

**TESTE DE COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL EM UM MOTOR DO CICLO OTTO
ASPIRADO: UMA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA UTILIZANDO O SOFTWARE DIESEL-RK**

**RENEWABLE FUEL TESTING IN AN Aspirated OTTO CYCLE ENGINE: AN
EFFICIENCY ANALYSIS USING DIESEL-RK SOFTWARE**

Simone dos Santos Ofrante
Faculdade Multivix Cachoeiro – Cachoeiro de Itapemirim – Espírito Santo – Brasil
siofrante@hotmail.com

Gabriel de Ribeiro Rezende
Faculdade Multivix Cachoeiro – Cachoeiro de Itapemirim – Espírito Santo – Brasil

Matheus Prado Cardoso
Faculdade Multivix Cachoeiro – Cachoeiro de Itapemirim – Espírito Santo – Brasil
Orientador
matheuscardoso5@professor.multivix.edu.br

Valquiria Cruz Cereza
Faculdade Multivix Cachoeiro – Cachoeiro de Itapemirim – Espírito Santo – Brasil
Coorientadora
valquiria.cereza@multivix.edu.br

RESUMO

Objetivo: Analisar o comportamento do biogás, que é uma opção de combustível renovável, em motores ciclo Otto aspirados. **Métodos:** Comparou-se com o combustível fóssil, gasolina, comprovando ou não sua viabilidade através de dados técnicos obtidos pelo *software* DIESEL-RK e gráficos comparativos reproduzidos no Excel. **Resultados:** O consumo específico de combustível é o que mais apresenta discrepância de dados, sendo necessário quase o triplo de biogás no motor 1.8 para que ele chegue próximo da eficiência e potência apresentadas para o motor 1.8 com gasolina. Na eficiência volumétrica todos os valores se mantêm próximos, tendo uma diferença de valores nas menores rotações. Dessa forma, evidencia-se a capacidade que o biogás possui de substituir a gasolina, sendo mais vantajoso em motores com menores cilindradas, enquanto motores com altas cilindradas irão requerer um volume maior de biogás e apresentarão menos potência e eficiência. **Conclusões:** Pode-se observar o *software* DIESEL-RK é bastante utilizado nas mais diversas aplicações e para variados fins de estudos. Baseado no que foi apresentado, o biogás se mostrou um recurso eficaz diante da urgência que o mundo enfrenta com o aquecimento global.

Palavras-Chave: Biogás. Combustível renovável. Eficiência. Motor do ciclo otto aspirado. Teste de combustível.

ABSTRACT

Objective: Analyze the behavior of biogas, which is a renewable fuel option, in naturally aspirated Otto cycle engines. **Methods:** It was compared with the fossil fuel, gasoline, proving or not its viability through technical data obtained by the DIESEL-RK software and comparative graphs reproduced in Excel. **Results:** Specific fuel consumption is the one that presents the most discrepancy in data, requiring almost triple the amount of biogas in the 1.8 engine for it to come close to the efficiency and power presented for the 1.8 engine with gasoline. In volumetric efficiency, all values remain close, with a difference in values at the lowest speeds. This highlights the ability of biogas to replace gasoline, being more advantageous in engines with smaller displacements, while engines with higher displacements will require a greater volume of biogas and will have less power and efficiency. **Conclusions:** It can be seen that the DIESEL-RK software is widely used in the most diverse applications and for various study purposes. Based on what was presented, biogas proved to be an effective resource given the urgency that the world faces with global warming.

Keywords: Biogas. Renewable fuel. Efficiency. Aspirated otto cycle engine. Fuel test.

1 Introdução

Nos últimos anos, catástrofes naturais decorrentes do uso indevido dos recursos naturais geraram crescentes reflexões sobre o meio ambiente. O papel do homem em sua preservação e um maior estado de alerta em frente ao aumento da temperatura terrestre, se tornaram assuntos amplamente debatidos em diferentes campos de estudos. Logo, os combustíveis renováveis são uma forma de energia limpa capaz de mitigar os problemas provenientes da queima dos combustíveis fósseis.

A engenharia pesquisa, há muito tempo, o comportamento de diferentes combustíveis em motores a combustão interna, como por exemplo, os motores ciclo Otto. A partir disso propôs-se o estudo de alternativas de combustíveis, usando o biogás como alternativa frente ao álcool, à gasolina e ao Gás Natural Veicular (GNV).

