ter proporcionado um consumo exagerado de diesel S1800, tendo em vista que o motor consumiu 31,8% menos diesel S500 em relação ao diesel S1800. Com relação às misturas usando diesel S500, as quais foram analisadas sem que o motor fosse desligado, verificou-se um maior consumo com o aumento do teor de biodiesel no combustível, com exceção do B20, o qual, provavelmente, é o combustível que melhor se enquadra, em termos de consumo, com as características do motor. Já a comparação entre o B100 etílico e o B100 metílico mostrou que este consumiu 0,3444 L/kWh e aquele 0,3055 L/kWh, mostrando a não interferência negativa, em termos de consumo, dos parâmetros não especificados do B100 etílico.

O estudo da viabilidade econômica de se utilizar um moto gerador para obter energia elétrica em horário de ponta levou em consideração apenas a tarifação

cobrada pela COPEL referente ao consumo. Neste contexto, a obtenção de energia proveniente da rede de distribuição da COPEL é mais viável que usar um moto gerador, isto quando é empregada a tarifação horossazonal azul. Porém, quando se usa a tarifação horossazonal verde, o estudo mostrou que a utilização do moto gerador possui uma maior viabilidade, para todos os combustíveis usados. Dentre estes, o diesel S500 mostrou ser o mais viável economicamente para ser usado em moto gerador e o B80 com diesel S500 o menos viável. No entanto, analisando apenas as misturas, o B10 com diesel S1800 e o B20 com diesel S500 foram os que apresentaram os menores custos.

6 CONCLUSÃO

A utilização de biodiesel puro no moto gerador, apesar de ter apresentado bons resultados quanto à redução da emissão de CO, não se mostrou viável economicamente e ambientalmente, pois possui custo muito elevado e foi o combustível que mais gerou NO_x. Já o uso de diesel puro, mostrou a desvantagem de gerar muito CO, porém, sendo vantajoso em termos de custo, como verificado no estudo com diesel S500. Levando em consideração apenas o estudo com o diesel S500, pois as condições de análises das misturas foram mantidas constantes, conclui-se que misturas B10 e B20 são as mais indicadas, ambientalmente e economicamente, para serem utilizadas em motores do ciclo diesel. Contudo, o estudo mostrou-se interessante e com resultados satisfatórios, tendo em vista que apresentou dados que justificam o fato do biodiesel ser considerado um combustível “verde”, principalmente em misturas com o óleo diesel, e uma possível alternativa para a geração de energia elétrica para os horários de maior consumo.

Apesar do biodiesel não estar em grande evidência no contexto energético atual, estudos com esse combustível são de grande valia, principalmente para tentar viabilizar o custo-benefício, isto que é um dos entraves para o uso desse biocombustível. Além disso, o emprego de biodiesel em misturas com o diesel apresentou, nesse e em outros estudos, resultados que viabilizam o uso dessas misturas em motores a diesel. Isso, aliado com aspectos econômicos positivos referentes ao cultivo de oleaginosas, reforça a importância de se aumentar a produção e, conseqüentemente, o uso do biodiesel, até porque novas alternativas energéticas, principalmente as renováveis, precisaram ser cada vez mais utilizadas em substituição ao petróleo.

Ademais, os resultados e discussões contidos nesse trabalho servem como inspiração para trabalhos futuros, os quais podem ser focados nos seguintes tópicos: quantificação da emissão de dióxido de enxofre para diferentes dieseis; realização das medições em replicatas e com um total controle dos parâmetros operacionais do moto gerador; utilização de um biodiesel totalmente especificado; estudar a influência da temperatura na geração de NO_x; realização de um estudo de viabilidade econômica completo, ou seja, considerando, também, a tarifação de demanda; analisar a viabilidade econômica do uso do biodiesel em moto geradores em outras regiões do Brasil.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Biodiesel – Introdução**. Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/?pg=46827&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1303522675218>>. Acesso em: 23 abr. 2011.

_____. **Leilões de Biodiesel**. Disponível em:<

<http://www.anp.gov.br/?pg=58975&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1327721333535>>. Acesso em: 27 jan. 2012.

_____. Resolução nº 7, de 19 de março de 2008. **Diário Oficial da União**, 20 de mar. de 2008. Disponível em:<

[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm\\$3.0\\$q=\\$x=\\$nc=6637](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates$fn=document-frame.htm$3.0$q=$x=$nc=6637)>. Acesso em: 13 mai. 2011.

_____. **Sistema de levantamento de preços**. Disponível em:

<http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Semanal_Estado.asp>. Acesso em: 27 jan. 2012.

ANDRADE, Jailson B. et al. Biodiesel: *An Overview*. **J. Braz. Chem. Soc**, v. 16, n. 6B, 2005.

BRASIL. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>>. Acesso em: 9 mai. 2011.

