

**DANIEL COLLE**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM GERADOR  
ELÉTRICO OPERANDO NO MODO DUAL, UTILIZANDO BIOGÁS E  
BLENDAS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA**

**CASCVEL  
PARANÁ-BRASIL  
MARÇO-2018**

**DANIEL COLLE**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM GERADOR ELÉTRICO OPERANDO NO MODO DUAL, UTILIZANDO BIOGÁS E BLENDS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA**

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

Professor Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

**CASCADEL  
PARANÁ-BRASIL  
MARÇO-2018**

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Colle, Daniel

Avaliação de desempenho energético de um gerador elétrico operando no modo dual, utilizando biogás e blends de biodiesel de óleo residual de fritura / Daniel Colle; orientador(a), Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, 2018.

59 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2018.

1. Motor dual. 2. Energia renovável. 3. Biogás. 4. Biodiesel. I. de Souza, Dr. Samuel Nelson Melegari . II. Título.

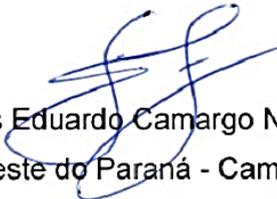
**DANIEL COLLE**

**“AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM GERADOR ELÉTRICO OPERANDO NO MODO DUAL, UTILIZANDO BIOGÁS E BLENDS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Samuel Nelson Melegari de Souza  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Eduardo Camargo Nogueira  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Aparecido Fernandes  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Medianeira (UTFPR)

Cascavel, 28 de março de 2018

*Dedico aos professores que não  
medem esforços para formar  
pessoas melhores para o mundo*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a todos os professores que cruzaram o meu caminho até este momento. Em especial aos meus pais que foram os primeiros professores que tive na vida e nunca mediram esforços para me orientar no caminho correto e se esforçaram para que eu tivesse as melhores oportunidades possíveis.

Agradeço também a minha esposa Eduarda pela compreensão, companheirismo, apoio e ajuda nesses últimos anos. Aos amigos e familiares que estiveram dispostos a ajudar.

As instituições de minha formação que tiveram sua devida importância durante cada etapa, desde o Colégio Cenecista João Batista Rotta em Espumoso/RS, a Universidade Federal do Rio Grande em Rio Grande/RS e por fim a Universidade Estadual do Oeste do Paraná em Cascavel/PR.

Aos professores e funcionários do programa que se dedicaram para sua criação e aos que se dedicam em sua manutenção. Assim nos oportunizando a fazer parte dele.

Não fazemos nada sozinhos e é impossível lembrar de todos que merecem serem agradecidos, portanto agradeço a todos que de alguma forma contribuíram positivamente para que este momento fosse possível.

Obrigado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Reação de transesterificação do biodiesel.....	7
Figura 2 Sistema de compensação de energia elétrica.....	13
Figura 3 Projeto do Reator de Biodiesel.....	15
Figura 4 Reator de Biodiesel.....	16
Figura 5 Painel de controle do Reator de Biodiesel .....	16
Figura 6 Limpeza do Biodiesel .....	17
Figura 7 Bomba Calorimétrica.....	18
Figura 8 Analisador de Gases .....	19
Figura 9 Conjunto Motor Gerador.....	20
Figura 10 Curva torque, potência, consumo específico de combustível do motor ....	21
Figura 11 Misturador de gases tipo Venturi.....	22
Figura 12 Adaptação Para Modo Dual .....	22
Figura 13 Banco de Cargas Resistivas .....	23
Figura 14 Microcontrolador ATmega2560 .....	23
Figura 15 Módulo RTC Ds3231 .....	24
Figura 16 Módulo Leitor de cartão Micro SD.....	24
Figura 17 Display LCD .....	24
Figura 18 Sistema de Coleta de Dados Acoplado ao Computador .....	25
Figura 19 Sistema de Coleta de Dados.....	25
Figura 20 Sensor de Tensão .....	26
Figura 21 Sensor de Corrente .....	26
Figura 22 Medidor de Fluxo de Biogás.....	26
Figura 23 Medidor Termal de Fluxo de Biogás.....	27
Figura 24 Medidor de Fluxo de Combustível Líquido .....	27
Figura 25 Proveta graduada.....	28
Figura 26 Ensaio - Etapa 1.....	29
Figura 27 Fluxograma do Experimento – Etapa 1.....	29
Figura 28 Fluxograma do Experimento – Etapa 2.....	30
Figura 29 Ensaio - Etapa 2a.....	31
Figura 30 Ensaio - Etapa 2b.....	31
Figura 31 Biodigestor .....	31
Figura 32 Medição da concentração de CH <sub>4</sub> .....	34
Figura 33 Potência gerada em função da carga no modo normal e no modo dual variando misturas de combustível líquido .....	35
Figura 34 Consumo específico de combustível líquido em função da carga no modo normal e no modo dual variando misturas de combustível líquido .....	37
Figura 35 Eficiência em função da carga no modo normal e no modo dual variando misturas de combustível líquido .....	38
Figura 36 Economia de combustível líquido no modo dual variando misturas de combustível líquido.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Constituinte e porcentagem de gases no biogás de acordo com diversos autores .....	5
Tabela 2 Especificações técnicas do motor .....	20
Tabela 3 Especificações técnicas conjunto motor gerador .....	21
Tabela 4 Poder calorífico dos combustíveis líquidos.....	33

## LISTA DE SIMBOLOS

A	Ampere
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	Dodecano
CH <sub>3</sub> OH	álcool metílico
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
g	grama
g.kWh <sup>-1</sup>	Grama por Quilo watt hora
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
Kg	Quilo grama
kJ	Quilo Joule
kJ.kg <sup>-1</sup>	Quilo Joule por quilo grama
kJ.m <sup>-3</sup>	Quilo Joule por metro cúbico
kW	Quilo Watt
mm	milímetro
MWh	Mega Watt hora
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NaOH	hidróxido de sódio
O <sub>2</sub>	Oxigênio
°K	Graus Kelvin
TWh	Tera Watt hora
V	Volt

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
B100	100 % de biodiesel
B20	20 % de biodiesel no diesel
B50	50 % de biodiesel no diesel
B8	Diesel comercial - 8% de biodiesel no diesel
B80	80 % de biodiesel no diesel
CDTER-PR	Centro de Desenvolvimento e Difusão Tecnológico em Energias Renováveis
CNPJ	Cadastro de Pessoa Jurídica
COFINS	Contribuição para o financiamento da seguridade social
CPF	Cadastro de Pessoa Física
Fundetec	Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
MME	Ministério de Minas e Energia
ORF	Óleo residual de fritura
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PIS	Programa integração social
RN	Resolução Normativa
RPM	Rotações por minuto
TR	Taxa de retorno
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

COLLE, Daniel. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Março 2018. **Avaliação de desempenho energético de um gerador elétrico operando no modo dual, utilizando biogás e blendas de biodiesel de óleo residual de fritura.** Orientador Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

## RESUMO

A geração de energia elétrica por meio de fontes alternativas de energia tem sido um tema constantemente abordado pelos pesquisadores, tanto pela preocupação por alternativas ao fornecimento de energia quanto pela busca da redução de impactos ambientais em sua geração. Esta pesquisa aborda a geração de energia elétrica por meio do uso de biogás e biodiesel, ambos combustíveis oriundos de fontes renováveis. Foi avaliado o desempenho de um gerador de eletricidade operando no modo dual com biogás e blendas de biodiesel. O biodiesel avaliado foi obtido a partir de óleo residual de fritura e foram realizados experimentos com blendas de proporções pré-estabelecidas em B8 (diesel comercial - 8% de biodiesel), B20 (20% de biodiesel), B50 (50% de biodiesel), B80 (80% de biodiesel) e B100 (biodiesel puro). O Biogás utilizado foi oriundo de biodigestor de resíduos de suinocultura. O conjunto motor gerador apresenta potência máxima de 5,0 kVA e tensão de saída 110 e 220 V. Nos ensaios o conjunto motor gerador foi acoplado a um banco de cargas resistivas, com variações de 0 a 100% da carga máxima. Cada incremento foi de 10%, permitindo obter a potência de geração para cargas variadas. O poder calorífico inferior (PCI) do biodiesel (B100) foi de  $35912 \text{ kJ.kg}^{-1}$  e do biogás foi de  $22562 \text{ kJ.m}^{-3}$ . A potência elétrica gerada foi superior no modo dual apresentando diferenças de 18,76% para B8 e 21,77% para B100. O consumo específico de combustível líquido foi menor no modo dual apresentando  $270,17 \text{ g.kWh}^{-1}$  operando com B8 e  $285,29 \text{ g.kWh}^{-1}$  operando com B100 em relação ao modo normal. A eficiência foi maior no modo normal apresentando resultados de 22,01% e 24,74% operando com B8 e B100 respectivamente, contra 17,51% e 20,18% no modo dual. A média de economia de combustível líquido para a mistura B8 foi de 30,06% e de 30,08% para B100 no modo dual em relação ao modo normal. Os resultados indicam a possibilidade da utilização de biodiesel de óleo residual de fritura no modo normal, assim como sua utilização no modo dual juntamente com o biogás.

**PALAVRAS-CHAVE:** biodiesel, biogás, motor dual.

COLLE, Daniel. State University of West Paraná, March 2018. **Energy performance evaluation of an electric generator operating in dual mode using biogas and biodiesel blends of frying residual oil.** Teacher Advisor: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

## ABSTRACT

The generation of electric energy through alternative sources of energy has been a theme constantly addressed by the researchers, both for the concern for alternatives to the energy supply and for the search of the reduction of environmental impacts in its generation. This research addresses the generation of electric energy through the use of biogas and biodiesel, both fuels from renewable sources. The performance of an electricity generator operating in dual mode with biogas and biodiesel blends was evaluated. The evaluated biodiesel was obtained from frying residual oil and experiments were performed with blends of pre-established proportions in B8 (commercial diesel - 8% biodiesel), B20 (20% biodiesel), B50 (50% biodiesel), B80 (80% biodiesel) and B100 (pure biodiesel). The biogas used came from biodigester of swine residues. The motor generator set has a maximum power of 5.0 kVA and an output voltage of 110 and 220 V. In the tests the motor generator set was coupled to a bank of resistive loads, varying from 0 to 100% of the maximum load. Each increment was of 10%, allowing to obtain the power of generation for varied loads. The lower calorific value of biodiesel (B100) was  $35912 \text{ kJ.kg}^{-1}$  and biogas was  $22562 \text{ kJ.m}^{-3}$ . The electric power generated was superior in the dual mode presenting differences of 18.76% for B8 and 21.77% for B100. The specific liquid fuel consumption was lower in the dual mode with  $270.17 \text{ g.kWh}^{-1}$  operating with B8 and  $285.29 \text{ g.kWh}^{-1}$  operating with B100 compared to the normal mode. The efficiency was higher in the normal mode, presenting results of 22.01% and 24.74%, operating with B8 and B100 respectively, against 17.51% and 20.18% in the dual mode. The average fuel economy for the B8 blend was 30.06% and 30.08% for B100 in dual mode over the normal mode. The results indicate the possibility of the use of biodiesel from frying waste oil in normal mode, as well as its use in dual mode together with biogas.

**KEYWORDS:** biodiesel, biogas, dual engine.

## ÍNDICE

RESUMO.....	ix
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivo Geral.....	2
1.2. Objetivos Específicos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Biocombustíveis.....	3
2.1.1. Biogás .....	4
2.1.2. Biodiesel.....	5
2.1.3. Processo de Transesterificação do Biodiesel.....	7
2.2. Motor Ciclo Diesel.....	7
2.3. Motor Dual .....	9
2.4. Geração de Eletricidade por Biomassa.....	10
2.4.1. Resolução Normativa nº 482/2012 ANEEL .....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1. Classificação da Pesquisa .....	14
3.2. Materiais .....	14
3.2.1. Biodiesel.....	14
3.2.2. Biogás .....	18
3.2.3. Conjunto motor gerador.....	19
3.2.4. Banco de cargas resistivas.....	23
3.2.5. Coleta de dados .....	23
3.2.6. Grandezas elétricas.....	25
3.2.7. Fluxo de Biogás.....	26
3.2.8. Fluxo de combustível líquido .....	27
3.3. Metodologia. ....	28
3.3.1. Análise dos dados .....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	33
4.1. Poder calorífico inferior do combustível líquido .....	33
4.2. Poder calorífico inferior do combustível gasoso .....	33
4.3. Potência elétrica gerada .....	34
4.4. Consumo específico de combustível líquido.....	36
4.5. Eficiência .....	37
4.6. Substituição do combustível líquido no modo dual .....	39
5. CONCLUSÕES .....	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos a demanda de energia elétrica apresenta, gradativamente, um aumento significativo, assim como seu custo. Em vista disto a preocupação com sua geração é inerente a todos, podendo ainda ser algo mais preocupante para propriedades rurais mais isoladas de grandes centros, devido fato de ter o risco maior quanto a insuficiência no fornecimento de eletricidade pela rede de distribuição (BRIZI *et al.*, 2014).