Um exemplo de combustível renovável já amplamente utilizado e de fácil acesso é o biogás. Este é compreendido como resultado do processo de digestão dos resíduos animais, que quando tratado e transformado em biocombustível, pode ser empregado para aquecer ambientes, preparo de alimentos e quando empregado em conjuntos de motores-geradores, para gerar energia (SOUZA *et al.*, 2004). Isto é, um combustível proveniente da decomposição de materiais orgânicos que, após tratado, pode ser utilizado como fonte de energia.

Este artigo visa analisar o comportamento do biogás, que é uma opção de combustível renovável, em motores ciclo Otto aspirados

2 Material e Métodos

Buscou-se entender o comportamento da queima da mistura e a quantidade de energia gerada. Comparou-se com o combustível fóssil, gasolina, comprovando ou não sua viabilidade através de dados técnicos obtidos pelo *software* DIESEL-RK e gráficos comparativos reproduzidos no Excel.

3 Resultados e Discussão

Biogás

O biogás pode ser gerado através da biomassa, que por sua vez, entende-se como a quantidade total de massa da matéria orgânica agrupada em um recinto substancial. Ou seja, a biomassa agrupa todos os seres vivos que residem em determinada área, assim como, seus depósitos (SOUZA *et al.*, 2004).

Esses depósitos podem ser entendidos como resíduos de atividade agrícola, urbanos, lixo doméstico e até mesmo lodo de esgoto. Por sua vez, esses sedimentos de matéria orgânica são degradados através de digestão anaeróbica, responsável pela geração de biogás.

A composição do biogás consiste numa combinação de gases que podem variar em tipo e quantidade devido ao tipo e particularidades dos substratos, tal como o modo que foi realizado o processo de digestão anaeróbica do produto (SOUZA *et al.*, 2004). Segundo Costa *et al.*, 2021, o biogás tem como compostos principais o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), apresentando em média cerca de 55% a 70% de CH₄ e 30% a 45% de CO₂. Outros gases como ácido sulfídrico (H₂S) e amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (O₂), podem ser encontrados em pequenas quantidades. Na tabela 1 estão apresentados os componentes principais do biogás e suas quantidades concentradas.

Tabela 1 – Composição do biogás

Gás	Símbolo	% no Biogás
Metano	CH ₄	50 – 80 %
Dióxido de Carbono	CO ₂	20 – 40 %
Hidrogênio	H ₂	1 - 3 %
Nitrogênio	N ₂	0,5 - 3 %
Sulfídrico e Outros	H ₂ S, CO, NH ₃ .	1 - 5 %

Fonte: (LA FARGE, 1979 *apud* SOUZA *et al.*, 2004, p.4)

O biogás deve ser tratado e purificado para garantir uma alta capacidade calorífica, desempenho térmico e eliminação da propriedade corrosiva do gás sulfídrico quando combinado com água. Além das razões citadas anteriormente para o tratamento do biogás, outros motivos são devido a necessidade de adequar o biogás para sua utilização em outras

aplicações como geradores, caldeiras e veículos, e, monitorizar o gás produzido. Ainda para outras aplicações, poder ser que seja preciso remover compostos gasosos.

Esta é uma das três razões pelas quais é necessário que as outras duas se devam à necessidade de cumprir as especificações exigidas para cada utilização (geradores, caldeiras, veículos), bem como à necessidade de monitorizar o gás produzido. De acordo com a aplicação, pode ser necessário remover compostos gasosos (ZANETTE, 2009 *apud* MACHADO, 2015, p.24). Na tabela 2 é possível visualizar quais compostos devem ser tratados ou removidos do biogás de acordo com a sua aplicabilidade.

Tabela 2 – Demonstrativo da necessidade de remoção de compostos conforme aplicação do biogás.

APLICAÇÃO	H₂S	CO₂	H₂O
Caldeiras	<1000 ppm	Não	Não
Fogões	Sim	Não	Não
Cogeração	<1000 ppm	Não	Condensação do vapor
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: (ZANETTE, 2009 *apud* MACHADO, 2015, p.25)

Além de ser um substituto para os combustíveis fósseis que é um dos principais agravantes do efeito estufa, o biogás colabora com a eliminação de depósitos orgânicos. Outra vantagem da produção do biogás, é que seu subproduto, resultante do processo de digestão anaeróbica, pode ser utilizado como fertilizante na produção agrícola e na melhoria da saúde do solo, por ser rico em nutrientes.

