

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-AMBIENTAL DOS COMBUSTÍVEIS APLICADOS EM GRUPOS MOTOR-GERADORES (GMG) INSTALADOS NO AGRONEGÓCIO PARA OS SETORES DE SUÍNO E BOVINOCULTURA

Elvanger Santos Cardoso¹; Eduardo Henrique Medeiros da Silva²; Marcio Zamboti Fortes³

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), emitidos na atmosfera, durante o processo de combustão do grupo motor-gerador (GMG), quando este equipamento estiver operando, separadamente, com biogás, gasolina e gás natural veicular (GNV). Dessa forma, a fim de avaliar a viabilidade econômico-ambiental, com relação aos três tipos de combustíveis, empregados nos sistemas de cogeração, foi realizado um estudo dos principais fatores encontrados em biogás, GNV e gasolina. Nesse contexto, por meio de pesquisa exploratória, buscou-se efetuar uma análise comparativa dos seguintes parâmetros: eficiência global; emissões de GEE; e custos mensais, provenientes dos volumes consumidos pelo GMG quando operando com diferentes tipos de combustíveis (biogás, GNV e gasolina). De acordo com os testes realizados, referenciados em outras pesquisas e considerando diversos valores de carga aplicada (25, 50, 75 e 100 %) ao GMG, a gasolina foi o combustível que apresentou maiores desvantagens em relação aos outros, ou seja, além de ser mais poluente, também demonstrou ser o combustível mais oneroso em comparação ao biogás e GNV. Nas análises e comparações efetuadas, foi atestado que, o custo mensal, referente ao volume de biogás consumido pelo GMG, ficou bem abaixo dos valores encontrados para o GNV e a gasolina. Portanto, se a viabilidade econômica for assumida como fator mais preponderante, durante a fase de projeto ou implantação, o biogás é o combustível mais indicado, porém, caso a redução dos impactos ambientais, causados pelas emissões de GEE, seja considerada mais importante, o GNV é o combustível mais adequado para ser utilizado em GMG aplicado à cogeração considerando sistemas de pequena potência.

Palavras-chave: Biogás; gases de efeito estufa; grupo motor-gerador.

Abstract

This work has as its main objective to quantify the emissions of greenhouse gases (GHG), emitted in the atmosphere, during the combustion process of the engine-generator set (Genset), when this equipment is operating, separately, with biogas, gasoline, and vehicular natural gas (NG). Thus, a detailed study of the main factors found in biogas, NG, and gasoline was carried out to assess the economic and environmental feasibility of the three types of fuels used in cogeneration systems. In this context, through exploratory research, this research was made to perform a comparative analysis of the following parameters: global efficiency; greenhouse gas emissions; and monthly costs, resulting from the volumes consumed by Genset when operating with different types of fuels (biogas, NG and gasoline). According to the tests carried out referred with other technical documents and considering various values of load applied (25, 50, 75, and 100%) to Genset, gasoline was the fuel that presented the greatest disadvantages to the others, that is, in addition to being more polluting, also proved to be the most expensive fuel

¹ Mestre em Montagem Industrial pela Universidade Federal Fluminense – UFF. E-mail: escardoso@id.uff.br.

² Mestre em Montagem Industrial pela Universidade Federal Fluminense – UFF. E-mail: ehmsilva@id.uff.br.

³ Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo-USP; professor Associado III da Universidade Federal Fluminense-UFF e atua nos Mestrados de Engenharia Elétrica e Telecomunicações e Profissional em Montagem Industrial. E-mail: mzamboti@id.uff.br.

compared to biogas and NG. In the analyzes and comparisons made, it was attested that the monthly cost, referring to the volume of biogas consumed by Genset, was well below the values found for NG and gasoline. Therefore, if economic viability is assumed to be the most important factor, during the design or implantation phase, biogas is the most suitable fuel, however, if the reduction of environmental impacts caused by GHG emissions is considered more important, the NG is the most suitable fuel to be used in Genset applied to cogeneration considering low power consumption systems

Keywords: Biogas; greenhouse gases; engine-generator set.

1 Introdução

Atualmente, a maior parte do planeta tem suas fontes de energia baseadas em combustíveis de origem fóssil, por exemplo, o petróleo, considerado, por algum tempo, como inesgotável. Dentro deste prisma, tornou-se necessário a busca por outras fontes de energia, dando preferência àquelas vindas de recursos renováveis [1]. Desta forma, existe a necessidade do desenvolvimento de fontes energéticas cada vez mais sustentáveis e eficientes, ou seja, menos destrutivas ao meio ambiente. Nesse sentido, muitas áreas de nossa sociedade têm buscado alternativas ao modelo atual de geração e consumo de energias. Alguns modelos de geração de energias renováveis já são consolidados, porém ainda precisam de grandes investimentos em sua implantação, tais como: hídrica, solar e eólica. Além disso, estas fontes são diretamente dependentes de fatores climáticos em sua produção [2].