Levando em conta isto, a energia elétrica oriunda de pequenas centrais geradoras passou a ser uma boa alternativa para resolver tanto o problema de demanda quanto o de custo (LACCHINI; RÜTHER, 2015). Tal fato que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa (RN) nº 482/2012, posteriormente alterada pela RN 517/2012 e pela RN 687/2015 com a finalidade de facilitar a conexão da energia provida das pequenas centrais geradoras na rede de distribuição (ANEEL, 2015; GOMES *et al.*, 2018).

Entretanto, existe a condição de que utilizem fontes renováveis de energia ou cogeração com elevada eficiência energética. Isto porque há também a preocupação ambiental em relação a esta prática. A redução da emissão de gases efeito estufa é um dos focos, devido a isto, este tema tem sido amplamente abordado (ALMEIDA *et al.*, 2016).

De acordo com Brasil (2017) a geração de energia termoelétrica a combustíveis fósseis em 2016 teve uma participação de 15,7% de um total de 619,7 TWh produzidos no país, ou seja, 97,3 TWh foram gerados através da queima de combustíveis fósseis contribuindo diretamente na emissão de gases de efeito estufa. Segundo Soares *et al.*, (2006) e Galvão (2006), em comparação com a utilização de combustíveis oriundos de biomassa a emissão de CO<sub>2</sub> apresenta um balanço nulo pois o CO<sub>2</sub> emitido na queima é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta pelo processo da fotossíntese.

Além disto a biomassa possui vantagens por ser uma fonte menos intermitente quando comparada a solar e eólica como também foi observado por Rieke *et al.*, (2018). Quando o assunto abordado é o biogás, segundo Khan *et al.*, (2017), a sua utilização pode ser expandida através de seu beneficiamento o transformando em biometano, possibilitando assim a substituição do gás natural. Deste modo é possível

utilizar esta fonte de energia para geração de eletricidade, calor e como combustível para veículos.

Esta pesquisa foi instigada pelas razões vistas de necessidade de geração de energia elétrica com redução de custos atrelada a eficiência energética, assim como o desenvolvimento rural.

Em vista, disto supõe-se a hipótese de que é possível produzir energia elétrica de forma tecnicamente eficiente.

### **1.1. Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho energético de um motor gerador de eletricidade com potência de 5,0 kVA operando no modo dual, biogás/biodiesel e biogás/misturas diesel e biodiesel, sendo que o biodiesel utilizado é oriundo de óleo residual de fritura como matéria prima base.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Avaliar a potência elétrica gerada;
- Avaliar o consumo de combustível líquido (biodiesel/diesel);
- Avaliar a eficiência de conversão do motor gerador dual (%);

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Biocombustíveis

Os Biocombustíveis têm sido um tema de estudo amplamente abordado por diversos autores nos últimos anos, como por exemplo Kuss (2015), Mofijur (2015), Saladini (2016) e Hakawati (2017). Entretanto além do interesse científico os biocombustíveis já possuem participação considerável no mercado de combustíveis (WASIAK, 2017). De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis ANP (2016), os biocombustíveis são definidos como aqueles que derivam da biomassa renovável, podendo estes substituir parcialmente ou até mesmo totalmente os combustíveis de origem fóssil. Para Özçimen e Karaosmanoglu (2004) a biomassa é uma importante fonte de energia utilizada para complementação da redução da utilização dos combustíveis fósseis.

A classificação dos biocombustíveis pode ser feita em duas categorias: primários e secundários. Os primários são biocombustíveis utilizados diretamente em sua forma natural como lenha e resíduos de culturas agrícolas como o bagaço da cana de açúcar. Os secundários são os biocombustíveis que necessitam algum processo de transformação antes de sua utilização como por exemplo o biodiesel que pode ser obtido através de óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais de fritura. (RODIONOVA *et al.*, 2016)

Para salientar o exposto a ANP (2016b) informa que atualmente cerca de 45% de toda a energia utilizada no Brasil e 18% dos combustíveis em consumo no país são oriundos de fontes renováveis. Também é possível observar os dados referente a energia elétrica nacional onde a participação de fontes renováveis é ainda maior, conforme mostra o Balanço Energético Nacional 2017, onde houve um aumento na demanda de 75,5% para 81,7% de 2015 para 2016. Quando tratado somente sobre energia elétrica gerada a partir da biomassa também é possível ver um relativo aumento de 8,0% para 8,2% de 2015 para 2016.

Desde janeiro de 2008 é obrigatório a adição de biodiesel no diesel, conforme estipula o artigo 2º da Lei 11.097 (BRASIL, 2005) inicialmente com a adição de 2% evoluindo gradativamente até 7% em Novembro de 2014. Atualmente o percentual de biodiesel no diesel é determinado pelo artigo 1º da Lei 13.263 (BRASIL, 2016) cujo

qual estipulou 8% desde março de 2017, 9% a partir de março de 2018 e 10% a partir de Março de 2019. Permitindo ainda o uso facultativo de porcentagem de biodiesel superior ao estipulado pela legislação.

Observa-se a relevância dos biocombustíveis quanto sua participação na matriz energética nacional, assim como a existência de dispositivos legais que propiciam o aumento gradativo de sua utilização. Buscando aprofundar o assunto, os próximos tópicos irão apresentar sobre o biogás e biodiesel respectivamente.

### **2.1.1. Biogás**

De acordo com Alves (2000) o biogás é oriundo da degradação de biomassa sem a presença de oxigênio. Esta biomassa pode ser originária de diversas fontes, podendo citar como exemplo os resíduos animais da suinocultura, cujos quais são convertidos em biogás através de biodigestores instalados na propriedade rural. Além da produção de biogás a matéria sólida residual é aproveitada como fertilizante para agricultura (MYDEEN *et al.*, 2016).

O estudo de Salomon e Lora (2009) conclui que o Brasil possui potencial de geração de eletricidade a partir do biogás obtido a partir da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos aproximadamente de 1,05 a 1,13 GW. Para complementar os dados do Balanço Energético Nacional de 2017 indicam que a oferta de biogás aumentou 46,2% de 2015 para 2016 no país (BRASIL, 2017).

Para Kandam e Panwar (2017) o biogás é uma das principais fontes de energia da atualidade, além de possuir diversas possibilidades de aproveitamento desde sua utilização direta no aquecimento de ambientes e cozimento de alimentos como na geração de energia térmica convertida em eletricidade. Na composição do biogás o metano é o elemento mais importante, pois é ele que vai ser queimado gerando energia térmica que posteriormente será transformada em energia elétrica (HAGMAN *et al.*, 2018). A informação da composição do biogás de acordo com alguns autores está disposta na Tabela 1.

Tabela 1 Constituinte e porcentagem de gases no biogás de acordo com diversos autores

Fonte: (WERNCKE, 2014, p. 8)

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

É possível observar que o biogás é composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O índice de metano está entre 40 e 75%, já o índice de dióxido de carbono está entre 25 e 45%. O índice de Sulfeto de Hidrogênio (H<sub>2</sub>S) é baixo, porém é um elemento indesejável que provoca corrosão química quando queimado juntamente com o metano em motores de combustão interna, gerando uma redução da vida útil do equipamento. Deste modo antes de realizar a queima do biogás o H<sub>2</sub>S deve ser removido. (KANDAM; PANWAR, 2017)

### 2.1.2. Biodiesel

Para a ANP (2016c) o biodiesel é um combustível oriundo de óleos vegetais ou de gorduras animais. Para sua produção a matéria prima precisa passar por um processo químico chamado de transesterificação, que a partir de uma reação com álcool primário (metanol ou etanol) transforma os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal em éster e glicerina. O Biodiesel é composto apenas pelos ésteres devidamente tratados para atender a Resolução Normativa nº07/2008 da ANP que determina a especificação do biodiesel comercializado no Brasil. Ela também define o biodiesel em seu Art.2º como: “biodiesel-B100 – combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais[...]”(ANP, 2008, p. 1)

Atapour, Kariminia e Moslehabadi (2014) defendem o uso deste combustível por ser uma alternativa aos combustíveis fósseis possuindo vantagens de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, por apresentar balanço nulo devido fato do CO<sub>2</sub>

emitido na queima ser reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta pelo processo da fotossíntese, além de ser renovável, biodegradável e não tóxico. Outros estudos apontam os mesmos benefícios do uso do biodiesel como Dorado *et al.*, (2003); Bouaid *et al.*, (2007); Murugesan *et al.*, (2009).

Entretanto para Nogueira e Capaz (2013) o crescimento da produção de biodiesel, em sua maioria oriundo a óleos vegetais, gera preocupação quanto a sua sustentabilidade. Assim como impacta diretamente na segurança alimentar, nos preços das commodities agrícolas e gera consequências ambientais negativas como o desmatamento para aumento da área de produção de culturas oleaginosas. Estes impactos também estão presentes no estudo de Ajanovic e Haas (2014) que afirmam que o uso de biodiesel gera problemas de competição entre alimentos e combustíveis, disponibilidade limitada de terras, impactos ambientais negativos e possuem custo superior ao diesel de origem fóssil, fazendo com que a geração de biodiesel necessite de programas de incentivo do governo para ser viável.

Uma alternativa para os problemas relatados pode ser o uso de óleo residual de fritura (ORF) como matéria prima para produção do biodiesel evitando assim a competição com o mercado de alimentos e ainda contribuindo com a reciclagem do que antes era apenas um resíduo indesejável (ATAPOUR; KARIMINIA; MOSLEHABADI, 2014). De acordo com Kiakalaieh, Amin e Mazaheri (2013) a utilização do ORF é fundamental para redução dos custos de produção do biodiesel, embora sua utilização requeira um pré-tratamento antes de sua utilização como matéria prima devido a possibilidade de conter alimentos remanescentes e outras impurezas (LAM; LEE; MOHAMED, 2010; MARCHETTI, 2012).

Segundo estudo de César *et al.*, (2017) o biodiesel produzido a partir de ORF é economicamente e tecnicamente viável e é uma excelente alternativa para suprir parte da produção do biodiesel no Brasil, conseqüentemente contribuindo também na redução dos custos de saneamento devido a redução descarte irregular do ORF no ambiente, de modo que poderia haver incentivos por parte das empresas responsáveis pelo tratamento de esgoto nas cidades brasileiras para coleta adequada da matéria prima.

Como exposto, é nítida a relevância do biodiesel, assim como os aspectos negativos de sua produção em relação a segurança alimentar. Entretanto a utilização do ORF como matéria prima para sua produção mostra-se, como uma importante

alternativa para minimizar os impactos na cadeia alimentar. Para sua produção é necessário que o ORF passe pelo processo de transesterificação, cujo qual, está exposto no tópico a seguir.

### 2.1.3. Processo de Transesterificação do Biodiesel

Para que seja possível a utilização de óleos vegetais ou sebo animal como biodiesel é necessário realizar uma reação química conhecida como transesterificação (Figura1) que é a reação de um éster com álcool para formar outros ésteres e um subproduto, glicerol, também conhecido como glicerina. A utilização de álcool metílico faz com que o biodiesel consiga assumir características muito próximas as do diesel de petróleo. Hidróxido de sódio ou de potássio podem ser utilizados como catalizador (ATAPOUR; KARIMINIA; MOSLEHABADI, 2014)

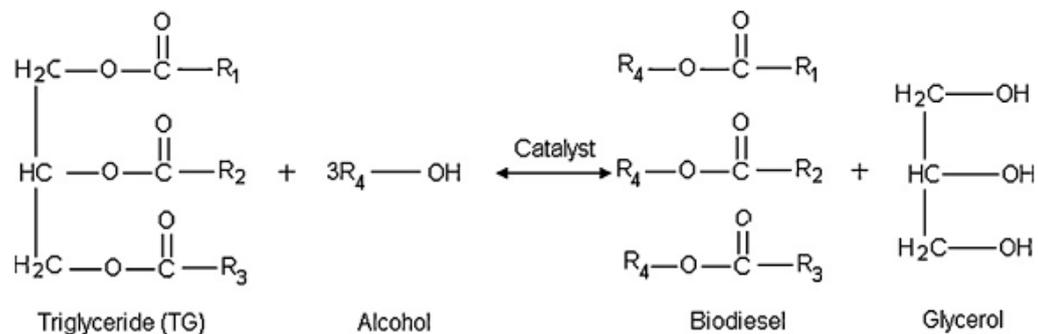


Figura 1 Reação de transesterificação do biodiesel.  
 Fonte: (ATAPOUR, KARIMINIA; MOSLEHABADI, 2016, p 180).