Motor ciclo otto aspirado

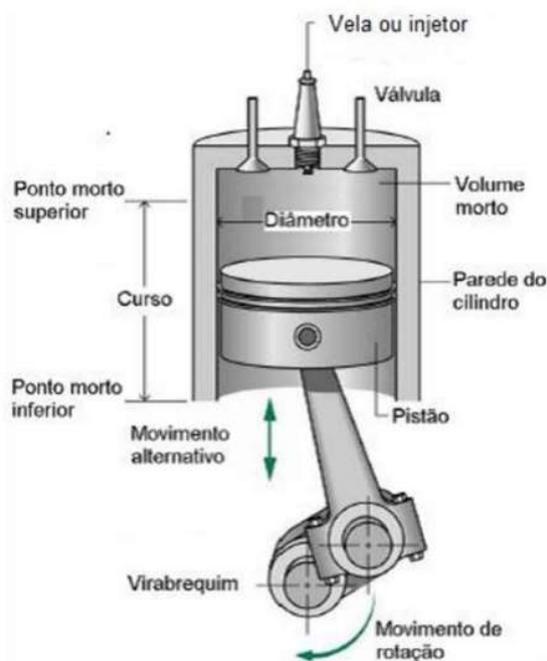
Os motores de ciclo Otto recebem essa nomenclatura devido ao seu desenvolvedor Nikolaus Otto, responsável por desenvolver um motor quatro tempos em 1876. Otto ficou conhecido como o inventor do motor moderno de combustão interna (FERGUSON, 2016 *apud* HONORATO, 2021, p.22), em que, até hoje são amplamente utilizados em automóveis, motocicletas e outros veículos.

O modelo ciclo Otto é usado como um guia para entender o sistema termodinâmico que acontecem em motores de combustão interna que inflamam por vela de ignição (HONORATO, 2021). Esses tipos de motores são dispositivos térmicos que possibilitam a conversão de calor em trabalho mecânico. O calor é conseguido pela combustão de um combustível. O trabalho mecânico é criado a partir de uma substância conhecida como fluido ativo, que sofre uma série de processos (BRUNETTI, 2012 *apud* GARLET, 2022, p. 27).

No motor o processo de geração de trabalho mecânico ocorre dentro dos cilindros. Os cilindros são compostos por uma vela ou injetor, responsável por emitir faísca para que

ocorra a combustão, válvulas de admissão e escape e um pistão que é conectado ao virabrequim. O pistão assume um papel fundamental na geração de movimento, pois é ele que alcança o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI), chama-se de curso a distância que o pistão percorre entre o PMS e PMI. Os quatro tempos apresentados no ciclo Otto acontecem no espaço do cilindro que se encontra entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior. Ainda dentro desse limite, entende-se como cilindrada o volume percorrido pelo pistão do PMS ao PMI (OLIVEIRA, 2018). Na figura 1 é possível visualizar uma ilustração do cilindro-pistão.

Figura 1 – Ilustração do cilindro-pistão de um motor de combustão interna.

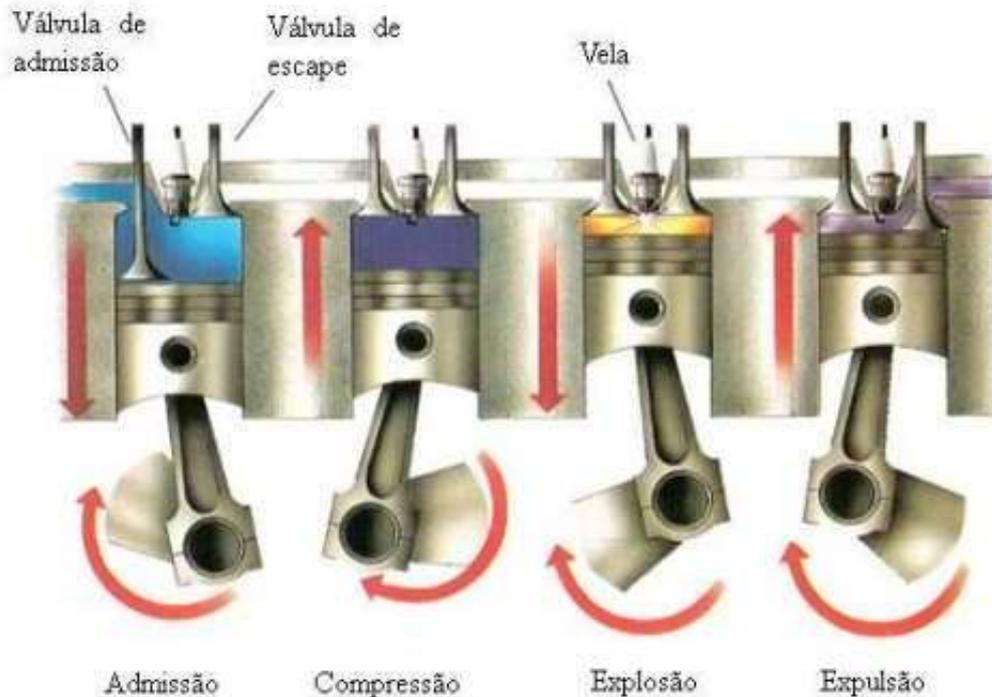


Fonte: (Costa, 2007 *apud* Oliveira, 2018, p.46).