Aliado ao crescimento populacional, além do consumo de energia, o mundo aumentou também a sua demanda em relação à produção agroindustrial, o que, conseqüentemente, contribuiu para o crescimento da geração de esterco bovino, suíno, aviário ou qualquer outro animal de criação extensiva. Os referidos dejetos, quando não tratados, se tornam um grande problema ambiental, o qual poderá ser resolvido por meio do aproveitamento de resíduos em produção de biogás, cuja aplicabilidade se assemelha ao do gás natural, ou seja, o combustível baseado em biogás também pode ser aplicado na conversão de energia elétrica, mecânica ou térmica em sistema de cogeração, podendo ser utilizado na própria propriedade, reduzindo, assim, os custos operacionais do agronegócio [1].

Uma das alternativas utilizadas para o tratamento destes resíduos é o processo de biodigestão anaeróbia, capaz de reduzir o potencial de poluição do resíduo e proporcionar à produção de biogás. Sendo assim, encontrar o consumo equivalente de energia elétrica (kWh) gerada pelo biogás torna-se fundamental, uma vez que possibilita projetar sistemas de geração adequados, no que tange ao atendimento da demanda instalada em atividades baseadas em bovino ou suinocultura.

Este trabalho objetiva realizar uma comparação entre os parâmetros do biogás de suíno e bovinocultura, do Gás Natural Veicular (GNV) e da gasolina, a fim de avaliar qual dos combustíveis apresenta melhor viabilidade econômico-ambiental. O estudo foi estruturado em quatro itens, o primeiro, contendo uma introdução que aborda os principais conceitos sobre biomassa, origem e utilização do biogás, biodigestores e cogeração de energia elétrica. O segundo, apresenta a metodologia e os materiais utilizados na pesquisa. O terceiro, busca apresentar as análises e os gráficos gerados pelo analisador de gases infravermelho durante o experimento. Finalmente, será apresentada uma conclusão comparando os combustíveis analisados e, assim, mostrando as suas principais diferenças com relação à aplicabilidade e viabilidade econômico-ambiental.

2 Biomassa

A biomassa pode ser descrita em geral como a massa total de matéria orgânica que é acumulada em um espaço vital. Assim, pertencem à biomassa todas as plantas e todos os animais incluindo os seus resíduos, bem como os materiais orgânicos convertidos em resíduos nas indústrias transformadoras de madeira e alimentos [3]. Um compêndio referente a potenciais aplicações de geração de energia com biomassa é encontrado em [4].

Nos dias atuais, a energia produzida através da biomassa tem muitos defensores que acreditam que esta é uma alternativa importante para países em desenvolvimento [1]. Os dejetos gerados pela criação de animais são considerados um dos grandes problemas ambientais do agronegócio, portanto, a tendência mundial é que estes tipos de resíduos sejam reaproveitados cada vez mais em sistemas de cogeração baseados a gás combustível. As matérias orgânicas resultantes dos dejetos supracitados são utilizadas como alimento de bactérias metanogênicas (que são bactérias que participam na formação do gás metano), as quais dão origem ao biogás.

É estimada a existência de 2 trilhões de toneladas de biomassa no mundo, nesse caso, são previstas 400 toneladas per capita, correspondente a oito vezes o consumo de energia primária no mundo, atualmente de 400 EJ/ano [1]. De acordo com o relatório do BEN (Balanço Energético Nacional) de 2020, a capacidade instalada de geração elétrica por fonte de biomassa em 2019 foi de 14.978 MW, correspondendo a uma oferta interna de energia elétrica por fonte de biomassa de 8,4% [5].

2.1 Origem do Biogás

Van Helmont foi um dos primeiros cientistas no século XVII que observou a produção de combustível de matéria orgânica em estado de decomposição. Alessandro Volta, em 1776,

já estava relacionando a variação da produção de biogás com a quantidade de matéria orgânica em regiões pantanosas. Estes locais reuniam as condições necessárias para a produção de biogás que eram: matéria orgânica e ausência de oxigênio suficiente para as bactérias de digestão anaeróbia. Reiset detectou em 1856, a formação de metano em estrumeiras, propondo assim um estudo para estabelecer o processo de decomposição anaeróbia. Em 1868, Bechamp chegou à conclusão de que o metano era formado a partir da ação de microrganismos. Popoff, em 1875, pesquisou diferentes tipos de matérias primas para obtenção do metano. Na sequência, até o ano de 1967, diversos experimentos descreveram como era o comportamento destes microrganismos e, também, em quais etapas do processo de digestão anaeróbia cada um destes se encontrava [6].

Em 1973, foi deflagrada a crise energética e a utilização dos biodigestores se tornou uma opção bastante promissora tanto para países do terceiro mundo, quanto para países ricos. Mas, os países que se destacaram em sua utilização foram a China e a Índia, e na China seu uso foi voltado prioritariamente por questões militares, temendo que um ataque nuclear pudesse paralisar principalmente as atividades industriais. Com a criação de pequenas unidades de biodigestão, a China acreditava poder minimizar seus danos. Já os indianos, utilizam-se dos biodigestores para atender o seu imenso déficit de energia. Isso tudo também contribuiu para a criação de dois modelos diferentes de biodigestor: o modelo chinês, mais simples e econômico e o modelo indiano, mais técnico visando o melhor aproveitamento na produção do biogás [1].

2.2 Biodigestores

Teoricamente, o biodigestor não produz necessariamente o biogás, mas cria as condições adequadas para conter a biomassa e para que as bactérias metanogênicas atuem na produção do gás. Muitos projetos de biodigestores são encontrados, mas basicamente são constituídos de duas partes: o tanque digestor, onde ocorre a metanogênese e o gasômetro onde é armazenado o biogás. Também há de se destacar que existem dois tipos de sistema: o contínuo e o intermitente.

