PAULO JOB BRENNEISEN

DESEMPENHO DE MOTOGERADOR DE CICLO DIESEL OPERANDO COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO/DIESEL OU BIOGÁS/DIESEL.

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO, 2013

PAULO JOB BRENNEISEN

DESEMPENHO DE MOTOGERADOR DE CICLO DIESEL OPERANDO COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO/DIESEL OU BIOGÁS/DIESEL.

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

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.
Co-orientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

CASCAVEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO, 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

B848d Brenneisen, Paulo Job

Desempenho de motogerador de ciclo diesel operando com gás de gaseificação/diesel ou biogás/diesel. / Paulo Job Brenneisen — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.

54 p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
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. Energia. 2. Biomassa. 3 Gaseificador. 4. Biogás. 5. Metanogênese. 6. Biodigestores. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 628.74

PAULO JOB BRENNEISEN

"Desempenho de motogerador de ciclo diesel operando com gás gaseificação/diesel ou biogás/diesel"

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, **aprovado** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

Prof. Dr. Reinaldo Prandini Ricieri
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

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

Cascavel, 08 de fevereiro de 2013.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio *Job* Brenneisen *in memoriam* e Hulda Josina Specht Brenneisen, pela dedicação, pela educação, pelo carinho, pelo amor, pelo exemplo de vida e principalmente por me colocar no bom caminho.

Caminho...

..que..

..ainda..

..sigo.

Obrigado meus Pais.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e incentivo;

À minha filha, que muito me ensina, Paula Carolina Cardoso Brenneisen;

Ao professor Dr. Reinaldo Prandini Ricieri, por ter me selecionado para o programa de mestrado;

Ao Professor Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pela sua disposição em orientar-me nesta caminhada;

Ao Professor Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti, pela presteza e grande auxílio;

Ao Sr Ervino Dassow, por disponibilizar os recursos de sua granja para realização deste experimento;

À nossa mãe, Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt, que no mestrado nos mantém dentro dos prazos e regulamentos;

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

À UTFPR, por propiciar as condições para meu aperfeiçoamento profissional;

Aos amigos da "MANSÃO", esta quase família: Eduard Kavanagh, Estor Gnoatto, Amauri Massochin, Yuri Ferruzzi e Jorge Kawahara;

A todos os amigos que fiz nesta Universidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Veículos a gasogênio - Rio de Janeiro 1943. 5
Figura 2 - Gaseificador contracorrente. 7
Figura 3 - Gaseificador concorrente. 7
Figura 4 - Gaseificador de fluxo cruzado. 8
Figura 5 - Gaseificador de leito fluidizado. 9
Figura 6 - Gaseificador concorrente de duplo estágio. 10
Figura 7 - Veículo movido a biogás. 11
Figura 8 - Biodigestor modelo indiano. 13
Figura 9 - Biodigestor modelo chinês. 13
Figura 10 - Biodigestor tubular. 14
Figura 11 - Admissão. 15
Figura 12 - Compressão. 15
Figura 13 - Combustão 16
Figura 14 - Escape. 16
Figura 15 - Sistema de Gaseificação. 19
Figura 16 - GMG Branco modelo BD-6500CF 20
Figura 17 - Acoplamento Ar/Gás. 21
Figura 18 - Banco de resistências. 21
Figura 19- Comando do banco de resistências. 21
Figura 20 - Balança semianalítica. 22
Figura 21 - Montagem do ensaio de biogás 23
Figura 22 - Bomba calorimétrica. 24
Figura 23 - Gás produzido. 27
Figura 24 - Comparação entre as amostras obtidas em diferentes temperaturas. 27
Figura 25 - Cromatograma do biogás. 31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Potência fornecida em função da carga. 29
Gráfico 2 - Consumo em função da carga 29
Gráfico 3 - CE na faixa de carga de menor consumo. 30
Gráfico 4 - Percentual de economia de diesel em função da carga. 30
Gráfico 5 - Potência fornecida em função da carga. 33
Gráfico 6 - Consumo em função da carga. 33
Gráfico 7 - CE Faixa de carga de menor consumo. 34
Gráfico 8 - Economia em função da carga. 35
Gráfico 9 - Potência em função da carga do diesel biogás e gasificação 36
Gráfico 10 - CE com diesel, biogás e gasificação. 36
Gráfico 11 - Economia entre biogás e gás de gaseificação. 37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do gás. 5
Tabela 2 - Composição do gás com diferentes tipos de gaseificadores. 10
Tabela 3 - Composição média do Biogás. 11
Tabela 4 - Peso específico e poder calorífico inferior do biogás. 12
Tabela 5 - Composição do Gás a 780°C 28
Tabela 6 - Composição do Biogás. 32

SUMÁRIO

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) iii
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste iii
LISTA DE FIGURAS v
LISTA DE GRÁFICOS vi
LISTA DE TABELAS vii
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1. PROGRAMA LUZ PARA TODOS 3
2.2. BIOMASSA 3
2.3. GASEIFICAÇÃO 4
2.3.1. Tipos de gaseificadores 5
2.3.1.1. Gaseificador contracorrente 6
2.3.1.2. Gaseificador concorrente 7
2.3.1.3. Gaseificador de fluxo cruzado 8
2.3.1.4. Gaseificador de leito fluidizado 8
2.3.1.5. Gaseificador concorrente de dois estágios 9
2.4. BIOGÁS 10
2.4.2. Biodigestores 12
2.4.2.1. Biodigestor indiano 13
2.4.2.2. Biodigestor chinês 13
2.4.2.3. Biodigestor tubular 14
2.5. MOTOR CICLO DIESEL 14
2.5.1. Detonação (*Knock*) 17
2.5.2. Tempo de Ignição 17
2.6. TRABALHOS CORRELATOS 17
3. MATERIAIS E MÉTODOS 19
3.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM GMG DUAL COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO 19
3.1.1. Acoplamento Ar/Gás 21
3.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM GMG DUAL COM BIOGÁS 23
3.3. PODER CALORÍFICO 24
3.3.1. Determinação do poder calorífico inferior 25
3.3.2. Poder calorífico de um gás 25
3.4. COMPOSIÇÃO DOS GASES 26

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 27
4.1. DESEMPENHO DO GMG COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO 27
4.1.1. Composição do gás de gaseificação 27
4.1.2. Ensaio do GMG dual com gás de gaseificação 28
4.2. DESMPENHO DO GMG DUAL COM BIOGÁS 31
4.2.1. Composição do biogás 31
4.2.2. Ensaio do GMG dual com biogás 32
4.3. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO GMG COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO E BIOGÁS 35
5. CONCLUSÃO 38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 39

Desempenho de Motogerador de Ciclo Diesel Operando com Gás de Gaseificação/Diesel ou Biogás/Diesel.

Resumo: O Programa LUZ PARA TODOS, promovido pelo Governo Federal, tem por objetivo levar energia elétrica, gratuitamente, para famílias de baixa renda no meio rural. O programa visa alavancar o índice de desenvolvimento humano com o acesso à energia elétrica como vetor para a implantação de outros programas de bem-estar social. Na implementação do programa LUZ PARA TODOS, um dos maiores obstáculos encontrados foi o acesso às comunidades isoladas, posto que, em muitos momentos, ocorria somente de helicóptero ou em lombo de burro. Assim, para suprir a demanda de energia elétrica naquelas comunidades, sistemas térmicos a diesel são utilizados, com custo elevado no transporte do combustível. Como solução para tal problema, este trabalho propõe o uso de biomassa como combustível, a fim de substituir parcialmente o diesel na geração. A substituição ocorreu pela conversão da biomassa sólida em gás em um gaseificador a partir do gás para a produção de energia elétrica, ou utilizando dejetos que, digeridos em um biodigestor, geram biogás utilizado na geração de energia elétrica. A gaseificação consiste na conversão da biomassa pela queima parcial da biomassa sólida. Essa, que em altas temperaturas, é convertida em gás combustível passível de ser aproveitado em motores de combustão interna. O biodigestor é o ambiente em que microrganismos metanogênicos digerem a matéria orgânica animal ou vegetal a fim de produzir metano. Neste trabalho, foi avaliado o funcionamento de um motor gerador de ciclo diesel modificado para operar no modo dual, com diesel e gás de gaseificação ou com diesel e biogás, como opção para a minimização da dependência do diesel em comunidades isoladas. O estudo da gaseificação foi realizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, *campus* de Cascavel-PR, e o estudo do biogás ocorreu na granja Dassow no Município de Toledo-PR. Dentre os resultados obtidos estão a redução do consumo de diesel em até 30,7% e o ganho de potência em até 43,8% quando o GMG operava no modo dual usando diesel e gás de gaseificação. A redução de consumo de diesel em até 73,8% apresentou ganho de potência fornecida pelo GMG em até 68,7% quando utilizou-se o GMG no modo dual com diesel e biogás. O poder calorífico inferior do biogás foi 85,51% maior do que o gás de gaseificação. Logo, o aumento de potência proporcionado pelo biogás em comparação com o gás de gaseificação foi de 35,59%. Esses resultados demonstram que a utilização da gaseificação de biomassa ou a utilização do biogás são viáveis para redução do consumo de diesel na produção de energia elétrica em comunidades isoladas.

Palavras-chave: energia; biomassa; gaseificador, biogás, pirólise, metanogênese, biodigestores.

MOTOR-CYCLE DIESEL PERFORMANCE POWERED BY GASIFICATION WITH GAS/DIESEL OR BIOGAS/DIESEL

Abstract: The LIGHT FOR EVERYONE Program, sponsored by the Federal Government aims at bringing free electricity for the low-income families in rural areas. This program aims at improving the Human Development Index using the electric power as a vector to introduce other social welfare programs. During the implementation of the LIGHT FOR EVERYONE Program, the biggest obstacle was reaching isolated communities, which in many instances such action could only be by helicopter or by mule. Thus, in order to supply the power demand in these communities, thermal diesel systems are used with a high cost to transport fuel. As a solution to this problem, this paper proposes the use of biomass as fuel to partially replace diesel generation. The replacement occurred by converting solid biomass into a gasifier taking into account gas to produce electricity or using digested manure in a digester that produce biogas used on electricity generation. Gasification is the conversion of biomass by partial burning of solid biomass, which is converted at high temperature into a fuel gas that can be used in internal combustion engines. The digester is the environment in which methanogenic microorganisms digest organic matter of animals or plants to produce methane. Thus, this study evaluated the performance of a diesel cycle engine generator that was modified to operate in dual mode with diesel and gasification gas or with biogas and diesel as an option to minimize the dependence on diesel in isolated communities. The gasification study was carried out at the Western Paraná State University, UNIOESTE, *campus* of Cascavel city in Paraná, while the biogas study was carried out at Dassow farm, in Toledo City in Paraná, as well. Among the obtained results, there is the diesel consumption reduction up to 30.7% and a power acquire up to 43.8% when the GMG operated in dual mode using diesel and gas gasification. The reduction of diesel consumption up to 73.8% showed a power gain provided by GMG up to 68.7% when using the GMG in dual mode with diesel and biogas. The lower calorific power of biogas was 85.51% higher than the gasification gas. Therefore, the increased power provided by the biogas when compared to the gasification gas was 35.59%. Those results have shown that the use of biomass gasification or the biogas use is feasible to reduce diesel consumption and to generate electricity in isolated communities.

Keywords: energy, biomass, gasifier, biogas, pyrolysis, methanogenesis, digesters.

1. INTRODUÇÃO

O programa LUZ PARA TODOS do Governo Federal brasileiro tem como meta levar energia elétrica gratuitamente às famílias de baixa renda. Assim, a eletricidade passa a ser um vetor de desenvolvimento social e econômico, pois contribui para: a redução da pobreza; o aumento da renda familiar e o aumento no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). O acesso à energia elétrica facilita a integração de programas sociais do Governo Federal, como serviços de saúde, educação, abastecimento de água e saneamento.

Um dos grandes obstáculos encontrados pelo Programa é o de atender às comunidades isoladas, localidades que se encontram distantes das redes de distribuição de energia elétrica existentes, de difícil acesso e com baixa densidade populacional, especialmente às localizadas na Amazônia.