BRAUN, Silvana; APPEL, Lucia G.; SCHMAL, Martin. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel – a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle de emissões e tendências futuras. **Química Nova**, São Paulo, v.27, n. 3, mai/jun. 2004.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Taxas e Tarifas**. Disponível em:

<<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Fcomercial%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F23BF37E67261209C03257488005939EB>>. Acesso em: 28 jan. 2012.

_____. **Manual do Cliente**. Disponível em:

<[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/docs/8049A74B185AB446032574FD00623B42/\\$FILE/manual_grande_cliente.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/docs/8049A74B185AB446032574FD00623B42/$FILE/manual_grande_cliente.pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2012.

ENWEREMADU C.C; RUTTO H.L. *Combustions, emissions and engine performance characteristic of used cooking oil biodiesel – A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 14, jul. 2010.

FERRARI, Roseli A.; OLIVEIRA, Vanessa da S.; SCABIO, Ardalla. Biodiesel de soja – Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, 2005.

FERREIRA, Sérgio L. et al. Análise por cromatografia gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (B10). **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 3, 2008.

GONÇALVES, Josane A. **Análise de emissões de gases de combustão em motor do ciclo diesel utilizando óleo diesel e óleos vegetais puros**. 2008. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

HE, Kebin et al. *Comparison of particle emissions from an engine operating on biodiesel and petroleum diesel*. **Fuel**, fev. 2011.

HIROSE, Fábio T.; FACHINETTO, Marco A. **Inventário do ciclo de vida do processo de obtenção do biodiesel de soja**. 2009. 144 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

KNOTHE, Gerhard. **The Biodiesel Handbook**. Champaign: AOCS Press, 2005.

LEITE, Rogério C. de C.; LEAL, Manuel R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos Estudos – CEBRAP**, São Paulo, n. 78, jul. 2007.

LÔBO, Ivan P.; FERREIRA, Sérgio L. C.; CRUZ, Rosenira S. da. Biodiesel: Parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**. São Paulo, v. 32, n. 6, jul. 2009.

MAGÍN, Lapuerta; ARMAS, Octavio; RODRÍGUEZ, José F. *Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions*. **Progress in Energy and Combustion Science**. Ciudad Real, v. 34, set. 2007.

PARANÁ. Lei nº 13.806, de 30 de setembro de 2002. **Diário Oficial**, nº 6327, 01 out. 2002.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA. **Formas de comercialização do óleo diesel**.

Disponível em:<

http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/oleodiesel!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ3cLI6B8JE55gyAjSnQ7GZOk29_f0xUob-Dq6mFsDIROSLexfIR6Tn4S0I9-Hvm5qfqR-IHmSKb5ebgZGPMeeLt7hhgbGxiY6EfmPKYnJlfqF-SGhkZUOqcDAPya5SQ!/dl3/d3/L0IJSklNa2shL0ICakFBTXIBQkVVSQ0IBISEvWUZOQzFOS18yN3chLzdfOU8xT05LRzEwT05IRjAyTFRLR0IUMzMwMDQ!/?PC_7_901ONKG10ONHF02LTKGIT33004000000_WCM_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/oleo+diesel/formas+de+comercializacao+do+oleo+diesel>. Acesso em: 7 mai. 2012.

____. **Óleo Diesel**. Disponível em:<

http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/paraembarcacoes/oleodiesel/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwMLD383A6MgbwNLE0MjAyDQL8h2VAQA9k0JIQ!!/?PC_7_9O1ONKG108HOF02RK094120003000000_WCM_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/oleo+diesel/caracteristica+do+oleo>. Acesso em: 17 mar. 2012.

PONZONI, Andre L.L. **Desenvolvimento de um sistema para caracterização de sensores de gases**. 2007. 105 f. Dissertação de Mestrado – Pós - graduação em Física, Universidade Estadual de Maringá, 2007. Disponível em: <

http://www.pfi.uem.br/mfi/disserta_teses/teses_pdf/andre_luiz_lima_ponzoni_2007.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2012.

PORTAL BR. **Óleo Diesel**. Disponível em:

<http://www.br.com.br/wps/portal/!ut/p/c0/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQwsLQ_2CbEdFAHrtAYU!/?WCM_GLOBAL_CONTEXT=>>. Acesso em: 22 abr. 2011.

PORTAL DO BIODIESEL. **O Biodiesel**. Disponível em:

<<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 22 abr. 2011.

PORTAL DUPONT. Metilato de Sódio. Disponível em <

http://www2.dupont.com/Sodium/pt_BR/tech_info/index.html>. Acesso em: 28 jan. 2012.

PORTAL TN SUSTENTÁVEL. **A força do biodiesel**. Disponível em:

<<http://www.tnsustentavel.com.br/biodiesel>>. Acesso em: 24 abr. 2011.