O motor ciclo Otto é caracterizado por apresentar quatro tempos, que são: admissão, compressão, expansão e escape. No primeiro tempo ocorre o processo de admissão, este consiste na abertura de uma válvula e a partir dela é adicionada uma mistura de oxigênio e combustível, juntamente com a abertura da válvula, o pistão é deslocado para o PMI do cilindro. No segundo tempo, tem-se a compressão, nesse momento fecha-se a válvula de admissão e com a subida do pistão começa-se a comprimir a mistura, antes que o pistão alcance o PMS, a vela de ignição lança uma faísca, dando início ao terceiro tempo. No terceiro tempo tem-se a expansão, como resultado da centelha emitida, inicia-se o processo de combustão, com a explosão da mistura é gerada também uma expansão de gases quentes, com essa energia liberada o pistão é forçado a retornar ao PMI. No quarto tempo acontece o escape, em que serão liberados os gases gerados, portanto, a válvula de escape é aberta e o pistão se movimenta para o PMS (MARTINS,

2011 *apud* MACHADO, 2015, p.16). Os quatro tempos do motor estão ilustrados na figura 2.

Figura 2 – Quatro tempos de um motor ciclo Otto.



Fonte: (Costa *et al.* 2005 *apud* Machado, 2015, p.16)

Por serem projetados para utilizar mistura de ar e combustível com vela de ignição, os motores ciclo Otto podem ser alterados para funcionarem com biogás (MACHADO, 2015). Mesmo sendo eficazes e potentes, os motores ciclo Otto têm a desvantagem de necessitarem de manutenção regularmente. Mesmo com o surgimento de novos modelos de veículos mais eficientes e limpos como os de motor elétrico, os motores ciclo Otto ainda assumem um importante papel na indústria dos transportes.

Utilização de biogás em motores ciclo otto

O biogás pode ser aplicado em diversas máquinas térmicas e geradoras de energia como motores, turbinas que utilizam de gás como combustível ou até microturbinas. Para isso, é preciso identificar algumas propriedades do biogás, como a vazão, composições químicas e capacidade calorífica, tal como a capacidade real de gerar energia elétrica. Ainda, é necessário que o biogás passe por um processo de tratamento e purificação para que seja utilizado como combustível (COELHO, *et al.*, 2006).

A presença de ácido sulfídrico (H_2S) no biogás, para geração de energia elétrica, se torna um grande problema durante o processo de compressão, devido às corrosões que esse ácido provoca (MAIA, *et al.*, 2015). Outro exemplo é a presença de umidade no biogás que pode causar diminuição da capacidade calorífica do combustível.

Já em relação ao motor ciclo Otto, são necessárias alterações no sistema que fornecem ar e combinação de ar e biogás. Portanto, substitui-se o carburador que funciona comumente para combustíveis líquidos. Como resultado, o motor é regulado pela quantidade de biogás fornecido. Uma taxa de compressão mais alta é ideal para este tipo de sistema, uma vez que é admitido menos ar no sistema devido ao combustível já ser gasoso, isso provoca baixa eficiência volumétrica, e conseqüentemente, menor produção de potência (MIHIC, 2004 *apud* MACHADO, 2015,p.63). Na figura 3 é possível visualizar o kit-gás, que será essencial para a conversão do motor.

Figura 3 – Imagem dos principais componentes do kit-gás.



Fonte: Costa, 2021.

Em qualquer cenário, a conversão de um motor Otto movido a gasolina para funcionar como biogás resultará em menos energia sendo produzida. Isso se deve a uma diminuição na eficiência volumétrica do sistema quando mudamos do uso de gasolina para biogás. Essa diminuição é resultado da maior capacidade energética de um combustível líquido, quando comparado em mesma quantidade, que um combustível gasoso. Ainda, o biogás in natura apresenta como desvantagem lentidão durante o processo de combustão quando comparado ao álcool e a gasolina devido a presença de CO₂, porém, o sistema de ignição pode ser modificado para funcionar sob as novas circunstâncias (MIHIC, 2004 *apud* MACHADO, 2015, p.26).