Diferentes condições operacionais e de processo, como tempo e temperatura de reação, proporção de álcool e a concentração do catalisador estão entre os fatores importantes afetando a produção de biodiesel. (LEUNG; GUO, 2006). No próximo tópico será abordado a transformação da energia química do combustível em energia mecânica por meio do motor ciclo diesel

## 2.2. Motor Ciclo Diesel

O motor ciclo diesel é uma máquina térmica de combustão interna alternativa de 4 tempos e possui ignição por compressão utilizando, em sua maioria, óleo diesel

como combustível, é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados a uma manivela (MOREIRA, 2008). De acordo com Pimenta (2008) constitui-se por um sistema mecânico que transforma um movimento alternativo linear em um movimento de rotação. O movimento linear é gerado pelo aumento da pressão oriunda da combustão, da mistura ar combustível, no interior do cilindro, fazendo com que o pistão seja impulsionado. O movimento linear é transformado, através de um sistema biela-manivela, em movimento de rotação.

Para Moran *et al.*, (2013) no motor de 4 tempos, para fornecer trabalho, o pistão executa quatro cursos sendo eles: admissão, compressão, potência (expansão) e exaustão. Com estes quatro processos é possível transformar a energia química do combustível em energia mecânica através de sua combustão, conseqüentemente gerando potência. O autor também explica que a liberação de energia na combustão é o resultado da rápida oxidação dos elementos do combustível formando os produtos da combustão. De acordo com ele o óleo diesel é um combustível hidrocarbonado modelado como dodecano ( $C_{12}H_{26}$ ) e para uma queima completa é necessária uma mistura de ar e combustível a fim de assegurar a quantidade mínima de oxigênio necessária para combustão.

Pimenta (2008) enfatiza que o início da combustão ocorre com a injeção do combustível diretamente no cilindro no momento em que o ar em seu interior encontra-se comprimido, conseqüentemente em condições de temperatura e pressão superiores ao ponto de inflamação do combustível. Contudo para que seja possível ter uma combustão perfeita, o sistema de injeção de combustível deve ser capaz de injetar combustível na quantidade correta e no momento certo. De acordo com Moreira (2008) devido fato de o ar encontrar-se com pressão elevada, é necessário que o combustível seja injetado a uma pressão superior, desta forma faz-se necessário um sistema de injeção a alta pressão.

Como visto, para que ocorra a combustão do combustível líquido no motor ciclo diesel é necessário criar um ambiente com alta pressão e temperatura, ambiente que também é favorável a utilização em conjunto de um combustível gasoso (biogás) no modo dual. Este assunto será abordado no próximo tópico.

### 2.3. Motor Dual

O motor de combustão dual é caracterizado por operar simultaneamente com combustível líquido (diesel ou biodiesel) e combustíveis gasosos, tais como o gás natural, o gás liquefeito de petróleo, o hidrogênio e o biogás, transformando energia química em energia mecânica. Para Suzuki *et al.*, (2011) os resultados são positivos quando um motor emprega o uso destes combustíveis simultaneamente.

Segundo Bora e Saha (2015), o motor de combustão interna no modo dual pode operar com combustível líquido e gasoso simultaneamente. A mistura ar e combustível gasoso (biogás), após ser comprimida na câmara de combustão, não irá entrar em ignição espontaneamente, pois no caso do biogás, a temperatura de ignição é de 1087° K. Logo, uma pequena quantidade de combustível líquido (diesel, biodiesel, ou misturas de biodiesel com diesel) deve ser injetado na câmara como uma fonte de ignição, pois o mesmo entrará em combustão fazendo com que o biogás também entre em combustão. O combustível líquido denomina-se combustível piloto, e o gasoso (biogás) é o primário, responsável pela produção de potência no motor. Um motor a diesel pode ser convertido conectando-se um misturador ar/gás combustível na entrada de ar do motor. Um mecanismo de controle deve ser instalado para limitar o suprimento de combustível piloto. (BORA;SAHA, 2015)

De acordo com Saleh *et al.*, (2008), Barik e Murugan (2015) as vantagens do uso de motores dual diesel/biodiesel e biogás são:

- Necessidade de poucas adaptações e na falta de biogás, o motor irá operar normalmente apenas com diesel/biodiesel;
- Os motores ciclo diesel são mais resistentes em comparação com o ciclo Otto;
- Maior facilidade para o agricultor que dispõe de biogás na propriedade, pois pode adquirir um motor diesel e fazer a conversão para biogás e tornar-se autoprodutor de eletricidade;
- O motor dual pode operar somente com combustível líquido, caso haja ausência no suprimento de combustível gasoso. Ou seja, numa propriedade agrícola onde ocorre uma redução abrupta na produção de biogás, o agricultor estará com o fornecimento seguro de eletricidade.

Com isso o agricultor pode utilizar um motor gerador a diesel no modo dual para operar com biogás e diesel, ou biogás e biodiesel, ou biogás e misturas diesel/biodiesel.

Segundo Bora e Saha (2015) existem poucos estudos com a utilização de motores diesel no modo dual utilizando biodiesel com combustível piloto. Embora para Zhao *et al.*, (2017) os estudos existentes mostram que a utilização de motor dual funcionou de maneira satisfatória apresentando redução significativa do consumo de diesel e emissão de gases efeito estufa.

De acordo com o exposto as vantagens da utilização de um motor ciclo diesel adaptado para o modo dual são notáveis possibilitando a operação desse motor utilizando, em maior parte, o biogás como fonte de energia e o diesel ou biodiesel como piloto. Deste modo é possível utilizar a energia renovável do biogás e biodiesel para gerar eletricidade a partir da biomassa.

#### **2.4. Geração de Eletricidade por Biomassa**

Segundo Lora (1997) podem ser consideradas duas categorias de biomassa: a tradicional, onde fazem parte a lenha e carvão vegetal, a palha e a casca de arroz, resíduos vegetais e animais; a biomassa moderna, onde estão inseridos os resíduos da utilização industrial da madeira, bagaço de cana, culturas energéticas e resíduos urbanos.

Os resíduos animais e vegetais disponíveis nas propriedades rurais ou agroindústrias podem ser utilizados para geração de eletricidade, por meio da queima direta em caldeiras de alta pressão para produção de vapor e geração de eletricidade em turbinas a vapor, com por exemplo o bagaço de cana, o qual vem ampliando seu espaço na geração distribuída de eletricidade. Uma outra forma de aproveitamento de resíduos para geração de eletricidade é a conversão de matéria orgânica (vegetal ou animal) em biogás por meio da digestão anaeróbia nos chamados biodigestores. Sendo que o biogás pode ser utilizado em motores geradores de eletricidade (SALAMOM; LORA 2009).

Os grandes grupos motores geradores a biogás alcançam potências da ordem de 1,6 MW, os quais possuem um sistema de resfriamento a água, onde a água quente e gases de exaustão podem ser utilizados com o auxílio de trocadores de calor

(cogeração) para aquecimento do efluente dos biodigestores, produção de água quente para o processo produtivo, aquecimento de construções, produção de frio com o auxílio de sistemas de refrigeração por absorção (trigeração) e outras aplicações. O uso da energia térmica aumenta a eficiência do sistema. (LORA, 1997; SALAMOM; LORA, 2009).

Os motores geradores a biogás podem ser utilizados em áreas rurais utilizando biogás proveniente de biomassa vegetal ou resíduos animais, ou área urbanas com biogás de aterro sanitário e sistemas de tratamento de esgoto industrial ou doméstico. Existem sistemas em propriedades rurais instalados em todo o mundo para geração de energia. No Brasil tem crescido continuamente a implantação de sistemas de geração de energia elétrica na área rural, especialmente com resíduos da suinocultura e bovinocultura (SILVA; NETO; SEIFERT, 2016; GARCEZ, 2017).

Salamom e Lora (2009) também elencam benefícios ao uso de biogás para obtenção de energia elétrica como a venda da eletricidade a concessionária local e o sistema de compensação de energia, além de enfatizar a possibilidade de geração descentralizada como solução dos problemas de falta de energia devido a problemas de transmissão para áreas mais remotas.

Conforme visto as possibilidades de geração de eletricidade de forma descentralizada através de fontes renováveis (biomassa) são vastas. Entretanto somente após a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL foi possível utilizar o sistema de compensação de energia. O que difundiu a microgeração e minigeração através de sua regulamentação. (ANNEEL, 2015)

#### **2.4.1. Resolução Normativa nº 482/2012 ANEEL**

De acordo com o artigo 1º da Resolução Normativa nº 482/2012, ficam estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia. (ANNEEL, 2015)

Para a ANNEEL (2016) a micro e a minigeração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades

consumidoras. Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para demais fontes renováveis de energia elétrica.

Uma importante inovação trazida pela Resolução Normativa nº 482/2012 (ANNEL, 2012) é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda.

Nesta lógica, quando a energia injetada na rede for superior a consumida, o consumidor receberá em sua próxima fatura um crédito em energia. Caso contrário o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada. Dependendo da tributação de cada Estado, o consumidor terá que pagar os impostos (ICMS e PIS/COFINS) incidentes sobre o total de energia absorvida da rede (o que inclui o imposto sobre os créditos). Os créditos a serem compensados são válidos por 60 meses (ANNEL, 2015).

Caso o consumidor tenha outras unidades consumidoras em sua titularidade na mesma área de concessão, os montantes de energia ativa injetada que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão compensar o consumo dessas outras unidades, desde que tenham sido cadastradas previamente. O consumidor deverá indicar a ordem de prioridade, mas a unidade de instalação da geração é obrigatoriamente a primeira a ter o consumo compensado. A Figura 2 mostra o fluxograma do processo de compensação (ANNEL, 2015).

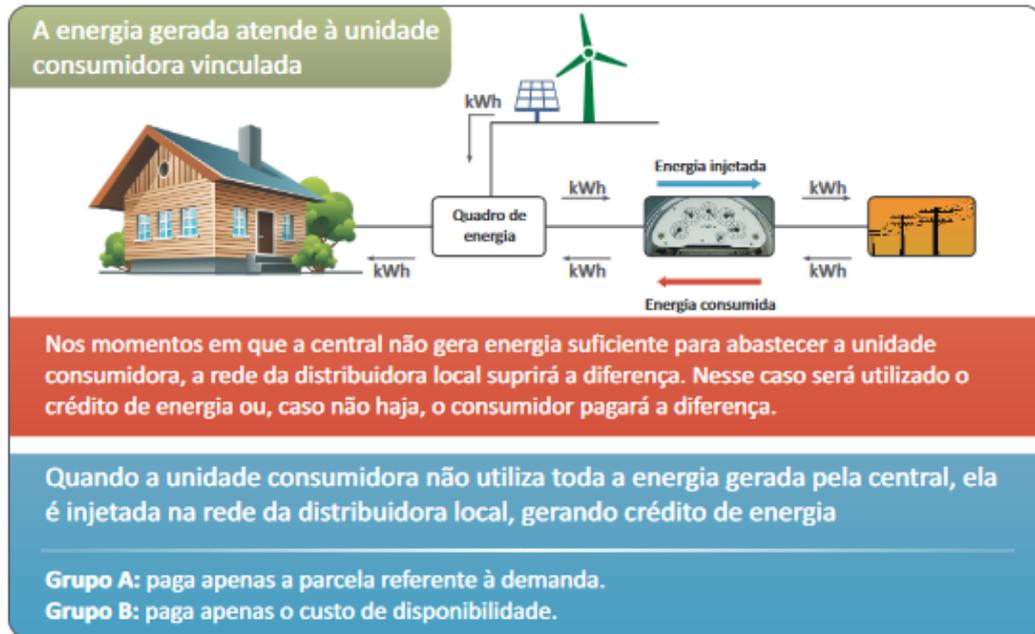


Figura 2 Sistema de compensação de energia elétrica.  
 Fonte: (ANEEL, 2016, p 16).

Deste modo torna-se possível que o agricultor possa gerar eletricidade em sua propriedade, a partir do biogás, com a utilização de um conjunto motor gerador ciclo diesel operando no modo dual com diesel ou biodiesel, permitindo que a geração de eletricidade seja mantida em momentos de baixa de produção de biogás com a operação do motor somente com diesel ou biodiesel. Também é possível que a demanda de eletricidade da propriedade seja mantida através dos benefícios do sistema de compensação de energia.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Gaseificação de Biomassa e Microgeração de Eletricidade, localizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), latitude 24°59'20.8"S e longitude 53°26'58.8"W, onde foi produzido o biodiesel a partir de óleo residual de fritura (ORF) e realizado os ensaios somente com combustível líquido. Já os ensaios no modo dual com combustível líquido e biogás foram realizados em uma granja de suinocultura localizada no município de Maripá no Oeste do Paraná, latitude 24°24'07.2"S e longitude 53°52'19.3"W onde havia disponibilidade de biogás.

#### **3.1. Classificação da Pesquisa**

De acordo com Gil (2002) a pesquisa, quanto a abordagem do problema, caracteriza-se com quantitativa de natureza aplicada. Quanto aos objetivos a pesquisa apresenta característica explicativa, pois aprofunda o conhecimento da realidade com a identificação de fatores que contribuem ou determinam a ocorrência de fenômenos. Quanto aos procedimentos a pesquisa classifica-se como experimentação que tem como objeto de estudo o desempenho energético selecionando-se variáveis que são capazes de influenciá-lo.