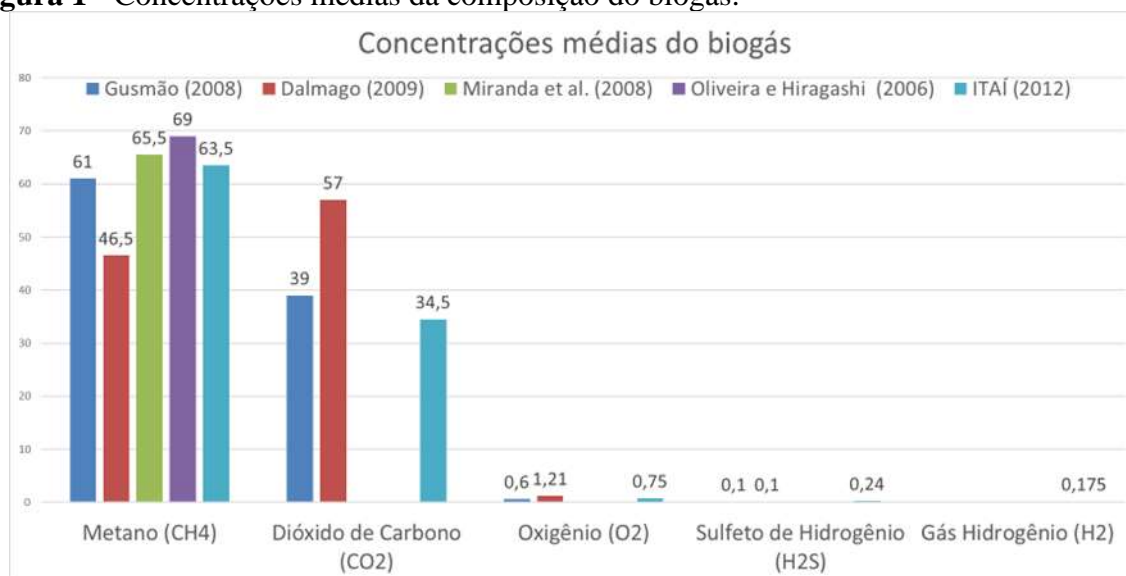
O contínuo é o mais difundido e é de fácil adaptação à maioria das biomassas, recebendo cargas periódicas e descarregando o resíduo, que pode ser utilizado como biofertilizante, automaticamente. Já o sistema intermitente é utilizado especificamente para biomassas que possuem uma decomposição mais lenta com um longo período de produção. Nesse caso, o sistema recebe toda a carga de biomassa e realiza todo o processo de biodigestão por batelada. Somente após o ciclo terminado, pode ser esvaziado e recarregado [1].

Em função de suas características, o sistema contínuo é o mais utilizado, tendo por modelos conhecidos o chinês e o indiano. Ambos são construções que possuem a sua maior parte disposta abaixo do nível do solo. A diferença básica entre eles é que o indiano possui uma campânula de ferro. Já o modelo chinês possui uma campânula fixa, que é construída em alvenaria.

2.3 Biogás

É um gás natural obtido através da fermentação anaeróbia de dejetos de animais, de resíduos vegetais e de lixo. É composto por uma mistura de gases, tendo sua concentração estabelecida pelo tipo de resíduo e das condições do processo de biodigestão. Sua constituição é dada basicamente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros. Na figura 1 encontram-se as concentrações do biogás, conforme [7].

Figura 1 - Concentrações médias da composição do biogás.

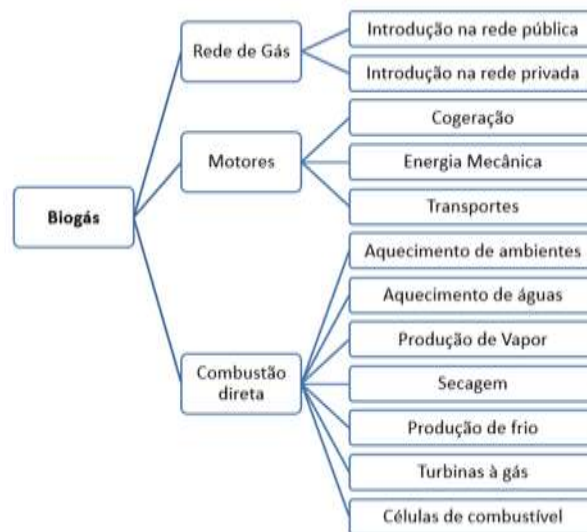


Fonte: Os autores, 2021.

2.3.1 Utilização do Biogás

Tendo suas características semelhantes ao gás natural, pode-se elencar possíveis aplicações para utilização do biogás figura 1, conforme [1].

Figura 2 - Principais opções para utilização/conversão do biogás



Fonte: Os autores, 2021.

O biogás como combustível, apresenta resultado de uma ou mais formas de conversão de energia: elétrica; térmica; e/ou mecânica. Sendo assim, podendo contribuir na economia de recursos e, conseqüentemente, despertando interesse na sua utilização.

