

IVAN WERNCKE

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM MOTOR GERADOR DE 5 KVA
OPERANDO NO MODO DUAL COM DIESEL, BIODIESEL DE CRAMBE E
BIOGÁS**

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
JANEIRO - 2014**

IVAN WERNCKE

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM MOTOR GERADOR DE 5 KVA
OPERANDO NO MODO DUAL COM DIESEL, BIODIESEL DE CRAMBE E
BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura para obtenção do título de Mestre.

Professor Orientador: Dr. Cleber Antonio Lindino.

Professor Coorientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
JANEIRO – 2014**

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO (CIP)

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

W524d Werncke, Ivan
Desempenho energético de um motor gerador de 5 kVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de crambe e biogás / Ivan Werncke—
Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
60p.

Orientador: Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino
Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

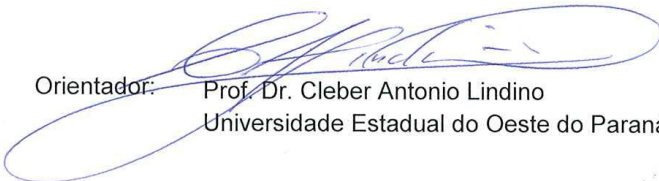
1. Biogás. 2. Biodiesel de crambe. 3. Motor dual. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 628.74

IVAN WERNCKE

**“Desempenho energético de um motor gerador de 5 kva operando
no modo Dual com diesel, biodiesel de crambe e biogás”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Flavio Gurgacz
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. André Sandmann
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira



Prof. Dr. José Ailton Azevedo dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira

Cascavel, 23 de janeiro de 2014.

Dedicatória

Aos meus pais, Ignácio Fuchter Werncke e
Helena Teresinha Costa Werncke, pelo
apoio, exemplo e dedicação.

Dedico!

Agradecimento

À Deus, por me dar vida e saúde;

À minha família, pelo apoio, incentivo e paciência;

Ao professor Dr. Cleber Antonio Lindino, pela orientação e colaboração;

Ao Professor Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pela orientação e colaboração;

Ao Professor Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti, pela colaboração e disponibilidade;

Ao Sr. Ivanir Martelli, por disponibilizar os recursos de sua granja para realização deste trabalho;

Ao Professor Dr. Flávio Gurgacz, pela colaboração no desenvolvimento do trabalho;

À minha namorada, Elesá, pelo apoio, incentivo e compreensão nos momentos difíceis;

À secretária do PPGEA, Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt, pela atenção e zelo com o programa de mestrado;

Aos demais professores não citados neste momento, mas importantes nesta caminhada;

Aos meus colegas de mestrado, Douglas Bassegio, Márcio Roberto Rigotte, Rovian Bertinato, Thaís Cristina Moraes Vidal e demais colegas não citados;

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro.

À UNIOESTE, por oferecer o programa de Mestrado em Energia na Agricultura;

A todos os amigos que fiz nesta Universidade.

Obrigado!

WERNCKE, Ivan, M. Sc. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Janeiro de 2014. **AValiação de um motor gerador de 5 kVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de crambe e biogás.**

Professor Orientador Dr. Cleber Antonio Lindino.

RESUMO

A constante busca pela diversificação das fontes de energia traz consigo a necessidade de novas soluções tecnológicas e para que isso seja possível, é preciso avaliar algumas opções de geração de energia. O presente estudo avaliou o comportamento do motor de combustão interna quanto à influência da substituição gradual até total de diesel comercial por biodiesel a partir de óleo de crambe e a influência do uso de biogás, operando o motor em modo Dual. Foram avaliados o poder calorífico do diesel, do biodiesel e do biogás, a potência gerada em função da carga imposta (kW.kW^{-1}), o consumo específico de combustível líquido (g.kWh^{-1}), consumo energético (kJ.h^{-1}), rendimento (%), redução de consumo de diesel-biodiesel (%), emissão de gases: óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO) e a variação de temperatura dos gases gerados no motor. O experimento foi realizado no laboratório de Gaseificação e Microgeração de eletricidade da Universidade Estadual do Oeste do Paraná e em uma unidade de engorda de leitões em Medianeira - PR. O diesel utilizado era composto de 95 % de Diesel mineral e 5 % de biodiesel, conforme normas vigentes. Foi analisado o PCI do diesel e do biodiesel com uma bomba calorimétrica E2K. A composição do biogás foi analisado com o DRAGER X-AM 7000. Para a mensuração de combustível utilizou-se um fluxometro OVAL M-III LSF41L0-M2 e os dados foram gravados pelo datalogger FIELD LOGGER. Para a mensuração do consumo de biogás foi utilizado um medidor de gás marca SCHIMBERGER, modelo GALLUS 1000. Os dados de consumo de biogás foram anotados em planilha eletrônica. A energia elétrica gerada foi mensurada pelo equipamento AE-200, marca INSTRUTHERM. A emissão e temperatura dos gases de exaustão foi analisada pelo equipamento PCA-3, marca BACHARACH. O PCI do diesel foi de 40141 kJ.kg^{-1} e do biodiesel de crambe foi de 36853 kJ.kg^{-1} . A concentração de metano no biogás foi de 66 % e o PCI foi de $23,7 \text{ MJ.m}^{-3}$. A potência elétrica gerada no modo normal foi menor que no modo Dual. O consumo específico de combustível líquido foi menor no modo Dual que no modo normal. A máxima eficiência no modo normal foi de 23,32 % com diesel na carga de 5 kW e no modo dual foi de 14,58 %, com B75 e carga de 4 kW. A máxima economia foi de 87% para as cargas de 2 e 3 kW do ensaio com B100. A emissão de NO_x foi menor com a inserção de biogás. Para a emissão de CO não houve uma tendência sobre a interferência das proporções de biodiesel e a inserção de biogás. A temperatura de exaustão dos gases elevou com a inserção de biogás e com o aumento da carga, chegando a valores acima de 500°C .

Palavras-chave: Biogás, biodiesel de Crambe, motor Dual.

WERNCKE, Ivan, State University of Western Paraná, January, 2014. **EVALUATION OF A GENERATOR 5 KVA ENGINE OPERATING IN DUAL MODE WITH DIESEL AND BIODIESEL CRAMBE BIOGAS**

Teacher Advisor Dr. Cleber Antonio Lindino

ABSTRACT

The constant search for new energy sources leads to need for new technological solutions, which require the analysis of some of the options for energy generation. This search assessed the behavior of an internal combustion engine in what concerns to the influence of gradual to total substitution of commercial diesel for crambe biodiesel and the influence of the use of biogas, with the engine running on dual mode. The items assessed were the diesel, biodiesel and biogas calorific power; the power generated according to the load (kW.kW^{-1}); the specific consumption of liquid fuel (g.kWh^{-1}); the energetic consumption (kJ.h^{-1}); return/yield (%); the reduction of diesel-biodiesel consumption (%); gas emission: nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxides (CO), and the variation of engine gas temperature. The experiment was performed at the Gas and micro-generation of electricity laboratory at the State University of West Parana (UNIOESTE), and in a pig fattening unit in the city of Medianeira – PR. The diesel used in the experiment was composed of 95% mineral diesel and 5% biodiesel, according to current standards. Both diesel and biodiesel's inferior calorific power were assessed with an E2K calorimeter. Biogas was analyzed with DRAGER X-AM 7000. In order to assess the fuel, an OVAL flowmeter model M-III LSF41L0-M2 was used. Data was recorded by means of a FIELD LOGGER data logger, by NOVUS. The assessment of biogas consumption happened with the aid of a gas meter, by SCHIMBERGER, model GALLUS 1000. Data were transferred to an electronic spreadsheet. The electricity generated was measured by analyzer AE-200, by INSTRUTHERM. The equipment used in the analysis of gas emission and temperature was BACHARACH's PCA-3. The Inferior Calorific Power (PCI) found was 40141 kJ.kg^{-1} for diesel and 36853 kJ.kg^{-1} for crambe biodiesel. Methane concentration in biogas was 66% and its PCI was 23.7 MJ.m^{-3} . The electric power generated in normal mode was up to 33% lower than in dual mode for the trial with B100. The specific consumption of the liquid fuel was lower in dual mode than in normal mode. The maximum efficiency in normal mode was 23.32% with diesel at a load of 5 kW and 14.58% in dual mode with B75 and load of 4 kW. Maximum economy was 87% for loads of 2 and 3 kW of the trial with B100. NO_x emission was lower with the insertion of biogas. Regarding CO emission, there wasn't a trend on the interference of biodiesel proportions and biogas insertion. The gas exhaustion temperature increased with the insertion of biogas and with load raise, reaching values over 500°C.

Keywords: Biogas, Biodiesel crambe, dual motor.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Energia no Brasil e no mundo	3
2.2	Biodiesel.....	3
2.3	Regulamentação do Biodiesel e fontes de matéria-prima.....	4
2.4	Produção de biodiesel.....	5
2.5	Vantagens e desvantagens.....	5
2.6	Crambe	6
2.7	Biodiesel de Crambe	7
2.8	Biogás	8
2.9	Produção de biogás	9
2.10	Utilização do biogás.....	10
2.11	Motor ciclo Diesel.....	10
2.12	Funcionamento do Motor ciclo Diesel	11
2.13	Motor Bi-combustível	13
3	Materiais e Métodos	15
3.1	Metodologia.....	15
3.2	Diesel, biodiesel e misturas.....	16
3.3	Análise calorimétrica do combustível	17
3.4	Poder calorífico do biogás.....	18
3.5	Energia elétrica gerada	19
3.6	Grupo motor gerador.....	20
3.7	Conexão e inserção de biogás.....	21
3.8	Banco de resistências	22
3.9	Sistema de mensuração de combustível	23

3.10	Consumo de biogás	24
3.11	Consumo específico de combustível líquido	24
3.12	Consumo energético	25
3.13	Rendimento	26
3.14	Emissão e temperatura dos gases de exaustão	26
4	Resultados e discussões	28
4.1	Poder calorífico superior, inferior e densidade do combustível	28
4.2	Poder calorífico do biogás	29
4.3	Energia elétrica gerada	29
4.4	Consumo específico de combustível	31
4.5	Consumo energético	33
4.6	Rendimento	34
4.7	Economia	35
4.8	Emissão de NO _x	37
4.9	Emissão de CO	38
4.10	Variação de temperatura de gases	40
5	Conclusões	43
6	Trabalhos futuros	44
7	Referências	45

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população mundial, popularização de máquinas, equipamentos e melhora no poder aquisitivo é normal que ocorra elevação dos níveis de consumo de produtos e principalmente de energia. Para suprir esta demanda crescente é necessário que seja produzido mais energia, o que acarreta em aumento de emissão de gases de efeito estufa, maior inserção de carbono na atmosfera, degradação ambiental devido à exploração de petróleo e seus derivados, dentre outros problemas.

Atualmente, grande parte do aumento da demanda de energia brasileira vem sendo suprida pelo petróleo e seus derivados, mascarando a real produção de energia considerada renovável, como a hidroelétrica, da biomassa da cana de açúcar e de biodiesel. No entanto não pode-se deixar de citar fontes muito importantes, com grande potencial e ainda pouco explorada, como a energia das águas do mar, do vento, do sol, do biogás e energia geotérmica.

O uso deste tipo de energia contém um grande potencial, que deve ser estudado e aprimorado, na busca da viabilidade econômica e baixo impacto ambiental.

O biogás é um bom exemplo de aproveitamento energético, pois é o resultado de um processo que melhora as características químicas e físicas de rejeitos humanos e animais, transformando-os em biofertilizante e energia. O correto processamento de rejeitos humanos e de animais pode produzir energia química na forma de biogás e ser utilizado na geração de energia elétrica, mecânica e térmica.

O biodiesel é produzido a partir dos óleos de plantas como a soja, girassol, crambe e canola. Muitas delas têm grande potencial de produção e características agrônômicas que estão sendo estudadas, como o crambe.

Neste sentido, a avaliação do comportamento de um grupo motor gerador, em relação à substituição de óleo diesel comercial, que conta atualmente com 95 % de diesel mineral, por biodiesel a partir de óleo de crambe é de fundamental importância para que se possa no futuro inserir, com fundamentação técnica, novas plantas e processos de produção de energia.

O presente estudo teve por objetivo estudar a influência do biodiesel obtido a partir de crambe em um motor gerador ciclo Diesel e a influência da inserção de biogás na entrada, operando o motor de modo Dual.

Objetivo: Avaliar o comportamento do motor com a inserção de diferentes proporções de diesel e biodiesel e posterior inserção de biogás.

Objetivos específicos:

- Avaliar o poder calorífico inferior do diesel, biodiesel e biogás;
- Avaliar a energia elétrica gerada, consumo específico de combustível, consumo energético, eficiência e redução do consumo de combustível, sob diferentes níveis de carga;
- Avaliar a emissão de NO_x , CO e a variação de temperatura de saída dos gases de exaustão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia no Brasil e no mundo

No Brasil em 2012, a oferta interna de energia aumentou 4,1%, ante a elevação de apenas 0,9 % do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. O gás natural, petróleo e seus derivados responderam por 97% deste incremento, devido basicamente à redução da oferta interna de biomassa da cana e de hidroeletricidade. Ainda em 2012, mesmo com aumento da produção de etanol em 2,4%, a oferta interna de etanol reduziu devido à elevação de 55,3% das exportações de combustível renovável, mantendo em 42,4%, acima da média mundial, calculada em 13,2% pela Agência Internacional de Energia (MME, 2013).

2.2 Biodiesel

Conforme a Lei Federal N. 11.097 de 13 de janeiro de 2005, biodiesel é biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (BRASIL, 2005).

O biodiesel é definido como ésteres de ácidos graxos de cadeia longa derivados de biolipídios renováveis (DEMIRBAS, 2008). Basso et al. (2012) destacam que o biodiesel é um combustível alternativo para motores ciclo Diesel, sucedâneo ao diesel mineral, não tóxico, biodegradável e não requer modificações em motores ciclo diesel na substituição ao óleo diesel mineral.

2.3 Regulamentação do Biodiesel e fontes de matéria-prima

A lei nº 11.097 introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira e ampliou a competência administrativa da ANP, que passou a denominar-se Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Com isso, a ANP assumiu a atribuição de regular e fiscalizar as atividades relativas à produção, controle de qualidade, distribuição, revenda e comercialização do biodiesel e da mistura óleo diesel-biodiesel (BX), na qual B significa presença de biodiesel e X a sua porcentagem (ANP, 2013).

Desde 1º de janeiro de 2010 todo o óleo diesel comercializado no Brasil deve ser composto por 5 % de biodiesel (B5). Esta norma foi estabelecida em 2009 pela Resolução nº 6/2009 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 26 de outubro de 2009, que aumentou de 4% para 5% o percentual obrigatório de mistura de biodiesel ao óleo diesel (ANP, 2013).

