



DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE UM MOTOGERADOR OPERANDO EM MODO *DUAL FUEL* COM BIOGÁS E ETANOL

Lucimar Venâncio Amaral¹
Pedro Henrique Rocha de Menezes Braga¹
Fabício José Pacheco Pujatti¹
Leonardo Lelis Dias¹
Rita de Cássia Oliveira Sebastião²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901

²Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901

Resumo. *O biogás produzido a partir da biodigestão de resíduos orgânicos pode ser utilizado como combustível para motores de combustão interna, e é uma alternativa para o atendimento às demandas energéticas da sociedade a partir de uma fonte renovável e sustentável. Este trabalho determina a eficiência de conversão de energia de um conjunto motogerador constituído por um motor de combustão interna de 4 cilindros de ignição por centelha acoplado a um gerador de energia elétrica operando com biogás, em modo dual-fuel, com biogás e etanol. Para o cálculo da eficiência bruta de conversão de energia foi considerada a razão entre a taxa de energia química admitida pelo conjunto através dos combustíveis, e a potência de geração de energia elétrica pelo gerador. Os resultados obtidos para os experimentos em modo dual-fuel indicam a necessidade de se realizar uma calibração extensiva do motor, com enfoque no ajuste da tabela de avanço de ignição, o que não foi possível através do aparato experimental disponível para este trabalho.*

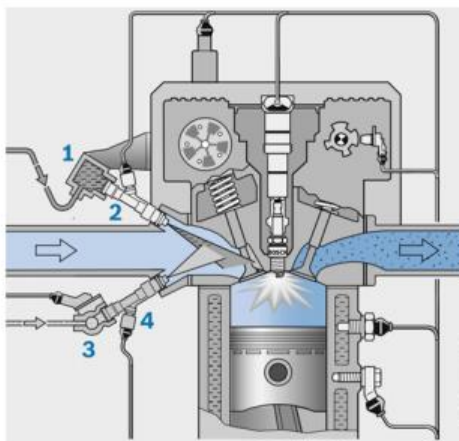
Palavras chave: *Biogás, etanol, dual fuel, motogerador*

1. INTRODUÇÃO

O conceito *dual fuel* consiste no uso simultâneo de dois combustíveis diferentes em um mesmo ciclo de um motor de combustão interna. O uso dessa tecnologia possibilita a adoção de diversas estratégias de operação do motor, como o uso de misturas mais pobres e razões de compressão mais altas. Além disso, permite a substituição parcial de um combustível por outro de menor custo e viabiliza a redução do consumo de combustível, o que pode gerar economia, aumento da eficiência do motor e redução de emissão de gases poluentes.

Este trabalho determina a eficiência de conversão de energia de um conjunto motogerador composto por um gerador de energia elétrica e um motor de combustão interna de 4 cilindros de ignição por centelha operando com biogás como combustível e em modo *dual fuel* com etanol e biogás. Para tal, foi necessária a realização de testes e medições com o motor operando sob diversas condições, com diferentes proporções de mistura etanol-biogás e implementar as devidas estratégias de gerenciamento eletrônico do motor. A Fig. 1 ilustra a instalação desse tipo de sistema.

Figura 1. Instalação de sistema *dual fuel* em motor de ignição por centelha (Reif, 2015)



O presente trabalho foi realizado no intuito de responder à crescente demanda que existe em nível global pelo desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a mitigação das emissões de gases poluentes e a substituição dos combustíveis fósseis por outros de fontes renováveis.

O etanol e o biogás são combustíveis obtidos de fontes limpas, renováveis e abundantes no Brasil. Além disso, o biogás é obtido a partir do tratamento de resíduos orgânicos, o que contribui para que o seu uso esteja em consonância com as diretrizes de preservação ambiental.