De maneira benéfica, a utilização de biogás como combustível para motores ciclo Otto evidencia a baixa emissão de poluentes na atmosfera, quando comparado com combustíveis fósseis. Dessa forma, o uso de biogás em motores ciclo Otto é uma forma viável na produção de energia limpa e renovável, só exige uma compreensão especializada em relação a purificação do biogás e modificações no motor.

Software DIESEL-RK

Para realizar os testes dos combustíveis em motores ciclo Otto utilizou-se o *software* DIESEL-RK. O desenvolvimento do *software* DIESEL-RK iniciou-se entre os anos de 1981 e 1982 na Universidade Técnica Estadual Bauman de Moscou. O *software* apresenta algoritmos e modelos matemáticos adequados para analisar e aprimorar os mais diversos tipos de motores e combustíveis (CAMARA, 2015).

O funcionamento do *software* busca ser bastante intuitivo. Permite-se introduzir os dados do motor como diâmetro do cilindro, curso do pistão, quantidade de cilindros, número de válvulas, assim como dados relacionados ambiente de utilização do motor, temperatura e pressão. Outro ponto importante apresentado pelo *software* é a disponibilidade de selecionar o combustível que será utilizado para análise.

Após o processamento das características do motor e do combustível no DIESEL-RK, é disponibilizado um relatório completo que apresenta os parâmetros de eficiência e potência, parâmetros ambientais, ecológicos, do cilindro, dados do sistema de exaustão, combustão e sistema de admissão, além de outros dados técnicos (DIESEL-RK).

Uma grande vantagem na utilização desse *software* é o seu acesso remoto gratuito que permite que qualquer pessoa possa acessá-lo, basta fazer o registro e será gerada uma credencial para efetuar o login no software. Dessa forma, o DIESEL-RK é uma ferramenta rápida e bem desenvolvida para gerar análises de motores, sendo muito eficaz principalmente para estudantes.

Análise biogás x gasolina

Para identificar se o biogás pode ser considerado como uma alternativa de substituição para a gasolina, realizou-se um comparativo entre as eficiências desses combustíveis em motores ciclo Otto aspirado. O motor utilizado como base para o comparativo é de um carro modelo Volkswagen Gol 1.0 8v 2010. Nas figuras abaixo é possível visualizar algumas peças principais desse motor.

Figura 4 – Diâmetro do pistão.



Fonte: Imagens do autor.

Figura 5 – Altura do pistão.



Fonte: Imagens do autor.

Figura 6 – Diâmetro da Biela.



Fonte: Imagens do autor.

Figura 7 – Comprimento do vão do virabrequim.



Fonte: Imagens do autor.

Ainda assim, buscou-se por uma ficha técnica do modelo para que os valores utilizados estejam mais próximos do modelo do fabricante, na figura 8 a seguir é possível visualizar esses dados.

Figura 8 – Ficha técnica do modelo Volkswagen Gol 1.0 8v 2010.

MOTOR			
Instalação	Dianteiro	Aspiração	Natural
Disposição	Transversal	Alimentação	Injeção multiponto
Cilindros	4 em linha	Comando de válvulas	Único no cabeçote
Tuchos	Hidráulicos		
Cilindrada unitária	250 cm ³	Acionamento comando	Correia dentada
Válvulas por cilindro	2	Diâmetro do cilindro	67,1 mm
Razão de compressão	13:1	Curso do pistão	70,6 mm
Deslocamento	1781 cm ³	Potência máxima	99 cv (A) 72 cv (G) a 5250 rpm
Código do motor	EA111	Torque máximo	10,6 kgfm (A) 9,7 kgfm (G) a 3850 rpm
Peso/potência	12,29 kg/cv	Torque específico	10,6 kgfm/litro
Peso/torque	88,1 kg/kgfm	Potência específica	76,1 cv/litro

Fonte: Adaptado de <https://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=8148>.

Aplicando esses dados no DIESEL-RK e considerando os combustíveis, primeiro, como gasolina e depois como biogás, obteve-se os seguintes dados apresentados nas figuras 9 e 10.