2.4 Cogeração de energia elétrica

A produção resultante da conversão de energia térmica em elétrica pode ser definida como cogeração, não importando o processo ou equipamento utilizado. Em grupos motor-geradores (GMG) a eficiência de conversão em energia elétrica é reduzida de 25 % a 38 % em relação à energia disponível de biogás. Em geral, os motores movidos a diesel possuem um rendimento de 3 a 5 pontos percentuais a mais que os motores de ciclo Otto operados a gás [1].

A energia restante do biogás (60-75%) é convertida em energia térmica, tais como: gases de escape (25-35%); sistema de arrefecimento (12-18%); óleo lubrificante do motor (5-10%); e outra parte por radiação (10-25%) [1].

3 Material e Método

Foi realizada uma pesquisa exploratória, envolvendo diversos artigos em periódicos, assim como monografias, dissertações e teses acadêmicas voltadas à área de cogeração, baseada na produção de energia elétrica por meio da conversão dos combustíveis de biogás, gás natural veicular (GNV) e gasolina, utilizados nos GMG instalados em suíno e/ou bovinoculturas.

Para avaliar a exequibilidade econômico-ambiental dos combustíveis (biogás, GNV e gasolina), realizou-se uma análise detalhada dos parâmetros relacionados à cogeração, tais como: (1) eficiência global para diferentes combustíveis; (2) poder calorífico inferior (PCI) de cada combustível; (3) densidade compensada; (4) produção de gases resultantes da combustão

(CO₂, CO, HC e NO_x) e emitidos na atmosfera; (5) identificar o combustível com a maior capacidade de impacto ambiental, devido à quantidade de GEE emitidos na atmosfera; e (6) custo de consumo envolvido de cada combustível para gerar a mesma energia ou potência ativa durante a operação do GMG.

3.1 Características dos equipamentos (GMG e analisador de gases) e combustíveis (Biogás, GNV e gasolina) utilizados no experimento [8]

A seguir serão apresentadas três tabelas contendo, basicamente: especificações técnicas do GMG (tabela 1); especificações do biogás, GNV e gasolina (tabela 2); e equivalentes energéticos de GNV e gasolina em relação ao metro cúbico (m³) de biogás (tabela 4).

Para realizar as medições e quantificar as emissões de gases poluentes (CO₂, CO, HC e NO_x), será inserido, na descarga do motor, um analisador de gases infravermelho, onde, nesta ocasião, a carga (P) do GMG será submetida a quatro variações: 25; 50; 75; e 100 %. O analisador também fornece valores de **Consumo Específico de Combustível** (CEC) para as cargas supracitadas e, com o valor de PCI dado na tabela 3, encontra-se, por meio da equação (2), as eficiências globais de cada combustível (biogás, GNV e gasolina).

O cálculo do volume de biogás será realizado por meio da equação (9), e, utilizando-se da tabela 4, faz-se a conversão do volume encontrado em seus equivalentes de GNV (metro cúbico) e gasolina (litro). Após a transformação equivalente de cada volume, utiliza-se a equação (10) para calcular os custos mensais dos diferentes combustíveis, considerando, para tal, o mesmo consumo de energia elétrica (kWh) do GMG, durante 720 h/mês.

Recorrendo às medições dos gases e verificações dos gráficos gerados pelo analisador, assim como aos cálculos de eficiência global, volume consumido e custo mensal de cada combustível, foi possível avaliar não somente os impactos ambientais causados pelas emissões de GEE durante o processo de combustão do GMG, mas também as questões econômicas relacionadas aos volumes de combustível consumidos mensalmente.

Tabela 1 - Especificações técnicas do GMG, modelo B4T 5000

Equipamentos	P _n (kW)	P _{máx} (kW)	f (Hz)	V _n (saída) (V _{CA}) 1F	I _{mín} (A) (220V _{CA})	I _{máx} (A) (110V _{CA})	FP (Cos φ)
Fabricante: Branco. Modelo: B4T 5000	4	4,5	60	120/220	26,2	29,1	0,80
Analisador de gases Modelo Napro PC- multigás,	Medição e monitoramento de CO, CO ₂ , HC, NO _x e O ₂ baseado no método de medição de infravermelho não dispersivo.						

Fonte: Os autores, 2021.

Tabela 2 - Especificações dos combustíveis [8,9]:

GRANDEZAS LEVANTADAS	COMBUSTÍVEIS		
	Biogás	GNV	Gasolina
PCI _{comp} [kWh/kg] [8]	6,83	10,47	12,50
Densidade relativa (adimensional) [8]	0,8148	0,6481	0,7200
CEC (kg/kWh) a plena carga (100% ou P = 4kW) [8]	0,8432	0,4122	0,5710
Potência de saída (kW) do GMG – nominal [8]	4	4	4
Concentração de metano (%CH ₄) [8,9]	66	89	0
Concentração de dióxido de carbono (%CO ₂) [8,9]	29	1,5	0

Fonte: Os autores, 2021.

3.2 Parâmetros a serem analisados

Neste item, serão apresentadas as principais equações relacionadas aos parâmetros que serão analisados e avaliados neste estudo, tais como: eficiência global (η) de conversão energética; vazão mássica (Q) ou instantânea de combustível compensada; poder calorífico inferior de combustível compensado (PCI_{comp.}); e cálculo de custo mensal (C_m).