Destaca-se também o fato de que usualmente o biogás produzido pelo processo de biodigestão dos resíduos, quando não usado para outros fins, é descartado para a atmosfera através de um dispositivo queimador de gás do tipo *flare*, tornando-se, portanto, um elemento poluente para a atmosfera. Esse fato sugere a necessidade ainda maior de que sejam desenvolvidos meios de aproveitamento do biogás produzido nas estações de tratamento de resíduos.

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias que incentivem o uso de biogás e etanol como combustíveis para uso em motores de combustão interna visa atender à demanda por soluções energéticas alternativas, agregar valor aos subprodutos do tratamento de resíduos orgânicos e ainda privilegia o mercado interno brasileiro, haja vista a elevada capacidade produtiva interna destes combustíveis.

Semanalmente, centenas de quilogramas de restos de alimentos são descartados nos Restaurantes Universitários do campus Pampulha da UFMG. Com o intuito de proporcionar a redução do volume e o encaminhamento adequado desses resíduos, concomitante ao estabelecimento de uma infraestrutura que possibilite o desenvolvimento de atividades de ensino e pesquisa, em 2014 foi instalada no quarteirão 10 – Q10 do campus uma plataforma de metanização de resíduos orgânicos – pMethar, conforme Fig. 2.

Na pMethar, parte dos resíduos orgânicos gerados no Restaurante Universitário II da UFMG são tratados e, como um dos produtos do tratamento, é produzido biogás.

Segundo Ferreira (2015), a capacidade média de produção de biogás da plataforma é de 19 m³/dia e a concentração média de metano no biogás produzido é 52,6%. Quando é identificado pelo monitoramento da produção de biogás que a concentração de metano em sua composição está muito inferior à média, devido a seu baixo potencial energético, o biogás é desviado para descarte na atmosfera através de um dispositivo queimador de gás do tipo *flare*. Considerando o elevado potencial corrosivo do H₂S, subproduto da pMethar, Colturato (2015) e Lobato (2011) recomendam a dessulfurização do biogás produzido quando possui concentração superior à 200 ppmV, de forma a prolongar a vida útil dos sistemas de compressão e cogeração de energia.

O biogás é obtido na pMethar e é direcionado ao Centro de Tecnologia da Mobilidade – CTM do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (DEMEC/UFMG), que, com financiamento da FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais e da FCA – Fiat Chrysler Automobiles, e por meio de sua equipe, projetou e construiu um motogerador protótipo (Fig. 2) para utilização na etapa de aproveitamento energético do biogás da pMethar.

Figura 2. Conjunto motogerador utilizado no desenvolvimento (Autor)



2. METODOLOGIA

Para a biodigestão dos resíduos orgânicos na pMethar, é utilizado um reator de metanização com volume útil de 18,8 m³, concebido como um digestor de mistura completa, operado em um único estágio de digestão anaeróbia, sob via úmida de tratamento, Ferreira (2015).

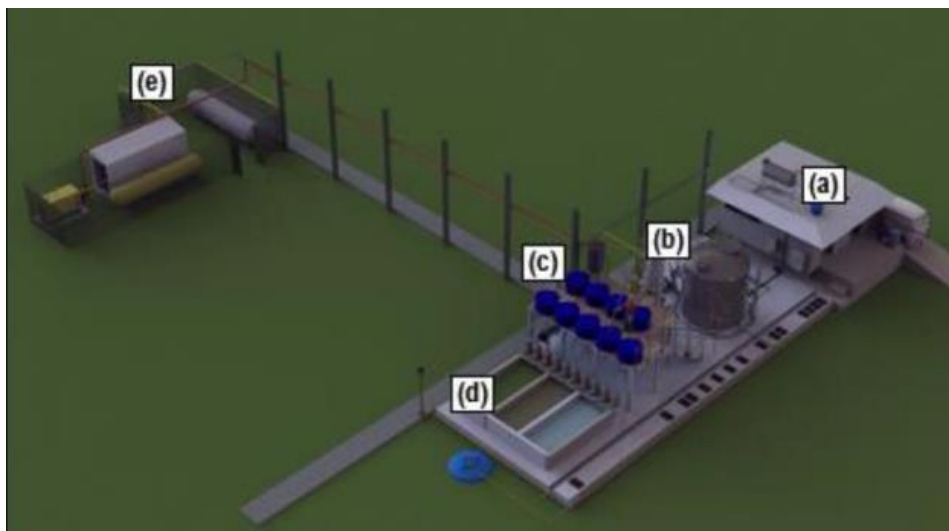
Figura 3. Reator de metanização de resíduos orgânicos (Ferreira, 2015)