Figura 9 – Dados Técnicos do motor 1.0 com gasolina.

```

Fuel: Petrol regular

----- PARAMETERS OF EFFICIENCY AND POWER -----
5250.0 - RPM - Engine Speed, rev/min
77.154 - P_eng - Piston Engine Power, kW
17.660 - BMEP - Brake Mean Effective Pressure, bar
140.35 - Torque - Brake Torque, N.m
0.03265 - m_f - Mass of Fuel Supplied per cycle, g
0.26661 - SFC - Specific Fuel Consumption, kg/kWh
0.26297 - SFC_ISO - Specific Fuel Consumption in ISO, kg/kWh
0.30689 - Eta_f - Efficiency of piston engine
20.978 - IMEP - Indicated Mean Effective Pressure, bar
0.36456 - Eta_i - Indicated Efficiency
12.355 - Sp - Mean Piston Speed, m/s
2.9598 - FMEP - Friction Mean Effective Pressure, bar (Intern.Exp)
0.85645 - Eta_m - Mechanical Efficiency of Piston Engine

----- ENVIRONMENTAL PARAMETERS -----
1.0000 - po_amb - Total Ambient Pressure, bar
303.00 - To_amb - Total Ambient Temperature, K
1.0400 - p_Te - Exhaust Back Pressure, bar (after turbine)
0.98000 - po_afiltr - Total Pressure after Induction Air Filter, bar

----- TURBOCHARGING AND GAS EXCHANGE -----
1.9100 - p_c - Pressure before Inlet Manifold, bar
326.94 - T_c - Temperature before Inlet Manifold, K
0.08570 - m_air - Total Mass Airflow (+EGR) of Piston Engine, kg/s
0.45999 - Eta_TC - Turbocharger Efficiency
1.7926 - po_T - Average Total Turbine Inlet Pressure, bar
959.16 - To_T - Average Total Turbine Inlet Temperature, K
0.09083 - m_gas - Mass Exhaust Gasflow of Pison Engine, kg/s
0.99998 - A/F_eq.t - Total Air Fuel Equivalence Ratio (Lambda)
1.0000 - F/A_eq.t - Total Fuel Air Equivalence Ratio
-0.35882 - PMEP - Pumping Mean Effective Pressure, bar
0.98937 - Eta_v - Volumetric Efficiency
0.02699 - x_r - Residual Gas Mass Fraction
1.0016 - Phi - Coeff. of Scavenging (Delivery Ratio / Eta_v)
0.0000 - BF_int - Burnt Gas Fraction Backflowed into the Intake, %
0.64238 - %Blow-by - % of Blow-by through piston rings

```

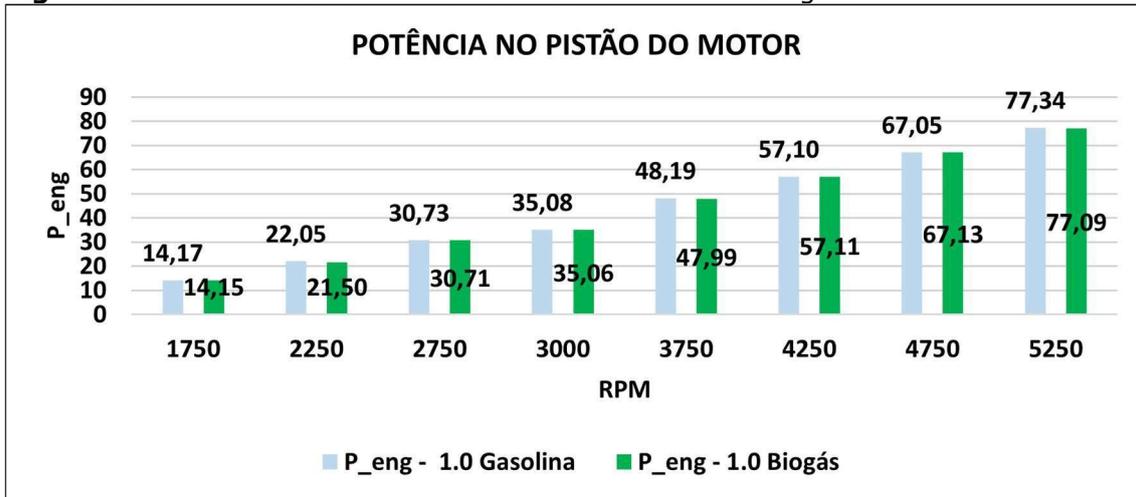
Fonte: Próprio autor pelo Software DIESEL-RK.