3.2.1 Eficiência global de conversão energética (η)

Ela está relacionada diretamente com as grandezas de: carga; temperatura; e/ou rendimentos (motor e gerador). Enquanto possui uma relação inversa com os seguintes parâmetros: vazão mássica; poder calorífico inferior compensado; temperatura medida ou desejada; consumo específico de combustível; e/ou concentração de combustível [7,10].

Para mensurar a eficiência global (η) variou-se a carga do GMG em: 25, 50, 75 e 100 %, e o seu cálculo foi baseado nas equações de (1) a (4):

$$n = \frac{P}{Q \cdot PCI_{comp.}} \quad (1)$$

$$n = \frac{1}{cec \cdot PCI_{comp.}} \quad (2)$$

$$n = \frac{T_{medida}}{cec \cdot \%c \cdot \rho_{padrão} \cdot PCI_{padrão} \cdot T_{padrão}} \quad (3)$$

$$n = n_{motor} * n_{gerador} \quad (4)$$

Onde:

- η : eficiência global de conversão do combustível em energia elétrica (pu);
- η_{motor} : eficiência do motor (pu);
- $\eta_{gerador}$: eficiência do gerador (pu);
- P : potência ativa gerada (kW);

- **%C:** concentração de combustível ou gás (%);
- **$\rho C_{comp.}$:** densidade do combustível compensada (kg/m^3);
- **$PCI_{padr\tilde{a}o}$:** poder calorífico inferior padrão do combustível (kWh/kg);
- **$T_{padr\tilde{a}o}$:** temperatura do gás em condições padrões ($273,15 \text{ K}$);
- **T_{medida} :** temperatura medida do gás (K);
- **CEC ou cec:** consumo específico de combustível (kg/kWh);
- **Q:** vazão mássica ou instantânea de combustível do GMG (kg/h).

3.2.2. Vazão mássica ou instantânea de combustível compensada (Q) [7,10]:

É a quantidade de combustível necessária por unidade de tempo para alimentar o GMG, variando diretamente com taxa de temperatura.

$$Q = Q_{comp.} = Q_{padr\tilde{a}o} * \frac{T_{medida}}{T_{padr\tilde{a}o}} = cec.P \quad (5)$$

Onde:

- **Q:** vazão mássica ou instantânea de combustível do GMG (kg/h);
- **$Q_{padr\tilde{a}o}$:** vazão mássica padrão do combustível ou gás (kg/h);
- **T_{medida} :** temperatura medida do gás (K);
- **$T_{padr\tilde{a}o}$:** temperatura do gás em condições padrões ($273,15 \text{ K}$);
- **CEC ou cec:** consumo específico de combustível (kg/kWh);
- **P:** potência ativa gerada (kW).

2.2.3. Consumo específico de combustível (CEC ou cec)

É responsável por mensurar o quanto determinado motor é eficiente ao se utilizar certo tipo de combustível, apresentando relação inversa no que tange à eficiência global [7,10].

As medições de emissões dos gases (CO , CO_2 , HC , NO_x e O_2), resultantes da combustão de biogás, GNV e gasolina, foram realizadas por meio do analisador de gás, marca NAPRO PC-MULTIGÁS, instalado na saída de descarga dos gases do GMG, onde a carga aplicada foi variada em 25, 50, 75 e 100 % [8].

2.2.4. Poder calorífico inferior de combustível compensado ($PCI_{comp.}$)

É diretamente proporcional a concentração e densidade compensada de gás, porém inversamente proporcional a temperatura medida ou desejada (T_{medida}), conforme equação (6) [7,10,11]:

$$PCI_{comp.} = \%C * \rho_{comp.} * PCI_{padr\tilde{a}o} \quad (6)$$

Onde:

- **PCI_{comp.}**: poder calorífico inferior de combustível compensado (kWh/kg);
- **PCI_{padrão}**: poder calorífico inferior padrão do combustível (kWh/kg);
- **%C**: concentração de combustível ou gás (%);
- **ρ_{comp.}**: densidade do combustível compensada (kg/m³).

2.2.5. Densidade compensada (ρ_{comp}) e o do combustível consumido (V)

São calculados pelas equações de 7 a 9 [7,10,11]:

$$\rho_{comp.} = \rho_{padr\tilde{a}o} * \frac{T_{padr\tilde{a}o}}{T_{medida}} \quad (7)$$

$$\rho_{comp.} = \rho_R * \rho_{H2O} \quad (8)$$

$$V = \frac{M}{\rho_{comp.}} = \frac{cec. P. \Delta t}{\rho_{comp.}} \quad (9)$$

Onde:

- **ρ_{comp}**: densidade compensada (kg/m³);
- **ρ_{padrão}**: densidade dos combustíveis ou gases em condições padrões (kg/m³);
- **T_{medida}**: temperatura medida do gás (K);
- **T_{padrão}**: temperatura do gás em condições padrões (273,15 K);
- **ρ_R**: densidade relativa do combustível (adimensional);
- **ρ_{H2O}**: densidade da água padrão (1000 kg/m³);
- **V**: volume do combustível consumido (m³);
- **M**: massa do combustível analisado (kg);
- **CEC ou cec**: consumo específico de combustível (kg/kWh);
- **P**: potência ativa gerada (kW);
- **Δt**: Variação de tempo desejada (h).