O volume de biogás produzido é quantificado por meio de um medidor de fluxo de gás Ítron tipo diafragma G2.5, e sua composição aferida através de um analisador de gases modelo Landtec GEM5000 (Ferreira, 2015). Dependendo da concentração de metano, o biogás passa por uma etapa de remoção de sulfeto de hidrogênio (H₂S) e é direcionado para tanques de armazenamento para ser utilizado como combustível na operação de um conjunto motogerador para geração de energia elétrica.

Na Fig. 4 está ilustrado o sistema integrado de tratamento e aproveitamento energético de resíduos da pMethar: a) container de recepção e triagem dos resíduos; b) reator de metanização; c) sistema de separação sólido-líquido; d) sistema de pós tratamento de efluentes líquidos; e) plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás.

Figura 4. Sistema integrado de tratamento de resíduos da pMethar (Ferreira, 2015)



Visando o melhor aproveitamento do volume dos tanques de armazenamento utilizados e a manutenção da pressão mínima de operação do conjunto motogerador, o biogás é armazenado comprimido a cerca de 5 bar de pressão. Para a compressão do biogás é utilizado um compressor que opera através de um motor de indução trifásico de gaiola com potência nominal de 3,7 kW.

O motogerador é constituído por um motor de 4 cilindros de ignição por centelha Fiat 1.4 L EVO Tetrafuel, de fabricação da FCA, cujas especificações estão descritas na Tab. 1. O motor foi mantido com seus componentes originais, exceto pelas adaptações no chicote elétrico necessárias para a instalação da central eletrônica aberta de desenvolvimento instalada no conjunto. O gerador que compõe o sistema é fabricado pela NOVA Motores e Geradores Elétricos Ltda. e suas especificações são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 1. Especificações do motor de combustão interna (FCA)

Característica	Valores
Número de cilindros	4 cilindros em linha
Número de válvulas por cilindro	1 de admissão e 1 de exaustão
Diâmetro x Curso	72,0 x 84,0 mm
Cilindrada total	1368,3 cm ³
Relação volumétrica de compressão	12,35 ± 0,15:1
Potência máxima @ 3600 rpm	54 cv (40kW) com GNV
Torque máximo @ 3500 rpm	10,7 kgf.m com GNV

Tabela 2. Especificações do gerador de energia (NOVA)

Característica	Valores
Potência Nominal	60 a 70 kVA
Tensões	220Vac/380Vac/440Vac (Trifásico)
Frequência	60 Hz
Grau de Proteção mínimo	IP21
Polaridade	2 polos (3600 rpm)
Classe de Isolamento mínima	180 °C (Classe "H")

Para o gerenciamento eletrônico do motor e configuração dos parâmetros de calibração e ajustes necessários para a realização dos experimentos, foi utilizada uma ECU (*Engine Control Unit*) aberta de desenvolvimento Motec M800, conforme Fig. 5.

Figura 5. ECU Motec M800 (Motec)



Para o tratamento da energia gerada pelo gerador e o adequado fornecimento para a rede da concessionária distribuidora de energia foi utilizado um equipamento conversor de potência de fabricação da PWP Lab, com potência nominal máxima de *operação* de 15,8 kW. Através do controle do conversor por meio do software de interface fornecido pela PWP Lab, foi possível controlar a aplicação de carga no motogerador por meio da variação da potência de geração de energia.

O conjunto motogerador é equipado ainda com um dispositivo supervisor que possibilita o monitoramento de diversos parâmetros de operação do conjunto, como horímetro, tensão da bateria, pressão de óleo lubrificante e potência de geração instantânea de energia.