As tecnologias disponíveis englobam sistemas de geração descentralizada mini e microcentrais hidrelétricas; sistemas hidrocinéticos; usinas térmicas; sistemas híbridos fotovoltaicos, aerogeradores, dentre outros, a fim de priorizar o uso de fontes alternativas de energias disponíveis na produção de eletricidade.

O fornecimento de energia elétrica em regiões remotas ou isoladas ocorre com geradores a diesel, bem como apresenta custos elevados em operação e manutenção e na logística do combustível.

A geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas de energia com o uso de matérias-primas renováveis, como a biomassa, é uma solução que, além de trazer sustentabilidade ambiental, desperta grande interesse devido às crescentes exigências relacionadas à preservação do meio ambiente.

Brito (2007) comenta que a madeira foi fundamental para o desenvolvimento da humanidade, como primeira fonte de energia, empregada no aquecimento e na cocção de alimentos. Ao longo dos tempos, passou-se a utilizar como combustível sólido, líquido e gasoso em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica.

Por conseguinte, este trabalho tem como objetivo avaliar o aproveitamento da biomassa convertida em combustível gasoso no funcionamento de um microgerador a diesel que operava de modo dual: diesel e gás de gaseificação ou diesel e biogás. O gás de gaseificação foi produzido em uma unidade de gaseificação tipo concorrente, localizada no Laboratório de gaseificação e microgeração de eletricidade, do Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura, (PPGEA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná -

UNIOESTE, *campus* Cascavel. O biogás foi obtido de um biodigestor de dejetos suínos, da granja de suínos Dassow, localizada em Vila Nova, no município de Toledo.

A utilização dos recursos locais para geração de gás e sua utilização para a minimização da dependência do diesel na geração de eletricidade é fundamental para a sustentabilidade energética das comunidades isoladas.

Objetivos específicos:

1. Determinar o poder calorífico inferior do gás de gaseificação da madeira e biogás de suinocultura;
2. Obter o desempenho de um motor gerador ciclo diesel que opera com gás de gaseificação e biogás:
    - Potência e consumo específicos;
    - Redução do consumo de diesel.
3. Fazer a comparação entre os desempenhos do grupo motor gerador com gás de gaseificação e diesel e utilizando biogás e diesel.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROGRAMA LUZ PARA TODOS

O Programa LUZ PARA TODOS é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, operacionalizado pela Eletrobrás e executado pelas concessionárias de energia elétrica e cooperativas de eletrificação rural em parceria com os Governos Estaduais. O objetivo do Programa LUZ PARA TODOS é levar o acesso à energia elétrica, gratuitamente, para famílias do meio rural que estão majoritariamente em localidades com menor Índice de Desenvolvimento Humano e renda familiar inferior a três salários mínimos.

Devido a esta realidade, o Governo definiu que a energia atuará como vetor de desenvolvimento social e econômico que contribuirá para a redução da pobreza e aumento da renda familiar, bem como facilitará a integração dos programas sociais do Governo Federal, com os serviços de saúde, educação, abastecimento de água e saneamento. Mas, durante a execução do Programa, foram encontradas muitas dificuldades, principalmente, nas Regiões Norte e Nordeste e nas áreas de extrema pobreza.

2.2. BIOMASSA

Nogueira *et al.* (2003) definem como biomassa a matéria vegetal gerada a partir da fotossíntese. Matéria vegetal resultante do acúmulo de energia química proveniente da transformação da irradiação solar, como está demonstrado na Equação 1.

$$nCO_2 + nH_2O + LUZ \xrightarrow[\text{clorofila}]{} (CH_2O)n + nO_2 \qquad (1)$$

A energia química acumulada representa 1% da energia total incidente. Assim, estima-se que no processo de fotossíntese sejam produzidos 220 Gton de biomassa, a qual representa 10% da energia global consumida no Planeta (SMIL 1985, *apud* NOGUEIRA & LORA, 2003).

A conversão da biomassa em energia ocorre por combustão ou por processos biológicos. A combustão pode ser total ou parcial. Todavia, na combustão total, toda a biomassa é consumida e convertida em calor restando gases residuais (CO_2 e H_2O), porém, na

combustão parcial, a biomassa é convertida em calor e gases, como o CO e H_2, com certo poder calorífico.

A razão estequiométrica (ʎ) relaciona a quantidade teórica e a quantidade real da biomassa e do ar em uma reação química (BRADY, 2009; PUIG-ARNAVAT, 2010). Na combustão total, a quantidade de ar é superestimada (ʎ > 1) visando à produção de calor, para garantir que todo o combustível seja consumido. Na combustão parcial o principal objetivo é geração de gás (gaseificação) e não a produção de calor, para tanto, a quantidade de ar é reduzida (ʎ < 1) (NOGUEIRA, 2003; TINAUT, 2006).

Nos processos biológicos de digestão ou fermentação, a biomassa é decomposta por microrganismos como os metanogênicos, os quais originam subprodutos como gás composto (biogás) e efluente (biofertilizante).

A digestão anaeróbia é um processo que ocorre naturalmente na ausência de ar e pela ação de bactérias. A biomassa é decomposta a fim de originar o biogás que é composto por uma mistura de gases que contêm metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), Nitrogênio (N_2), Gás sulfídrico (H_2S) e Hidrogênio (H_2).

Por fim, a fermentação é um processo biológico anaeróbio em que leveduras convertem o açúcar presente na biomassa em etanol ou metanol (ARENA, 2010).

2.3. GASEIFICAÇÃO

A tecnologia da gaseificação na forma de gasogênio foi utilizada no Brasil nos anos 40, no período de crise da segunda guerra mundial. Essa foi a solução encontrada para a propulção automotiva. Mais de 2.000 automóveis impulsionados a gasogênio estavam em circulação no Rio de Janeiro (Figura 1) e cerca de 10.000 veículos equipados com esse dispositivo operavam em São Paulo (N.A.P, 1983).

Figura 1 - Veículos a gasogênio - Rio de Janeiro 1943.
Fonte: AUTOCLASSIC

O processo de gaseificação da biomassa consiste na conversão da biomassa sólida em gás combustível. É um processo físico-químico em que ocorre a decomposição térmica por meio da combustão parcial em temperaturas elevadas. O gás resultante tem um poder calorífico máximo de até 40 $MJ.Nm^{-3}$. A composição média do gás de gaseificação pode ser vista na Tabela 1 (NOGUEIRA, 2003; ANDO, 2005; TINAUT, 2006; PUIG-ARNAVAT, 2010; MARTINES, 2012).

Tabela 1 - Composição média do gás.

Componentes	Concentração (%)
CO	8 a 25
H_2	13 a 15
CH_4	3 a 9
CO_2	5 a 10
N_2	45 a 54
H_2O	10 a 15

2.3.1. Tipos de gaseificadores

Os gaseificadores de biomassa são caracterizados pelo tipo de biomassa utilizada, pelo poder calorífico do gás produzido, pelo agente de gasificação, pela pressão de trabalho; pelo fluxo da biomassa em relação ao agente de gaseificação (GÓMEZ-BAREA, 2011).

O poder calorífico do gás produzido é caracterizado entre:

- ≤ 5 $MJ.Nm^{-3}$ → baixo poder calorífico;
- 5 a 10 $MJ.Nm^{-3}$ → médio poder calorífico;
- 10 a 40 $MJ.Nm^{-3}$ → alto poder calorífico.

Os agentes de gaseificação são:

- Ar;

- Hidrogênio;
- Oxigênio;
- Vapor de água.

Com relação à pressão de trabalho caracterizado como:

- Atmosférico baixa pressão até 1 MPa;
- Alta pressão de 1MPa até 6 MPa.

Fluxo da biomassa em relação ao agente gaseificação:

- Contracorrente;
- Concorrente;
- Fluxo cruzado;
- Leito fluidizado;
- Leito arrastado.

2.3.1.1. Gaseificador contracorrente

O gaseificador contracorrente é caracterizado pela entrada de ar e se localiza na parte inferior, com saída de gás pela parte superior, cuja alimentação do combustível é feita pelo topo do gaseificador. O fluxo da biomassa é descendente e passa pelas zonas de secagem, pirólise, gaseificação e combustão. O fluxo de gás é ascendente, com elevado teor de óleo e alcatrão. Quando o combustível utilizado é a biomassa, o gás gerado no processo é obtido com baixa temperatura, entre 80 e 300°C. Porém, se o combustível utilizado for o carvão, a faixa de temperatura dentro do gaseificador variará entre 300 e 600°C. Pode-se visualizar um gaseificador contracorrente na Figura 2.

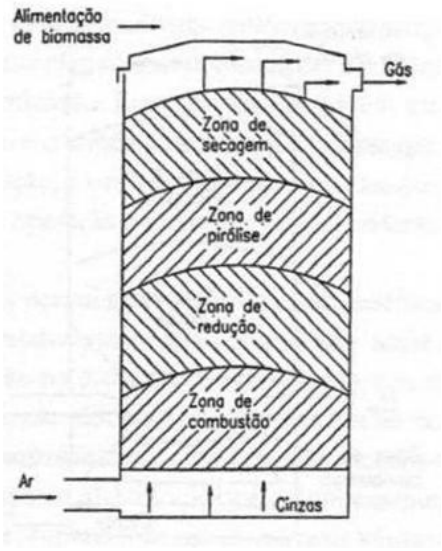

Figura 2 - Gaseificador contracorrente.
Fonte: Cortez *et al.*, 2008.

2.3.1.2. Gaseificador concorrente

O Gaseificador concorrente tem como característica a alimentação de combustível pelo topo e saída dos gases pela parte inferior. O fluxo de ar e combustível tem a mesma direção descendente. O fluxo combustível e o fluxo de gás passam pelas zonas de secagem, pirólise, combustão e redução. A alimentação do ar ocorre na zona de combustão e gera calor para todo o processo. O fluxo descendente e a passagem do gás pelas zonas de combustão e redução provocam a oxidação e o craqueamento do alcatrão gerado na zona de secagem e a pirólise e reduz bastante a presença de alcatrão no gás gerado. O gás gerado no processo tem temperatura de saída entre 900 e 1000 °C. Um exemplo de gaseificador concorrente pode ser visto na Figura 3.

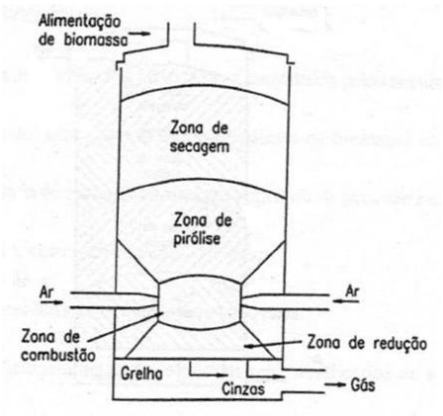

Figura 3 - Gaseificador concorrente.
Fonte: Cortez *et al.*, 2008.

2.3.1.3. Gaseificador de fluxo cruzado

O gaseificador de fluxo cruzado tem por característica a saída de gás pela lateral e a mesma altura da entrada de ar, que está em oposição à saída do gás. O combustível é introduzido pelo topo do gaseificador, assim, o fluxo de combustível e o fluxo gás passam pelas zonas de secagem, pirólise, combustão e redução. Como a zona de combustão e redução são muito limitadas, a oxidação e o craqueamento do alcatrão são deficientes e produzem gás com elevado nível de alcatrão. A temperatura dos gases produzidos pelo processo é em torno de 900 ºC. Um exemplo de gaseificador de fluxo cruzado é visto na Figura.

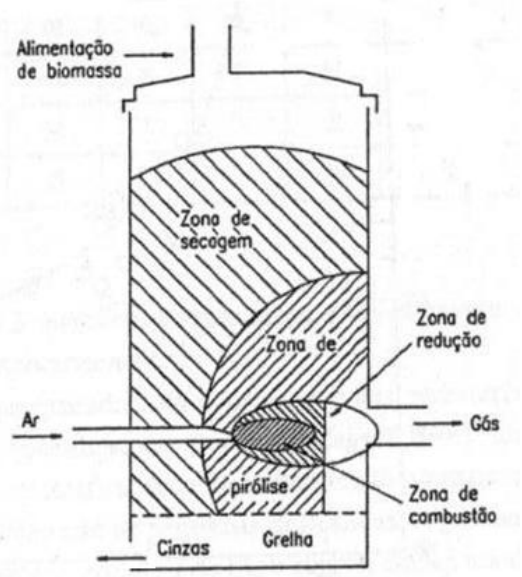

Figura 4 - Gaseificador de fluxo cruzado.
Fonte: Cortez *et al.*, 2008.