Para a produção de biodiesel podem ser utilizadas matérias-primas como plantas oleaginosas, tais como soja, canola, palma, girassol, mamona, crambe, entre outras. Também podem ser utilizados óleos vegetais residuais, gorduras e sebos animais (LEMOS, 2012). Neste contexto, é possível que sejam implantadas culturas com a finalidade exclusiva de produção de óleo para a produção de biodiesel, em épocas do ano que as lavouras estão ociosas, como o caso do crambe e canola.

A vantagem do uso de biodiesel em relação ao óleo bruto é a sua eficiência no momento da queima, pois o óleo contém cadeias de carbono mais longas que o biodiesel e por isso não queima completamente no interior do cilindro, acarretando em acúmulo de carbono no motor e posterior problema mecânico, como quebra e obstrução da entrada e saída dos gases de escape.

Não é recomendado o uso de óleo bruto sem ter sido submetido ao processo de transesterificação, independente da fonte pois, conforme Maziero et al (2005), o uso de óleo bruto de girassol causa redução acentuada na eficiência do motor, contaminação do óleo lubrificante, aumenta a viscosidade, oxidação, aumento do teor de minerais, formação de incrustações no interior do motor (bico injetor e

cabeça do pistão), formação de depósitos no porta válvulas, no parafuso da bomba injetora e na entrada da bomba injetora.

Por esses motivos deve-se atentar-se aos processos de transesterificação de óleo em biodiesel, pois mesmo com pequenas porcentagens de óleo bruto no biodiesel, este pode com o tempo acarretar em problemas mecânicos ao motor e demais sistemas de injeção de combustível (BARICCATTI, 2012).

2.4 Produção de biodiesel

Para a obtenção de biodiesel a partir de óleo vegetal ou gordura animal, submete-se a matéria-prima a uma reação química denominada transesterificação. Na reação, o óleo vegetal (ou gordura animal) reage com catalisador e álcool, para produzir os ésteres de alquilo de ácidos gordos correspondentes (BASSO et al., 2012). Parente (2003) enfatiza que o biodiesel é constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente.

A produção brasileira de biodiesel em 2012 foi de 17.239.715 barris equivalente de petróleo (ANP, 2013). Observa-se que anualmente há uma grande elevação na produção de biodiesel no Brasil, impulsionado principalmente pelo aumento obrigatório da proporção de biodiesel no diesel mineral.

2.5 Vantagens e desvantagens

O biodiesel apresenta ciclo de carbono breve, menor ponto de fulgor, menor concentração de enxofre, não é tóxico e pode ser obtido de forma sustentável. Estudos da *National Biodiesel Board* demonstraram que a queima de biodiesel puro pode emitir em média 48 % a menos de monóxido de carbono; 47 % a menos de material particulado e 67 % a menos de hidrocarbonetos, sendo que em misturas de

diesel mineral e biodiesel, essas reduções são proporcionais (BELTRÃO e OLIVEIRA, 2008; HUANG et al., 2010).

Misturas com baixa percentagem de biodiesel, como o B20, podem ser usadas em equipamentos concebidos para funcionamento a Diesel, como os motores de combustão interna de ignição comandada, turbinas e caldeiras. Misturas mais elevadas podem exigir atenções especiais, na programação da combustão e a nível construtivo (U.S.DEPARTMENT OF ENERGY, 2006).

Dentre as desvantagens do biodiesel é possível citar o menor poder calorífico, cerca de 10 % em geral, problemas de congelamento em caso de baixas temperaturas, dificultando a circulação do combustível e possíveis aumentos nos níveis de emissão de NO_x (MORREIRA, 2008; PIMENTA 2008).

A produção excessiva de biodiesel faz com que áreas que sejam plantadas com culturas energéticas, como a cana de açúcar, girassol, soja, canola, crambe, dentre outras passem a competir por espaço com culturas para a alimentação humana, como feijão, milho e trigo.

2.6 Crambe

As sementes de *Crambe abyssinica* ou "crambe", como é popularmente conhecido, contêm 35,6 - 42,8% de óleo (CASTLEMAN et. al., 1999). Possui uma gama elevada de aplicações industriais, como lubrificantes industriais, inibidor da corrosão, ingrediente para a fabricação de borracha sintética, produção de películas de plástico, nylon, plastificantes, adesivos e de isolamento elétrico (FALASKA et.al., 2010).

A produtividade desta planta depende da região, clima e época de plantio, com algumas divergências na literatura consultada. Em ensaio de três anos, Fila et al. (2002) relataram a produtividade superior a 4 ton.ha⁻¹. Na Áustria Vollmann e Ruckenbauer (1993), relataram valores de rendimento de 0,97 a 3,33 ton.ha⁻¹, com um teor de óleo de 23% a 38%. No Brasil, a Fundação MS de Maracaju MS, responsável por parte das pesquisas com o Crambe no país, relata produtividade de

1 a 1,5 ton.ha⁻¹. Para o estado do Paraná verificou-se produtividade superior a 1,3 ton.ha⁻¹ (ROGÉRIO et al., 2013).

O Crambe é bem adaptado para o cultivo de entressafra, devido a sua rusticidade e cultivo curto, com o emprego dos mesmos equipamentos utilizados para culturas tradicionais de grãos como a soja (*glycinemax*) (PITOL et al., 2010.)

2.7 Biodiesel de Crambe

O biodiesel produzido a partir do óleo de crambe apresenta baixo ponto de fusão (-12°C), alta estabilidade oxidativa, apresentando-se como alternativa para mistura em outros tipos de biodiesel com menor estabilidade oxidativa em relação ao biodiesel a partir da soja (ROSCOE et al., 2010). Estudos de Wazilewski et al. (2012), mostraram que o biodiesel de crambe é mais estável que o biodiesel a partir de óleo de soja e que a mistura de biodiesel de crambe no biodiesel de soja estabiliza as alterações viscosimétricas do biodiesel de soja mesmo em diferentes proporções.

Silveira et al. (2012) relatam que o biodiesel de crambe produzido por rota metílica é mais aconselhável, de acordo com as varias situações testadas.

O processo de transformação de óleo vegetal bruto em biodiesel por meio da transesterificação é necessário pois, com isto, ocorre a quebra das cadeias longas de carbono em cadeias mais simples, redução da viscosidade e contribuir na queima completa do combustível no interior do motor. Esta reação é imprescindível a fim de evitar a queima incompleta do combustível e a formação de precipitados de carbono no interior dos motores, o que acarreta na falha do equipamento. De acordo com Machado (2007), a transesterificação de óleo de crambe em biodiesel é viável, apresentando boa porcentagem de ácido graxo convertido em éster metílico.

2.8 Biogás

Alessandro Volta, em 1776, identificou o metano presente no gás dos pântanos, resultante da decomposição de restos vegetais (CASSEB, 1996). Depois desta descoberta, em 1806, na Inglaterra, Humphrey Davy identificou um gás rico em metano e dióxido de carbono, resultante da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos (NOGUEIRA 1986).

O biogás é um gás natural resultante da fermentação anaeróbia (ausência de oxigênio) das mais diversas fontes de biomassa. A biomassa é uma fonte renovável de energia abundante que pode ser derivada de todos os materiais orgânicos produzidos por atividades humanas e naturais, incluindo resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, florestais, agrícolas e de animais (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008; WYMYSLOWSKI et al., 2010).

Conforme Sganzerla (1983), Bombaim, na Índia, é considerado o primeiro local que teve um biodigestor em funcionamento regular, modelo batelada. Em 1950, Patel instalou na Índia o primeiro Biodigestor de sistema contínuo. Na década de 1960, o fazendeiro Fry desenvolveu pesquisas com biodigestores na África do Sul. Atualmente, os biodigestores estão espalhados pelo mundo, com ênfase na China e na Índia, produzindo biogás e biofertilizante.

O biogás é composto de uma mistura de gases em diferentes concentrações, sendo que o tipo de matéria prima influência na concentração e quantidade dos gases gerados (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008; MASSÉ et al., 2010). A constituição do biogás pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Constituinte e porcentagem de gases no biogás.

Constituinte	Igoni et al. (2008)	Saloman e Lora (2005)	Huang e Crookes (1998)	Castanon (2002)
CH ₄	55-75%	40-75%	50-70%	40-75%
CO ₂	30-45%	25-40%	25-50%	25-40%
H ₂ S	1-2%	Traços	Traços	0,1-0,5%
N ₂	0-1%	Traços	0,3-3%	0,5-2,5%
H ₂	0-1%	Traços	1-5%	1-3%
CO	Traços	Traços	-	0-0,1%
O ₂	Traços	Traços	-	0,1-1%

O biogás é constituído principalmente pelo metano, que é considerado um dos responsáveis pelo aquecimento global e possui potencial de aquecimento 21

vezes maior que o dióxido de carbono. Neste sentido, o uso de biodigestores colabora para a produção e uso do metano gerado em ambientes anaeróbios.

A geração de eletricidade com motores geradores, queima direta ou indireta do biogás e utilização em turbinas são algumas formas de mitigar a emissão e promover a redução do efeito estufa (BOHRZ, 2010).

2.9 Produção de biogás

Embora a digestão ou biodigestão anaeróbia seja conhecida há muitos anos, apenas recentemente o estudo e aplicação tem despertado o interesse de diversos setores da sociedade moderna mundial, a qual busca a produção de energia limpa e renovável (WU et al., 2010).

A biodigestão anaeróbia consiste na degradação bioquímica da matéria orgânica complexa em compostos orgânicos simples e nutrientes dissolvidos, por meio da ação de bactérias que, na ausência de oxigênio livre, produzem metano, dióxido de carbono, amônia, traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixa massa molecular e envolvem uma série de reações metabólicas em que componentes complexos são reduzidos a uma mistura. Para que ocorra a produção de biogás, é necessário que a biomassa sofra a biodigestão anaeróbia, que é composta por quatro fases (WEISS et al. 2009; LANSING et al., 2008).

Na primeira fase, a hidrólise, ocorre a quebra das moléculas orgânicas complexas (proteínas, lipídios e carboidratos) em moléculas mais simples, as exoenzimas, trabalho realizado pelas bactérias hidrolíticas.

Na segunda fase, a ácida ou de acidogênese, as moléculas produzidas na hidrólise são transformadas em hidrogênio, gás carbônico, sais e álcoois.

Na terceira fase, a acetogênese, os ácidos voláteis e os álcoois são metabolizados e produzem acetato e H_2 a partir das bactérias acetogênicas e por ultimo, na quarta fase, na metanogênese é produzido o metano pelas bactérias acetotróficas (CARON et al., 2009).

A biodigestão anaeróbia pode ser influenciada pela temperatura ambiente, pH, fonte de substrato, tempo de retenção, modelo de biodigestor utilizado, concentração de matéria orgânica.

2.10 Utilização do biogás

O aproveitamento do biogás pode ocorrer na forma de queima direta para produção de energia térmica ou em geradores de energia elétrica. Para isso, o sulfeto de hidrogênio deve ser retirado do biogás a fim de evitar que ocorra a corrosão do sistema de geração de energia. Sua purificação pode ser obtida por processos de oxidação a seco, processos de adsorção, processos de biotratamento e processos de absorção química. O gás carbônico, por ser um gás inerte no biogás, provoca a redução do poder calorífico inferior (PCI) de forma direta.

O biogás produzido em unidades rurais, como granjas de suínos, pode ser utilizado para aquecimento de leitões, matrizes e animais de engorda, cocção de alimentos, geração de energia mecânica e elétrica com o uso de motores de combustão interna e turbinas a gás acoplados a geradores. Para a utilização de biogás, normalmente é necessário que sejam feitas adaptações a fim de transformar os equipamentos originalmente a gás natural ou gasolina (ciclo Otto) em equipamento a biogás (COLDEBELA, 2006).

A utilização de biogás em grupos motor-gerador para a produção de energia elétrica deve respeitar as regras de conexão com a rede da concessionária, a fim de cumprir a legislação vigente e evitar acidentes com pessoas e equipamentos.

2.11 Motor ciclo Diesel

O motor diesel ou motor de ignição por compressão é uma máquina térmica capaz de transformar a energia térmica, libertada durante a combustão de uma mistura ar-combustível, em energia mecânica. Teve sua invenção patenteada por

Rudolf Diesel em Fevereiro de 1897, sendo constituído por sistema mecânico capaz de transformar um movimento alternativo linear num movimento rotativo através de um pistão que ligado a um sistema biela-manivela, permite obter o movimento de rotação desejado (PIMENTA, 2008).

2.12 Funcionamento do Motor ciclo Diesel

O motor ciclo diesel funciona mediante o ciclo de compressão do ar e injeção de combustível no interior do cilindro do motor. Quando a compressão do ar está próxima ao seu ponto máximo, o combustível é pulverizado em alta pressão e encontra o ar em alta temperatura devido a elevada compressão imposta, ocasionando a detonação da mistura ar-combustível na câmara de combustão (PENIDO FILHO, 1996). O ciclo de funcionamento de um motor ciclo Diesel convencional quatro tempos é descrito nas Figuras 1 a 4.

- Admissão – movimento do pistão entre o PMS e o PMI em que ocorre a entrada de ar para o interior do cilindro, através da válvula de admissão aberta;

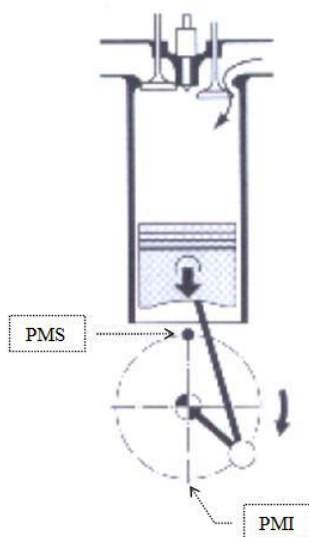


Figura 1 – Admissão de motor ciclo Diesel.

Fonte: Sanches, 2005

- Compressão – com as válvulas de admissão e escape fechadas, regresso do pistão ao PMS comprimindo o ar, provocando o seu aquecimento;

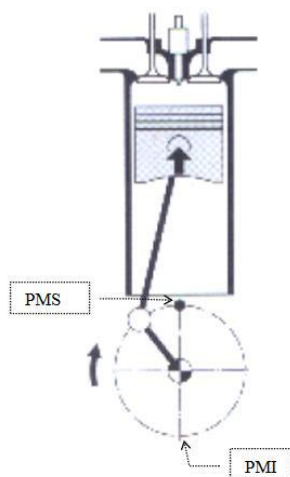


Figura 2–Compressão de motor ciclo Diesel.

Fonte: Sanches, 2005.