#### **3.2. Materiais**

##### **3.2.1. Biodiesel**

Para produção do biodiesel de óleo residual de fritura foi desenvolvido um reator de transesterificação com volume de 100 litros, possibilitando assim a produção, em uma batelada, do volume suficiente para realização de todos os experimentos, a fim de garantir a homogeneidade das características do biodiesel produzido. O projeto do reator foi desenvolvido em software de desenho tridimensional (Figura 3).



Figura 3 Projeto do Reator de Biodiesel

O reservatório possui formato cônico com inclinação de  $60^\circ$ , diâmetro de 435 mm, altura de 1040 mm, massa de 6,94 kg e é fabricado em polipropileno com função comercial de fermentador de cerveja. A estrutura do reator foi fabricada a partir de componentes estruturais de aço carbono 50mmx30mmx2mm utilizando os processos de corte e solda. Para o misturador foi utilizado um motor de para-brisa automotivo 12V e hastes misturadoras de tinta. A Figura 4 mostra o reator durante fabricação a esquerda, finalizado no centro e a direita é possível observar durante processo de transesterificação.



Figura 4 Reator de Biodiesel

Com a finalidade de aquecimento e de manter a temperatura foi utilizada uma resistência elétrica de 1500W controlada por um termostato digital do fabricante Full Gauge, modelo TIC17RG, com temperatura de controle de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $105^{\circ}\text{C}$  e resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , localizado em no painel de controle (Figura 5).



Figura 5 Painel de controle do Reator de Biodiesel

O óleo residual de fritura necessário para o processo foi obtido através de coleta na Pão de Trigo Panificadora e Restaurante, localizada em Cascavel/PR na

Avenida Brasil 9544. Para produção de biodiesel foi utilizado álcool metílico ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) como catalizador, posteriormente foi realizada limpeza do resíduo com água.

Para reação de transesterificação o hidróxido de sódio foi dissolvido no álcool metílico e depois adicionado ao reator onde já continha o ORF aquecido a  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Durante a reação a temperatura foi mantida e o misturador permaneceu ligado. Após o término da reação a resistência elétrica e o misturador foram desligados para decantação da glicerina. Depois de retirada da glicerina o biodiesel foi lavado com água e teve sua secagem realizada através do acionamento do misturador e da resistência elétrica, mantendo a temperatura constante em  $60\text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas (Figura 6).



Figura 6 Limpeza do Biodiesel

Após a produção do biodiesel foram feitas as blends de combustível líquido com as seguintes nomenclaturas: B8 (8% de biodiesel e 92% de diesel – diesel comercial); B20 (20% de biodiesel e 80% de diesel); B50 (50% de biodiesel e 50% de diesel); B80 (80% de biodiesel e 20% de diesel) e B100 (biodiesel puro).

As misturas foram submetidas a um teste do poder calorífico superior (PCS), utilizando uma bomba calorimétrica E2K (Figura 7) localizada no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.



Figura 7 Bomba Calorimétrica

De acordo com Moreira (2008) o poder calorífico inferior ( $PCI_{biodiesel}$ ) (kJ/kg) foi determinado a partir do poder calorífico superior (PCS) (kJ/kg).

$$PCI_{biodiesel} = PCS_{biodiesel} - 3052 \quad \text{Equação 1}$$

### 3.2.2. Biogás

O biogás utilizado no experimento foi de origem suína e teve sua porcentagem de metano ( $CH_4$ ) obtida por meio de um analisador de gases, marca Landtec, modelo Gem5000, o qual possui capacidade de mensuração dos gases:  $CH_4$  (0 a 100%),  $CO_2$  (0 a 100%),  $O_2$  (0 a 25%),  $CO$  (0 a 2000 ppm),  $H_2S$  (0 a 10000ppm); temperatura de operação de  $-10^\circ C$  a  $50^\circ C$ ; pressão de operação de  $-250mbar$  a  $250mbar$  e umidade relativa de operação de 0 a 95%. (Figura 8).



Figura 8 Analisador de Gases

Por meio da concentração de metano é possível obter o poder calorífico do biogás ( $PCI_{biogás}$ ) ( $\text{kJ/m}^3$ ).

$$PCI_{biogás} = \frac{P_m}{100} * PCI_{metano} \quad \text{Equação 2}$$

Onde o poder calorífico inferior do metano ( $PCI_{metano}$ ) equivale a  $8500 \text{ kcal.m}^{-3}$  e  $P_m$  é a porcentagem de metano no biogás (%). (ALVES, 2000)

### 3.2.3. Conjunto motor gerador

Para realização dos experimentos foi utilizado um conjunto motor gerador ciclo diesel, monocilíndrico, refrigerado a ar da marca Branco, modelo BD-6500 CF com características de fábrica para operação com 2% de biodiesel (Figura 9).



Figura 9 Conjunto Motor Gerador  
 Fonte: (BRANCO, 2011, p.33).

As especificações técnicas do motor do conjunto estão na Tabela 2 e sua curva de Torque potência e Consumo específico na Figura 10.

Tabela 2 Especificações técnicas do motor  
 Fonte: (BRANCO, 2011) adaptado pelo autor

Descrição	Especificação
Sistema de combustão	Injeção direta
Diâmetro x Curso	86 mm x 70 mm
Cilindrada	406 cm <sup>3</sup>
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
Consumo	2,15 L*h <sup>-1</sup>
Lubrificação	forçada por bomba de óleo
Capacidade de óleo	1,5 L
Dimensões (C x L x A)	417 x 470 x 494
Nível de ruído (7 m)	79 dB

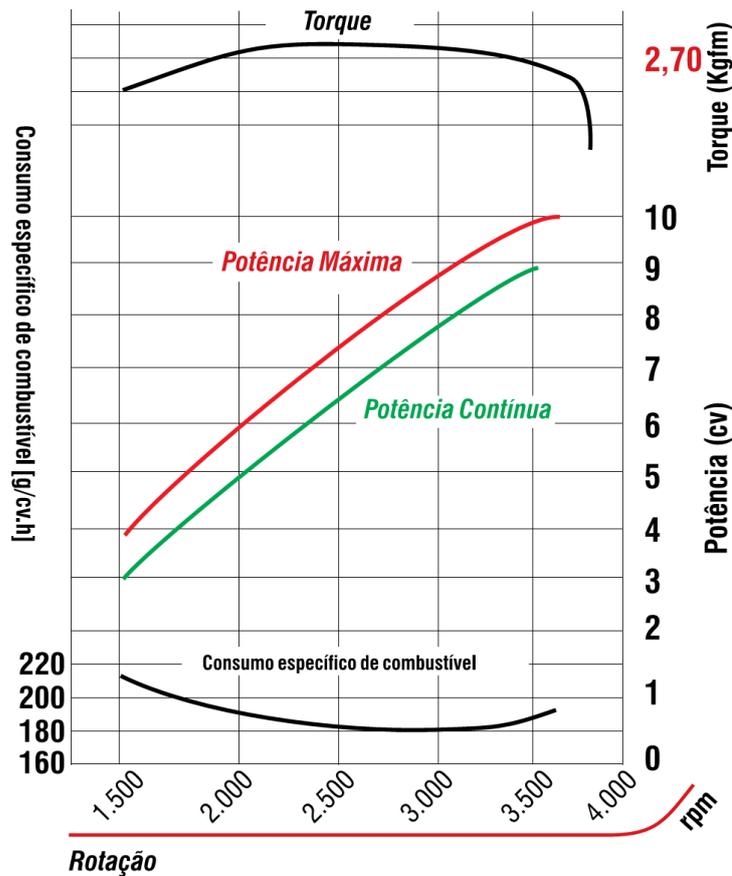


Figura 10 Curva torque, potência, consumo específico de combustível do motor  
Fonte: (BRANCO, 2011, p.15).

As especificações técnicas do conjunto motor gerador estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 Especificações técnicas conjunto motor gerador  
Fonte: (BRANCO, 2011) adaptado pelo autor

Descrição	Especificação
Potência máxima	5,5 kVA
Potência contínua	5,0 kVA
Tensão de saída	110 V / 220 V
Controle de tensão	Capacitor / sem Escova
Capacidade do tanque	12,5 L
Autonomia	5,20 h
Fases	Monofásico
Ruído (7 m)	79 dB
Dimensões (C x L x A) (conjunto)	735 x 458 x 670 (mm)
Massa (conjunto)	95 kg

Para que seja possível a correta realização dos experimentos o conjunto motor gerador diesel foi convertido para o modo dual, por meio de adaptação de um

misturador de ar biogás representado na Figura 11, onde o mesmo encontra-se acoplado na entrada de ar original do motor.



Figura 11 Misturador de gases tipo Venturi

A Figura 12 mostra o sistema completo **instalo** no motor. Sistema este que permite o funcionamento normal do motor somente com combustível líquido.

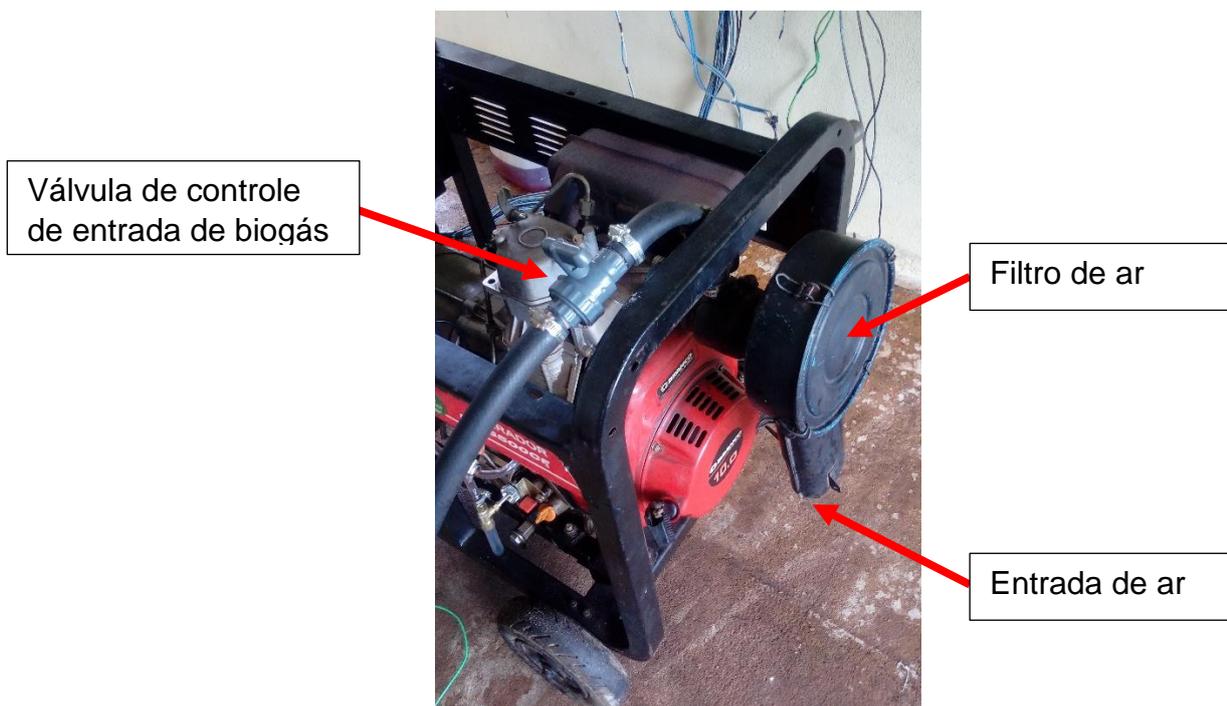


Figura 12 Adaptação Para Modo Dual

### 3.2.4. Banco de cargas resistivas

Para simular o consumo de energia elétrica foi utilizado um banco de cargas resistivas composto por oito resistências (1 de 250 W, 2 de 500 W, 2 de 1000 W e 3 de 2000 W) com tensão de alimentação de 220 V em corrente alternada. O conjunto possui um quadro de comando que possibilita o acionamento individual de cada carga resistiva, permitindo assim o correto controle da potência requerida (Figura 13).



Figura 13 Banco de Cargas Resistivas

### 3.2.5. Coleta de dados

Foi montado um sistema de coleta de dados controlado por um microcontrolador ATmega2560 (Figura 14) com a finalidade de coletar e armazenar todos os dados dos ensaios.



Figura 14 Microcontrolador ATmega2560

Também foi utilizado um módulo *real time clock* (RTC) Ds3231 (Figura 15) para controle da hora e data.



Figura 15 Módulo RTC Ds3231

Para armazenamento de dados foi instalado o módulo leitor de cartão micro SD (leitura e escrita) juntamente com um cartão micro SD, programado para gravar os dados a cada 10 segundos (Figura 16).



Figura 16 Módulo Leitor de cartão Micro SD

Com a finalidade de controle do funcionamento do dispositivo de coleta de dados foi utilizado um display LCD 20x4 2004 12c com tela azul e escrita branca (Figura 17).