Os testes foram realizados com o motor em regime de rotação constante de 3600 rpm submetido a uma carga de referência. Para manter o motor nas condições estabelecidas de operação, a ECU foi configurada para realizar o controle de rotação em marcha lenta através do dispositivo de aceleração eletrônica *drive-by-wire* (DBW) e o conversor de energia foi ajustado para a potência de geração referente à carga estabelecida. A ECU foi configurada para controlar 8 injetores, sendo a bancada primária composta por 4 injetores de combustível gasoso e a bancada secundária composta por 4 injetores de combustível líquido, através do software de interface de configuração da ECU foi possível variar a proporção da mistura entre esses dois combustíveis injetados simultaneamente no ciclo de operação do motor.

Foram feitos os ajustes do tempo de injeção de combustível e avanço de ignição, com enfoque nos pontos de operação estabelecidos para o motor durante a realização dos testes, utilizando como referência o valor de $\lambda = 1,00$, correspondente à mistura estequiométrica de ar-combustível. Para a manutenção do valor alvo de lambda durante a operação do motor quando submetido às oscilações de carga e variação da mistura de combustíveis, foi configurado o controle de lambda em malha fechada através da retroalimentação do sinal gerado pela sonda Bosch *Wideband* LSU 4.2, instalada no sistema de exaustão do motor.

Os demais parâmetros de calibração do motor foram obtidos a partir de mapas de referência previamente calibrados e devidamente ajustados para se adequarem às condições de operação destes testes.

Os experimentos foram realizados através das medições necessárias para o cálculo da eficiência de conversão de energia do motogerador operando em 3 condições distintas: somente com biogás e em modo *dual-fuel* com duas diferentes proporções de mistura entre biogás e etanol.

Para todos os experimentos, de forma a estabelecer-se um parâmetro de comparação, submeteu-se o motor a uma mesma carga equivalente à potência de geração de energia elétrica de 8 kW. Esse valor de carga foi limitado devido ao baixo potencial energético do biogás, em relação a outros combustíveis, associado à limitação de pressão de admissão do biogás imposta pelos equipamentos utilizados, o que impossibilitou a operação estável do motor quando alimentado somente com biogás e submetido a cargas superiores a 8 kW.

Para fins de organização deste trabalho, define-se que os experimentos serão descritos em função da razão de combustível através da seguinte nomenclatura:

Tabela 3. Nomenclatura em função da razão de combustível (Autor)

Código de referência	Vazão mássica de biogás
R100	100%
R50	50%
R25	25%

Os valores de vazão mássica de biogás da Tab. 3 correspondem ao percentual da vazão mássica de biogás em relação ao experimento com o motor submetido a carga de 8 kW e operando somente com biogás, que corresponde ao código de referência R100. Para a realização do experimento R50, foi gradualmente adicionado etanol à mistura, mantendo estáveis a rotação, a carga e o valor de lambda, até que a vazão mássica de biogás atingisse o valor correspondente a 50% da vazão mássica medida no experimento R100.

Para a realização do experimento R25, de maneira análoga, adicionou-se etanol à mistura até que a vazão mássica de biogás atingisse o valor correspondente a 25% da vazão mássica medida no experimento R100.

A eficiência de conversão de energia de um conjunto motogerador é calculada através da razão entre a energia química contida no combustível admitido para a operação do motor e a energia elétrica fornecida para a rede de distribuição de energia elétrica, esse cálculo pode ser feito através da determinação da taxa de entrada de energia no motor e da taxa de saída de energia do gerador, que corresponde à potência elétrica útil produzida.

Neste trabalho, para determinação da energia admitida através do biogás, inicialmente verifica-se a sua composição através de medição realizada com o analisador de gases modelo Landtec GEM5000.