2.3.1.4. Gaseificador de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado tem por característica o combustível suspenso em meio às partículas inertes. O ar pressurizado é injetado no gaseificador de forma que a vazão anule o peso das partículas de combustível e iguale a força de arraste do gás. O combustível particulado em suspensão passa a ter comportamento de líquido no interior do gaseificador. O processo de gaseificação é mais eficiente por ter maior transferência de calor e homogeneização da temperatura, da ordem de 1000 °C. Exemplo de gaseificador de leito fluidizado (Figura 5).

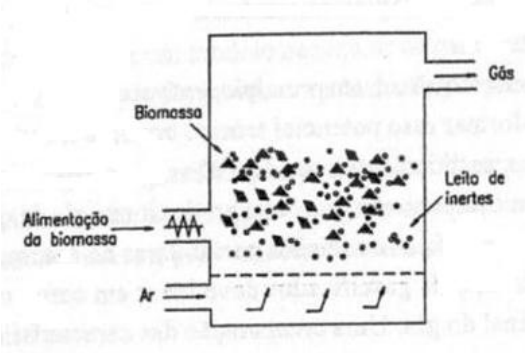

Figura 5 - Gaseificador de leito fluidizado.
Fonte: Cortez *et al*., 2008.

2.3.1.5. Gaseificador concorrente de dois estágios

No gaseificador concorrente de dois estágios, Figura 6, a retirada do gás combustível é feita pela porção inferior. O fluxo gasoso ocorre de cima para baixo, no mesmo sentido do fluxo do material sólido. Desta forma, os componentes gasosos produzidos nas zonas de secagem e pirólise são forçados a atravessar o leito de carvão incandescente onde ocorrem etapas de redução com reação endotérmica, formação de hidrogênio, monóxido de carbono, metano e eteno.

No primeiro estágio, na presença do agente de gaseificação (ar), ocorre a queima parcial da biomassa e a geração calor de para zona de secagem (Figura 6 A), com temperaturas entre 100 a 200 °C a fim de evaporar a água presente na biomassa sólida utilizada. Na zona de pirólise (Figura 6B), com temperaturas entre 280 e 450 °C, ocorre o início do fracionamento dos sólidos (hemicelulose, celulose, lignina, etc.), consequentemente a produção de alcatrão, ácidos leves, gases não condensáveis (CO, CO_2, H_2, CH_4, O_2), sólido (cinzas) e reações endotérmicas deste estágio.

No segundo estágio na zona de combustão parcial (Figura 6 C), com temperaturas entre 600 e 800 °C, fase em que ocorre a oxidação da biomassa na presença do ar, nesta fase os gases originados na pirólise reagem com o agente oxidante, em uma reação exotérmica, responsável pelo calor gerado pelo gaseificador, responsável pela redução do alcatrão a um teor abaixo de 75 $mg.Nm^{-3}$. Na zona de gaseificação, com temperaturas entre 800 e 1000 °C na fase da redução, o processo no qual o hidrogênio reage com o monóxido de carbono gera metano e água (ÁNGEL, 2009; BROWN, 2009; PUIG-ARNAVAT, 2010; MARTINES, 2012).

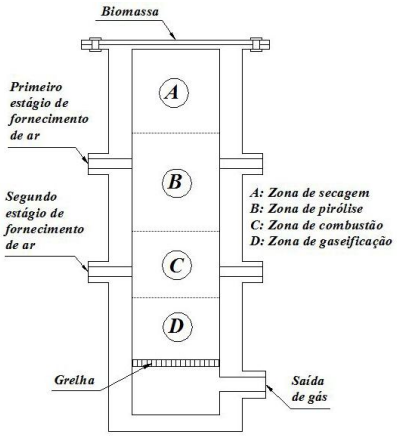

Figura 6 - Gaseificador concorrente de duplo estágio.
Fonte: Ángel, 2009

Segundo Nogueira & Lora, (2003), o poder calorífico do gás produzido pelo processo de gaseificação pode ser classificado em três tipos, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Composição do gás com diferentes tipos de gaseificadores.

Gaseificador	Composição do gás,% vol. Base seca					PCS $MJ.Nm^{-3}$	Qualidade do gás*
	H_2	CO	CO_2	CH_4	N_2		
Leito fluidizado	09	14	20	7	50	5,4	Média
Contracorrente	11	24	9	3	53	5,5	Pobre
Concorrente	17	21	13	1	48	5,7	Boa

Fonte: Bridgwater, (1991). * Particulados e Alcatrão

2.4. BIOGÁS

No Brasil, o biogás foi fortemente incentivado na década de 1980 com a instalação de mil gaseificadores de uma projeção inicial de nove mil, motivado pela crise energética de 1970, (NOGUERIA, 1986). Das pesquisas daquele período destacamos a de Gomes, (1985) e da CONLURB, no Rio de Janeiro, em 1985.

Em março de 1983, na cidade Piraí do Sul, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) desenvolveu uma planta de biogasificação para tratamento de esgoto doméstico, resíduos sólidos de culturas e industriais a fim de fornecer biogás para a cocção e o aquecimento de 286 casas (GOMES, 1985).

Em 1984, a SANEPAR utilizou metano em alta concentração e alta pressão como combustível veicular (GMV) para movimentação de parte se sua frota na cidade de Londrina, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Veículo movido a biogás.
Fonte: GIFEL.

No período de 1985 a 1990, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB) utilizou o biogás como combustível veicular, para movimentação de 150 veículos de sua frota bem como para o abastecimento de táxis que utilizavam esse combustível (Manual de aproveitamento de biogás, 2009).

Na Granja Colombari, propriedade do Sr. José Carlos Colombari, situada no Município de São Miguel do Iguaçu, no Estado do Paraná, um projeto de Geração Distribuída de energia elétrica foi comissionado em 10 de janeiro de 2008, gerada em uma microcentral termelétrica movida a biogás a partir de dejetos de suínos (BLEY, 2008; MARQUES, 2012).

Segundo Nogueira (1986) e Marchaim (2007), o biogás é uma mistura de gases produzidos naturalmente na decomposição de compostos orgânicos por ação de bactérias e na ausência de oxigênio (digestão anaeróbia). Em 1776, na Itália, Alessandro Volta investigou o 'gás dos pântanos' e descobriu o metano. Um gás incolor, altamente combustível, cuja chama é azul lilás e a queima não deixava fuligem além do fato de a poluição ser mínima.

O biogás, Segundo Nogueira (1986), é composto por metano, dióxido de carbono, nitrogênio, gás sulfídrico e hidrogênio. A composição e o volume produzidos dependem de diversos fatores, como a temperatura, o tipo de biodigestor e a matéria orgânica utilizada. A composição média do biogás é vista na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição média do Biogás.

Componente	Concentração (%)
CH_4	60 a 80
CO_2	25 a 45
N_2	0 a 3
H_2S	0 a 1
H_2	0 a 0,1

O poder calorífico do biogás varia em função da concentração de metano, a qual influencia não apenas o poder calorífico inferior, mas também a densidade e/ou peso

específico do biogás. Na Tabela 4, pode-se observar a variação entre o poder calorífico inferior do biogás e a densidade em função da quantidade de metano presente no biogás.

Tabela 4 - Peso específico e poder calorífico inferior do biogás.

Composição química	Peso específico ($kg.m^{-3}$)	Poder Calorífico Inferior ($kcal.kg^{-1}$)
10% CH4 e 90% CO2	1,8393	465,43
40% CH4 e 60% CO2	1,4600	2333,85
60% CH4 e 40% CO2	1,2143	4229,98
65% CH4 e 35% CO2	1,1518	4831,14
75% CH4 e 25% CO2	1,0268	6253,01
95% CH4 e 05% CO2	0,7768	10469,60
99% CH4 e 01% CO2	0,7268	11661,02

Fonte: Iannicelli, (2008).

2.4.1. Digestão anaeróbia

O processo biológico de digestão anaeróbia é composto pelas fases de: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. De acordo com Caron *et al.* (2009), na fase da hidrólise, as moléculas orgânicas complexas (proteínas, lipídios e carboidratos) são convertidas em material orgânico mais simples pelas enzimas extracelulares - exoenzimas, produto da fermentação de bactérias hidrolíticas. Na fase ácida ou de acidogênese, os compostos gerados na hidrólise são convertidos em H_2, CO_2, sais e alcoóis. Na fase da acetogênese, os ácidos voláteis e os alcoóis são metabolizados e produzem acetato e H_2 a partir das bactérias acetogênicas. Na fase de metanogênese, as bactérias acetotróficas produzem o metano (CH_4).

2.4.2. Biodigestores

Biodigestor, segundo Sganzerla (1983), é um dispositivo destinado a receber a biomassa e dar condições para que as bactérias metanogênicas atuem sobre a biomassa e produzam biogás.

Os sistemas são caracterizados como contínuo e em batelada. Os mais utilizados são os contínuos como os seguintes tipos: indiano, chinês, paquistanês, tailandês, coreano, filipino, tubular ou canadense, dentre ouros. Porém, o mais utilizado é o tipo tubular.

2.4.2.1. Biodigestor indiano

Segundo Nogueira (1986), o biodigestor indiano tem por característica o uso de um gasômetro flutuante, que é uma campânula de metal, onde o gás produzido é armazenado e pressurizado a 20 mm.ca. O afluente se desloca verticalmente e precisa estar misturado com água. Na Figura 8, pode ser visualizado um biodigestor indiano.

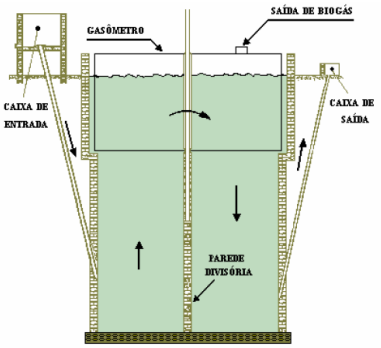

Figura 8 - Biodigestor modelo indiano.
Fonte: Prati, 2010.

2.4.2.2. Biodigestor chinês

A característica do modelo chinês, segundo Nogueira (1986), é a de não fazer uso de gasômetro. O gás é armazenado no interior do biodigestor e a pressão se origina do desnível hidráulico. Na Figura 9 pode ser visualizado um biodigestor chinês.

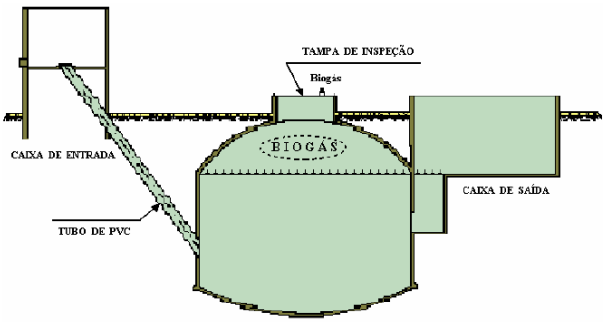

Figura 9 - Biodigestor modelo chinês.
Fonte: Prati, 2010.

2.4.2.3. Biodigestor tubular

O biodigestor tubular possui uma construção horizontal e a dimensão é alongada, cuja câmara de biodigestão é escavada no solo, o qual é revestido com material plástico. O gasômetro é do tipo inflável e feito de material plástico reforçado. No biodigestor tubular, a biomassa tem entrada contínua em uma das extremidades do biodigestor; passa através do mesmo e é descarregada na outra extremidade, como vemos na Figura 10.

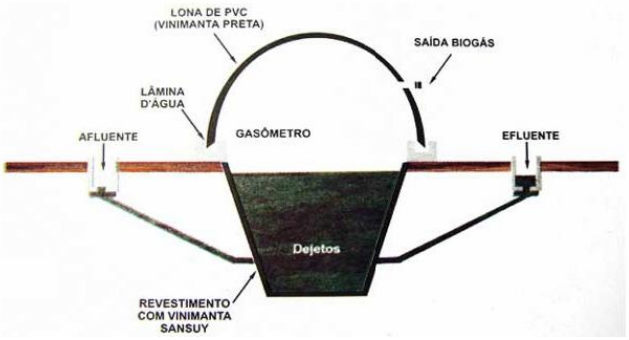

Figura 10 - Biodigestor tubular.
Fonte: Oliver, 2008.