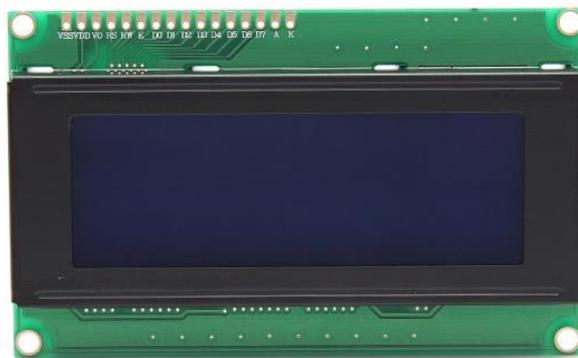


Figura 17 Display LCD

O sistema completo foi montado em uma caixa de disjuntores permitindo o acoplamento dos sensores e cabo de alimentação e cabo de comunicação conforme Figura 18 e Figura 19.

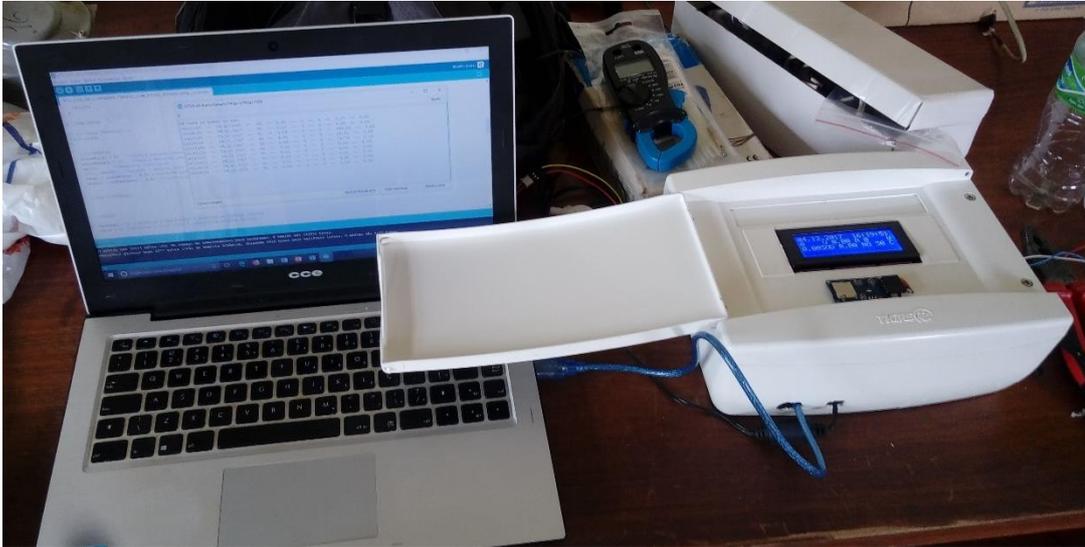


Figura 18 Sistema de Coleta de Dados Acoplado ao Computador



Figura 19 Sistema de Coleta de Dados

### 3.2.6. Grandezas elétricas

Com o objetivo de obter a potência gerada para a carga fixada o banco de resistências foi acoplado aos sensores de tensão AC Arduino (Figura 20) com

capacidade de medição de 0 a 310 V e ao sensor de corrente não invasivo STC-013-000 100A (Figura 21) com capacidade de medição de 0 a 100 A com sinal de saída de 0 a 50 mA e temperatura de trabalho entre -25 °C a 70 °C, para coletar os dados de tensão (V) e corrente (A) respectivamente. O sistema foi configurado para fornecer o a potência gerada.



Figura 20 Sensor de Tensão



Figura 21 Sensor de Corrente

### 3.2.7. Fluxo de Biogás

O fluxo de biogás foi analisado por meio de um sensor de fluxo de vazão YF-S201 (Figura 22) acoplado na entrada de biogás do conjunto motor gerador com a armazenagem dos dados realizada pelo sistema de coleta de dados



Figura 22 Medidor de Fluxo de Biogás

Também foi utilizado um medidor de vazão mássica termal da marca Magnetrol, modelo TA2 indicando diretamente o fluxo de biogás ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) em seu *display* (Figura 23).



Figura 23 Medidor Termal de Fluxo de Biogás

### 3.2.8. Fluxo de combustível líquido

O fluxo de combustível líquido foi medido em por meio de um sensor de fluxo de vazão YF-S401 (Figura 24), com faixa de medição de  $0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $6,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , acoplado na saída do reservatório de combustível líquido tendo a coleta de dados realizada pelo sistema de coleta de dados.



Figura 24 Medidor de Fluxo de Combustível Líquido

Uma proveta plástica graduada em mL (Figura 25) foi utilizada como reservatório de combustível líquido possibilitando a análise diretamente do consumo volumétrico de diesel/biodiesel durante o intervalo de tempo do ensaio de acordo a Equação 3.

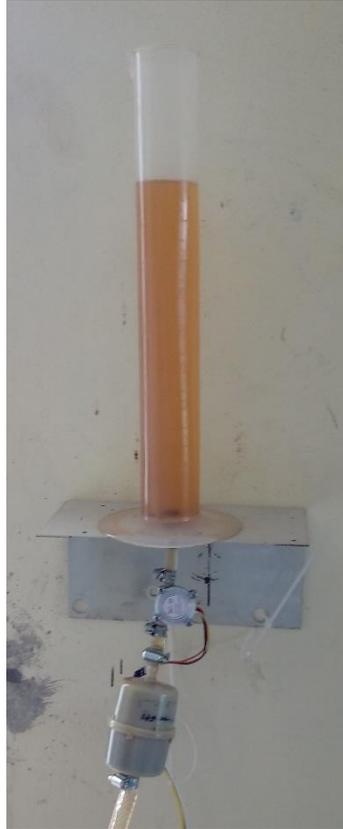


Figura 25 Proveta graduada

$$C_{cl} = \frac{V_i - V_f}{t}$$

Equação 3

Onde  $C_{cl}$  é o consumo de combustível líquido ( $\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $V_i$  é o volume inicial de combustível líquido no reservatório (mL),  $V_f$  é o volume final de combustível líquido no reservatório e  $t$  é o tempo de duração do ensaio (s).

### 3.3. Metodologia.

O Experimento foi realizado em duas etapas, a primeira utilizando somente o combustível líquido com as blends: B8 (8% de biodiesel e 92% de diesel – diesel comercial); B20 (20% de biodiesel e 80% de diesel); B50 (50% de biodiesel e 50% de diesel); B80 (80% de biodiesel e 20% de diesel) e B100 (biodiesel puro), foi realizado no Laboratório de Gaseificação de Biomassa e Microgeração de Eletricidade da UNIOESTE (Figura 26).



Figura 26 Ensaio - Etapa 1.

Nos ensaios o conjunto motor gerador foi acoplado ao banco de cargas resistivas, com variações de 0 a 100% da carga máxima, cada variação foi de 10%, onde foi obtido a potência de geração para cargas variadas. As cargas ensaiadas foram: 0,0kW (0%) 0,5 kW (10%); 1,0 kW; 1,5 kW; 2,0 kW; 2,5 kW; 3,0 kW; 3,5 kW; 4,0 kW; 4,5 kW e 5,0 kW (100%).

Para cada blenda de combustível líquido foram realizadas quatro repetições com as variações de carga estabelecidas de 0% a 100%. A Figura 27 mostra o fluxograma do experimento de avaliação de desempenho do motor somente com combustível líquido (Etapa 1).

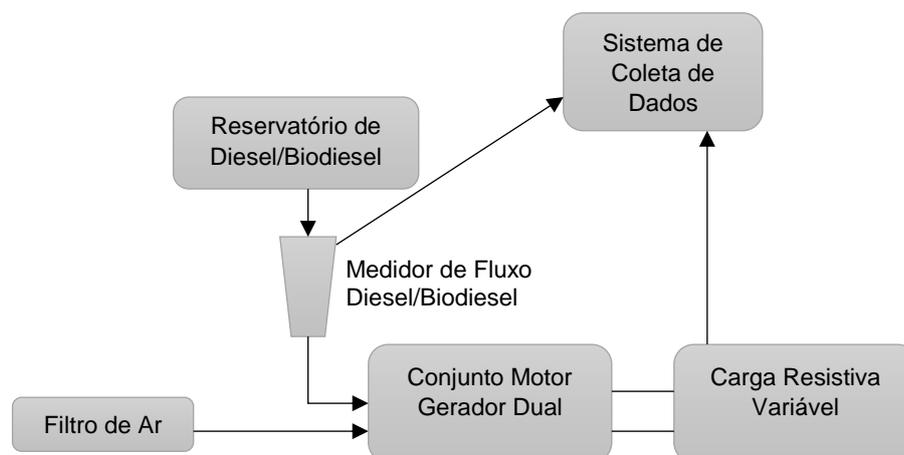


Figura 27 Fluxograma do Experimento – Etapa 1.

Na segunda etapa os ensaios foram realizados em uma granja de suinocultura localizada no município de Maripá no Oeste do Paraná, latitude  $24^{\circ}24'07.2''S$  e longitude  $53^{\circ}52'19.3''W$ . Nesta etapa também foi utilizado o biogás como combustível juntamente com o combustível líquido, ou seja, os ensaios foram realizados com o conjunto motor gerador no modo dual.

Foram ensaiadas as mesmas blends de combustível líquido e mesmas variações de cargas da primeira etapa com o mesmo número de repetições, com o acréscimo do combustível gasoso em todos os ensaios. A Figura 28 mostra o fluxograma do experimento de avaliação de desempenho do motor dual (Etapa 2).

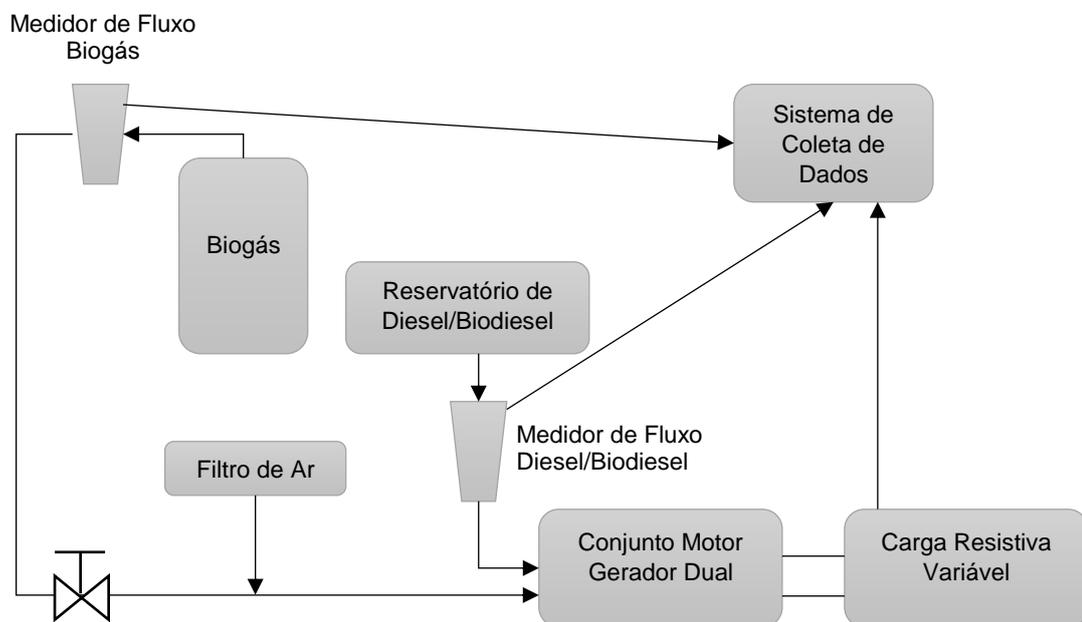


Figura 28 Fluxograma do Experimento – Etapa 2.

Nesta etapa as condições de realização do ensaio se aproximaram muito da realidade da utilização do biogás pelos proprietários de biodigestores, visto que a captação do biogás foi imediatamente antes da entrada do conjunto motor gerador instalado na granja. As condições dos ensaios da etapa 2 podem ser observadas nas Figura 29 e 30 e o biodigestor na Figura 31.



Figura 29 Ensaio - Etapa 2a



Figura 30 Ensaio - Etapa 2b



Figura 31 Biodigestor

### 3.3.1. Análise dos dados

Com os dados de consumo de biogás e combustível líquido, assim como os dados de potência elétrica gerada em função das misturas de diesel e biodiesel, foi possível obter os principais parâmetros de desempenho do sistema. A eficiência do conjunto motor gerador ( $\eta$ ) no modo dual foi determinada conforme proposto por Bora e Saha (2015) pela Equação 4:

$$\eta = \frac{Pe}{(\dot{m}_{cl} \cdot PCI_{cl} + \dot{m}_{bg} \cdot PCI_{bg})} \quad \text{Equação 4}$$

Onde  $\dot{m}_{cl}$  é o fluxo de massa de combustível líquido, no caso o diesel, biodiesel e misturas (em  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $PCI_{cl}$  é o poder calorífico inferior do combustível

líquido ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ ),  $\dot{m}_{bg}$  é o fluxo de biogás ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e  $PCI_{cl}$  é o poder calorífico inferior do combustível gasoso (biogás) ( $\text{kJ.m}^{-3}$ ) e  $Pe$  é a potência produzida pelo gerador.