2.2.6. Cálculo de viabilidade econômica (R\$/kWh)

Na base de cálculo foi considerado os volumes totais (m³) de biogás, GNV e gasolina, consumidos pelo GMG, durante um período de 30 dias, funcionando 24 h/dia.

Primeiramente, para calcular o volume do biogás utilizou-se a equação (9) e, em seguida, utilizou-se a tabela 3 para efetuar as conversões de biogas para GNV (m³) e gasolina (litro) respectivamente.

Em uma segunda etapa, a quantidade de cada combustível é multiplicada pelos seus respectivos preços por volume (R\$/m³; R\$/l). Sendo assim, por meio da equação (10) encontram-se seus respectivos custos mensais (R\$).

O custo do biogás, em 2006, foi de R\$ 0,229/m³ para bovinos e de R\$ 0,063/m³ para suínos [1,12,13].

Atualizando os referidos valores para 2021, encontram-se: R\$ 0,40/m³ para bovinos; e R\$ 0,17/m³ para suínos. Uma vez encontrado o volume total consumido de cada combustível (equação 9), faz-se a conversão equivalente, de acordo com a tabela 4, e, em seguida, acha-se os respectivos custos mensais (R\$) de biogás, GNV e gasolina, utilizando-se da equação 10.

$$C_m = C_{2021} * V \quad (10)$$

Onde,

- **C_m**: custo mensal de combustível (biogás, GNV ou gasolina) em R\$;
- **C₂₀₂₁**: custo por metro cúbico de biogás em 2021 (R\$/m³);
- **V**: volume mensal consumido de combustível (m³).

Tabela 3 - Equivalentes energéticos por metro cúbico (1 m³) de biogás

Combustível	Quantidade equivalente
Biogás	1 m ³
Gasolina	0,98 l
GNV	1,5 m ³
Eletricidade	2,21 kWh

Fonte: Adaptada de Farret (2012).

3 Análise dos resultados e discussão

Os principais produtos gerados pela combustão de combustíveis (biogás, GNV e gasolina, etc) são: dióxido de carbono (CO₂); monóxido de carbono (CO); hidrocarbonetos (HC), óxidos nitrosos (NO_x); entre outros. Dessa forma, a emissão desses tipos de gases, na natureza, pode contribuir direta ou indiretamente para o agravamento de impactos ambientais, potencial de aquecimento global e problemas à saúde da população, visto que os referidos gases podem ser classificados como poluentes do meio ambiente e, também, como GEE [14,15], devido à sua concentração na atmosfera resultar em retenção de calor, sendo, o CO₂, de acordo com o protocolo de quioto, o gás que possui a maior contribuição para o aquecimento global, cerca de 60 %. Abaixo serão realizadas algumas comparações entre combustíveis (biogás, GNV e gasolina) que alimentam o GMG, a fim de verificar às seguintes grandezas: (1) emissões de CO₂, CO, HC e NO_x; e (2) eficiências globais. Por meio de resultados encontrados, será

verificado qual o combustível que apresenta uma maior viabilidade quando empregado para alimentar GMG em sistema de cogeração (suíno ou bovinocultura).

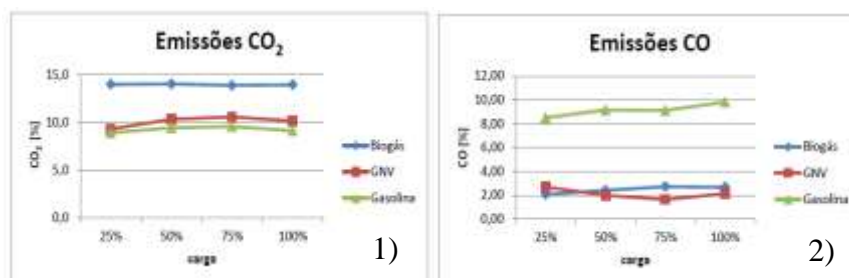
Tabelas 4 - Dados encontrados pelo analisador de gases infravermelho:

CARGA (%)	BIOGÁS					
	CEC (kg/kWh)	η (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	No _x (ppm)
25	1,838	8,1	2,06	43	120,6	0,081
50	1,155	12,4	2,41	45	197,8	12,4
75	0,906	16,2	2,72	44,4	258,2	16,2
100	0,850	17,4	2,67	77,8	424,2	17,4
CARGA (%)	GASOLINA					
	CEC (kg/kWh)	η (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	No _x (ppm)
25	1,348	5,9	8,5	152,6	119,6	0,059
50	0,846	9,5	9,15	183,4	175,4	0,095
75	0,634	12,6	9,12	166,6	218,2	0,126
100	0,571	14	9,81	176,6	221,4	0,14
CARGA (%)	GNV					
	CEC (kg/kWh)	η (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	No _x (ppm)
25	1,019	9,4	2,68	92,2	191	0,094
50	0,541	17,7	1,99	64,2	500,4	17,7
75	0,436	21,9	1,64	59,6	801,6	21,9
100	0,412	23,2	2,14	55,8	984	23,2

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

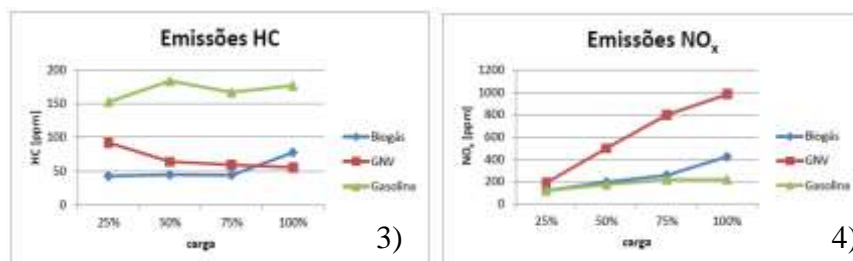
A seguir são apresentados os gráficos gerados a partir da tabela 4.