Figura 10 – Dados Técnicos do motor 1.0 com biogás.Fuel: 55%CH₄+35%CO₂+10%N₂

PARAMETERS OF EFFICIENCY AND POWER		
5250.0	- RPM	- Engine Speed, rev/min
66.152	- P_eng	- Piston Engine Power, kW
15.141	- BMEP	- Brake Mean Effective Pressure, bar
120.33	- Torque	- Brake Torque, N m
0.07578	- m_f	- Mass of Fuel Supplied per cycle, g
0.72167	- SFC	- Specific Fuel Consumption, kg/kWh
0.26364	- SFC_ISO	- Specific Fuel Consumption in ISO, kg/kWh
0.30585	- Eta_f	- Efficiency of piston engine
18.255	- IMEP	- Indicated Mean Effective Pressure, bar
0.36875	- Eta_i	- Indicated Efficiency
12.355	- Sp	- Mean Piston Speed, m/s
2.8021	- FMEP	- Friction Mean Effective Pressure, bar (Intern.Exp)
0.84384	- Eta_m	- Mechanical Efficiency of Piston Engine
ENVIRONMENTAL PARAMETERS		
1.0000	- po_amb	- Total Ambient Pressure, bar
303.00	- To_amb	- Total Ambient Temperature, K
1.0400	- p_Te	- Exhaust Back Pressure, bar (after turbine)
0.98000	- po_afltr	- Total Pressure after Induction Air Filter, bar
TURBOCHARGING AND GAS EXCHANGE		
1.9100	- p_C	- Pressure before Inlet Manifold, bar
326.94	- T_C	- Temperature before Inlet Manifold, K
0.07566	- m_air	- Total Mass Airflow (+EGR) of Piston Engine, kg/s
0.46033	- Eta_TC	- Turbocharger Efficiency
1.7683	- po_T	- Average Total Turbine Inlet Pressure, bar
890.70	- To_T	- Average Total Turbine Inlet Temperature, K
0.08837	- m_gas	- Mass Exhaust Gasflow of Pison Engine, kg/s
1.0000	- A/F_eq.t	- Total Air Fuel Equivalence Ratio (Lambda)
0.99998	- F/A_eq.t	- Total Fuel Air Equivalence Ratio
-0.31181	- PMEP	- Pumping Mean Effective Pressure, bar
0.96211	- Eta_v	- Volumetric Efficiency
0.02828	- x_r	- Residual Gas Mass Fraction
1.0020	- Phi	- Coeff. of Scavenging (Delivery Ratio / Eta_v)
0.0000	- BF_int	- Burnt Gas Fraction Backflowed into the Intake, %
0.62888	- %Blow-by	- % of Blow-by through piston rings

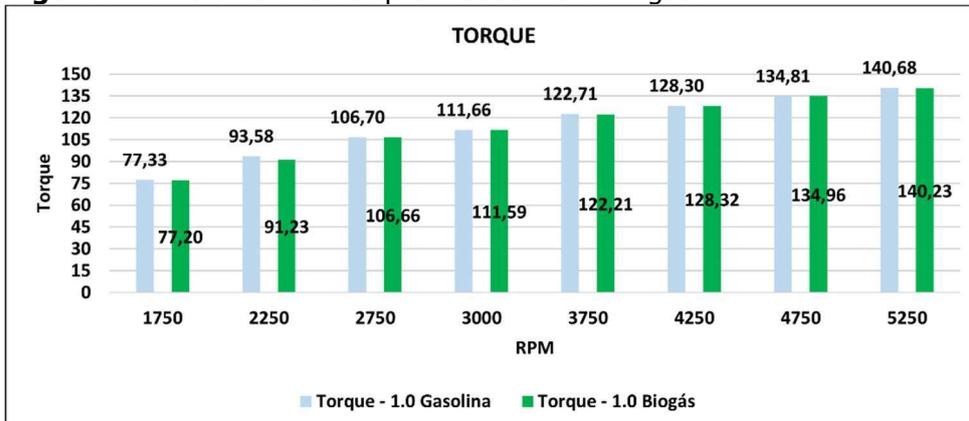
Fonte: Próprio autor pelo *Software* DIESEL-RK.

Com os resultados obtidos foi possível gerar gráficos possibilitando uma melhor visualização, os principais pontos observados foram a potência no pistão do motor (P_eng), o torque (Torque), o consumo específico de combustível (SFC) e eficiência volumétrica (Eta_v). Para uma melhor visualização os gráficos foram feitos no Excel.

Figura 11 – Gráfico da Potência no Pistão - Gasolina x Biogás.