A eficiência do conjunto motor gerador ( $\eta$ ) operando com combustível líquido, sem biogás foi determinada pela Equação 5.

$$\eta = \frac{Pe}{(\dot{m}_{cl} \cdot PCI_{cl})} \quad \text{Equação 5}$$

Durante a operação do conjunto no modo dual, é importante reduzir ao máximo o consumo de combustível líquido, pois o biogás deverá ser o combustível primário e o combustível líquido o piloto, cujo objetivo seria a ignição. Para o motor ensaiado não foi necessário realizar nenhum sistema de redução de alimentação de combustível líquido, pois o mesmo executa esta redução automaticamente de acordo com o incremento de combustível gasoso. A substituição de combustível líquido (SCL), em %, por biogás no motor gerador diesel operando no modo dual foi obtida pela Equação 6:

$$SCL = \frac{(\dot{m}_{mn} - \dot{m}_{md})}{(\dot{m}_{mn})} \cdot 100 \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $\dot{m}_{mn}$  é o consumo de combustível líquido no modo normal, em  $\text{kg.h}^{-1}$ , e  $\dot{m}_{md}$  é o consumo de combustível líquido no modo dual.

A potência gerada e o consumo específico de combustível líquido foram mensuradas diretamente pelo sistema de coleta de dados para cada mistura de combustível, tipo de operação (modo normal e modo dual) e para cada incremento de carga. Assim como o consumo de combustível gasoso (biogás) também foi mensurado pelo sistema de coleta de dados durante a operação no modo dual para cada combustível líquido e incremento de carga. Tendo dos dados de eficiência e substituição de combustível líquido calculados pelas equações 4, 5 e 6.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Poder calorífico inferior do combustível líquido

O poder calorífico inferior do biodiesel (B100) de óleo residual de fritura foi mensurado em  $35912 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , o que representa um resultado 14,57% inferior ao do diesel comercial (B8) que obteve  $42038 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Os demais dados referentes ao poder calorífico superior e inferior de todos os combustíveis líquidos utilizados no experimento encontram-se dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 Poder calorífico dos combustíveis líquidos

Combustível	PCS ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )	PCI ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )
B8	45090	42038
B20	44557	41505
B50	41703	38651
B80	39867	36815
B100	38964	35912

Na pesquisa de Sanli *et al.*, (2015) o poder calorífico inferior do biodiesel de óleo residual de fritura foi mensurado em  $37333 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , muito próximo ao definido por Attia e Hassaneem (2016) com valor de  $37951 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Ambos resultados próximos aos obtidos apresentando uma diferença aproximada de 5%. Vale ressaltar que o óleo residual de fritura pode ser provido de diferentes óleos e que o material frito nele também pode influenciar as características do biodiesel, justificando a diferença de resultados.

### 4.2. Poder calorífico inferior do combustível gasoso

A mensuração da porcentagem de Metano ( $\text{CH}_4$ ) do biogás obteve um resultado de 63,5% (Figura 32), conseqüentemente obtendo um poder calorífico inferior de  $22562 \text{ kJ.m}^{-3}$ , resultado superior aos 53% e 51% de  $\text{CH}_4$  encontrados na pesquisa de Benato, Macor e Rossetti (2017), superior também aos 60% do estudo de Ambarita (2017) e inferior aos 73% encontrado por Barick *et al.*, (2017), entretanto

ambos os resultados estão dentro dos parâmetros definidos por Igoni *et al.*, (2008) entre 55% e 75%, assim como para Salomon e Lora (2005) entre 40% e 75%.

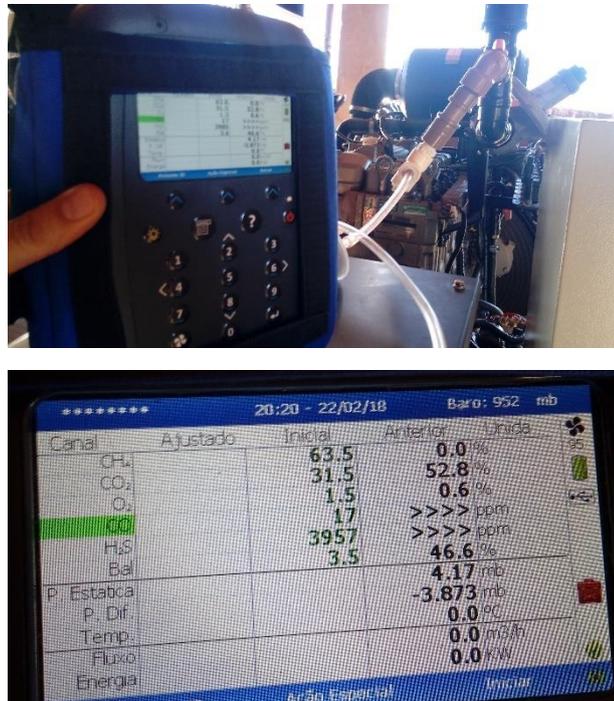


Figura 32 Medição da concentração de CH<sub>4</sub>

### 4.3. Potência elétrica gerada

A potência elétrica gerada no modo dual (combustível líquido e biogás) foi levemente superior do que a obtida no modo normal (somente combustível líquido). Na Figura 33 é perceptível que durante o modo normal a curva de potência decai proporcionalmente ao incremento de carga, apresentando perda acentuada a partir da carga de 4 kW. No modo dual a curva de potência possui comportamento linear sem apresentar queda acentuada.

A diferença de potência elétrica gerada durante aplicação de carga baixa obteve pouca diferença entre o modo dual e normal, ficando em torno de 5% para todos os combustíveis líquidos. Entretanto esta diferença de potência elétrica gerada apresentou comportamento crescente proporcional ao incremento de carga, chegando a maior diferença com a carga de 5,0 kW. As maiores diferenças foram de 18,76%, 16,06%, 17,41%, 16,33%, 21,77% durante operação com os combustíveis líquidos B8, B20, B50, B80 e B100 respectivamente.

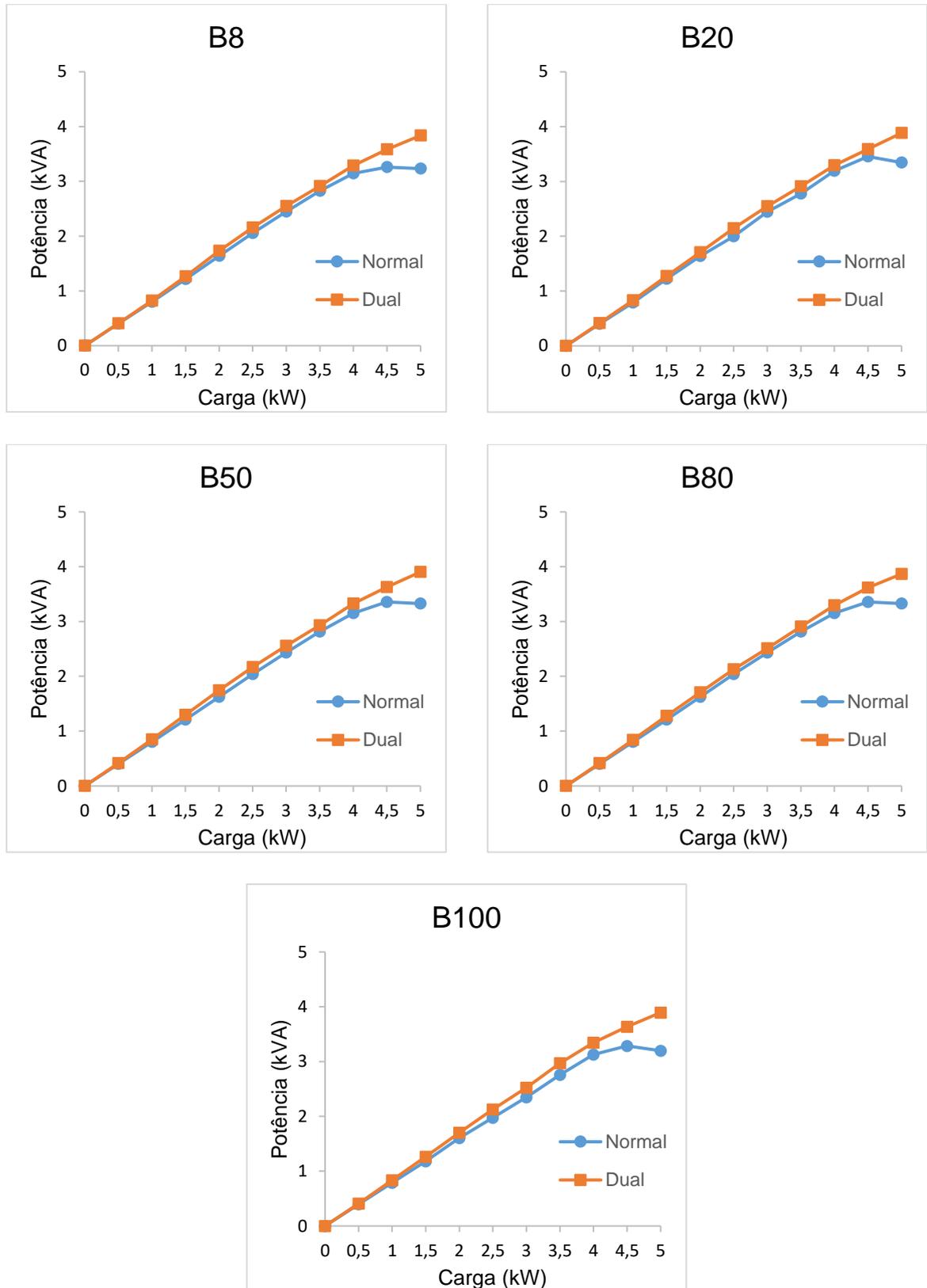
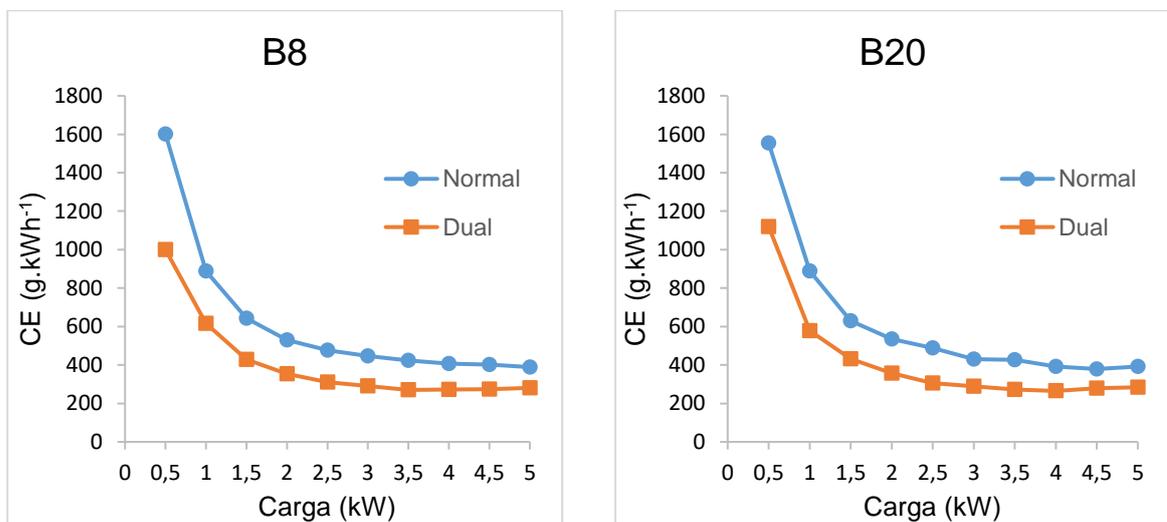


Figura 33 Potência gerada em função da carga no modo normal e no modo dual variando misturas de combustível líquido

Os resultados encontrados se assemelham com os obtidos por Ambarita (2017) que concluiu que durante a operação no modo dual a potência de saída é superior em comparação ao modo normal. Ao estudar a comportamento da taxa de compressão em motor dual com biogás e biodiesel Barik *et al.*, (2017) também evidenciou o aumento de potência durante operação no modo dual.

#### 4.4. Consumo específico de combustível líquido

O consumo específico de combustível líquido apresentou resultado menor no modo dual em comparação ao modo normal, de modo que é perceptível que o acréscimo de biogás como fonte de energia teve influência positiva. Esta redução de consumo específico obteve resultado médio de 33,32%, 32,03%, 32,74%, 31,53% e 34,97% operando com os combustíveis B8, B20, B50, B80 e B100 respectivamente (Figura 34).