Figura 3 - Emissões de CO₂ e CO em função da carga aplicada ao GMG



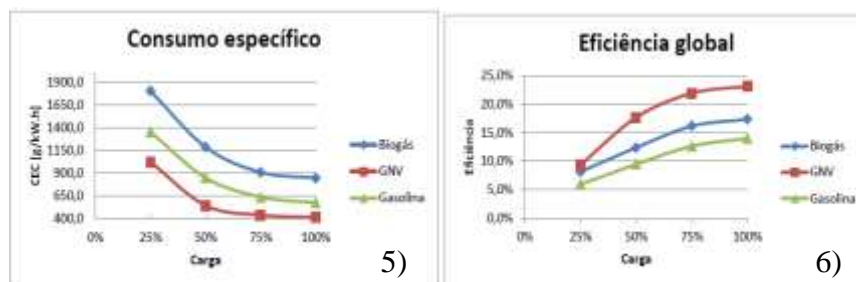
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 4 - Emissões de HC e NO_x em função da carga aplicada ao GMG



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 5 - Consumo específico de combustível e Eficiência global em função da carga aplicada ao GMG



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

De acordo com as figuras 3,4 e 5, é possível notar que:

- (i) a análise do gráfico 1 (emissão de gases poluentes): o biogás apresentou maior emissão de CO₂, na seguinte ordem decrescente: biogás (± 14 %) > GNV(± 10 %) > gasolina (± 8 %);
- (ii) a análise do gráfico 2 e 3 (emissão de gases poluentes): a gasolina apresentou maior emissão de CO e HC, na seguinte ordem decrescente: (a) emissão de CO: gasolina (6-10%) > biogás (2-3%) > GNV (2-3%) e (b) emissão de HC: gasolina (150 a 180 ppm) > GNV (50 a 100 ppm) > biogás (49 a 79 ppm);
- (iii) a análise do gráfico 4 (emissão de gases poluentes): o GNV apresentou maior emissão de NOx; GNV (200 a 1000 ppm) > biogás (110 a 402 ppm) > gasolina (110 a 200 ppm);
- (iv) a análise do gráfico 5 (consumo específico de combustível): o biogás apresentou maior consumo específico de combustível, na seguinte ordem decrescente: biogás (850 a 1838 g/kWh) > gasolina (571 a 1348 g/kWh) > GNV (412 a 1019 g/kWh), e;
- (v) a análise do gráfico 6 (eficiência global): o GNV apresentou maior eficiência global, na seguinte ordem decrescente: GNV (9,4 a 23,2 %) > biogás (8,1 a 17,4 %) > gasolina (5 a 14 %).

Sendo assim, o GNV foi o combustível que apresentou melhor viabilidade ambiental, em relação à redução da emissão de GEE proveniente da combustão do GMG, indicando, portanto, que este combustível possui um potencial de aquecimento global reduzido, quando comparado aos outros tipos (biogás e gasolina) utilizados pelos GMG em sistemas de cogeração.

Por ter apresentado um baixo poder calorífico inferior (PCI), o CEC do biogás foi maior em relação ao mesmo motor operando com GNV ou gasolina [8]. No entanto, devido ao valor de seu PCI ter sido considerado muito inferior ao da gasolina, por consequência, possui melhor eficiência global em relação a este combustível, ficando abaixo apenas a do GNV, pois, este último, além de possuir um PCI não tão elevado, em comparação com o biogás, também apresentou um CEC menor em relação aos outros dois tipos de combustíveis (biogás e

gasolina). Assim sendo, o GNV foi o combustível que apresentou a eficiência global mais elevada, de acordo com o gráfico 6 da figura 5.

3.2 Análise da viabilidade econômica

De acordo com tabela 6, o biogás (proveniente de suíno ou bovino) foi o combustível que apresentou uma melhor viabilidade econômica comparada aos outros combustíveis, ou seja, colocando os combustíveis na ordem do menos para o mais oneroso, temos: biogás suíno; biogás bovino; GNV; e gasolina.

Tabela 6 - Custo mensal por volume consumido para a mesma demanda de eletricidade.

GRANDEZAS CALCULADAS	COMBUSTÍVEIS			
	Biogás (Suíno)	Biogás (Bovino)	GNV	Gasolina
Volume mensal equivalente em relação ao biogás – 24h/dia ou 720 h/mês - (aplicações da equação 9 e da tabela 4).	2,980 m ³ (V _{biogás})	2,980 m ³ (V _{biogás})	4,470 m ³ (V _{biogás} x 1,5)	2,920 l (V _{biogás} x 0,98)
Consumo mensal de eletricidade constante (aplicação tabela 4) $C_{\text{BIOGÁS}}=C_{\text{GNV}}=C_{\text{GASOLINA}}=V_{\text{biogás}} \times 2,21\text{kWh}/\text{m}^3$	6,586 kWh	6,586 kWh	6,586 kWh	6,586 kWh
Valor do m ³ e l atualizado (2021) [1,11]	R\$ 0,17/m ³	R\$ 0,40/m ³	R\$ 3,19/m ³	R\$ 5,20/l
Custo mensal por volume consumido (aplicação da equação 10)	R\$ 0,51	R\$ 1,19	R\$ 14,26	R\$ 15,18

Fonte: Os autores, 2021.