- Explosão - Expansão – injeção do combustível no ar comprimido provocando a ignição da mistura e aumento de pressão, obrigando a descida do pistão até PMI;

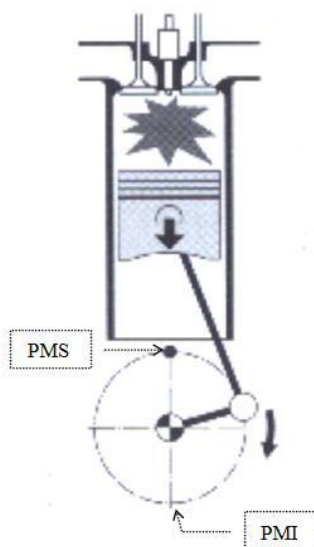


Figura3–Combustão de motor ciclo Diesel.

Fonte: Sanches, 2005.

Escape – Movimento de subida do pistão até ao PMS expulsando os gases de combustão pela válvula de escape aberta (MARTINS, 2006).

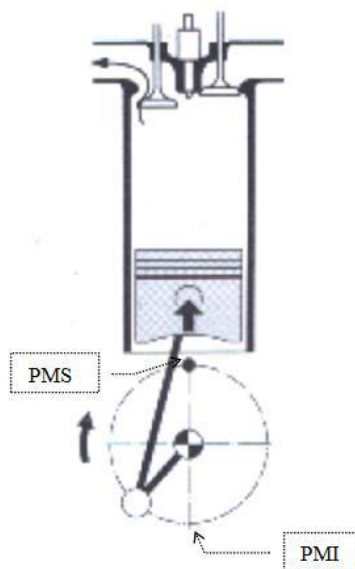


Figura 4– Escape de motor ciclo Diesel.

Fonte: Sanches, 2005.

2.13 Motor Bi-combustível

O motor de combustão a duplo-combustível é caracterizado por operar simultaneamente com combustível líquido e combustíveis secundários (gasosos), transformando energia química em energia mecânica. Além do biogás, é possível a utilização de outros combustíveis gasosos como o hidrogênio, metano, propano, gás natural veicular e gás liquefeito de petróleo (GLP).

Quando esses combustíveis são empregados simultaneamente, trazem resultados positivos, que, conforme Suzuki et al. (2011) com a utilização do biogás em motores diesel, diminuiu o consumo de combustível líquido em aproximadamente 30%.

Já quando se emprega biogás e biodiesel, pode ocorrer uma perda de potência quando comparado ao sistema biogás e diesel, pois, segundo Silva et al. (2012), a injeção de 31% de biodiesel, ocorre queda de potência de apenas 1,4 % com metano purificado a partir de biogás. Com 57 a 61% de biodiesel, observou-se perda de potência de até 12%, devido ao menor poder calorífico do biodiesel.

Dentre as vantagens do uso de motores Dual diesel/biodiesel e biogás está que são necessárias poucas adaptações e na falta de biogás, o motor irá operar normalmente apenas com diesel/biodiesel.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no laboratório de Gaseificação e Microgeração de eletricidade da Universidade Estadual do Oeste do Paraná e na Granja Martelli, localizada na Linha dourada, município de Medianeira- PR, de propriedade de Ivanir Martelli, latitude 25° 19' 47" S e longitude 54° 01' 54" O.

3.1 Metodologia

O experimento constituiu inicialmente em testar a influência do biodiesel de Crambe em diferentes proporções em um conjunto motor gerador ciclo Diesel. Posteriormente realizaram-se ensaios da influência da inserção de biogás no motor, com exceção da adição do monitoramento de consumo de biogás quando operado de forma dual. Foram realizados 4 misturas (B10, B20, B50 e B75), além da testemunha (diesel comercial) e biodiesel puro de crambe (B100). Foi desconsiderada a presença de 5% de biodiesel no óleo diesel comercial e nas respectivas misturas.

Ao operar com diesel, o motor foi avaliado com a amplitude de 0 a 5 kW de cara, com variação de 1 kW. No modo dual, procedeu-se até 4 kW, pois o motor manteve a tensão, produzindo energia suficiente para desarmar o disjuntor do painel de controle e proteção do gerador que é de 20 A.

A Figura 5 mostra o esquema do fluxograma do processo de ensaio e aquisição dos dados.

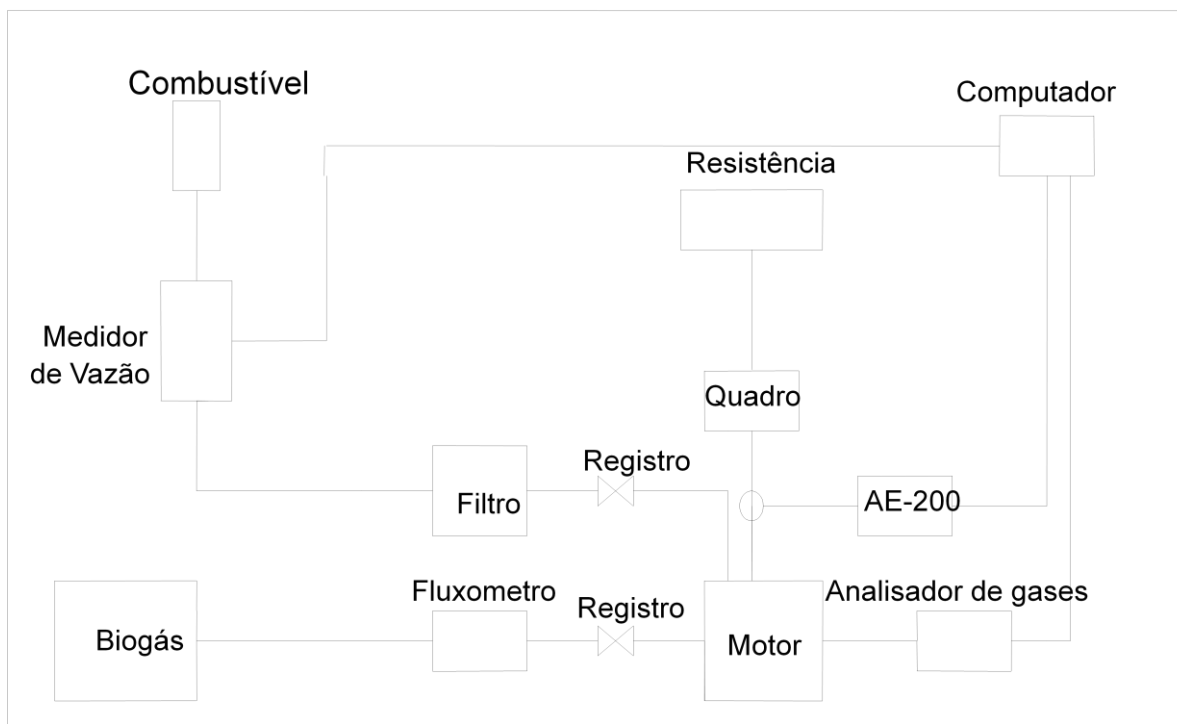


Figura 5 – Fluxograma da pesquisa

Fonte: Acervo do autor

3.2 Diesel, biodiesel e misturas

O óleo diesel utilizado como testemunha e nas misturas foi proveniente de uma mesma batelada, adquirido em um posto de combustível da cidade de Cascavel-PR, o qual contava com 5% de biodiesel, não informada a fonte, de acordo com a legislação em vigor, Lei 11.097/05, que estabeleceu o percentual obrigatório de 5% volumétrico (v/v), de adição de biodiesel ao óleo diesel mineral, a partir de 1º de janeiro de 2010. A utilização de óleo diesel com biodiesel foi utilizada por ser considerado padrão conforme relatado por diversos autores.

Reis et. al., (2013) analisaram o desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja.

Fiorese, D. A., (2011) estudou o desempenho de um motor em um dinamômetro e emissões residuais de um motor de trator agrícola operando com misturas binárias de óleo Diesel B5 e biodiesel de óleo de frango.

Bedoya et al., (2009), utilizou óleo diesel comercial da Colômbia simulando os efeitos do sistema bi combustível, diesel e biogás simultâneo em motor de ciclo Diesel.

O óleo de crambe foi transesterificado e transformado em biodiesel no Laboratório de biocombustíveis da Unioeste – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, com matéria-prima doada pela FAG – Faculdade Assis Gurgacz, do mesmo município. A transesterificação do óleo bruto ocorreu pela rota metílica utilizando como reagente o hidróxido de potássio. No preparo das misturas utilizou-se uma proveta de vidro com capacidade de 500 mL para a mensuração da quantidade de cada combustível.

3.3 Análise calorimétrica do combustível

O poder calorífico superior (PCS) do diesel e do biodiesel de crambe foi determinada na bomba calorimétrica E2K (Figura 6) do laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* Cascavel. Utilizou-se alíquotas entre 0,5 e 0,8 gramas do combustível. Realizou-se o procedimento em triplicata e efetuou-se a média dos valores obtidos, conforme manual do equipamento.



Figura 6 – Bomba calorimétrica

Fonte: BRENNEISEN (2012)

O poder calorífico inferior (PCI) (kJ.kg^{-1}) foi determinado a partir do poder calorífico superior (PCS) (kJ.kg^{-1}), conforme Volpato (2009), apud Moreira (2007) (Equação 1).

$$PCI = PCS - 3052 \quad (\text{Equação 1})$$

O PCI das misturas foi calculado em função da porcentagem de Diesel e Biodiesel em cada mistura.

3.4 Poder calorífico do biogás

O biogás, por ser uma mistura de diversos gases, mas principalmente metano e dióxido de carbono, têm o poder calorífico determinado pela porcentagem de metano (CH_4). O Poder Calorífico Inferior (PCI) de 1m^3 de metano é de 8500 Kcal.m^{-3} (IANNICELLI 2008); (COPEL, 2011).

A quantidade de energia contido no biogás é definida pela equação 2.

$$PCI_{\text{Biogás}} = \frac{P_m}{100} * PCI_{\text{Metano}} \quad (\text{Equação 2})$$

na qual:

$PCI_{\text{biogás}}$ – Poder calorífico inferior do biogás (kJ.m^{-3});

P_m – Porcentagem de metano no biogás (%);

PCI – Poder calorífico inferior do metano (kJ.m^{-3}).

A porcentagem de metano (CH_4) foi determinada na própria granja, no município de Medianeira, com o uso de um analisador de gases, marca DRAGER, modelo X-AM 7000. O equipamento também possui capacidade de leitura de dióxido de carbono (CO_2) (%), oxigênio (O_2) (%) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (ppm). Foram realizados três testes e utilizada a média dos valores obtidos.

O consumo energético de biogás foi obtido por meio da multiplicação do consumo de biogás pelo PCI (Equação 3).

$$C_{eb} = \frac{V * PCI_{\text{biogás}}}{t} \quad (\text{Equação 3})$$

na qual:

Ceb- consumo energético de biogás (kJ.s^{-1});

V - volume de biogás consumido (m^3);

$\text{PCI}_{\text{biogás}}$ - Poder calorífico inferior do biogás (kJ.m^{-3});

t - tempo (s).

3.5 Energia elétrica gerada

O banco de resistências foi utilizado para simular diferentes cargas sob o Grupo Motor Gerador (GMG), com variação de 0 a 100% da capacidade do gerador de energia elétrica. Esta potência máxima é correlacionada com o sistema de proteção do gerador. A energia elétrica gerada pelo GMG e dissipada pelo banco de resistências foi mensurada pelo analisador de energia elétrica, modelo AE-200, marca INSTRUTHERM (Figura 7). O analisador conta com datalogger interno, programável por meio de sua interface. O equipamento foi programado para ler e coletar os dados de tensão (V) e corrente (A) a cada 6 segundos. Os dados foram armazenados na memória do equipamento durante o período de coleta e descarregados no computador ao final. A potência elétrica dissipada pelo banco de resistência foi calculada pelo software do equipamento, mediante multiplicação dos valores de tensão e corrente.

O equipamento foi instaladona saída do GMG ao quadro de comando do banco de resistências.



Figura 7 – Analisador eletrônico de energia AE-200.

Fonte: Instrutherm (2013)

3.6 Grupo motor gerador

Foi utilizado o GMG (Figura 8), modelo BD – 6500 CF marca Branco, partida manual, ciclo diesel, quatro tempos, monocilíndrico, refrigerado a ar, injeção direta e lubrificação forçada por bomba de óleo. As demais especificações técnicas do motor e do gerador estão disponíveis nas Tabelas 3 e 4.



Figura 8- Grupo motor gerador

Fonte: Acervo do autor

Tabela 3- Especificações técnicas do GMG e do gerador

Potência máxima	5,5 KVA
Potência contínua	5,0 KVA
Tensão de saída	110 V / 220 V
Corrente máxima	20 A
Tomada auxiliar	Sim
Controle de tensão	Capacitor/Sem escova
Carregador de bateria	12 V; 8,3 A
Capacidade do tanque	12,5 l
Autonomia (50 % de carga)	5,20 h
Peso	95 Kg
Ruído (7 m)	79 db A
Comprimento	735 mm
Largura	485 mm
Altura	670 mm

Fonte: Catálogo Branco

Tabela4- Especificações do motor

Diâmetro x Curso (mm)	86 x 70
Cilindrada (cm) ³	406
Taxa de compressão	19 : 1
Potência máxima	10,0 cv a 3600 rpm
Potência contínua	9,0 cv a 3600 rpm
Torque máximo	2,70 kgfm a 2000 rpm
Peso (PM/PE)	46/51 kg
Consumo (L. h ⁻¹)	2,15
Capacidade do tanque (L)	4,5
Capacidade de óleo do Carter (L)	1,5

Fonte: Catálogo Branco

3.7 Conexão e inserção de biogás

Para o funcionamento do motor foi necessário manter uma quantidade mínima de óleo combustível, para que ocorresse a detonação por meio da compressão no interior do cilindro do motor, pois o motor ciclo Diesel não contém sistema de ignição, sendo necessário que o diesel ou biodiesel iniciem a detonação. Foi instalado na entrada de ar do motor um misturador tipo Venturi (Figura 9) e um registro tipo esfera com regulagem manual, para regular o fluxo de biogás.



Figura 9 – Misturador tipo Venturi

Fonte: Acervo do autor

3.8 Banco de resistências

Foi utilizado um banco de resistências (Figura 10) com nove resistências, composto por: 2 x 250 W, 2 x 500 W, 2 x 1000 W e 3 x 2000 W (potência dissipada com base em tensão de alimentação de 220 VCA). O controle da potência requerida foi efetuado por meio do quadro de comando que permitiu a conexão individual das resistências.