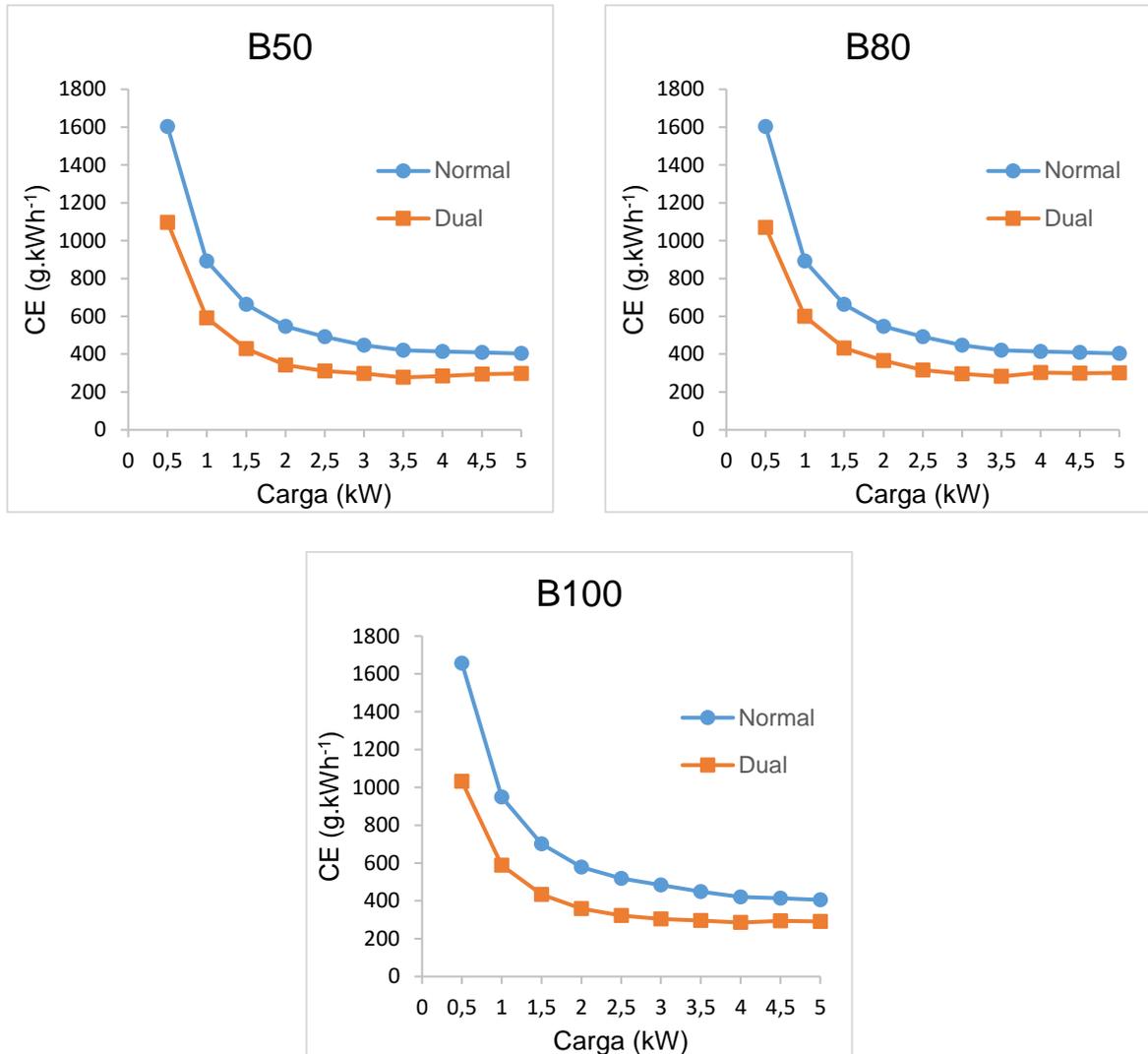


Figura 34 Consumo específico de combustível líquido em função da carga no modo normal e no modo dual variando misturas de combustível líquido

Também é possível perceber que houve redução na diferença entre o modo dual e normal de acordo com o incremento de carga. Este fato possivelmente pode ser atribuído ao fornecimento de biogás insuficiente a necessidade do conjunto motor gerador.

#### 4.5. Eficiência

A eficiência mensurada foi maior durante operação no modo normal chegando a 22,01%, 22,10%, 23,10%, 24,25% e 24,74% operando com os combustíveis B8, B20, B50, B80 e B100 respectivamente com a maior aplicação de carga (5 kW) conforme Figura 35.

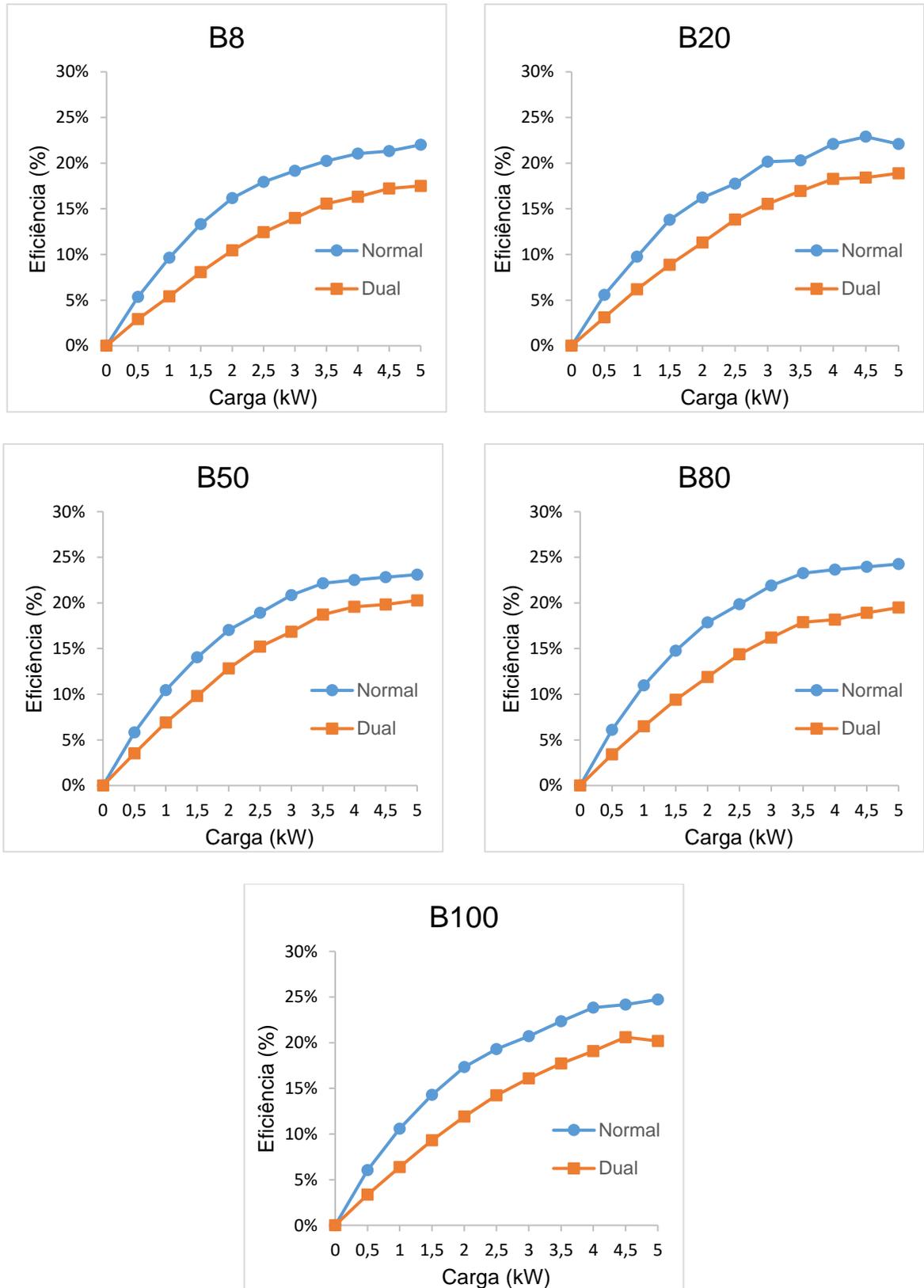
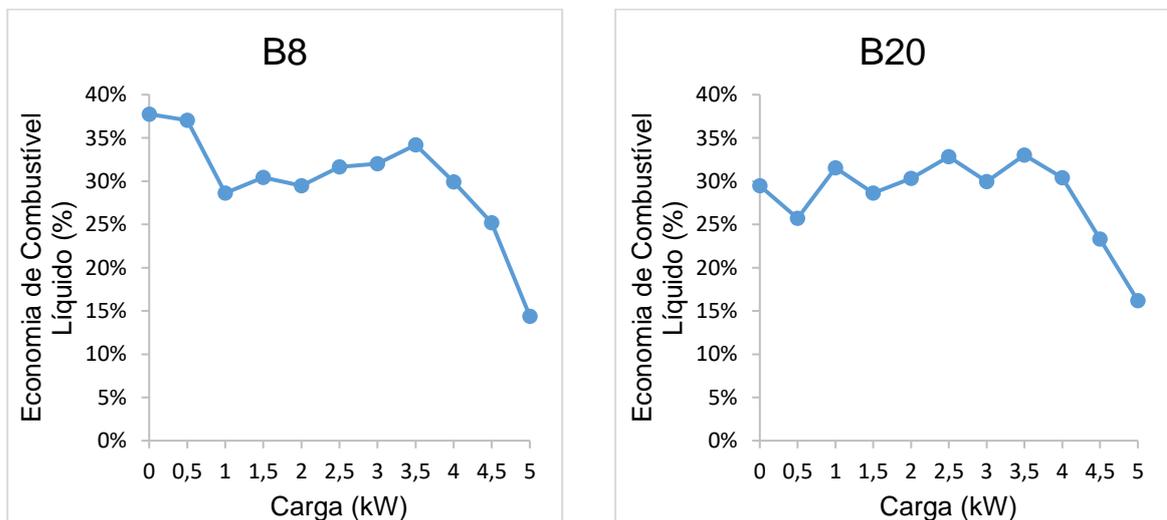


Figura 35 Eficiência em função da carga no modo normal e no modo dual variando misturas de combustível líquido

Para o modo dual a eficiência foi de 17,51%, 18,89%, 20,27%, 19,48% e 20,18% operando com os combustíveis B8, B20, B50, B80 e B100 respectivamente. Portanto a diferença entre o modo dual e normal foi de 4,50%, 3,21%, 2,83%, 4,77% e 4,56% para cada combustível líquido já evidenciado.

#### 4.6. Substituição do combustível líquido no modo dual

A substituição do combustível líquido é representada pela Figura 36, onde apresenta a curva de comportamento da substituição em função da carga aplicada para cada mistura de combustível. Para todos os casos é observado uma redução da substituição de combustível líquido com a elevação da carga, principalmente a partir de 4,0 kW evidenciando mais uma vez uma possível insuficiência na alimentação de biogás obrigando o motor gerador consumir mais combustível líquido gradativamente com o aumento da carga. A média de economia de combustível líquido para misturas B8, B20, B50, B80 e B100 foi de 30,06%, 28,31%, 27,79%, 27,75% e 30,08% respectivamente.