2.5. MOTOR CICLO DIESEL

Neste tipo de motor de combustão interna, somente o ar é aspirado, enquanto o combustível é injetado no interior do cilindro no tempo de compressão. Quando a compressão do ar está próxima ao seu ponto máximo (PMS), o diesel é injetado em alta pressão, com temperatura do ar elevada devido à alta pressão no interior do cilindro, onde o combustível se inflama na câmara de combustão (PENIDO FILHO, 1996).

Os motores de ciclo Diesel podem ser de:

- dois tempos, que corresponde a um giro completo do virabrequim ou dois cursos do pistão;
- quatro tempos, que corresponde a dois giros completos do virabrequim ou quatro cursos do pistão.

No motor de ciclo diesel de quatro tempos, o pistão realiza quatro tempos que são: admissão, compressão, combustão e escape.

Admissão (Figura 11): No ½ giro inicial do virabrequim, o pistão move-se do PMS para o PMI. A válvula de admissão se abre e o ar é aspirado para o interior do cilindro;

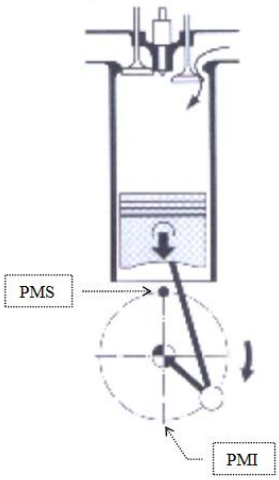

Figura 11 - Admissão.
Fonte: Sanches, 2005.

Compressão (Figura 12): Na sequência do movimento do virabrequim, avança ½ giro de PMI para PMS, a válvula de admissão se fecha e o pistão desloca-se para o PMS, comprimindo o ar. Assim, a alta compressão eleva a temperatura do ar no interior do cilindro;

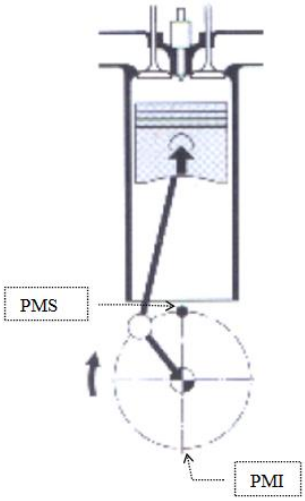

Figura 12 - Compressão.
Fonte: Sanches, 2005.

Combustão (Figura 13): o sistema de injeção injeta o combustível a diesel próximo do PMS, em alta pressão no interior do cilindro. O diesel vaporizado em contato com ar fortemente aquecido no interior do cilindro se inflama e entra em combustão. Os gases resultantes da combustão se expandem e forçam o pistão do PMS para o PMI, que faz com que o virabrequim gire em ½ volta para dar origem ao conjugado de carga;

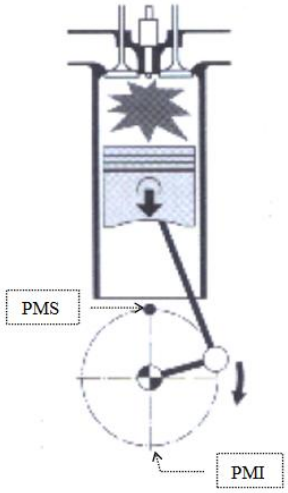

Figura 13 - Combustão
Fonte: Sanches, 2005.

Escape (Figura 14): ao atingir o PMI, após a combustão do diesel, a válvula de escape é aberta e o pistão é movimentado para PMS, forçando os gases queimados para fora do cilindro em ½ giro do virabrequim quando o ciclo termina.

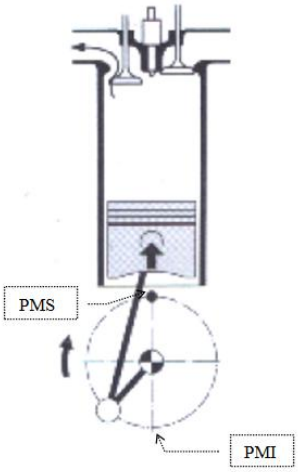

Figura 14 - Escape.
Fonte: Sanches, 2005.

A ignição nos motores de ciclo diesel acontece espontaneamente pela alta temperatura atingida na compressão da mistura.

Segundo Martins (2006), para a utilização do gás de biomassa em motores a gasolina (ciclo Otto), não é necessário fazer grandes modificações, pois o gás pode ser introduzido diretamente no carburador desses motores, os quais podem funcionar 100% a gás. Porém, nos motores a diesel, não se consegue operar somente com o gás. Todavia, é possível substituir o diesel em até 90%. Na partida, deve-se utilizar 100% diesel e após funcionamento e estabilização, o gás é gradativamente introduzido.

Silva (2004) recomenda que a substituição do diesel em um motor de ciclo diesel não deve exceder a 75%, já que o arrefecimento dos bicos injetores é prejudicado pelo menor fluxo de retorno de óleo nos bicos injetores. Isso causa aumento muito elevado da temperatura e pode danificar os bicos.

2.5.1. Detonação (*Knock*)

Segundo Ángel (2009), detonação ou efeito *knock* é um fenômeno relacionado à autoignição do combustível, causada por picos de pressão no cilindro do motor.

Uma vez iniciada a combustão, a propagação da chama causa um aumento da pressão no interior do pistão. Na medida em que a frente de chama avança, a elevação da pressão faz com que o combustível não queimado sofra detonação.

2.5.2. Tempo de Ignição

Segundo Ángel (2009), o tempo de ignição depende diretamente da velocidade da chama do combustível. Em uma mistura ar/combustível com maior velocidade de chama, o tempo de ignição deverá ser atrasado e adiantado em uma mistura com menor velocidade de chama. Na utilização do gás de gaseificação, gás pobre, o tempo de ignição deve ser atrasado. Mas, se a gaseificação apresentar maiores concentrações de hidrogênio no gás, o tempo de ignição deve ser retardado devido ao aumento na velocidade de chama.

2.6. TRABALHOS CORRELATOS

A utilização do gás no modo dual foi demonstrada em diferentes trabalhos como o de Shaw *et al.*, (1990), que em um motor diesel adaptado para operar de forma dual com gás e diesel e com gás combustível, produzido a partir de lascas de madeira (resíduos cítricos secos ao ar), utilizado um gaseificador de sucção *downdraft*, introduziu o gás juntamente com o ar no colector de admissão do motor modo dual. Os autores obtiveram como resultado uma

substituição de 75% do diesel por gás e usaram 25% de diesel para inflamar o gás no modo dual, assim, o motor atingiu 78% da potência nominal.

Ribeiro (2007), em estudo, utilizou um gaseificador de biomassa de leito fixo com tecnologia *downdraft* estratificada, para a gaseificação de cedrinho, babaçu e açaí. O motor utilizado foi adaptado para operação com diesel e gás, motor dual, com um conjunto de resistências para simulação de carga. O resultado observado foi que, com uma substituição da ordem de 40% de diesel por gás, o motor não teve perda de potência substancial. Porém, para substituição de até 73% do diesel por gás e usando 27% de diesel para inflamar o gás modo dual, o motor apresentou 30% de perda de potência.

Neitzke (2010) utilizou a gaseificação de pellets de cama de aviário, com um gaseificador de leito fixo do tipo co-corrente estratificado (topo aberto) e alimentou um motor gerador dual e um sistema de dissipação de energia. O nível de substituição do óleo diesel foi da ordem de 36,22% com uma economia no consumo de óleo Diesel de 36,22 %, cujo motor funcionava com gás proveniente da cama de aviário. Nesse mesmo estudo, o autor substituiu os pellets de cama de aviário pela gaseificação do endocarpo da macaúba e babaçu e obteve uma substituição de diesel de até 74,6%, com economia de 74,6% de óleo diesel.

Silva (2011), com um motor diesel adaptado para utilização de 100% diesel ou no modo dual, utilizou diesel e biogás. O motor foi acoplado a um dinamômetro para o ensaio em que utilizou biodiesel como combustível piloto e biogás *in natura*, oriundo da digestão de dejetos bovinos, como combustível principal. O autor obteve como resultado uma substituição de até 74% do diesel por biogás com 26% de injeção de diesel para ignição do biogás, cuja perda de potência foi de até 8,1%.

Souza (2004), com um motor de ciclo Otto, analisou o rendimento do motor que operava com gasolina, gás natural e biogás. O motor foi acoplado a um dinamômetro para o ensaio. O autor obteve como resultado diminuição de 15% de potência quando foi utilizado gás natural e redução de 30% com biogás.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Laboratório de Gaseificação e Microgeração de eletricidade nas dependências da UNIOESTE, *campus* Cascavel e na granja Dassow, de propriedade de Ervino Dassow.

3.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM GMG DUAL COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO

A biomassa utilizada foi a Itaúba, *Mezilaurus Itauba sp*, com poder calorífico superior de 22 $MJ.kg^{-1}$. Segundo Quirino (2005), o resíduo é proveniente da indústria madeireira da região, cortada em cubos entre 2 e 4,0 cm, de acordo com especificação do fabricante.

O gás produzido a partir da Itaúba em gaseificador Termoquip modelo CD60 fabricado em 2005, um gaseificador (GDE), é concorrente de duplo estágio. O agente de gaseificação utilizado foi o ar com uma vazão de 0,35 $Nm^3.min^{-1}$, que é pressurizado a pressão de trabalho de 1,0 bar, com temperatura operacional de 860 °C, como é mostrado na Figura 15.

O gás produzido tem baixa presença de alcatrão, < 75 $mg.Nm^{-3}$, e teor de particulado após o filtro tipo manga < 20 $mg.Nm^{-3}$ (Termoquip), condição necessária ao funcionamento do motor de combustão interna. O gás produzido foi armazenado temporariamente em um gasômetro de selo de água (GA) (Figura 15), para posterior utilização no moto gerador.

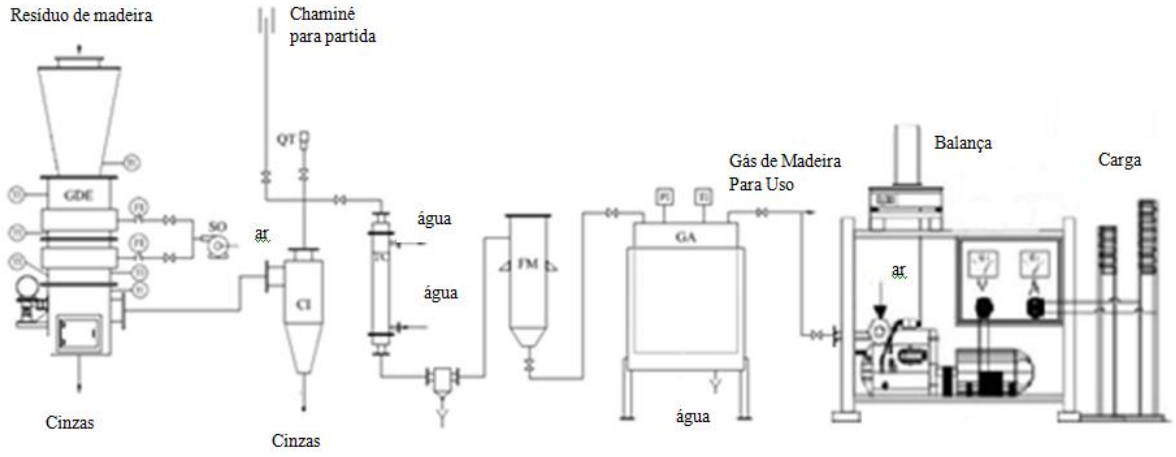

Figura 15 - Sistema de Gaseificação.
Fonte: ÁNGEL (2009).

O GMG diesel utilizado é da marca Branco, modelo BD-6500CFE, como visto na Figura 16 e suas especificações estão detalhadas no Quadro 1.

Figura 16 - GMG Branco modelo BD-6500CF
Fonte: Catalago Branco.