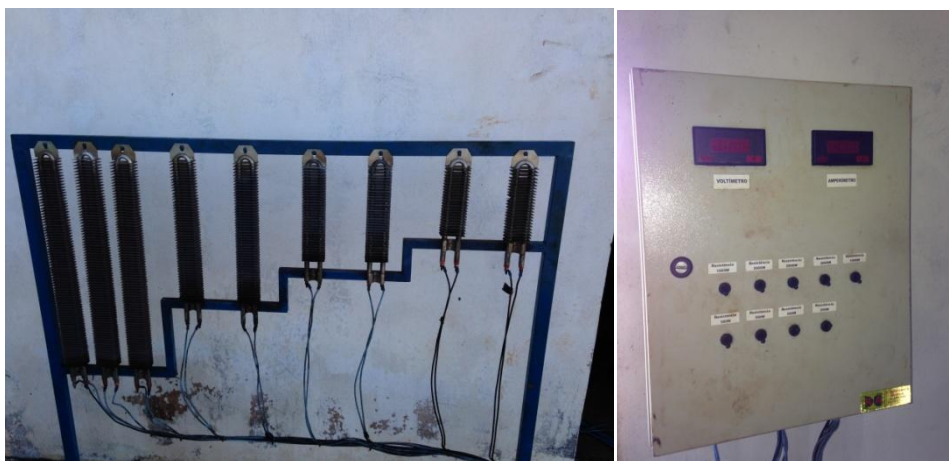


Figura 10 – Banco de resistências e quadro de comando

Fonte: Acervo do autor.

3.9 Sistema de mensuração de combustível

Para a mensuração do combustível consumido utilizou-se um medidor de vazão, FLOWMATE OVAL M-III LSF41L0-M2 (Figura 11), com capacidade de medição de 1 a 100 litros por hora e faixa de temperatura de -20 a 80°C. O fluxometro é composto de uma entrada e uma saída de líquido, com sentido de fluxo pré-estabelecido. A alimentação elétrica pode variar de 12 a 24 VDC. O fluxometro é composto por engrenagens que ao efetuar um giro completo emitem um pulso de tensão (alto) de 6,2 a 7,6 VDC e em nível normal 0,5 VDC. A cada volta (pulso) passa 1 cm³ de líquido a ser contabilizado pelo DATALOGGER (registrador de dados).

O datalogger utilizado para aquisição e registro dos dados foi o FIELDLOGGER, da marca NOVUS, com software que acompanha o equipamento, versão V1.3x. O medidor de vazão foi alimentado com a fonte auxiliar do registrador de dados e conectado a uma das entradas digitais. Programou-se um canal digital para a leitura de pulsos e um canal virtual para a contagem. O sistema do contador é de acumulação, e o registrador de dados coletou a cada 250 mili segundos quantos mililitros (pulsos) haviam passado pelo fluxometro. Após cada ensaio realizado no motor efetuou-se a transferência dos dados para o computador.



Figura 11 – Fluxometro e datalogger

Fonte: Acervo próprio.

3.10 Consumo de biogás

Para a mensuração do consumo de biogás foi utilizado um medidor de gás marca SCHIMBERGER, modelo GALLUS 1000, com vazão mínima de $0,016 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, vazão máxima de $2,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e resolução de $0,001 \text{ m}^3$. O consumo foi calculado através da equação 4.

$$cons = \frac{L_f - L_i}{t} \quad (\text{Equação 4})$$

na qual:

Cons= Consumo de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

L_i = Leitura inicial do medidor (m^3);

L_f = Leitura do final do biogás (m^3);

t = tempo (h).

3.11 Consumo específico de combustível líquido

O consumo volumétrico de combustível foi calculado pela diferença entre o valor final e o inicial gravado pelo datalogger, durante o experimento, conforme a equação 5:

$$C_v = \frac{(V_f - V_i)}{t} \quad (\text{Equação 5})$$

na qual: C_v = consumo de combustível ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$);

V_f = valor final gravado pelo datalogger (mL);

V_i = valor inicial gravado pelo datalogger (mL);

t = tempo (s).

O consumo de combustível ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$) é dado pela multiplicação do consumo volumétrico pela densidade da mistura do combustível (Equação 6).

$$C_m = C_v * \rho_c \quad (\text{Equação 6})$$

sendo:

C_m = consumo de combustível (g.s^{-1});

C_v = consumo de combustível (mL.s^{-1});

ρ_c = densidade da mistura (g.mL^{-1}).

O consumo específico de combustível líquido é dado pelo consumo mássico pela potência gerada (Equação 7).

$$C_{esp} = \frac{C_m}{Pot} \quad (\text{Equação 7})$$

sendo:

C_{esp} = consumo específico (g.kWh^{-1});

C_m = consumo mássico (g);

Pot = potência dissipada (kWh).

3.12 Consumo energético

O consumo energético é dado pela relação (Equação 8) entre a soma do consumo mássico de combustível líquido (diesel-biodiesel) mais gasoso (biogás).

$$C_{en} = (C_m * PCI_{com} + C_b * PCI_b) \quad (\text{Equação 8})$$

na qual:

C_{en} = consumo energético do grupo motor gerador (kJ.h^{-1});

C_m = consumo mássico (kg.h^{-1});

PCI_{com} = poder calorífico inferior do combustível líquido (kJ.kg^{-1});

C_b = consumo de biogás ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$);

PCI_b = poder calorífico inferior do biogás (kJ.m^{-3}).

3.13 Rendimento

O rendimento do sistema é definido pela relação entre potência gerada e consumo energético (BEDOYA et. al., 2009).

$$n = \frac{Pot}{C_{en}} * 100$$

Onde:

n= rendimento (%)

Pot= potência gerada (kW);

C_{en} = consumo energético do grupo motor gerador (kJ.s);

3.14 Emissão e temperatura dos gases de exaustão

A emissão de gases do GMG foi analisada com o analisador de gases de exaustão, modelo PCA 3, marca BACHARACH. O equipamento foi preparado para aquisição dos seguintes gases: monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). A emissão de NO_x é soma das emissões de NO e NO₂, sendo estes os valores determinados no presente trabalho. Com o equipamento foi realizada a mensuração da temperatura do ar ambiente e da temperatura de saída dos gases de exaustão.

Foram realizadas 5 coletas de dados em cada condição, sendo que foi inserida a sonda de coleta da amostra de gás após 7 minutos do início do teste e aguardado 45 segundos coletando, para iniciar a gravação, sendo que a cada 5 segundo era gravado novamente, perfazendo as 5 repetições. Após as 5 coletas, o equipamento ficava em operação até o início da outra leitura apenas captando ar ambiente, a fim de arejar o sistema e não provocar danos ao equipamento. Após o fim de todos os testes os dados gravados foram transferidos para o computador. O software do equipamento foi utilizado para efetuar a transferência dos dados do equipamento para o computador e dispor em planilha eletrônica compatível com o sistema operacional utilizado.

As especificações técnicas do equipamento encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do analisador de gases

Gás	Faixa de leitura	Precisão
CO	0 – 4000 ppm (faixa baixa)	± 10 ppm
CO	4001 – 20000 ppm (faixa alta)	± 10 ppm
NO	0 – 3000 ppm	± 5 ppm
NO ₂	0 – 500 ppm	± 5 ppm
SO ₂	0 – 5000 ppm	± 10 ppm
O ₂	0,1-20,9%	± 0,3%

Fonte: Bacharach (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Poder calorífico superior, inferior e densidade do combustível

O poder calorífico inferior do biodiesel de crambe foi 8,2% menor do que o diesel utilizado como testemunha e apresentou uma densidade menor do que a testemunha. Na Tabela 6 pode-se observar o poder calorífico superior, inferior e a densidade do diesel, biodiesel e das misturas.

Tabela 6 – PCS, PCI e densidade dos combustíveis

Combustível	PCS (kJ.kg ⁻¹)	PCI (kJ.kg ⁻¹)	Densidade (kg.m ⁻³)
B0	43193	40141	852
B10	42864	39812	854
B20	42536	39484	856
B50	41549	38497	863
B75	40727	37675	869
B100	39905	36853	874

Oliveira e Da Silva (2013) relatam em seu trabalho que o PCS do biodiesel de Crambe foi de 40564 kJ.kg⁻¹, resultado próximo ao apresentado na Tabela 6. Conforme Silva et. al., (2012) o poder calorífico inferior do diesel foi de 44351 kJ.kg⁻¹. Os mesmos autores ressaltam ainda que exista relação linear de redução do poder calorífico superior com substituição gradual de diesel por biodiesel, corroborando com os resultados encontrados.

Quanto a densidade, o biodiesel de crambe apresentou densidade de 874 kg.m⁻³, à temperatura de 20 °C. Wazilewski et al. (2012) relatam em seu trabalho o valor de densidade de 874 kg.m⁻³. Jasper (2009) relata que a temperatura de 15 °C, a densidade encontrada foi de 911,3 kg.m⁻³. O valor encontrado está dentro da faixa, ou se corrigida para a temperatura de 20° C se enquadrana faixa de 850 a 900 kg.m⁻³, definida pela AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (2010).

4.2 Poder calorífico do biogás

A porcentagem de metano mensurada com o equipamento foi de 66 %, sendo que diversos autores citam que a variação do metano está na faixa de 40 a 75 %, (Igoni et al. 2008), (Salomon e Lora, 2005), (Huang e Crookes, 1998) e (Castanon 2002). Brenneisen (2013), ao ensaiar a porcentagem de metano no biogás, relata a porcentagem de 83,6 %, acima das demais literaturas consultadas. O poder calorífico inferior do biogás utilizado para a realização do experimento foi calculado, em $23,7 \text{ MJ.m}^{-3}$. Lombardi (2011), afirma que o PCI do biogás com 60 % de metano é de $20,595 \text{ (MJ.Nm}^{-3})$ e com 70% de metano é de $24,028 \text{ (MJ.Nm}^{-3})$.

4.3 Energia elétrica gerada

A figura 12 demonstra as médias de energia gerada conforme a porcentagem de diesel e biodiesel de crambe. Observa-se que ao operar em modo Dual, o motor não perdeu potência, e ultrapassou o limite do sistema, tanto que foi limitado o experimento a carga de 4 kW, pois o disjuntor de proteção atuava, impossibilitando o experimento com 5 kW. No modo Dual, a potência se manteve estável e crescente, mesmo com o aumento da carga, enquanto que no modo normal, houve uma grande perda de potência. Quanto maior a carga aplicada sob o grupo no modo normal e quanto maior a porcentagem de biodiesel, menor a potência gerada. Para as misturas B0, B10, B20, B50, B75 e B100, houve redução de 16%, 16%, 18%, 21%, 30% e 33%, respectivamente na potência gerada na saída do GMG.

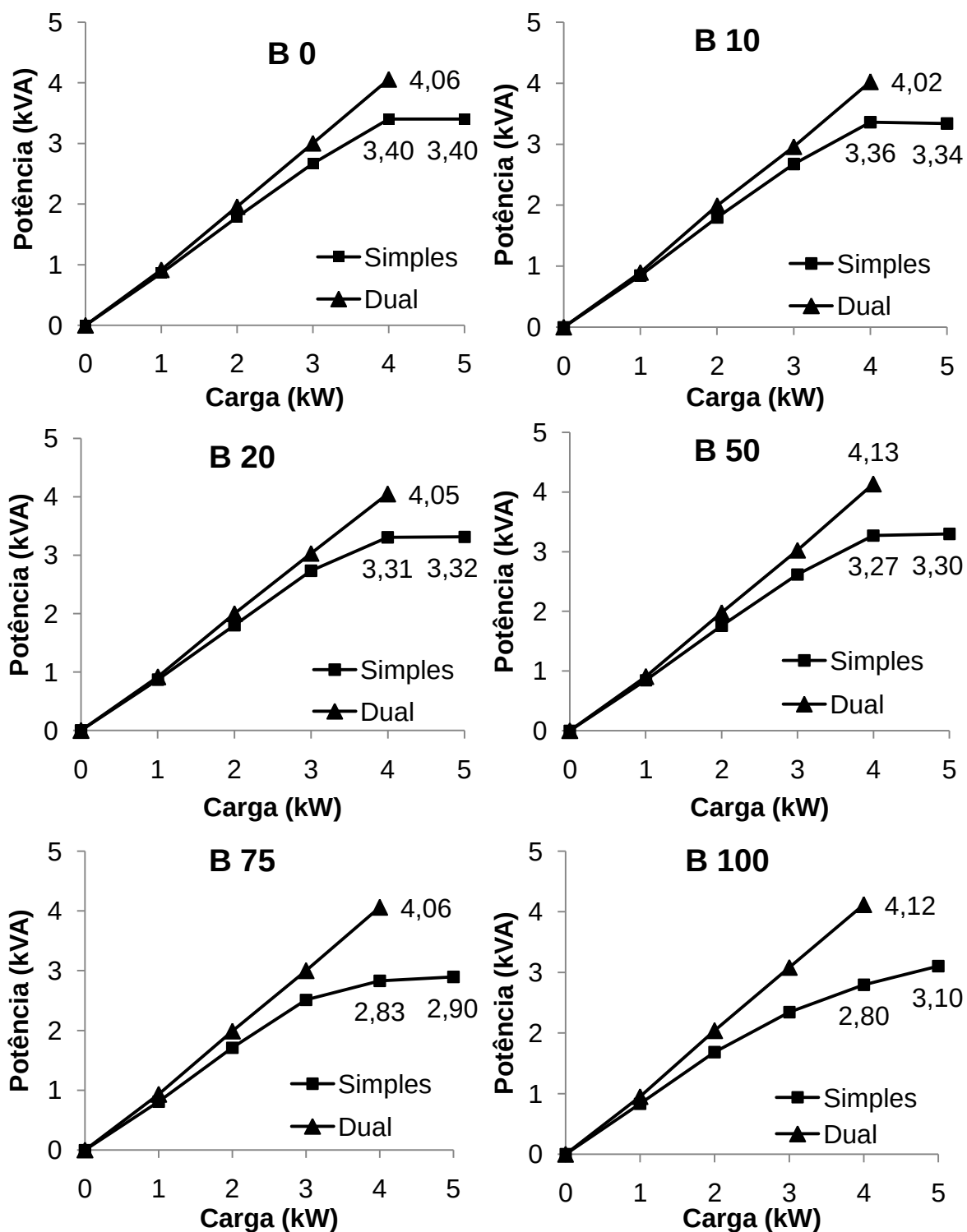


Figura 12 – Potência em função da carga das 6 misturas de combustível. Modo simples, sem biogás e modo dual, com biogás.