A parcela da potência de entrada do conjunto motogerador proveniente do etanol e do biogás foi calculada através das Eq. (1) e Eq. (2), em que se multiplica o poder calorífico inferior de cada combustível pela sua vazão mássica. O poder calorífico e a vazão mássica foram tomados a partir dos valores encontrados no trabalho de Ferreira, 2015.

$$W_{adm, biogás} = PCI_b \times mb \quad (1)$$

$$W_{adm, etanol} = PCI_e \times me \quad (2)$$

Em que:

$W_{adm, biogás}$ = Potência admitida através do biogás [W]

$W_{adm, etanol}$ = Potência admitida através do etanol [W]

PCI_b = Poder calorífico inferior do biogás [MJ.kg⁻¹]

PCI_e = Poder calorífico inferior do etanol [MJ.kg⁻¹]

mb = vazão mássica do biogás [kg.s⁻¹]

me = vazão mássica do etanol [kg.s⁻¹]

Por fim, utilizando os valores calculados para a potência disponível admitida por meio de ambos os combustíveis e o valor medido da potência elétrica na saída do gerador, calcula-se a eficiência de conversão de energia do conjunto motogerador através da relação apresentada na Eq. (3):

$$\eta_{conv} = (W_{elétrica}) / (W_{adm, biogás} + W_{adm, etanol}) \quad (3)$$

Em que:

η_{conv} = Eficiência de conversão de energia [%]

$W_{elétrica}$ = Potência elétrica na saída do gerador [W]

$W_{adm, biogás}$ = Potência disponível admitida por meio do biogás [W]

$W_{adm, etanol}$ = Potência disponível admitida por meio do etanol [W]

3. RESULTADOS

A Tab. 4 demonstra os valores das medições realizadas para cada experimento. A pressão do biogás admitido no experimento R100 foi significativamente inferior à pressão do biogás admitido nos experimentos R50 e R25, assim como a vazão volumétrica do biogás para o experimento R100 foi inferior à vazão volumétrica do biogás para os experimentos R50 e R25. Essas grandezas estão correlacionadas, uma vez que uma menor demanda de biogás devido à adição de etanol nos experimentos R50 e R25 provoca a queda da vazão admitida do combustível gasoso.

Consequentemente, devido à redução da velocidade de escoamento do fluido no sistema, ocorre uma menor perda de carga do biogás, o que resulta em uma maior pressão de admissão do biogás pelo motor. A pressão de admissão mais elevada do biogás corresponde a uma maior densidade energética do combustível, o que por sua vez reduz a vazão necessária para atender à demanda energética do motor e assim estabelece-se um círculo de efeitos em cadeia que explica os resultados aferidos pelas medições.

Tabela 4. Parâmetros obtidos para cada experimento (Autor)

	R100	R50	R25
Pressão do biogás [bar]	2,0	5,7	5,7
Temperatura do biogás [°C]	43,4	56,7	60,0
Vazão volumétrica do biogás [m ³ .h ⁻¹]	3,40	0,80	0,41
Vazão mássica de etanol [g.s ⁻¹]	0,00	1,68	2,59
Potência de geração de energia elétrica [kW]	8,14	8,32	8,13

A Tab. 5 demonstra os valores de PCI e densidade do biogás utilizados para cada experimento. Esses valores foram utilizados para a determinação do conteúdo energético do biogás utilizado.

Tabela 5. PCI e densidade do biogás utilizado (Autor)

	PCI [MJ/kg]	Densidade [kg.m ⁻³]
R100	26,46	1,30
R50	27,76	1,27
R25	27,76	1,27

A Tab. 6 demonstra os valores das eficiências bruta e líquida de conversão de energia obtidos para cada experimento. Para o cálculo da eficiência líquida de energia, foi deduzido da potência elétrica produzida pelo gerador o valor da potência consumida pelo compressor para comprimir o biogás utilizado em cada experimento.