Quadro 1 - Especificação do gerador Branco modelo BD-6500CF

PM	90304420
Motor	10,0 cv
Potência máxima	5,5 Kva
Potência contínua	5,0 kVA
Tensão de saída	110 V / 220 V
Tomada auxiliar (monofásico)	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
Fases	Monofásico
Ruído (7 m)	79 db A
Dimensões C×L×A (mm)	735×485×670

Fonte: Catalago Branco.

O motor do GMG DB-6500 é de quatro tempos de ciclo diesel monocilíndro com 10cv de potência. As especificações estão detalhadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Especificações do motor Branco.

Motor	horizontal, monocilíndrico,diesel, refrigerado a ar
Sistema de combustão	injeção direta
Diâmetro x Curso (mm)	86×70
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
Lubrificação	forçada por bomba de óleo
Consumo ($L.h^{-1}$)	2,15
Capacidade do tanque (L)	4,5
Capacidade de óleo (L)	1,5
Dimensões C×L×A (mm)	417×470×494
Nível de ruído (7 m)	79 dB.A

Fonte: Catalago Branco

3.1.1. Acoplamento Ar/Gás

O GMG utilizado não sofreu alteração, uma vez que a detonação ocorre por compressão no motor de ciclo diesel e para o funcionamento no modo dual com gás de gaseificação ou biogás, é necessária uma porção de diesel para inflamar o gás. A alteração consiste do acoplamento na entrada de ar do motor do GMG bem como de um misturador tipo Venturi com dois registros de esfera: um para o ar e o outro para o gás, para dosar de forma manual a melhor relação ar/gás para a condição de carga do sistema, Figura 17.

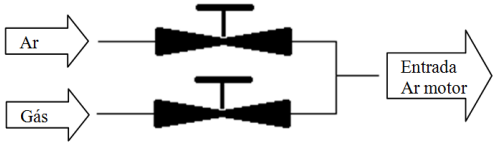

Figura 17 - Acoplamento Ar/Gás.

As condições da operação são determinadas pelo ajuste de entrada de gás e ar no Venturi sob condições de carga de 250W a 5000W, determinadas por uma associação de resistências ligadas ao gerador.

Na avaliação, foram utilizadas diferentes condições de carga, as quais foram geradas em um banco de resistências comandadas por um painel de controle com gradientes de 250 W até a condição nominal do GMG, conforme as Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Banco de resistências.

Figura 19- Comando do banco de resistências.

O consumo de diesel foi determinado com o uso de uma proveta plástica de 250 mmL e uma balança semianalítica, da marca Gehaka, modelo BK2000, Figura 20, com capacidade máxima para 2100 g e resolução de 0,01 g.

Figura 20 - Balança semianalítica.

O consumo horário de diesel do sistema, Equação 5, foi determinado com o uso de um cronometro digital.

$$Cons = \frac{M_I - M_F}{t} \quad (5)$$

Em que:

Cons - Consumo de combustível ($g.h^{-1}$);

M_I - Massa inicial do combustível (g);

M_F - Massa do final do combustível (g);

t - Tempo (h).

O experimento consistiu em submeter o sistema sob condição de carga de 250 W, condição mínima, até a carga máxima nominal do equipamento (5 kVA), com gradientes de 250 W. O tempo e o consumo nas distintas condições de carga mostram o consumo específico do combustível (CE). O CE, Equação (6), foi comparado em iguais condições de carga, quando o sistema operava no modo normal e no modo dual.

$$CE = \left(\frac{3600 \times Cons}{V \times I \times t}\right) \quad (6)$$

Em que:

CE - Consumo específico de combustível ($g.kWh^{-1}$);

I - Corrente (A);

t - Tempo (h);

V - Tensão (V).

A diferença entre o consumo na operação do sistema em modo Dual em relação ao modo normal foi definida como economia e expressa pela Equação (7).

$$\text{Economia}=\left(\frac{\text{Cons}_{\text{normal}}-\text{Cons}_{\text{dual}}}{\text{Cons}_{\text{normal}}}\right)\times 100 \quad (7)$$

Em que:

Economia - economia de combustível (%);

$\text{Cons}_{\text{normal}}$ - consumo com diesel ($g.h^{-1}$);

$\text{Cons}_{\text{dual}}$ - consumo de diesel + gás ($g.h^{-1}$).

3.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM GMG DUAL COM BIOGÁS

O experimento de biogás foi desenvolvido na granja Dassow, de propriedade de Ervino Dassow, localizada em Vila Nova, Município de Toledo, latitude 24°29’35,59’’S, e longitude 53°51’34,17’’O.

Na Figura 21, visualiza-se de modo simplificado a montagem do sistema de suprimento de biogás ao GMG. Composto pelo galpão de suínos, o biodigestor tubular ligado ao GMG, balança de medição de consumo, banco de resistências e lagoa de efluentes.

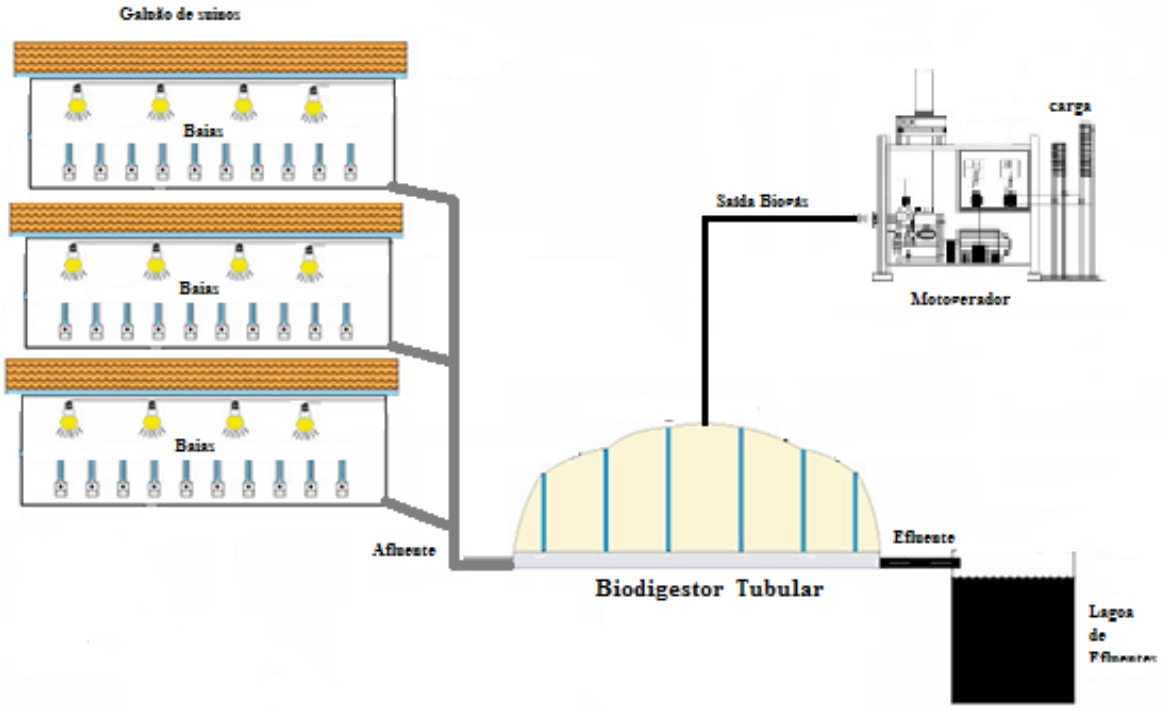

Figura 21 - Montagem do ensaio de biogás

O motor utilizado é o mesmo anteriormente descrito. Os parâmetros e as condições de análise seguem as mesmas condições de operação com gás de gaseificação, todavia esse foi substituído pelo biogás. No ajuste da relação ar/gás da mesma forma que no ensaio de gaseificação buscou-se um ponto de operação com mínima pré-ignição.

3.3. PODER CALORÍFICO

A determinação do poder calorífico do combustível foi realizada no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Cascavel/PR.

As amostras de biomassa foram preparadas e separadas em porções ± 0,5 g pesadas e secas em estufa à temperatura de 105 °C, até o peso se manter constante.

Desta forma, obteve-se o conteúdo de umidade na base seca. Para determinação da umidade em base úmida, a diferença entre o peso da amostra antes e depois da secagem foi dividida pelo peso inicial da madeira.

O poder calorífico da madeira foi determinado em uma bomba calorimétrica E2K, Figura 22.

Figura 22 - Bomba calorimétrica.

3.3.1. Determinação do poder calorífico inferior

O poder calorífico é a quantidade liberada de calor, quando da combustão completa de uma unidade de massa ou volume de combustível nas condições normais de temperatura e pressão.

O poder calorífico pode ser determinado em um calorímetro adiabático com volume constante. Nessas condições, a água formada pela queima do hidrogênio permanece no estado líquido e o poder calorífico é denominado poder calorífico superior (PCS).

Na determinação do poder calorífico, em que a queima é realizada sob pressão constante, na qual a água formada é liberada no estado de vapor, o poder calorífico medido é denominado de poder calorífico inferior (PCI) por absorver 2.260 $kJ.kg^{-1}$ de energia.

$$PCS - PCI = m_{H_2O} \times L \quad (8)$$

Em que:

PCS = Poder calorífico Superior ($kJ.kg^{-1}$);

PCI = Poder calorífico Inferior ($kJ.kg^{-1}$);

m_{H_2O} = Quantidade de água presente;

L = Calor de condensação da água.

3.3.2. Poder calorífico de um gás

Segundo Nogueira e Lora (2003), o poder calorífico de um gás pode ser calculado a partir da sua composição volumétrica, segundo a Fórmula 9.

$$PCI_g = \sum_{i=1}^{n} PCI_{gi} \cdot C_i \quad (9)$$

$$PCI_g = 0{,}126.C_{CO} + 0{,}358C_{CH_4} + 0{,}108C_{H_2} + 0{,}59C_{C_2H_4} + 0{,}637C_{C_2H_6} \quad (10)$$

Em que:

PCI_g = Poder calorífico do gás ($Mj.Nm^{-3}$);

PCI_{gi} = Poder calorífico do componente i ($Mj.Nm^{-3}$);

C_i = Concentração volumétrica do componente (%).

3.4. COMPOSIÇÃO DOS GASES

As determinações da composição dos gases de gaseificação e do biogás foram realizadas no Laboratório de Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Toledo/PR, em um cromatógrafo gasoso. As amostras de gás foram analisadas por cromatografia gasosa, em um aparelho marca Construmaq, modelo U-13.

Nesse tipo de aparelho, é necessário controlar as temperaturas do injetor (T_I), das colunas (T_C) e do detector (T_D). A T_I não pode ser inferior à temperatura de ebulição da amostra neste caso e como é um gás, foi utilizado 50 ^oC. A T_C é responsável pela eficiência de separação dos componentes da amostra juntamente com a coluna utilizada. Nesse equipamento, foram utilizadas T_C de 30 ^oC e uma coluna empacotada, cujo recheio é constituído por *hayeSep* D com 1,5m de comprimento.

HayeSep são polímeros porosos com macroporos, de forma esféricas, utilizadas para executar separações em cromatografia gasosa. A última T_D é responsável pelo sinal gerado no detector de condutividade térmica. O detector tem um filamento aquecido por um metal (Pt, W, Ni, etc), dentro de um bloco metálico que recebe o gás a ser analisado.

A condutividade térmica está em função do peso molecular e quanto menor a molécula maior sua condutividade térmica. Assim, tanto o hidrogênio molecular como o hélio são as moléculas que têm a maior condutividade térmica. Com o gás de arraste puro fluindo no detector, a perda térmica é constante bem como a temperatura do filamento. Se a composição do gás muda, a temperatura do filamento se altera e causa uma correspondente mudança em sua resistência elétrica, medida por uma ponte de Wheatstone contra um sinal de referência, considerada como um segundo detector por onde passa apenas o gás de arraste. Por último, o gás de arraste (hidrogênio, pureza 99,995%) teve um fluxo de 40 $mL.min^{-1}$ na coluna de análise e 60 $mL.min^{-1}$ na coluna de referência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DESEMPENHO DO GMG COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO

Na gaseificação, a itaúba foi utilizada no gaseificador Termoquip, com temperatura operacional de 860 °C, como demonstrado na Figura 23, em um teste de presença de gás.

Figura 23 - Gás produzido.

4.1.1. Composição do gás de gaseificação

O gás produzido foi analisado no cromatógrafo do laboratório de química do *Campus* de Toledo, para a determinação de sua composição como demonstrada na Figura 24.