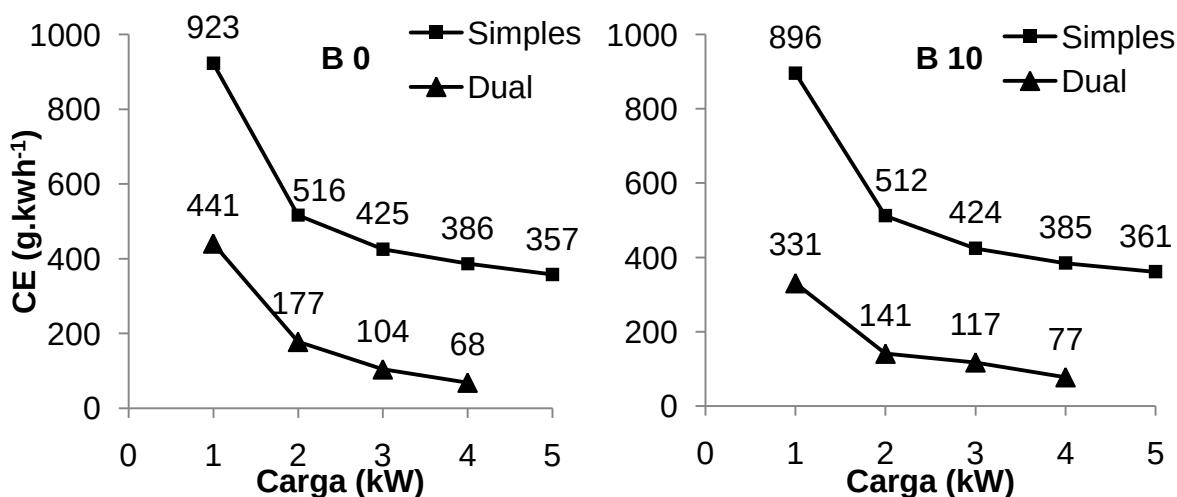
Ao analisar a potência gerada na máxima carga ensaiada no modo normal, observa-se uma redução de 8,8 % na potência gerada. No entanto, o poder calorífico inferior do biodiesel de Crambe é 8,1 % menor que o do diesel utilizado

como testemunha. Yücesu e Cumali (2006) e Aydim (2010), ao estudar o comportamento do biodiesel a partir de óleo de algodão afirmam que esta menor potência gerada está relacionada ao menor poder calorífico inferior do biodiesel. Chaves et. al, (2012) ao ensaiar a potência gerada com biodiesel de crambe relata que na maioria das cargas houve redução da potência gerada e que com o biodiesel de soja houve aumento da potência. Brenneisen (2012) ao ensaiar um motor ciclo Diesel em modo Dual encontrou redução de 68 % na potência gerada ao comparar diesel e diesel – biogás. Observa-se ainda que com carga menor, a perda de potência não foi tão elevada.

A maior viscosidade do biodiesel provoca maior dificuldade de injeção e pulverização do biodiesel no interior do cilindro do motor, fazendo com que a quantidade de combustível injetada seja maior para que ocorra a detonação (Utlü et. al., 2008)

4.4 Consumo específico de combustível

Houve redução acentuada no consumo específico (CE) de combustível líquido quanto aos dois fatores avaliados: carga e modo normal-Dual. A inserção de biogás mostrou-se eficiente para a redução do CE das misturas de combustível, sendo que houve redução em todos os ensaios realizados. O aumento da carga sob o GMG influenciou positivamente para a redução do CE. A figura 13 demonstra o CE de combustível líquido de acordo com a variação da carga.



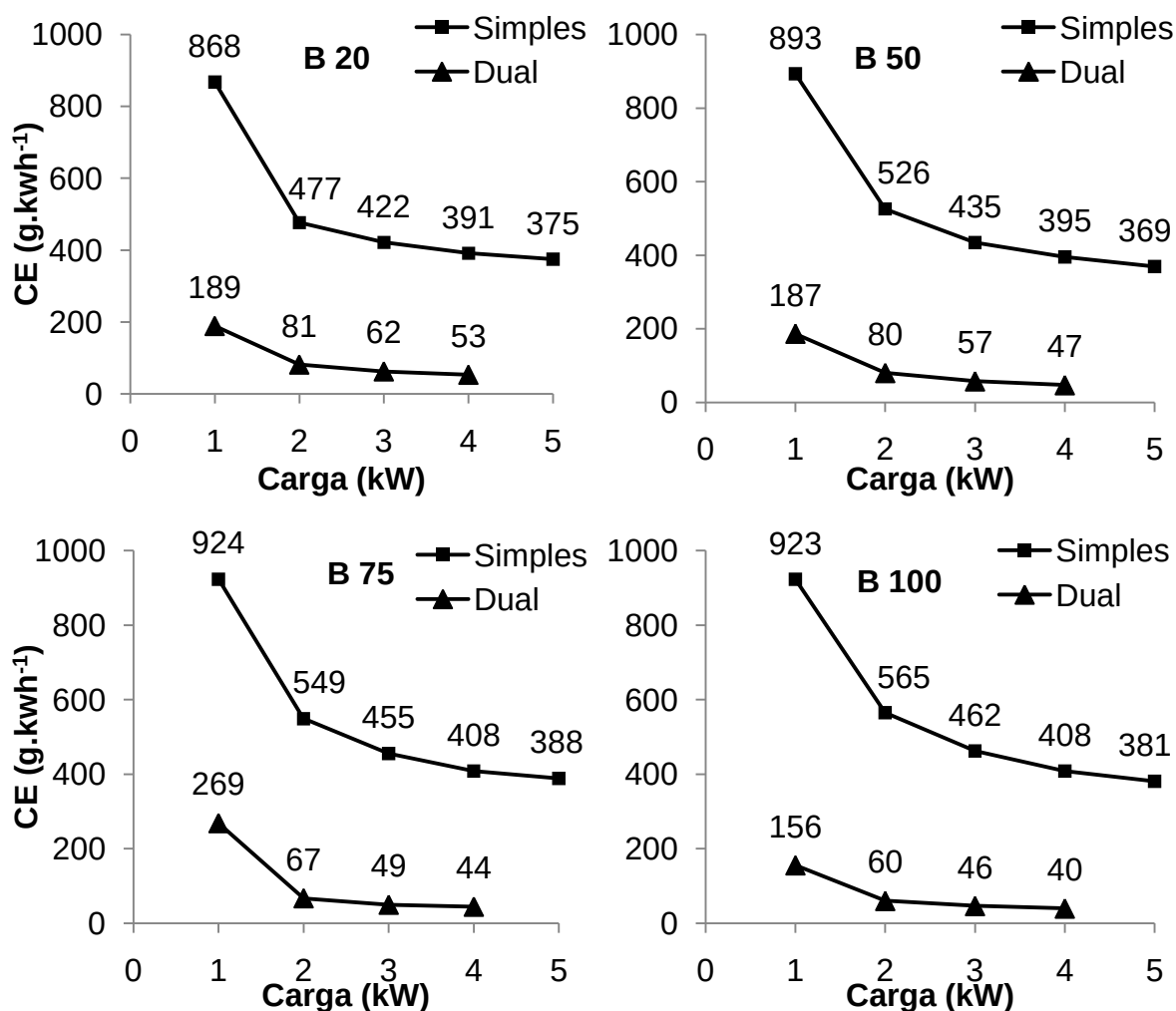


Figura 13 – Consumo específico em função da carga e combustível, com e sem biogás.

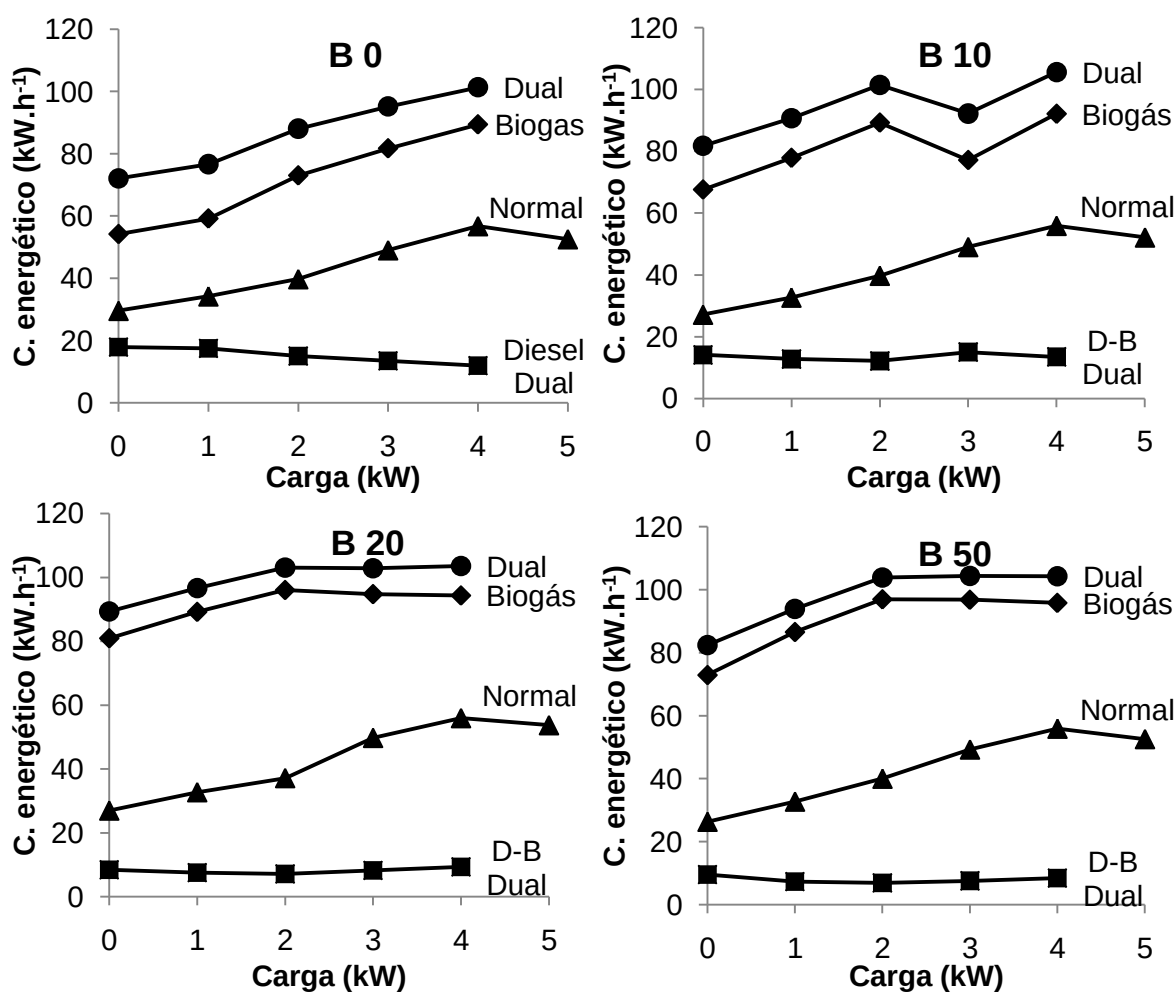
Os gráficos demonstram que houve uma diferença acentuada no CE no modo Dual. Tal fator está relacionado ao mecanismo de controle de inserção de biogás no GMG ser manual, incumbindo em diferentes proporções de inserção de biogás.

Houve redução média de 69%, 72%, 83%, 84%, 84% e 88% no consumo específico de combustível para as misturas B0, B10, B20, B50, B75 e B100 de biodiesel respectivamente. Quanto maior a proporção de biodiesel no combustível, maior foi à redução do CE. A elevada redução do consumo específico está relacionada com a maior concentração de oxigênio e maior ponto de fulgor do biodiesel, que contribui para a explosão, finalidade do uso de combustível no modo Dual (Wazilewski et. al., 2012).

4.5 Consumo energético

O consumo energético foi maior no modo dual, pois quando o motor opera desta forma, é necessário que diesel ou biodiesel faça a detonação da mistura ar-combustível. Mesmo que ocorra a detonação, não ocorre a queima total dos hidrocarbonetos e a temperatura de exaustão é relativamente mais alta, conforme os dados das emissões, que serão apresentados e discutidos posteriormente.

É possível observar que quanto mais combustível líquido é injetado, menor a quantidade de biogás consumida. Na figura 14 observa-se o consumo energético do motor normal, Dual, combustível líquido Dual e biogás.



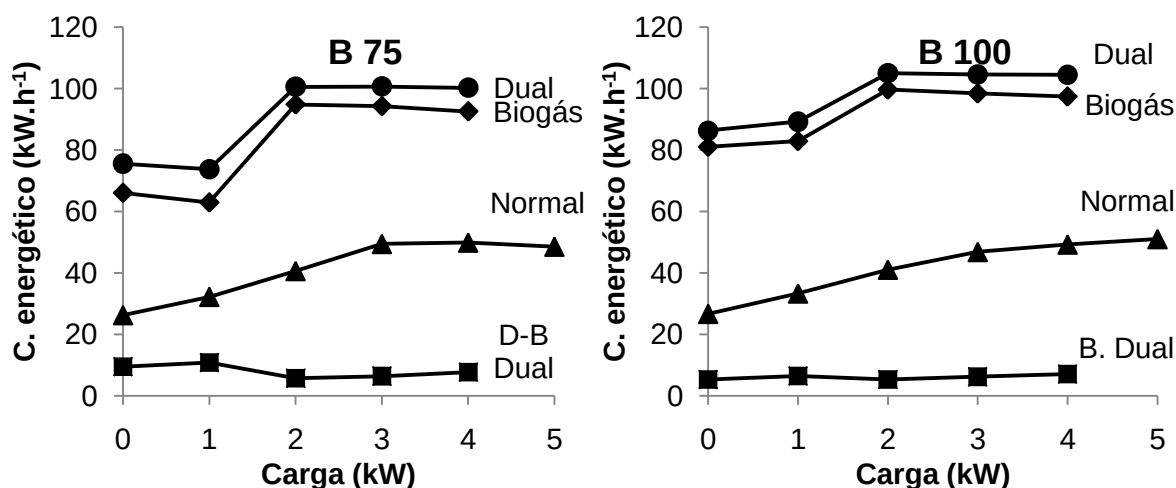
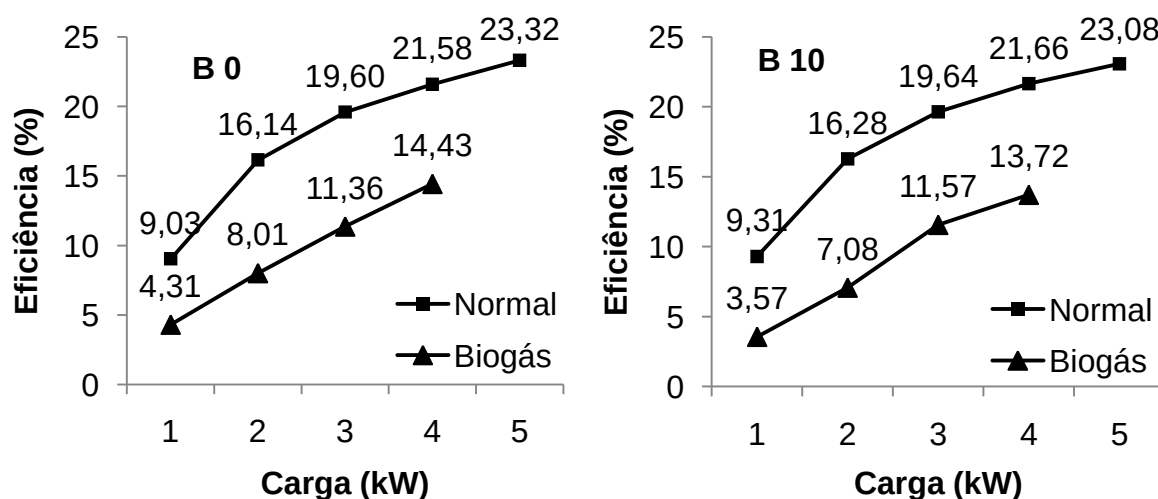


Figura 14 – Consumo energético em função da carga e combustível. (D) Diesel; (B) Biodiesel; (Normal) sem biogás; (Dual) com biogás.