QUINTELLA, Cristina M. et al. Cadeia do biodiesel da bancada à indústria: uma visão geral com prospecção de tarefas e oportunidades para P&D&I. **Química Nova**. São Paulo, v. 32, n. 3, mar. 2009.

RAMOS, Luiz P. et al. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, jul/ago. 2000.

RANDAZZO, Mário L.; **Emissões e performance de um veículo operando com misturas de óleo diesel, biodiesel e etanol**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

ROCHA, Clarissa F.; GNOATTO, Victor E. **Purificação de óleos vegetais e quantificação dos gases liberados na queima destes óleos em motores à diesel adaptados**. 2008. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Química Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Resolução nº 54, de 22 de dezembro de 2006. **Diário Oficial**, 27 dez. 2006.

SUAREZ, Paulo A. Z. et al. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Química Nova**. São Paulo, v. 32, n. 3, mar. 2009.

TECNOLOGIAS BIOENERGÉTICAS Ltda. (TECBIO). **Procedimento Operacional Padrão**, Curitiba, 2007.

TOLMASQUIM, Mauricio T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

VIANNA, Fernanda C. **Análise de ecoeficiência: avaliação do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e petrodiesel**. 2006. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ANEXOS

ANEXO A – Certificado de calibração do analisador portátil de emissões


CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 20178/11

LABORATÓRIO DE GASES DA COMBUSTÃO

Cliente: SIMILAR TECNOLOGIA E AUTOMAÇÃO LTDA
Endereço: R. ALAGOAS 2466 – CURITIBA – PR
Ref. Cliente: SUA NF: 2435 **Ref. ECIL:** OS: 9768

Objeto da Calibração: Analisador Portátil de Gases da Combustão
Modelo: ECOLINE 6000
Fabricante: Eurotron **N.º Série:** 106185

PROCEDIMENTO:

A calibração foi realizada conforme procedimento IT- 884 rev.1

RASTREABILIDADE:
GÁS PADRÃO:

Gás Padrão (tipo)	Unidade	Valor Padrão	Certificação	N.º certificado	Validade
Oxigênio (O ₂)	% vol.	10,4	White Martins	40740132	12/05/13
Oxigênio (O ₂)	% vol.	0,0	White Martins	40741217	11/05/16
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	212	White Martins	40740132	12/05/13
Monóxido de Carbono (CO)	Ppm	1.001	White Martins	40741217	11/05/16
Óxido Nítrico (NO)	ppm	520	White Martins	40743227	21/05/12
Óxido Nítrico (NO)	ppm	1.016	White Martins	40743229	21/05/13
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	ppm	90	White Martins	40624860	16/07/11
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	ppm	215	White Martins	40715472	11/03/12
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	ppm	1.001	White Martins	40684127	16/12/11
Metano (CH ₄)	% vol.	25.090	White Martins	40618720	02/07/15

TEMPERATURA:

Calibrador (tipo)	N.º série	Certificação	N.º certificado	Validade
Cappo 10 n/s	C10508/0082	ECIL	3659-11	16/05/12

CONDIÇÕES AMBIENTAIS:

Temperatura Ambiente: 25°C ± 5°C
 Umidade Relativa do Ar: 55% ± 30%


 Marcos Adriano
 Eng. Responsável

Data da Calibração: 03/08/2011
 Data da Emissão: 03/08/2011



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 20178/11

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

1- GASES

Gás Padrão (tipo)	Unidade	Incerteza (1)	Valor Padrão	Valor Teste	Erro
O ₂ (Ar Ambiente)	% vol.	-	20,9	20,9	0,0
O ₂	% vol.	0,4	10,4	10,5	0,1
O ₂	% vol.	0,2	0,0	0,2	0,2
CO	ppm	11	212	215	3
CO	ppm	40	1.001	999	-2
NO	ppm	21	520	515	-5
NO	ppm	41	1.016	1.014	-2
NO ₂	ppm	8	90	90	0
SO ₂	ppm	9	215	212	-3
SO ₂	ppm	19	1.001	1.005	4
CH ₄	% vol.	0,3	25090	2,50%	0,0

2- TEMPERATURA

Padrão (tipo)	Unidade	Incerteza (1)	Valor Padrão	Valor Teste	Erro
TC K	°C	0,8	100,0	100,2	0,2
TC K	°C	1,8	400,0	400,1	0,1
TC K	°C	2,8	700,0	700,1	0,1

Observações:

1. A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência K=2, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.
2. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido a calibração, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

Página 2 de 2

ECIL PRODUTOS E SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE LTDA

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - Paulas e Mendes
Piedade - SP - 18170-000
Fone: (15) 3244-8000 - Fax: (15) 3244-1672
www.ecil.com.br ecil@ecil.com.br