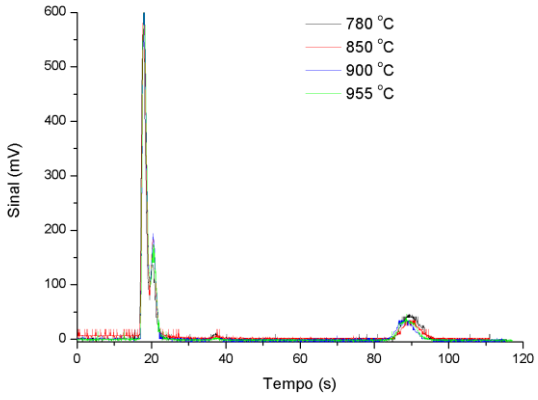

Figura 24 - Comparação entre as amostras obtidas em diferentes temperaturas.

A análise comparativa do cromatograma quantificou a presença de nitrogênio, metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Em uma análise por infravermelho, observou-se a

ausência de água (H_2O) nas amostras. Assim, o hidrogênio foi quantificado (H_2) pelo método dedutivo.

Os resultados quantificados estão organizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição do Gás a 780°C

Componente	Concentração
N_2	49,4%
CH_4	1,0%
CO_2	13,4%
CO	12,3%
Total	76,1%
H_2	23,9%

A partir da composição do gás, foi possível determinar o PCI do gás (4,49 $MJ.Nm^3$) como demonstrado a partir das Equações 11, 12 e 13.

$$PCI_g = 0{,}126 \times 12{,}3_{CO} + 0{,}358 \times 1{,}0_{CH_4} + 0{,}108 \times 23{,}9_{H_2} \quad (11)$$

$$PCI_g = 1{,}5498_{CO} + 0{,}358_{CH_4} + 2{,}5812_{H_2} \quad (12)$$

$$PCI_g = 4{,}49\ MJ.Nm^3 \quad (13)$$

4.1.2. Ensaio do GMG dual com gás de gaseificação

A utilização do gás de gaseificação contribuiu para a melhor regulação de tensão do gerador com média de 201 V quando no modo normal e de 208 V quando no modo dual.

A utilização do gás de gaseificação contribuiu para a elevação da corrente máxima, de 15,2 A no modo normal para 18,4 A no modo dual. Ademais, representa um ganho de corrente máxima de 21,05%.

No Gráfico 1, o comportamento da potência fornecida pelo gerador, em função da carga solicitada, está relacionado com os modos normal e dual.

A utilização do gás de gaseificação contribuiu para o aumento na potência máxima de 2,58 kW no modo Normal para 3,72 kW no modo Dual. Isso representa um aumento de 43,8%, como foi demonstrado por Ribeiro (2007).

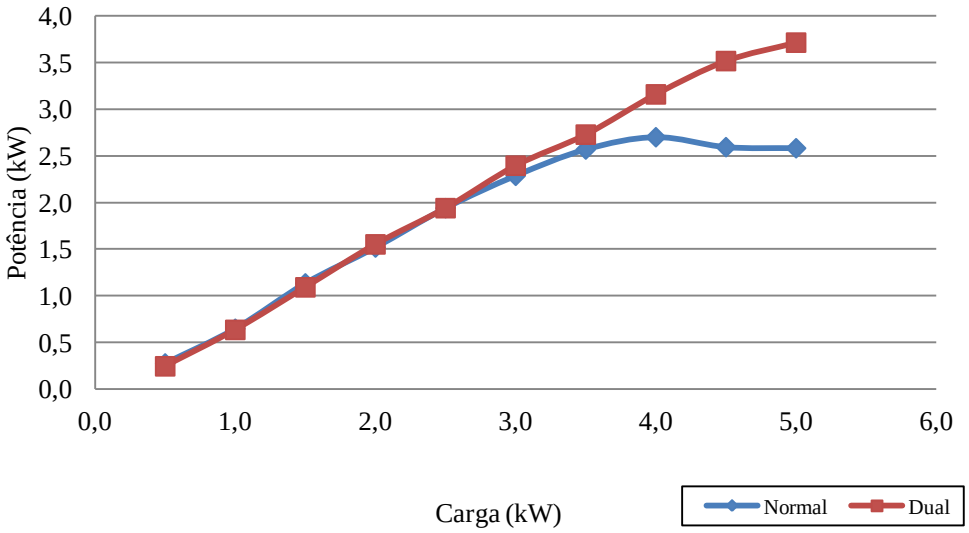

Gráfico 1 - Potência fornecida em função da carga.

No Gráfico 2, o comportamento do consumo está em função da carga solicitada, nos modos normal e dual. A utilização do gás de gaseificação contribuiu para a redução do consumo quando a potência da carga é maior que 1,5 kW. A redução do consumo alcançou o máximo de em 3,5 kW com 30,7% de redução, como foi observado por Neitzke, (2010) e Ribeiro, (2007).

Observou-se que tanto no modo dual quanto no normal tem-se elevado consumo específico (CE) quando o sistema opera com carga leve (pouca carga), portanto, caracteriza-se como um menor desempenho do motor. Isso ocorre com o aumento da carga solicitada e a diminuição do consumo específico para a carga entre 1,5 kW e 4,5 kW.

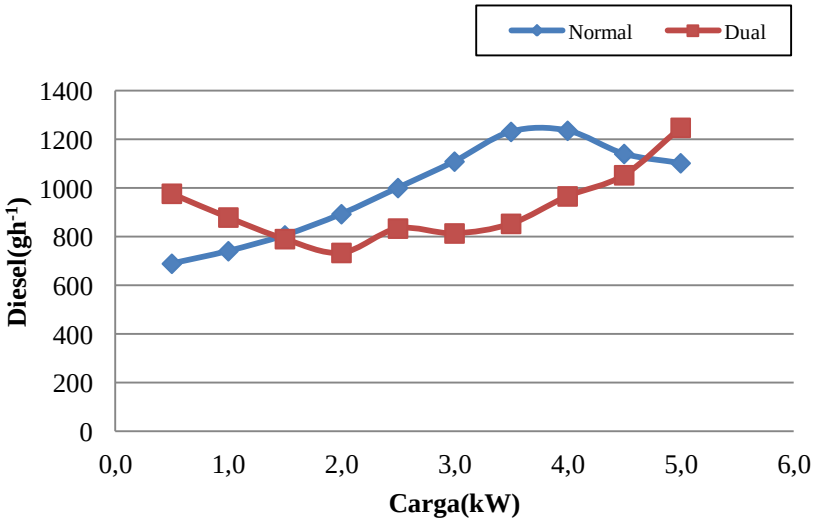

Gráfico 2 - Consumo em função da carga

No Gráfico 3, o consumo específico do combustível está em função da carga solicitada, nos modos normal e dual. Na faixa de carga compreendida entre 1,5 kW e 4,5 kW,

o CE mínimo no modo normal foi de 309,00 g.kWh^{-1} e o máximo de 537,43 g.kWh^{-1}, com um CE médio de 402,48 g.kWh^{-1}. Porém, nessa mesma faixa, no modo dual, o CE mínimo foi de 241,58 g.kWh^{-1} e o máximo de 527,27 g.kWh^{-1}, tendo como média 330,81 g.kWh^{-1}.

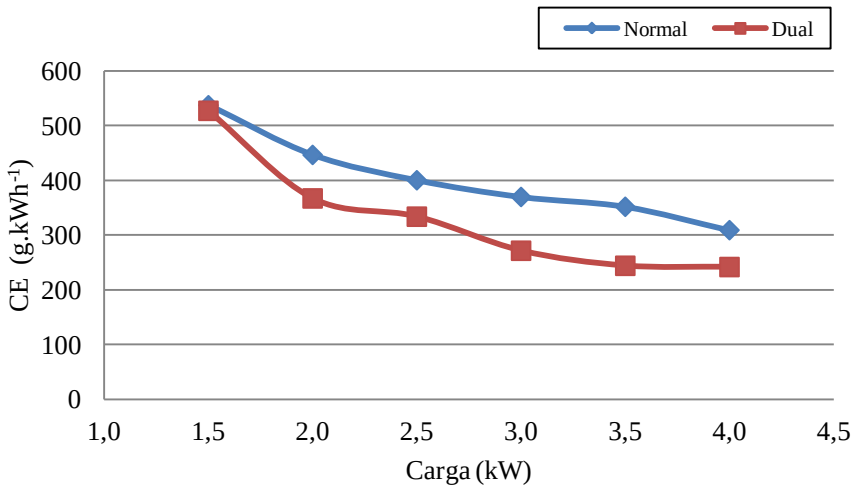

Gráfico 3 - CE na faixa de carga de menor consumo.

No Gráfico 4, a economia de combustível ocorre em função da carga solicitada, entre o modo normal e o modo dual, na faixa de carga entre 1,5 kW e 4,5 kW.

A utilização do gás de gaseificação contribuiu para a redução do consumo quando a potência da carga foi maior do que 1,5 kW e menor do que 4,5 kW, cuja redução média foi de 17,8% do consumo. Ademais, a redução máxima foi em 3,5 kW com 30,7% de redução, como demonstrado por Ribeiro (2007).

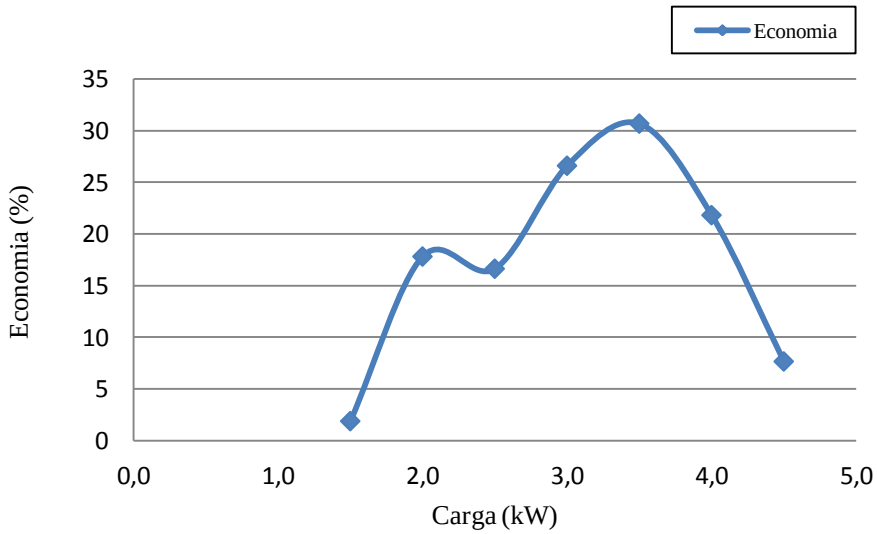

Gráfico 4 - Percentual de economia de diesel em função da carga.

4.2. DESMPENHO DO GMG DUAL COM BIOGÁS

O ensaio foi realizado na granja Dassow. Foi utilizado biogás de um biodigestor de dejetos suínos. O gás foi utilizado de forma *in natura*, sem qualquer purificação.

4.2.1. Composição do biogás

O biogás utilizado proveniente do biodigestor da granja Dassow foi analisado no cromatógrafo do laboratório de química do *campus* de Toledo, para a determinação de sua composição como está demonstrado na Figura 25.