4.6 Rendimento

Existe uma tendência de redução da eficiência com o aumento da proporção do biodiesel no modo normal, diferente do modo Dual, conforme pode ser observado na Figura 15. Os valores de eficiência para o modo normal são relativamente baixo devido a altas temperaturas de exaustão de gases e queima incompleta dos gases de emissão.



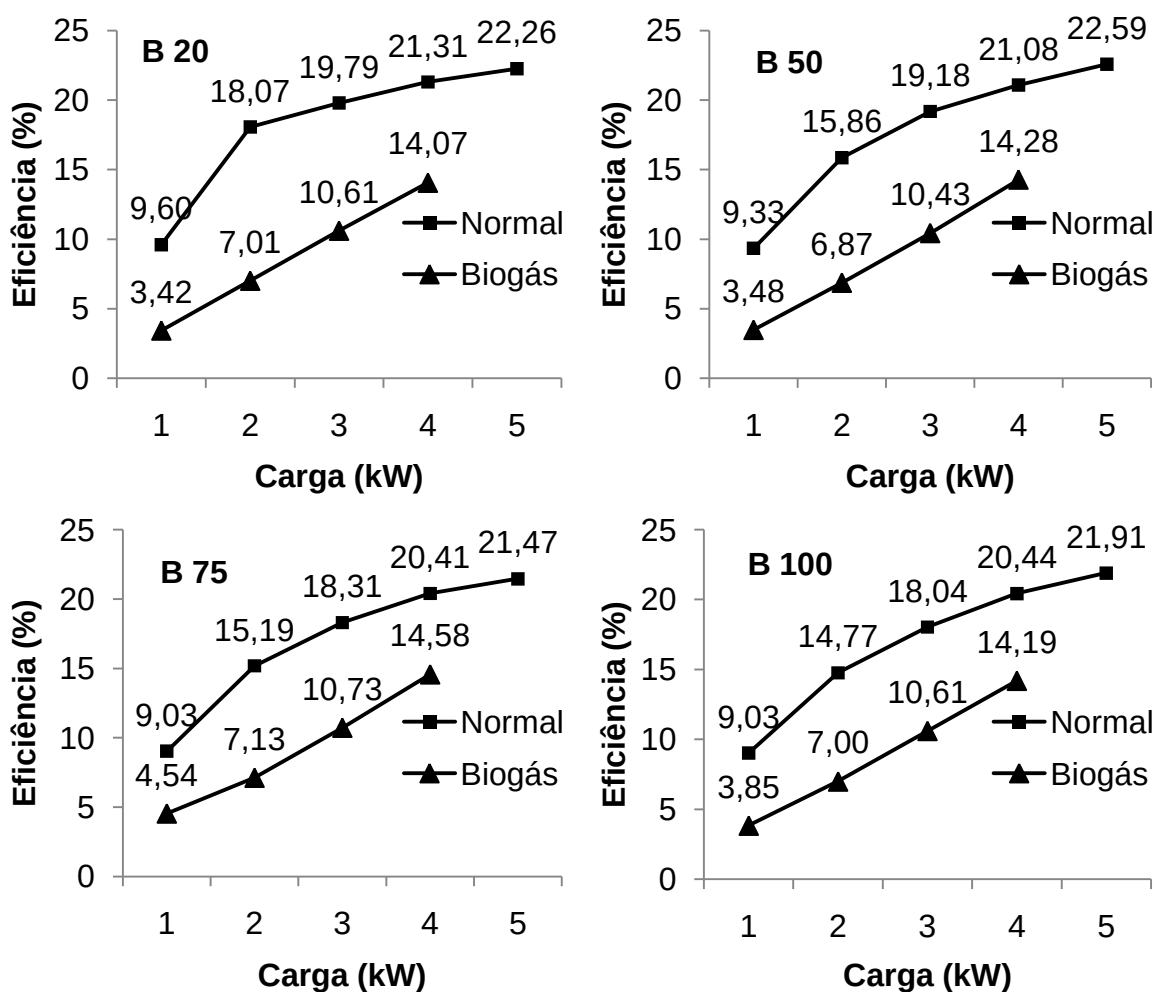


Figura 15 – Eficiência em função da carga e combustível, para o modo normal e dual.

4.7 Economia

Houve uma redução significativa do consumo de combustível líquido com a inserção de biogás, como pode ser observado na Figura 16, sendo que reduziu-se em média 60%, 64%, 78%, 78%, 77% e 84% o consumo de combustível para as misturas B0, B10, B20, B50, B75 e B100 respectivamente. Houve redução do consumo de combustível com o aumento da proporção de biodiesel, sendo que a maior redução foi de 87% para as cargas de 2 e 3 kW do ensaio com biodiesel puro.

Mesmo com um menor poder calorífico, quanto mais biodiesel contém a mistura, maior foi a redução do combustível líquido. Yoon e Lee (2011), relatam que

o diesel contém o ponto de fulgor entre 200 e 360 °C e Wazilewski et. al., (2012) que o biodiesel de crambe apresentou ponto de fulgor de 136 °C, portanto quanto menor o ponto de fulgor, a combustão ocorrerá precocemente e melhor será a queima do combustível na câmara de combustão.

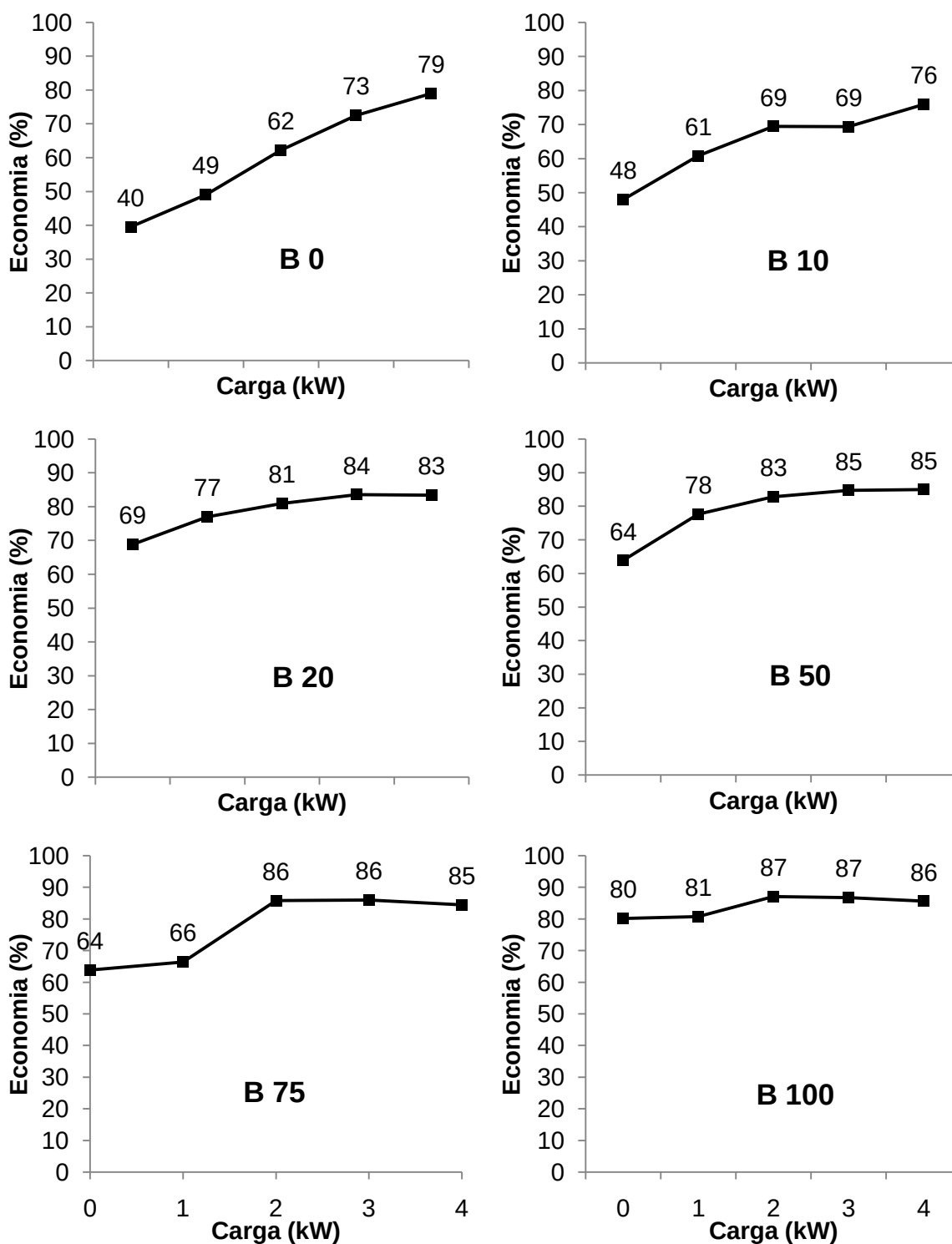
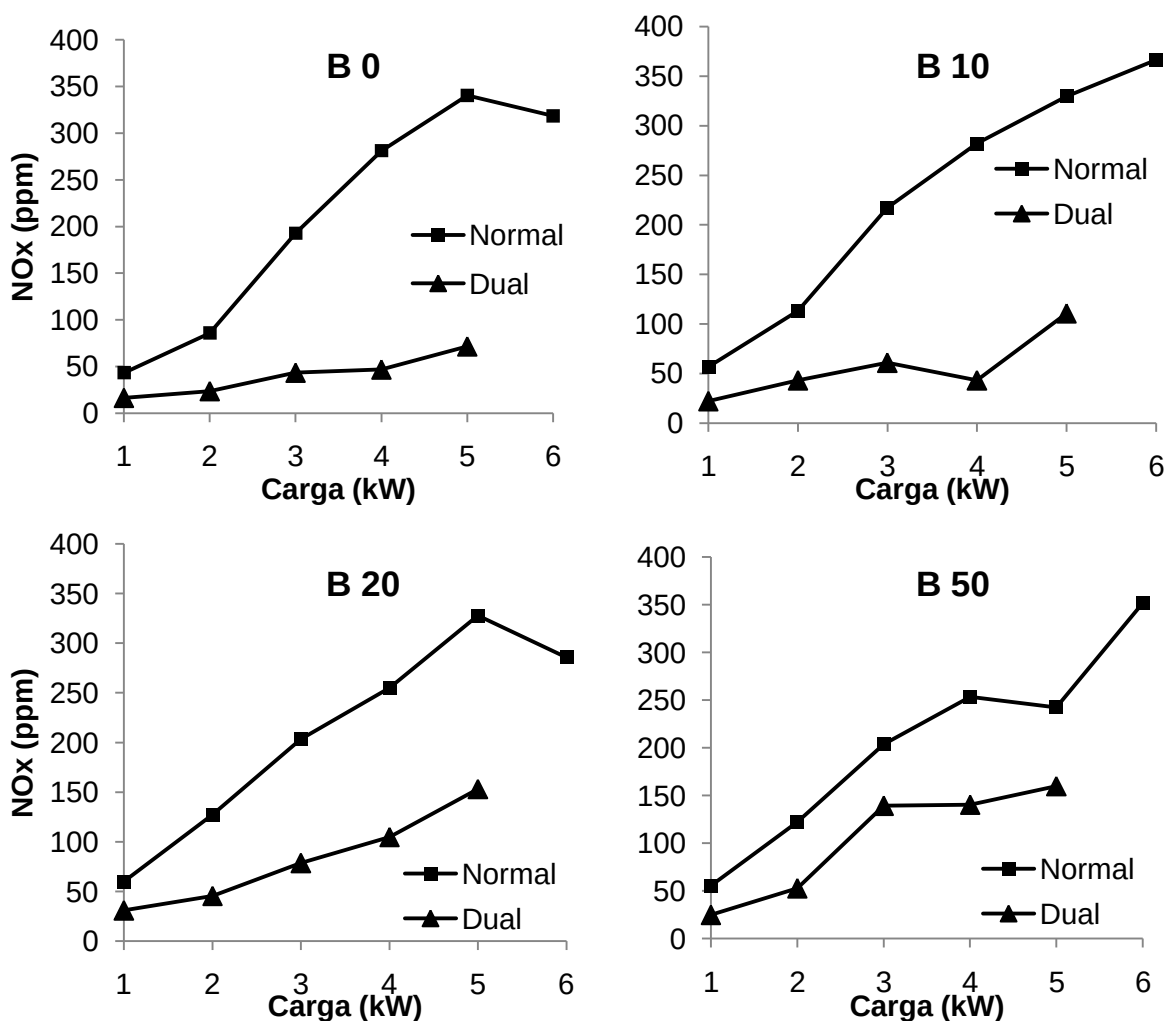


Figura 16 – Economia em função da carga e combustível.

4.8 Emissão de NO_x

A emissão de NO e NO₂ aumentou no modo normal, com o aumento das cargas, mas não apresentou tendência com a variação das misturas de biodiesel. Yoon e Lee (2011) a influência da inserção de biogás em um GMG relataram que a inserção de biogás reduziu a emissão de NO_x, e que esta aumentou com a elevação da carga. As emissões de NO_x podem ser observadas na Figura 17.