4 Conclusão

Este artigo comparou a aplicação de três combustíveis (biogás, GNV e gasolina) nas condições de diferentes cargas (25, 50, 75 e 100%) para a geração de energia elétrica em um GMG modelo B4T 5000, fabricante Branco. Após a coleta dos dados reais dos testes obtidos em um analisador de gases modelo Napro PC-Multigás, aplicou-se o cenário da produção de energia elétrica por um período de 720 horas por mês. Observa-se neste estudo que a gasolina demonstrou maior potencial de geração de gases do efeito estufa, e este fenômeno ocorreu devido ao maior nível de emissão de CO e HC durante a combustão, na seguinte ordem de emissão: CO (gasolina > biogás > GNV) e HC (gasolina > GNV > biogás). Já em relação à eficiência global de conversão energética, o GNV mostrou uma melhor eficiência seguida do biogás e da gasolina. No tocante ao consumo específico do combustível, o GNV também foi mais eficiente, tendo seu consumo menor que a gasolina e o biogás.

Entretanto, sendo considerado o mesmo consumo energético do GMG, o custo do volume produzido de biogás foi menor em relação ao GNV e à gasolina. Assim sendo, o GNV

demonstrou melhor viabilidade ambiental, enquanto o biogás apresentou melhor viabilidade econômica.

Dessa forma, este trabalho contribuiu para uma visão mais aberta das práticas de geração de energia por biogás, pois os impasses provenientes dos dejetos dos grandes produtores de suíno e bovinocultura abrangem impactos ambientais danosos ao planeta. Porém, ao considerar um cenário de fazendas produtoras dessas culturas, cuja logística de abastecimento e a infraestrutura e para implantação de reservatórios de combustíveis seja complexa, o sistema de cogeração utilizando o biogás torna-se uma solução para ser aplicada e apresenta uma oportunidade para redução da degradação ambiental, pois, os dejetos provenientes dos criadouros, são acondicionados e destinados à produção de energia, não mais expostos diretamente ao meio ambiente, evitando tornar-se um vetor de contaminação do solo, subsolo, lençóis freáticos e sistemas fluviolacustres.

5 Referências

- [1] COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do Biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Cascavel-PR, 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - UNIOESTE/CCET – Cascavel – PR.
- [2] FREITAS, G. M. **Biomassa, uma fonte de energia**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016. 124 f. Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Elétrica.
- [3] SOUZA, S. N. M et al. **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura**. Acta Scientiarum Technology, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.
- [4] MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARAES, V. **Uso da Biomassa para a Geração de Energia**. Brasília-DF.
- [5] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 16 set. 2022.
- [6] SILVA, R.L. **Caracterização de biodigestores com controle de temperatura com enfoque na produção de biogás e metano na digestão anaeróbica**. 2016. 44 p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- [7] SILVA, F. P. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura**. Cascavel, 2015. 60 p. Dissertação (Mestrado do

programa de Pós-Graduação Strict Sensu em em Engenharia de energia na agricultura) - UNIOESTE/CCET – Cascavel – PR.

[8] LEMOS, M. V. D. VIII. **Uso Eficiente de Biogás de Esgoto em Motores Geradores**. 2013. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola Politécnica, 2013.

[9] CARVALHO, F. I. M.; DANTAS FILHO, H. A. D. **Estudo da qualidade da gasolina tipo A e sua composição química empregando análise de componentes principais**. Química Nova, v. 37, n. 1, p. 33-38, 2014.

[10] MITZLAFF, K. V. Engines for biogas. **German Appropriate Technology Exchange (GATE), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)**, 1988.

[11] HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. 1ª ed., New York: McGraw-Hill Education, 2018.

[12] FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 2ª ed. revista e ampliada, Santa Maria: Editora UFSM, 2010.

[13] CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M.S.T.; BUENO, O. C. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica**, Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.5, p.831-844, set./out. 2010.

[14] TEIXEIRA, E. C. FELTRES, S. SANTANA, E.R.R.; **Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre**, Rio Grande do Sul. Química Nova, v.31, n.2, p.244-248, 2008.

[15] AGUIAR, P. R. M. **Coleção ambiental – volume III, protocolo de Quioto, correlata e legislação correlata**. Senado Federal, Secretaria Especial de Editoração e Publicações, Brasília, DF, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2005.

[14] TEIXEIRA, E. C. FELTRES, S. SANTANA, E.R.R.; Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Química Nova**, v.31, n.2, p.244-248, 2008.

[15] AGUIAR, P. R. M. **Coleção ambiental – volume III, protocolo de quioto, correlata e legislação correlata**. Senado Federal, Secretaria Especial de Editoração e Publicações, Brasília, DF, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2005.