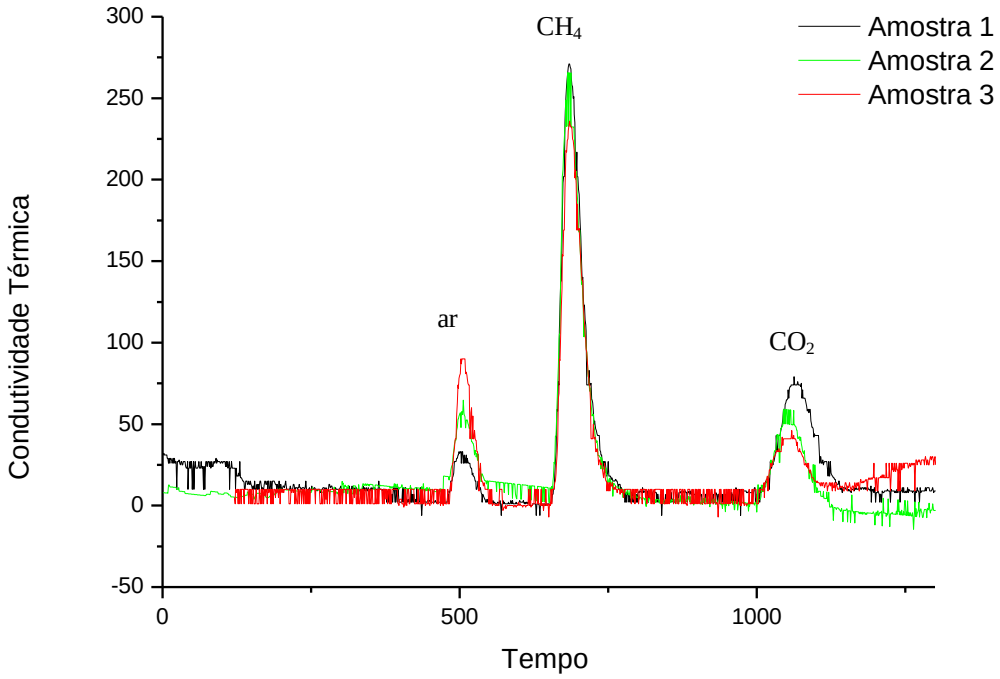

Figura 25 - Cromatograma do biogás.

Os picos visualizados na Figura 25 são atribuídos ao ar próximo a 500 s, ao metano (CH_4), próximo a 700 s, e ao dióxido de carbono (CO_2), próximo a 1050 s.

A presença de ar na amostra possui grande variação, logo, indica contaminação na hora de adquirir a amostra. Suas porcentagens são 7,3% para a Amostra 1; 10,2% para a Amostra 2 e 19,6% para a Amostra 3.

Para o metano, na Amostra 1, foi obtido um percentual de 78,9%; para a Amostra 2, o percentual foi de 76,0% e para a Amostra 3, o percentual foi de 69,0%. Para uma quarta amostra não apresentada no gráfico, o percentual obtido foi de 76,0%. Ao se considerar que o ar veio de contaminação, cerca de 84,6% de metano estão presentes na Amostra 1; 83,8% de metano foram registrados na Amostra 2 e 82,5% de metano na Amostra 3. O desvio padrão estimado pela análise em duplicata referente ao resultado do metano com 99,99% de pureza (Figura 25) é de 2,9%. Os resultados para melhor visualização foram organizados na Tabela 6, com média de 83,6% de metano, com desvio padrão de 1,05.

Tabela 6 - Composição do Biogás.

Componente	Amostras			Média	Desvio Padrão
	1	2	3		
Metano (%)	84,6	83,6	82,5	83,6	1,05

Da composição do biogás, foi possível determinar o poder calorífico do gás que é de 30,99 MJ. Nm^3, obtido a partir da Tabela 6.

4.2.2. Ensaio do GMG dual com biogás

O ajuste da quantidade da relação ar/gás foi feito da mesma forma que na gaseificação, em que buscou-se um ajuste com pré-ignição mínima para que as oscilações do motor fossem reduzidas ao máximo a fim de se encontrar um ponto otimizado da operação.

A utilização do biogás contribuiu para a melhor estabilidade de tensão do gerador com média de 201 V quando no modo normal e de 221 V quando no modo dual.

No Gráfico 5, o comportamento da potência fornecida pelo gerador está em função da carga solicitada, nos modos normal e dual.

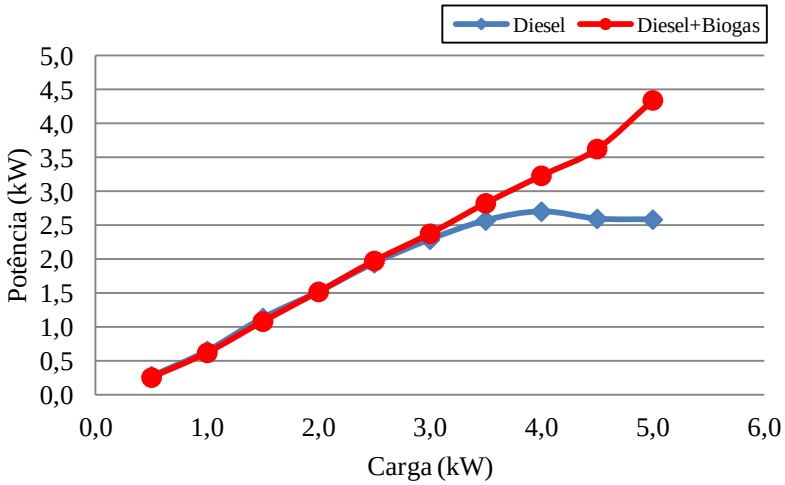

Gráfico 5 - Potência fornecida em função da carga.

Com carga nominal a potência fornecida no modo Normal foi de 2,7 kW, com a utilização do biogás a potência foi de 4,34 kW modo Dual. Tal dado representa aumento de 68,7% da potência, com aumento médio de 12,7% da potência do gerador no modo dual.

No Gráfico 6, o comportamento do consumo ocorre em função da carga solicitada, nos modos normal e dual.

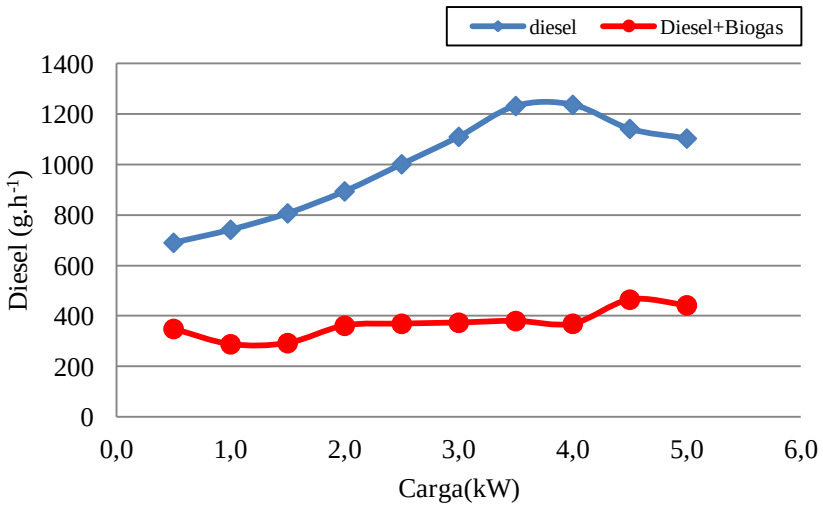

Gráfico 6 - Consumo em função da carga.

A utilização do biogás contribuiu para a redução média do consumo de 63,7%, porém, a redução máxima de consumo foi de 73,8% com 4,0 kW, como demonstrado por Silva, (2011).

Observou-se que tanto o modo dual como o modo normal tem CE elevado quando o sistema opera com carga leve (pouca carga), o que caracteriza menor desempenho do motor.

Com o aumento da carga solicitada, houve diminuição do consumo específico. O consumo específico do combustível em função da carga solicitada nos modos normal e modo dual está demonstrado no Gráfico 7.

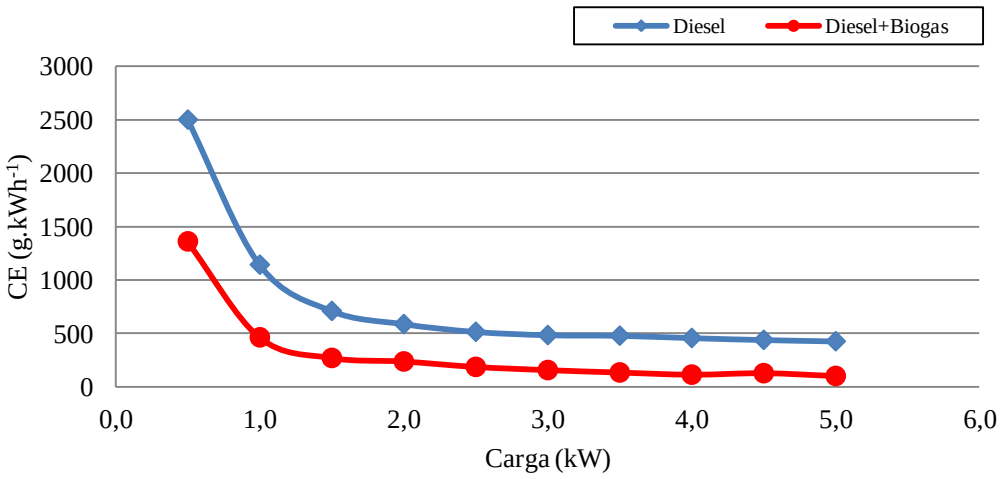

Gráfico 7 - CE Faixa de carga de menor consumo.

Na faixa de carga compreendida entre 0,5 kW e 4,0 kW, o CE mínimo no modo normal foi de 457,45 g.kWh^{-1} com 4,0 kW de potência, enquanto o CE máximo apresentou resultado de 2502,28 g.kWh^{-1} com 0,5 kW de potência. No modo dual, o CE mínimo foi de 92,93 g.kWh^{-1} com 4,0 kW de potência e o máximo foi de 936,93 g.kWh^{-1} com 0,5 kW de potência.

No Gráfico 8, a economia de combustível está relacionada com a carga solicitada, entre os modos normal e dual, quando se utilizou biogás.

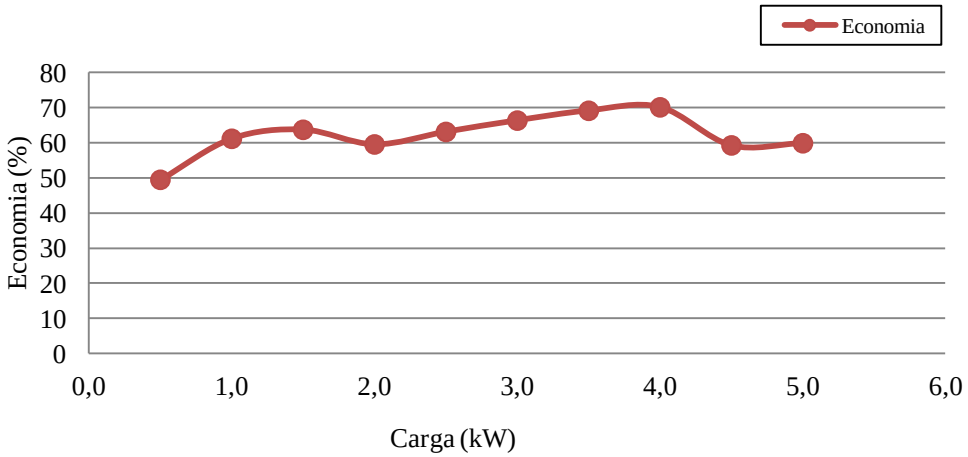

Gráfico 8 - Economia em função da carga.

A utilização do biogás contribuiu para redução média de 63,7% do consumo, e alcançou redução máxima de 73,8% com 4,0 kW, como demonstrado por Silva (2011).

4.3. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO GMG COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO E BIOGÁS

O poder calorífico inferior do gás de gaseificação utilizado foi de 4,49 $MJ.Nm^3$, enquanto o poder calorífico inferior do biogás utilizado foi de 30,99 $MJ.Nm^3$. Tais dados apontam que o poder calorífico inferior do biogás é 85,51% maior do que o percentual encontrado para o gás de gaseificação.

No Gráfico 9, a potência solicitada pela carga está relacionada com a potência fornecida pelo GMG com diesel, gaseificação e biogás. Assim, a potência fornecida não tem diferença significativa entre as três condições até 3 kW ou metade da carga nominal do GMG. Acima desse valor, mesmo na condição nominal, o ganho de potência foi 35,59% maior para o biogás.