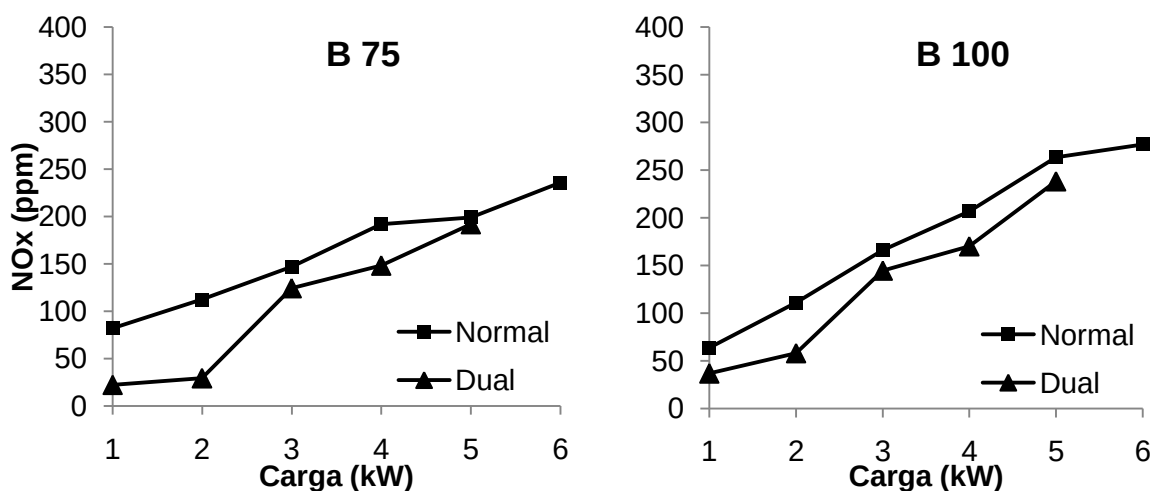


Figura 17 - Emissão de NO_x em função da carga e combustível, para o modo normal e dual.

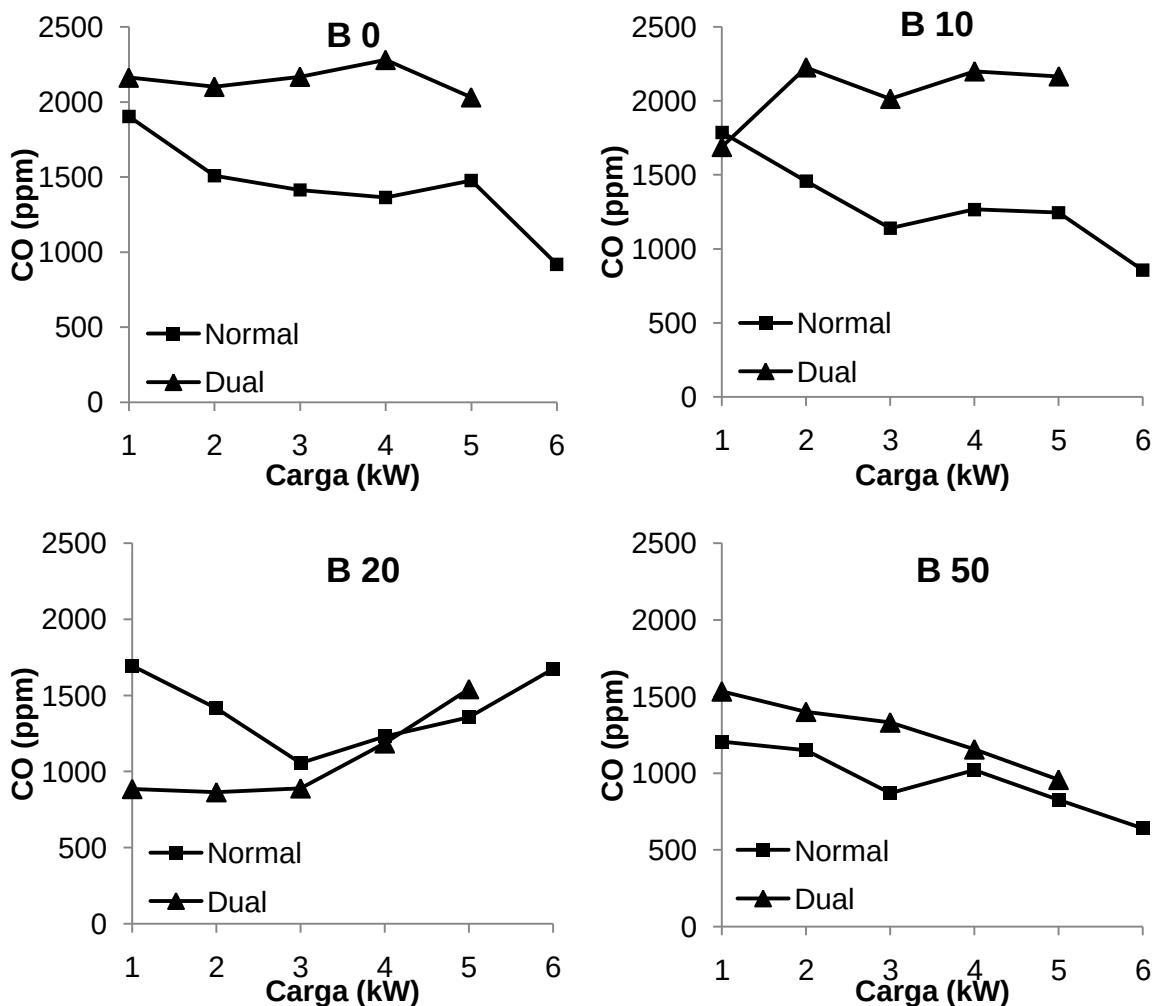
Lee et al., (2010) avaliando eficiência de geração e emissão de óxido e dióxido de nitrogênio num grupo motor-gerador a gasolina, operando a biogás de 60 % de metano, verificou que com o aumento da temperatura, ocorre a elevação das emissões de óxidos de nitrogênio.

Huang e Crookes (1998) realizaram testes para melhorar a eficiência de geração e reduzir as emissões de óxido e dióxido de nitrogênio, utilizando intervalos de ignição ideais com base nas eficiências máximas de geração com diferentes taxas de recirculação dos gases de escape, obtiveram resultados que tanto a emissões de NO_x , quanto a eficiência de geração diminui quando a taxa de recirculação é aumentada. A recirculação de gases tem por finalidade reduzir as emissões de NO_x , com o uso de válvulas que reconduzem de 20 a 30% dos gases emitidos para a entrada dos cilindros, o que acarreta na redução da pressão média efetiva, que irá reduzir a temperatura máxima dentro do motor, reduzindo assim a formação de NO_x .

4.9 Emissão de CO

As emissões de monóxido de carbono (CO), Figura 18 não apresentaram uma tendência clara nem com o biodiesel, nem com a inserção de biogás e nem com a variação da carga. No entanto com o aumento da proporção de biodiesel na

mistura, observa-se que há uma redução mínima das emissões, conforme relatado por Maziero et al. (2006) e Castelanelli et al. (2008) que afirmam que isto ocorre devido a redução das emissões de CO_2 ocasionadas pela maior quantidade de O_2 no combustível.



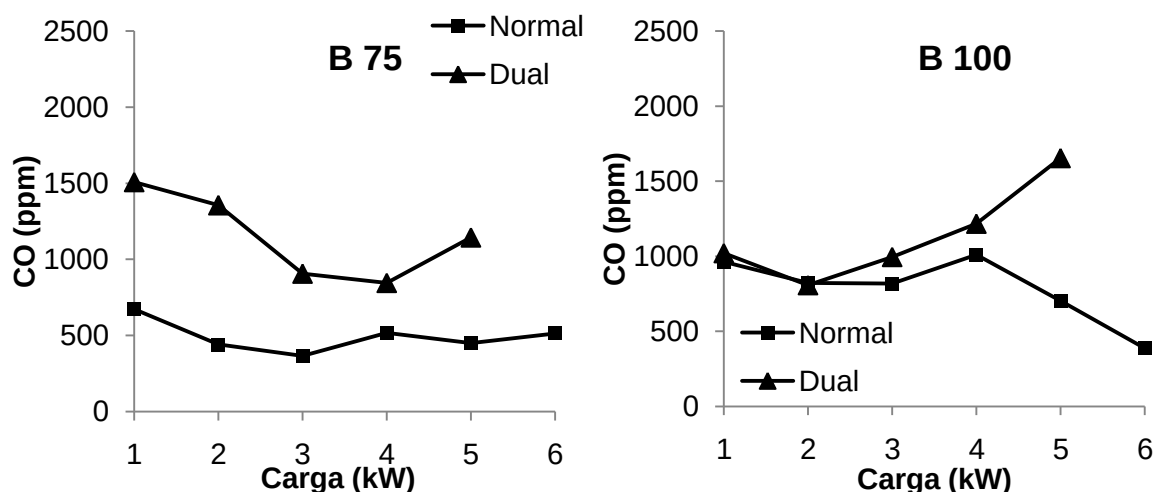


Figura 18 – Emissão de CO em função da carga e combustível, para o modo normal e dual.

Conforme Kivevele et al. (2011) o monóxido de carbono é resultado da combustão mais incompleta, pois com cargas mais altas do motor, e a temperatura mais elevada de combustão, promove uma combustão mais completa gerando uma menor emissão de CO.

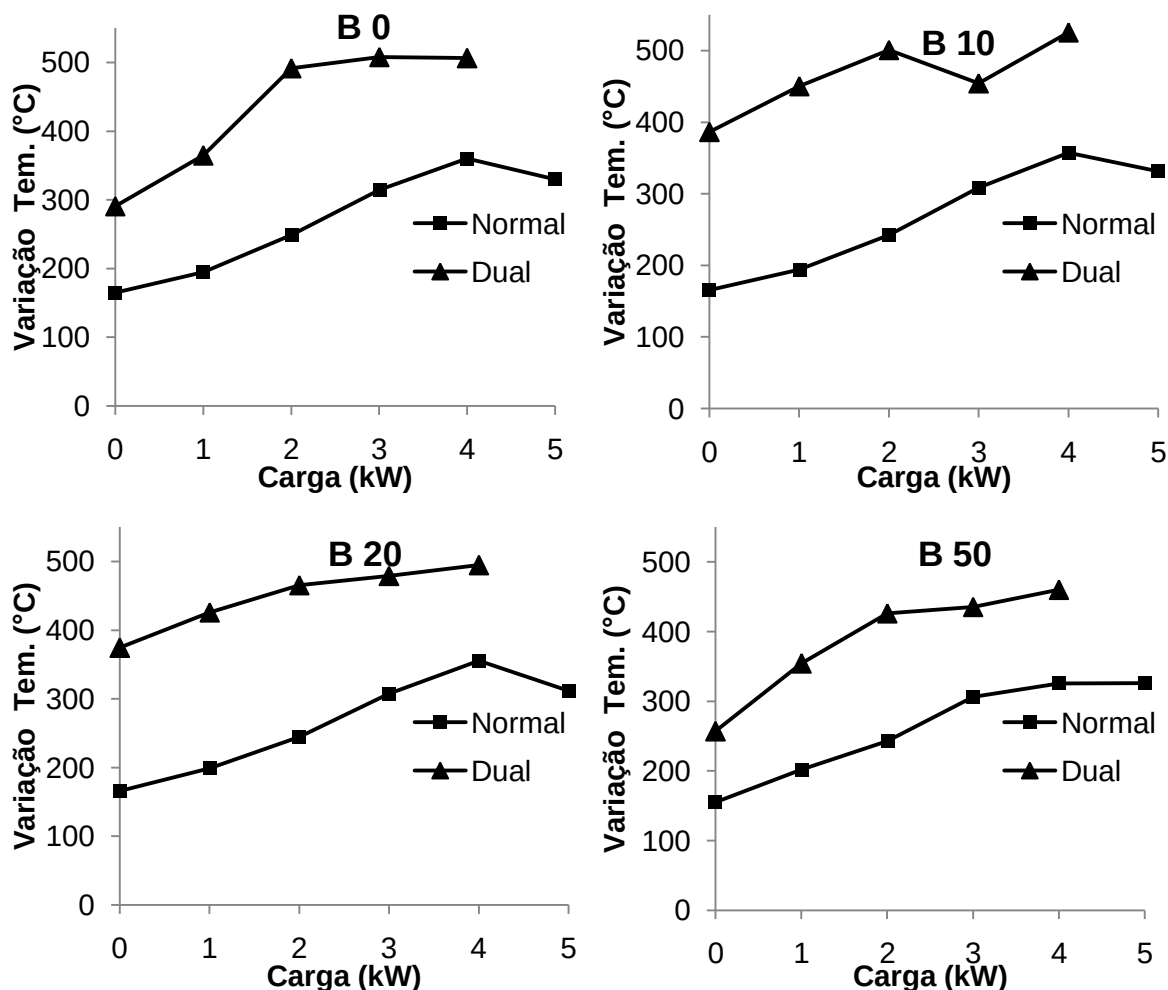
4.10 Variação de temperatura de gases

A variação de temperatura entre o ar admitido e os gases de exaustão aumentou com o aumento da carga e com o aumento da proporção de biodiesel nas misturas (Figura 19).

É possível relacionar o aumento da temperatura de emissão dos gases de exaustão com a redução da eficiência do GMG no modo Dual em relação ao modo normal, pois ao comparar com o ciclo térmico dos motores a Diesel, conclui-se que este calor aquece os gases não está sendo utilizado para a geração de energia mecânica e sim de energia térmica. Quanto menor a temperatura de saída dos gases, maior a tendência de aumento na eficiência do GMG.

Conforme Castellaneli et al. (2008), o aumento da carga sob o GMG provoca maior esforço sob o motor, o que induz ao aumento de consumo de combustível e perdas térmicas.

O aumento na temperatura também leva a uma tendência de aumento de emissão de gases poluentes, como o CO, NO e NO₂. Yoon e Lee (2011) relatam em seu trabalho que a temperatura eleva com o aumento da carga de forma proporcional, tanto no modo simples quanto no modo Dual.



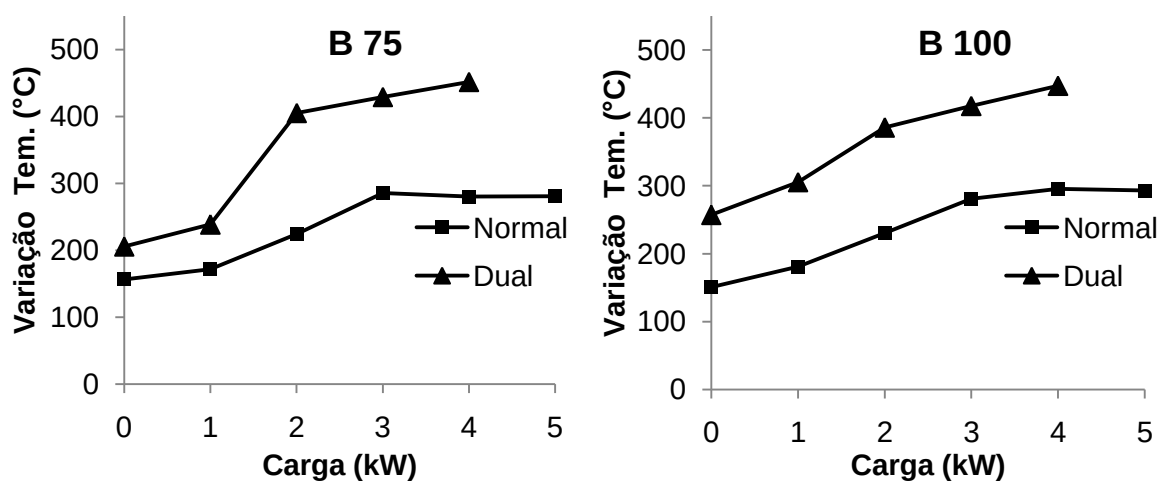


Figura 19 – Variação da temperatura dos gases de exaustão e função da carga e do combustível.