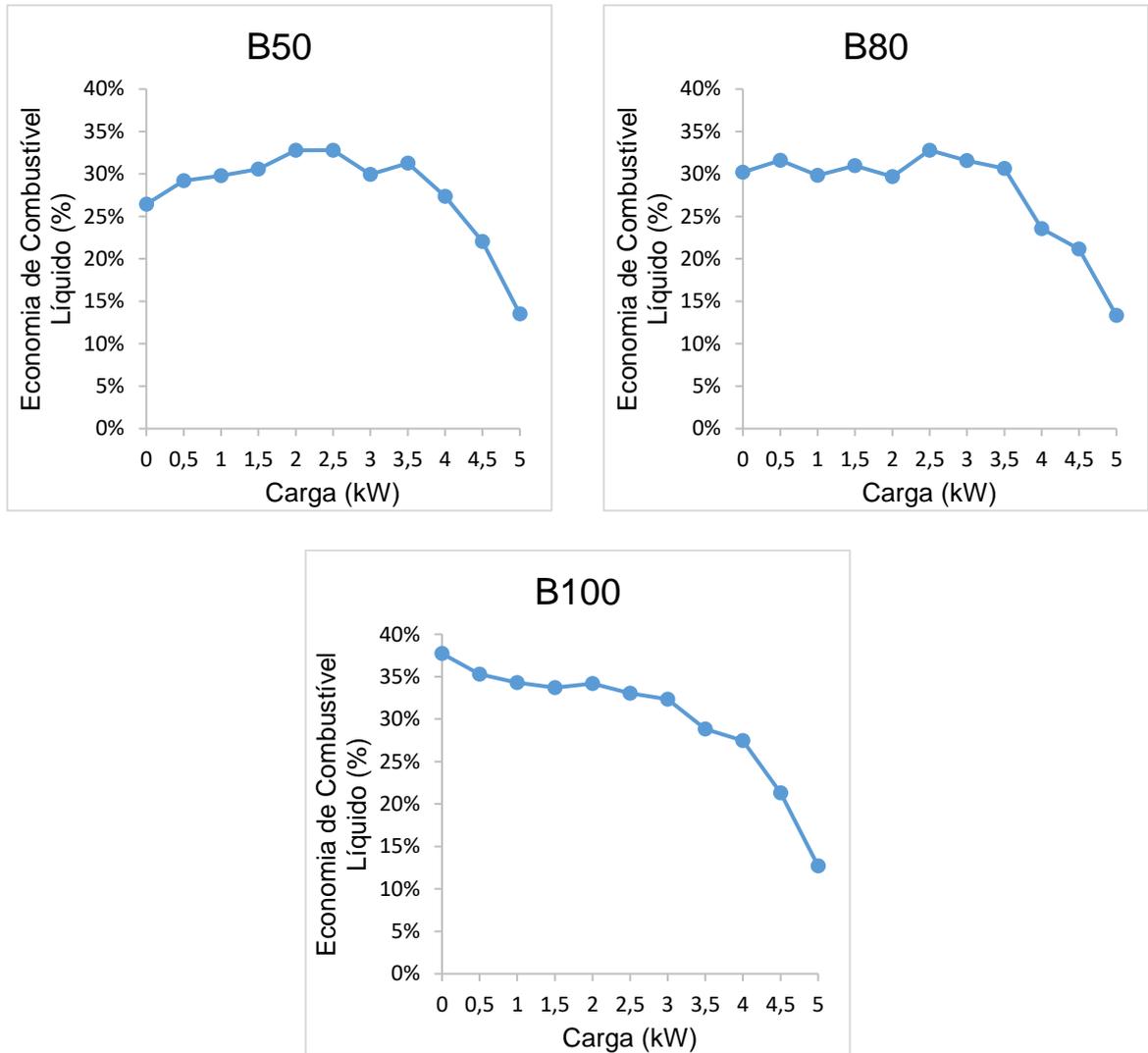


Figura 36 Economia de combustível líquido no modo dual variando misturas de combustível líquido

Em outras pesquisas a substituição de combustível líquido obteve valores superiores como no caso da pesquisa de Rosha, Dhir e Mohapatra (2018) onde chegou-se ao pico de 72,3% e na pesquisa de Verma *et al.*, (2017) a substituição foi ainda maior, atingindo 84,2% de substituição de combustível líquido operando com Diesel e Biogás.

## 5. CONCLUSÕES

O poder calorífico mensurado do biodiesel de óleo residual de fritura foi de  $35912 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , o que representa um resultado 14,57% inferior ao do diesel comercial (B8) que obteve  $42038 \text{ kJ.kg}^{-1}$  evidenciando uma redução do PCI em decorrência do aumento da proporção de biodiesel no diesel. O percentual de metano ( $\text{CH}_4$ ) presente no biogás foi de 63,5% conseqüentemente apresentando um PCI de  $22562 \text{ kJ.m}^{-3}$ .

A potência elétrica gerada foi superior no modo dual apresentando diferenças para B8, B20, B50, B80 e B100 de 18,76%, 16,06%, 17,41%, 16,33%, 21,77% respectivamente. O consumo específico de combustível líquido foi menor no modo dual obtendo em média redução de 33,32%, 32,03%, 32,74%, 31,53% e 34,97% respectivamente para as misturas de combustível líquido já mencionadas. No modo normal o consumo específico de combustível líquido obteve o melhor resultado de  $389,01 \text{ g.kWh}^{-1}$  com B8 e  $405,24 \text{ g.kWh}^{-1}$  com B100, no modo dual o menor consumo específico foi de  $270,17 \text{ g.kWh}^{-1}$  com B8 e  $285,29 \text{ g.kWh}^{-1}$  com B100.

A eficiência foi maior no modo normal apresentando resultados de 22,01%, 22,89%, 23,10%, 24,25% e 24,74% operando com B8, B20, B50, B80 e B100 respectivamente, contra 17,51%, 18,89%, 20,27%, 19,48% e 20,18% no modo dual. Para ambos os casos a carga de maior eficiência foi de 5,0 kW. A economia de combustível líquido apresentou queda com o aumento de carga, acentuando-se a partir de 4,0 kW (80% da carga) o que indica insuficiência na alimentação de biogás. Entretanto a economia média de combustível líquido para a mistura B8 foi de 30,06% e de 30,08% para B100.

Contudo a utilização de um conjunto motor gerador ciclo diesel com o objetivo de geração de eletricidade tecnicamente eficiente, tanto no modo normal com misturas de diesel/biodiesel quanto no modo dual com biogás e misturas de diesel/biodiesel mostraram-se possíveis. Embora no modo dual a eficiência energética foi levemente inferior em comparação ao modo normal, é possível afirmar que o motor gerador apresentou desempenho satisfatório em ambos os casos, assim como capacidade de geração de eletricidade e redução do consumo de combustível líquido no modo dual. Enfatizando ainda que o biogás é um combustível de baixo custo e renovável, assim como o biodiesel de óleo residual de fritura.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA C. de *et al.* Analysis of the socio-economic feasibility of the implementation of an agro-energy condominium in western Paraná – Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, article in press, p. 1-8, 2016.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 142p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000

AMBARITA, H. Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogás) mode. **Case Studies in Thermal Engineering**. v. 10, p. 179-191, 2017

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2.ed Brasília: ANEEL, 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482. Brasília: ANEEL, 2012, 5P.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687. Brasília: ANEEL, 2015, 25P.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 07. Brasília: ANP, 2008, 9P.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

**Biocombustíveis**. Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/?pg=33972&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1298634452218>>. Acesso em: 18 ago. 2016b.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biodiesel**.

Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/?pg=73292&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1471802156077>>. Acesso em: 18 ago. 2016c.

ANP - Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 30. Brasília: ANP, 2016a, 7P.

ATAPOUR, M.; KARIMINIA, H. R.; MOSLEHABADI, P. M. Optimization of biodiesel production by alkali-catalyzed transesterification of used frying oil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 92, p. 179-185, 2014.

ATTIA, A. M. A.; HASSANEEN, A. E. Influence of diesel fuel blended with biodiesel produced from waste cooking oil on diesel engine performance. **Fuel**, London v.167, p. 316-328, 2016

BARIK, D.; MURUGAN, S. Experimental investigation on the behavior of a DI diesel engine fueled with raw biogas-diesel dual fuel at different injection timing. **Journal of the Energy Institute**. v.89, p. 373–388, 2015.

BARIK, D. *et al.* Combined effect of compression ratio and diethyl ether (DEE) port injection on performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with upgraded biogas (UBG)-biodiesel dual fuel. **Fuel**, London v. 209, p. 339-349, 2017.

BENATO, A.; MACOR, A.; ROSSETTI, A. Biogas Engine Emissions: Standards and On-Site Measurements. **Energy Procedia**, v.126, p. 398-405, 2017

BORA, B. J.; SAHA, U. K. Comparative assessment of a biogás run dual fuel diesel engine with rice bran oil methyl ester, pongamia oil methyl ester and palm oil methyl ester as pilot fuel. **Renewable Energy**, Lemesos, v.81, p. 490-498, 2015.

BOUAID, A. Optimization of biodiesel production from jojoba oil. *Trans IChemE*, v. 85, p. 378-382, 2007

BRANCO. **Catálogos de Produtos**. São José dos Pinhais, 2011. (catálogo comercial)

BRASIL. Lei 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. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/111097.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/111097.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2017.

BRASIL. Lei 13.263, de 23 de Março de 2016. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/L13263.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/L13263.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2017

BRIZI, F. *et al.* Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogás. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 193-211, 2014

CÉSAR, A. da S. *et al.* The potential of waste cooking oil as supply for the Brazilian biodiesel chain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 246-253, 2017.

DORADO, M. P. *et al.* Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. **Fuel**, v. 82, p. 1311-1315, 2003.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2017**: ano base 2016. Rio de Janeiro: EPF, 2017.

- GALVÃO, L. C. R. Aspectos Energéticos da Biomassa como Recurso no Brasil e no Mundo. AGRENER GD 2006 - 6º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. 2006.
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projeto de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.
- GOMES, P. V. *et al.* Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues. **Energy Policy**. v. 115, p. 199-206, 2018.
- HAGMAN, L. *et al.* The role of biogas solutions in sustainable biorefineries. **Journal of Cleaner Production**. v. 172, p. 3982-3989, 2018.
- HAKAWATI, R. *et al.* What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?. **Applied Energy**. v. 206, p. 1076-1087, 2017
- IGONI H. *et al.* Designs of anaerobic digesters for producing biogás from municipal solid-waste. **Applied Energy**, v. 85, n.6, p.430-438, 2008.
- KADAM, R.; PANWAR, N. L. Recent advancement in biogas enrichment and its applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 892-903, 2017.
- KHAN, I. U. *et al.* Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**. v. 150, p. 277-294, 2017.
- KIAKALAIEH, A. T.; AMIN, N. A.S.; MAZAHERI, H. A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. **Applied Energy**, v. 104, p. 683-710, 2013.
- KUSS, V. V. *et al.* Potential of biodiesel production from palm oil at Brazilian Amazon. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 50, p. 1013-1020, 2015.
- LACCHINI, C.; RÜTHER, R. The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. **Renewable Energy**. v. 85, p. 786-798, 2015.
- LAM, M. K.; LEE, K. T.; MOHAMED A. R. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. **Biotechnology Advances**, v. 28, p. 500-518, 2010.
- LAO INDÚSTRIA. **Medidores de Gás**. Osasco, 2015. (catálogo comercial)
- LEUNG, D. Y. C.; GUO, Y. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. **Fuel Processing Technology**. v. 87, p. 883-890, 2006
- LORA, E. S. Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes

Renováveis na Agricultura. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1997, Campina Grande, 1997.

ROSHA, P.; DHIR, A.; MOHAPATRA, S. K. Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 82, p. 3333-3349, 2018.

MOFIJUR, M. *et al.* Role of Biofuels on IC Engines Emission Reduction. **Energy Procedia**. v. 75, p. 886-892, 2015

MME – Ministério de Minas e Energia (MME), EPE – Empresa de Pesquisa Energética, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília: MME/EPE, 2014, 434p.

MARCHETTI, J. M. A summary of the available technologies for biodiesel production based on a comparison of different feedstock's properties. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 90, p. 157-163, 2012.

MORAN, M. J. *et al.* **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MOREIRA, S. M. dos S. R. **Influência do Biodiesel nas emissões de um motor turbo diesel**. 2008. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

MURUGESAN, A. *et al.* Production and analysis of bio-diesel from non-edible oils - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 825-834, 2009.

MYDEEN, M. A. *et al.* Self - Circulating Biogas Generation for Swine Waste. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 795-800, 2016.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. Biofuels in Brazil: Evolution, achievements and perspectives on food security. **Global Food Security**, v. 2, p. 117-125, 2013.

ÖZCIMEN, D.; KARAOSMANOGLU, F. Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake. **Renewable Energy**, v. 29, p. 779-787, 2004.

PIMENTA, D. J. T. Estudo da **Influência do Biodiesel no funcionamento de um motor diesel**. 2008. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

RIEKE, C. *et al.* Modeling and optimization of a biogas plant for a demand-driven energy supply. **Energy**. v. 145, p. 657-664, 2018.

RODIONOVA, M. V. *et al.* Biofuel production: Challenges and opportunities. **International Journal of Hydrogen Energy**, article in press, p. 1-12, 2016

SALADINI, F. *et al.* Guidelines for emergy evaluation of first, second and third generation biofuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 66, p. 221-227, 2016

SALEH H. E. Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine. **Fuel**, London v.87, n.13, p. 3031-3039, 2008.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 1101-1107, 2009.

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.

SANLI H. *et al.* Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. **Fuel**, London v.159, p. 179-187, 2015.

SOARES, T. S. *et al.* Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça – SP, v.4, n. 8, 2006.

SUZUKI P. B. A. *et al.* 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.

VERMA, S. *et al.* A comparative exergetic performance and emission analysis of pilot diesel dual-fuel engine with biogas, CNG and hydrogen as main fuels. **Energy Conversion and Management**. v. 151, p. 764-777, 2017.

WASIAK, A. L. Effect of Biofuel Production on Sustainability of Agriculture. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 739-746, 2017.

WERNCKE, I. **Desempenho energético de um motor gerador de 5 KVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de crumbe e biogás**. 2014. 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2014.

ZHAO, W. *et al.* Development of a skeletal mechanism for heavy-duty engines fuelled by diesel and natural gas. **Applied Thermal Engineering**, v. 17, 2017 disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117326042>> Acesso em: 23 jul. 2017.