Observa-se que nos experimentos em modo *dual-fuel* houve uma redução de 7% a 9% da eficiência bruta e de 4% da eficiência líquida em relação à operação somente com biogás, sendo que a diferença entre a eficiência bruta e a líquida tende a ser menor à medida que a vazão de biogás reduz, uma vez que a parcela da energia dispendida para a compressão do biogás utilizado no experimento tende a se tornar menos expressiva.

Tabela 6. Eficiência calculada para cada experimento (Autor)

	Eficiência bruta [%]	Eficiência líquida [%]
R100	20,0 ± 4,0	14,0 ± 4,0
R50	13,0 ± 2,0	10,0 ± 4,0
R25	11,0 ± 2,0	10,0 ± 4,0

4. CONCLUSÕES

Os valores de eficiência calculados neste trabalho foram inferiores aos obtidos em trabalhos análogos de referência, como os de Costa (2017) e Rocha (2017). Considerando que a literatura indica que os motores de combustão interna apresentam maior eficiência quando submetidos a cargas relativamente mais altas, provavelmente a limitação de 8 kW de carga aplicada no motor na realização dos experimentos comprometeu a obtenção de valores de eficiência mais elevados.

Os resultados, portanto, sugerem a necessidade de se adaptar o sistema de forma a se obter uma pressão de admissão de biogás mais alta e, desta forma, aumentar a densidade energética do biogás e possibilitar a realização de experimentos com o motor submetido a cargas mais altas. Tal adaptação provavelmente dependeria da instalação de um dispositivo redutor de pressão à montante do sistema de admissão do motor com valores de perda de carga inferiores aos do redutor de pressão utilizado neste trabalho e/ou do fornecimento de biogás ao sistema a uma pressão superior, de forma a compensar a perda de carga no redutor.

Para o experimento R100, com o motor operando somente com biogás como combustível, foram calculados os valores de eficiência bruta de 20% e líquida de 14%, significativamente abaixo da eficiência bruta de 27% e líquida de 19% calculadas por Rocha (2017) nos testes com um conjunto motogerador equivalente ao deste trabalho.

Observa-se, porém, que em seu trabalho Rocha realizou os experimentos com o motor submetido a uma carga de 13 kW, enquanto que, no presente trabalho os experimentos foram realizados com o motor submetido a carga de 8 kW, o que, conforme já discutido, justifica a discrepância dos resultados.

A eficiência de conversão de energia calculada para os experimentos R50 e R25, com o motor operando em modo *dual-fuel*, indicaram, independente da proporção das misturas de combustíveis avaliadas, uma redução em relação à eficiência calculada para o motor operando somente com biogás. Esse resultado contraria a expectativa baseada no trabalho de Costa (2017), em que se constatou o aumento da eficiência de conversão de energia em modo *dual-fuel* com biogás e etanol em relação ao modo de operação somente com biogás para todas as proporções de mistura de combustíveis avaliadas.

Esse resultado possivelmente é decorrente das condições específicas de operação do motor nos respectivos experimentos e sugere a necessidade de se realizar uma calibração mais extensa dos parâmetros de gerenciamento eletrônico do motor, com enfoque nos ajustes dos valores de avanço de ignição considerando as características próprias do etanol, como velocidade de combustão etc. Tais ajustes não foram realizados neste trabalho devido a limitações de infraestrutura e instrumentação do motor, que foi instalado em campo e não possuía os sistemas de aquisição e monitoramento usualmente utilizados neste tipo de calibração.

Acredita-se que as adaptações sugeridas, associadas à realização de melhores ajustes de calibração do motor, possibilitariam a realização de experimentos que produzam resultados que corroborem as conclusões obtidas nos estudos análogos já publicados.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais pelas instalações, laboratórios e suporte de seus professores e funcionários.

6. REFERÊNCIAS

- Colturato, L. F.. Dessulfuração de Biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S. 2015. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- Ferreira, B. O.. Metanização de Resíduos Alimentares com Vistas ao Aproveitamento Energético do Biogás. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- Lobato, L. C.. Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- Reif, K. Gasoline Engine Management. 1ed. Springer Fachmedien Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg, 2015.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.