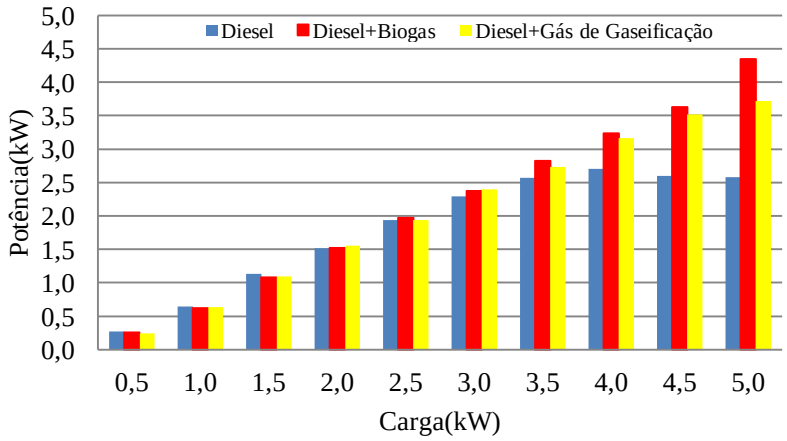

Gráfico 9 - Potência em função da carga do diesel biogás e gasificação

No Gráfico 10, o CE está em função da carga para o GMG que operava com diesel e no modo dual com diesel e biogás ou diesel e gás de gaseificação. Na análise comparativa do consumo específico entre o gás de gaseificação e o biogás, o gás de gaseificação teve CE médio de 859,61 g.kWh^{-1}, enquanto o biogás teve CE médio de 315,56 g.kWh^{-1}. Quando CE do GMG operou com diesel e biogás, foi registrada uma média 172,40% menor do que a média do CE observado na operação como diesel e gás de gaseificação.

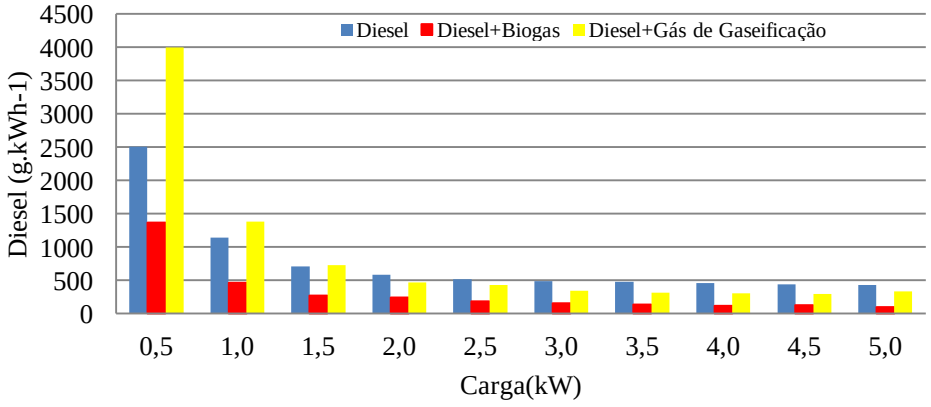

Gráfico 10 - CE com diesel, biogás e gasificação.

No Gráfico 11, a economia de diesel no funcionamento do GMG está relacionada com diesel e biogás ou com diesel e gás gaseificação em todo o intervalo do ensaio. A economia com diesel e gás de gaseificação foi em média de 4,95%; e na utilização do diesel e biogás, a média foi de 62,22%. Assim, a economia propiciada pelo funcionamento do GMG com diesel e biogás foi em média 92% maior do que com diesel e gás de gaseificação.

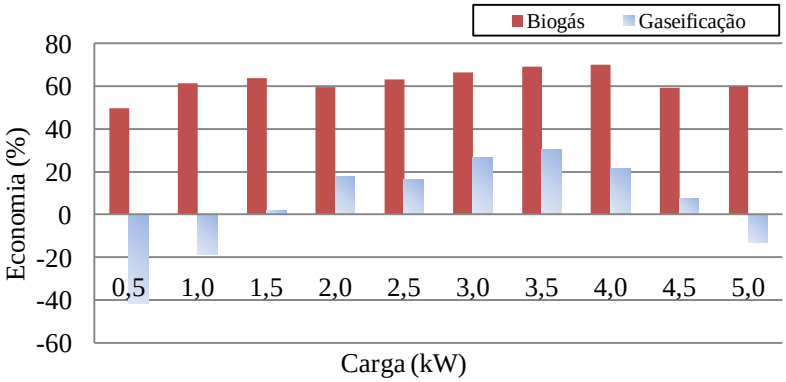

Gráfico 11 - Economia entre biogás e gás de gaseificação.

5. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados permitem concluir que tanto a utilização da gaseificação quanto a utilização do biogás são formas viáveis de redução do consumo de diesel em uma unidade GMG em regiões de difícil acesso.

Este trabalho demonstra que, ao se utilizar GMG diesel na forma dual com gás de gaseificação, há redução do consumo de diesel em até 30,7% e o ganho de potência foi de até 43,8% em comparação com a utilização do GMG com diesel.

Quando o GMG foi utilizado no modo dual com biogás, observou-se redução do consumo de diesel em até 73,8%, com ganho de potência fornecida pelo GMG de até 68,7%, quando comparado com a utilização do GMG com diesel.

A comparação entre a utilização do GMG que opera no modo dual com biogás e gás de gaseificação mostrou que mesmo o biogás tendo poder calorífico 85,51% maior do que o gás de gaseificação, o aumento de potência proporcionado pelo biogás em comparação com o gás de gaseificação foi de 35,59%. Quando se comparou o consumo específico do GMG que operava no modo dual com biogás e gás de gaseificação, foi obtido consumo médio de 172,4% menor. Na comparação da economia de diesel, observou-se economia média de 92% quando o GMG operava no modo dual com biogás.

Pelas considerações acima, é possível afirmar que a utilização do biogás em motores GMG no modo dual é a melhor opção para a redução da dependência de diesel em comunidades isoladas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁNGEL, J. D. M. Estudo experimental do conjunto gaseificador de biomassa em reator co-corrente com duplo estágio de fornecimento de ar e motor de combustão interna. Itajubá-MG: UNIFEI, 2009.

ANDO, Y., YOSHIKAWA, K., BECK, M., ENDO, H. Research and development of a low-BTU gas-driven engine for waste gasification and power generation, Energy, v. 30, Issues 11-12, August-September 2005, p. 2206-2218.

ARENA, U., GREGORIO, F. D., SANTONASTASI, M. A techno-economic comparison between two design configurations for a small scale, biomass-to-energy gasification based system, Chemical Engineering Journal, v. 162, Issue 2, 15 August 2010, p. 580-590.

AUTOCLASSIC. Portal do automobilismo. Disponível em: < http://www.autoclassic.com.br/autoclassic2/?p=5588 >.

BLEY, C. Geração elétrica a partir do biogás com saneamento ambiental : a experiência da Itaipu binacional. Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Residos Animais Geração de Energia a Partir de Resíduos Animais, Florianópolis - SC, 11 - 13 mar. 2009.

Biomassa - Aneel. Disponível em: <www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf>.

BRIDGEWATER, A.V., Review of thermo chemical biomass conversion. ESTUB1202. Crown. 1991.

BRADY, J. E., SENESE, F., JESPERSEN, N. D. Química: a matéria e suas transformações. 5º edição, LTC, v. 1, 2009.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. 2007.

BROWN, D., GASSNER, M., FUCHINO T., MARÉCHAL, F. Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems, Applied Thermal Engineering, v. 29, Issues 11-12, August 2009, p. 2137-2152.

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, nº. 42, p. 63-73, Curitiba, 2009.

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

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas, SP. Editora da UNICAMP, 2008.

DAMARTZIS, TH., MICHAILOS, S., ZABANIOTOU, A. Energetic assessment of a combined heat and power integrated biomass gasification-internal combustion engine system by using Aspen Plus®, Fuel Processing Technology, v. 95, March 2012, p. 37-44.

GIFEL, http://www.gifel.com.br/g30/Sanepar-GMV.htm.

GOMES, C. S., AISSE, M. M. Research at Sanepar and state of Paraná, Brazil, with anaerobic treatment of domestic sewage in full scale and pilot plants. Companhia de Saneamento do Paraná; Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Instituto de Saneamento Ambiental. Congresso Anaerobic Treatment of Sewage, Massachusetts, United States of

America, 27-28 Jun. 1985. Disponível em: <http://docs.watsan.net/Scanned_PDF_Files/Class_Code_3_Sanitation/341.1-85RE-6589.pdf>. Acessado em: 6/06/2012.

GÓMEZ-BAREA, A., LECKNER, B., PERALES, A. V., NILSSON, S., CANO, D. F. Improving the performance of fluidized bed biomass/waste gasifiers for distributed electricity: A new three-stage gasification system, Applied Thermal Engineering, Available online 22 December 2011.

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. Instituto de Tecnologia Química, UPV-CSIC, Universidade Politécnica de Valência. Valencia, Spain. Chemical Reviews, 2006, v. 106, p. 4044~4098.

IANNICELLI, L. A. Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. Taubaté: DEM/UNITAL, 2008. Dissertação mestrado.

Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. ICLEI -Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

MARCHAIM, U. Biogas processes for sustainable development. Sustainable Development. 2007.

Marques, C. A. Microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural utilizando biogás como fonte primária de energia elétrica**.** Cascavel-PR: UNIOESTE, 2012. Dissertação Mestrado.

Martínez, J. D., Mahkamov, K., Andrade, R. V., Lora, E. E. S. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines, Renewable Energy, v. 38, Issue 1, February 2012, p. 1-9.

Moreira, F. Desempenho de Motor Alimentado com Biodiesel Associado ao Biogás**.** (2000) 361-365.

N. A. P., 1983. Producer gas: Another fuel for motor transport. Washington, D.C., U.S.A.

NEITZKE, G. Geração elétrica distribuída a partir da gaseificação de pellets de cama de aviário. Brasília: UNB, 2010. 80p. Dissertação Mestrado.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: Fundamentos e aplicações. 2ª ed. - Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2004.

Nogueira, L. A. H. Biodigestão: a alternativa energética. São Paulo, Ed. Nobel, 1986.

OLIVER, A. P. M.; SOUZA, A. A.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. Manual de treinamento em biodigestão. Salvador-BA. WINROCK, 2008. p. 23.

PENIDO FILHO, Paulo. 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.

PRATI, L. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. Curitiba: UFP, 2010. p. 83. Monografia - TCC.

PUIG-ARNAVAT, M., Bruno, J. C., Coronas, A. Review and analysis of biomass gasification models, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, Issue 9, December 2010, p. 2841-2851,

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. Revista da Madeira, nº. 89, p. 100-106, 2005.

REED, T., DASS, A. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Solar Energy Research Institute (SERI), U.S. Department of Energy Solar Technical Information Program. Third Printing, 140p. 1989.

RIBEIRO, R. S. Investigação experimental e integração de um sistema de geração de energia elétrica por gaseificação de biomassa para comunidades isoladas. Brasília: UNB, 2007. 106p. Dissertação Mestrado.

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

SILVA, F. M.; LOPES, A.; CASTRO N. P.; DABDOUB, M. J. ; SALVADOR, N.; FURLANI, C. E. A. Avaliação do desempenho do motor alimentado com duplo combustível-Biodiesel e Biogás. In: I Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos Vegetais e Biodiesel, 2004, Varginha. Anais. Lavras: UFLA, 2004. p. 251-257.

SILVA, M. J., SOUZA, S. N. M., SOUZA, A. A., RICIERI, R. P., FRACARO, G. P. M. Microgeneration of electricity with producer gas in dual fuel mode operation. Eng. Agríc.. 2011, v.31, nº. 5, p. 879-886.

SGANZERLA, E. Biodigestor; uma solução. Porto Alegre Ed. Agropecuária, 1983.

SHAW, L. N.; WHITNEY, J. D.; HEDDEN, S. D.; CHURCHILL, D. B. Operating a Diesel Irrigation Pump on Citrus-Wood Producer Gas. American Society of Agricultural Engineers. v. 6, n° 4, p. 376-381, 1990.

SOUZA, J. Desempenho de um motor ciclo Otto utilizando biogás como combustível. Cascavel-PR: UNIOESTE, 2004. Dissertação Mestrado.

TINAUT, F. V., MELGAR, A., ALFONSO HORRILLO, ANA DÍEZ DE LA ROSA, Method for predicting the performance of an internal combustion engine fuelled by producer gas and other low heating value gases. Fuel Processing Technology, v. 87, nº. 2, January 2006, p. 135-142.

WIERZBICKI, S. Effect of the parameters of pilot dose injection in a dual fuel diesel engine on the combustion process. Journal of KONES Power train and Transport, v. 18, nº. 3, 2011, p.10-17.