5 CONCLUSÕES

O aumento da proporção de biodiesel reduziu o poder calorífico inferior do biocombustível e aumentou a densidade. O PCI foi de 40141 kJ.kg^{-1} para o diesel e 36853 kJ.kg^{-1} para o biodiesel de crambe. A concentração de metano no biogás foi de 66 % e o PCI foi de $23,7 \text{ MJ.m}^{-3}$. A potência elétrica gerada no modo normal foi menor que no modo Dual, em todas as misturas utilizadas.

Houve redução do consumo específico de combustível líquido no modo Dual em relação ao modo normal. O consumo energético no modo dual foi maior que no modo normal e mesmo com potência gerada maior, a eficiência foi menor. A máxima eficiência foi de 23,32 % operando com diesel testemunha e 5 kW de carga e 14,58 % no modo Dual com B75 e carga de 4 kW.

A máxima economia foi de 87% para as cargas de 2 e 3 kW do ensaio com B100.

A emissão de NO_x foi menor com a inserção de biogás e sem interferência das proporções de biodiesel e a inserção de biogás. A temperatura de exaustão dos gases elevou com a inserção de biogás e com o aumento da carga, chegando a valores acima de 500°C .

O poder calorífico do biodiesel foi menor que a do diesel, acarretando numa menor potência do motor. O grupo motor-gerador manteve a potência requerida com o uso do biogás, sendo que sem o biogás isto não ocorreu.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros:

Instalação de sonda Lambda no escape do motor, para controlar o volume de biogás introduzido no modo Dual.

Instalação de um sensor de torque entre o motor e o gerador, para verificar a geração de energia mecânica, independente da eficiência do gerador.

Instalação de dinamômetro e sensor de torque no lugar do gerador para simular diferentes cargas sob o motor.

7 REFERÊNCIAS

- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biocombustíveis**. 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?id=470>. Acesso em: 29 Jul. 2013.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. NBR 7148. Tabela 1. Especificação do biodiesel. 2010.
- AYDIN, H.; BAYINDIR, H. Performance and emission analysis of cottonseed oilmethyl ester in a diesel engine. **Renewable Energy**, v.35, n.3, p.588–592, 2010.
- BACHARACH. **Portable Combustion Analyzer PCA3**. Operation and Maintenance Manual Instruction 0024-9472.2011. 100p.
- BARICCATTI, R. A. **Biodiesel**. In: SANTOS R. F. e SIQUEIRA J. A. C. Fontes renováveis – Agroenergia. Cascavel: EDUNIOESTE, 2012, p.208.
- BASSO, R. C.; MEIRELLES, A. J. A.; BATISTA, E. A. C. Liquid–liquid equilibrium of pseudo ternary systems contain in glycerol + ethanol + ethylic biodiesel from crambe oil (*Crambe abyssinica*) at T/K = (298.2, 318.2, 338.2) and thermo dynamic modeling. **Fluid Phase Equilibria**. v. 333, p. 2137-2152, 2012.
- BEDOYA, I. D.; ARRIETA A. A.; CADAVID, F. J. Effects of mixing system and pilot fuel quality on diesel–biogas dual fuel engine performance. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 6624–6629, 2009.
- BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, M. I. P. **Oleaginosas e seus Óleos: Vantagens e Desvantagens para Produção de Biodiesel**. Embrapa. Documento 201. 2008.
- BOHRZ, G. I. **GERAÇÃO DE METANO EM LAGOA ANAERÓBIA: UM ESTUDO DE CASO EM ABATEDOURO DE BOVINOS**. 2010.
- BRASIL. Lei no 11.097, de 13 de janeiro de 2005. **Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação: edição Federal, Brasília, 2005.
- CARON, C. F.; MESSIAS, J. N.; FILHO, J. S. C.; RUSSI, J. C. V.; WEBER, M. I. Geração de energia no campus a partir da biodigestão anaeróbica. **Tuiuti: Ciência e Cultura**, Curitiba, n. 42, p. 63-73, 2009.
- CASTANÓN N. J. B. **Biogas originates from the tailings rural. Conversion and use**. St. Paul: University of Sao Paulo, 66 p, 2002.

CASTELLANELLI, M.; SOUZA, S.N.M.; SILVA, S.L.; KAILER, E.K. Desempenho de motor ciclo Diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia Agrícola**. 2008, vol.28, n.1 pp. 145-153.

CASTLEMAN, G.;PYMER, S.;GREENWOOD, C. Potential for Crambe (*C. abyssinica*) In Mallee/Wimmera of Australia. Proceedings 10th international rapessed congress. Camberra, Austrália (1999).

CASSEB, M. M. S. **Avaliação do desempenho de um reator anaeróbico defluxo ascendente e manta de lodo, em escala piloto, tratando de esgotos sanitários da cidade de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

CHAVES, L.; I.; ROSA, H.; A.; SOUZA, S. N. M., REOLON, C. B.; FERNANDES, J. B.; SANTOS, R. F. Variação da potência de saída de um gerador em função da utilização de biodiesel de crambe e soja. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.1, n.1, p. 1-7, 2012.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do Uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para Geração de Energia Elétrica e Irrigação em Propriedades Rurais**. (2006)

COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Fontes de Energia - Biomassa. 2011.

DEMIRBAS, A. **Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines**. 1. ed. London: Springer, 2008.

DEUBLEIN D.; STEINHAUSER. A. **Biogas from waste and renewable resources – an introduction**. Wiley-vch, Deggendorf. 2008.

FALASCA, S. L.; FLORES, N.; LAMAS, M. C.; CARBALLO, S. M.; ANSCHAU, A. Crambe abyssinica: An almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina. **International journal of hydrogen energy**, v.35, p. 5808 – 5812, 2010.

FILA, G.; FONTANA, F.; MAESTRINI, C.; BELLOCCHI, G. Field evaluation of crambe cultivars in northern Italy. In: Proceedings VII ESA Congress, Córdoba, Spain; 2002.

FIGLIARESE, D. A. Desempenho em um dinamômetro e emissões residuais em um motor de trator agrícola operando com misturas binárias de óleo diesel B5 e biodiesel de óleo de frango. Santa Maria- RS, 134p. 2011.

HUANG, G. H.; CHENB, F.; WEIC, D.; ZHANGC, X.; CHENC, G. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied Energy**, v. 87, p.38–46, 2010.

HUANG, J.; CROOKES, R. J. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine. **Fuel**, v.77, n.15, 1793–1801, 1998.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. Taubaté.** Dissertação de Mestrado. DEM/UNITAU. 2008.

IGONI H.; AYOTAMUNO, M, J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Designs of anaerobic digesters for producing biogás from municipal solid-waste. **Applied Energy**, 85, n.6, p.430-438, 2008.

JASPER, S. P. Cultura do crambe (crambe abyssinica hochst): avaliação energética, de custo de produção e produtividade em sistema de plantio direto. Dissertação (TESE). Botucatu, 2009.

KIVEVELE, T.; KRISFOF, L.; BERECKZY, A.; MBARAWA, M. M. Engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics of a CI engine fuelled with croton megalocarpus methyl ester with antioxidant. **Fuel**, v.90, n.8, p.2782-2789, 2011.

LANSING, S.; BOTERO, R. B.; MARTIN, J. F. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. **Bioresource Technology**, Oxford, v.99, n.13, p. 5881-5890, 2008.

LEE, K.; KIM, T.; CHA, H.; SONG, S.; CHUN, K. M. Generating efficiency and NOx emissions of a gas engine generator fueled with a biogas – hydrogen blend and using an exhaust gas recirculation system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 11, p. 5723-5730, 2010.

LEMOS, J. S. **Desenvolvimento de Sistema de Tratamento e Reciclagem e Meio de Cultivo de Microalgas para Produção de Biodiesel.** Curitiba – PR. UFPR. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. 2012.

MACHADO, M. F. Estudo Do Crambe (Crambe abyssinica) Como Fonte De Óleo Para Produção De Biodiesel. In: II Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, Anais, Brasília, 2007.

MARTINS, L. S. **Geração de Energia através de Biomassa.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES: UFES, 2006.

MASSÉ D.; GILBERT Y.; SAVOIE, P.; BÉLANGER G.; PARENT G.; BABINEAU D. Methane yield from switch grass harvested at different stages of development in Eastern Canada. **BioresourceTechonology**, Oxford, v.101, n.24, p. 9536-9541, 2010.

MAZIERO, J. V. G.; CORRÊA, I. M.; TRIELLI, M. A.; BERNARDI, J. A.; D AGOSTINI, M. Avaliação do desempenho de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível. In: Congresso Brasileiro de plantas oleaginosas, óleos, gorduras e biodiesel. 2005, Varginha, MG. Anais. Lavras: UFLA, 2005.

MAZIERO, J. V. G.; CÔRREA, I. M.; TRIELLI, M. A.; BERNARDI, J. A.; D'AGOSTINI, M. F. Avaliação de emissões poluentes de um motor diesel utilizando biodiesel de girassol como combustível. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v.14, n.4, p.287-292, 2006.

MME- Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: EPE- Empresa de Pesquisa Energética, 2013.

MOREIRA, A. Combustíveis. São Carlos: USP - Escola de Engenharia de São Carlos, 2007. Apostila. Disponível em:<<http://www.netef.eesc.sc.usp.br/moreira/COMBUSTÍVEIS.ppt>>. Acesso em: 28 maio 2007.

MOREIRA, S. 2008. **Influência do Biodiesel nas emissões de um motor turbo diesel**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NOGUEIRA, L. A. H, **Biodigestão: A alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986.

OLIVEIRA L. E.; SILVA M. L. C. P. D. Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**. Bilbao (Spain), 2013.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: Tecbio, 2003.

PENIDO FILHO, P. **Os motores de combustão interna: para cursos de máquinas térmicas, engenheiros, técnicos e mecânicos em geral que se interessam por motores**. Belo Horizonte: Lemi, v. 2, 1996.

PIMENTA, D. J. T. **Estudo da Influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel**. Dissertação. 2008.

PITOL, C.; BROCH, D. L.; ROSCOE, R. Tecnologia e Produção: crambe. Fundação MS, Maracajú. 2010.

REIS, E. F.; CUNHA, J. P. B.; MATEUS, D. L. S.; DELMOND, J. G.; COUTO, R. F. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.17, n.5, p.565–571, 2013.

ROGÉRIO, F.; SILVA, T. R. B.; SANTOS, J. I. S.; POLETINE, J. P. Phosphorus fertilization influences grain yield and oil content in crambe. **Industrial Crops and Products**, v.41, p.266-268, 2013.

ROSCOE, R.; BROCH, D. L.; NERY, W. S. L. Análise de Sensibilidade dos Modelos Agrícolas e Industrial de Utilização do Óleo de Crambe na Cadeia Produtiva de Biodiesel em Mato Grosso do Sul. IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa – PB. 2010.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SANCHES, C. G.; SILVA, J. F. **Combustão diesel automotivo e suas alternativas**. Campinas-SP: UNICAMP, 2005. p. 32.

SGANZERLA, E. Biodigestor: uma solução. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

Silva, M. J.; Souza, S. N. M.; SOUZA, A. A.; MARTINS, G. I.; SECCO, D. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande- PB, v.16, n.3, p. 320–326, 2012.

SILVEIRA, E. V.; ALEXANDRE, E. C. F.; CASTRO, C. F. S.; LIÃO, L. M. Efeito da catálise ácida alcalina na produção e propriedades físico-químicas do biodiesel metílico de crambe. I Congresso de Pesquisa e Pós-graduação do Campus Rio Verde do IF Goiano. 2012.

SUZUKI, P. B. A.; FERNANDES, M. D.; FARIA P. A. R.; VIDAL, T. C. M. V. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.4, n.1, p.221–237, 2011.

Utlu, Z.; Koc, M. S. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. **Renewable Energy**, v.33, n.8, p. 1936–1941, 2008.

U.S.DEPARTMENT OF ENERGY – **Biodiesel Handling and Use Guidelines**. 3 Energy Efficiency and Renewable Energy, 2006.

VOLLMANN, J.; RUCKENBAUER, P. Agronomic performance and oil quality of crambe as affected by genotype and environment. **Bodenkultur -wienandmunchen**. V.44, p 335–343, 1993.

Volpato, C. E. S.; Conde, A. P.; Barbosa, J. A.; Salvador, N. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100). **Revista Ciência Agrotecnológica**, v.33, p.1125-1130, 2009.

WAZILEWSKI, W. T.; BARICCATTI, R. A.; MARTINS, G. I.; SECCO, D.; SOUZA, S. N. M.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I. Study of the methyl crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) and soybean biodiesel oxidative stability. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.43, p. 207-212, 2013.

WEISS A.; JÉRÔME, V.; BURGHARDT, D.; LIKKE, L.; PEIFFER, S.; HOFSTETTER E. M.; GABLER, R.; FREITAG, R. Investigation of factors influencing biogas production in a large-scale thermophilic municipal biogas plant. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 84, n. 5, p. 987-1001, 2009.

WYMYSŁOWSKI, M.; LUCZAK, M.; ZAWADZKA, A. IMBIEROWICZ, M.; CHACUK A. Methane fermentation of poultry slaughterhouse waste. **Polish Journal of Chemical Technology**, v. 12, p.15–18, 2010.

WU, X.; YAO, W. Y.; ZHU, J.; MILLER, C. Biogas and CH₄ productivity by codigesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. **Bioresource Technology**, v.101, p.4042–4047, 2010.

YOON, S. H.; LEE, C. S. Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas–biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine. **Fuel Processing Technology**, v.92, p 992–1000, 2011.

YÜCESU, H. S.; CUMALI, I. Effect of cotton seed oil methyl ester on the performance and exhaust emission of a diesel engine. **Energy Source**, v.28, 389–98, 2006.