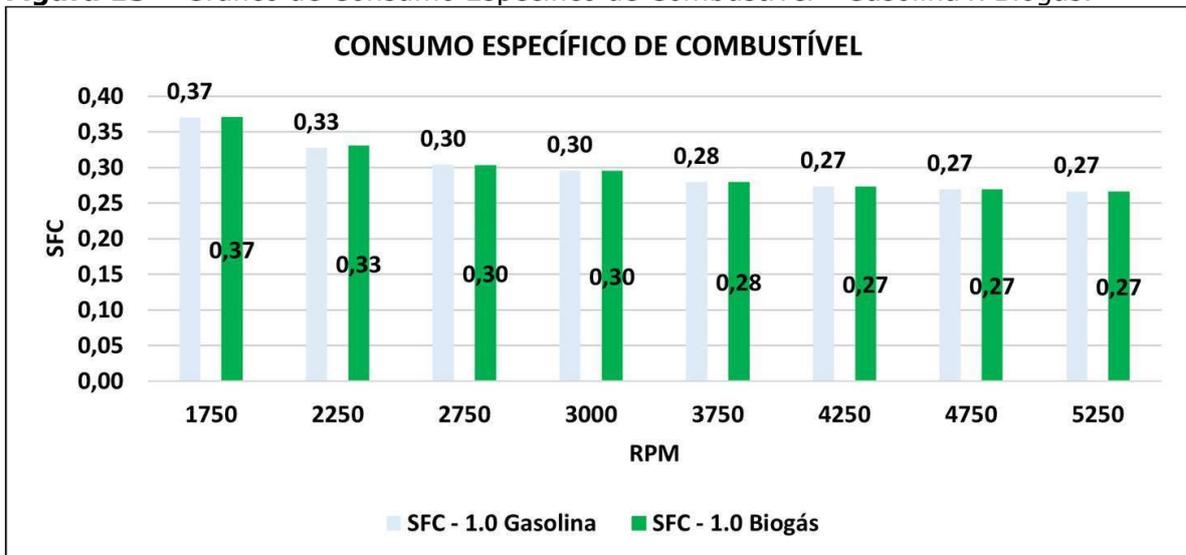
Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

A potência no pistão se mantém praticamente a mesma, tanto para a gasolina, quanto para o biogás, sendo que quando o rpm está entre 4250 e 4750 a potência do biogás é maior que a da gasolina.

Figura 12 – Gráfico de Torque - Gasolina x Biogás.

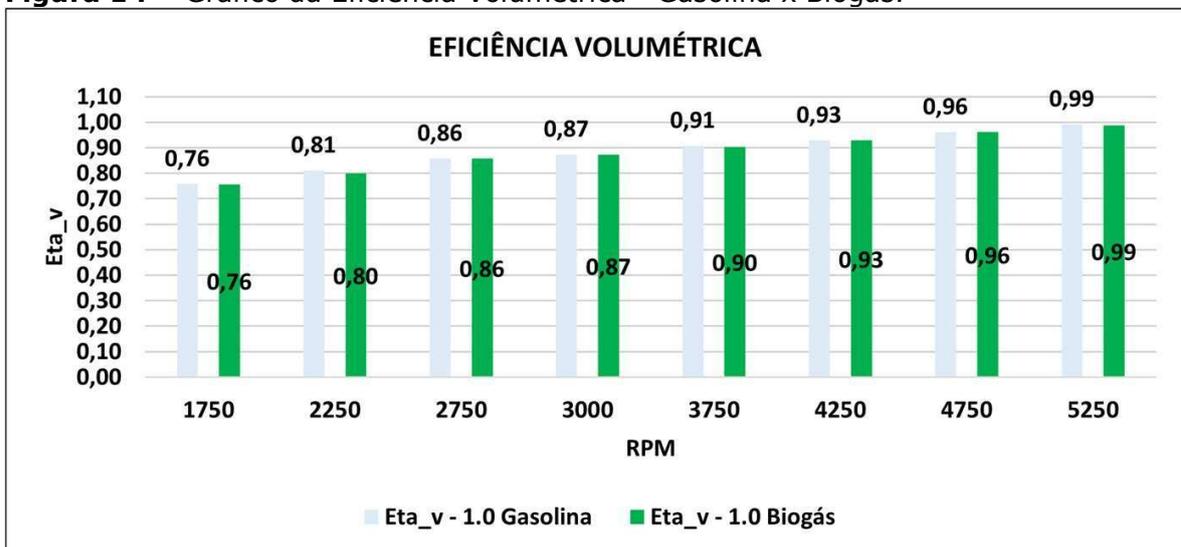
Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

No gráfico de torque novamente o biogás se sobressai em relação a gasolina para rpm 4250 e 4750.

Figura 13 – Gráfico de Consumo Específico de Combustível - Gasolina x Biogás.

Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

O consumo específico se mantém o mesmo independentemente do valor atribuído ao rpm. Ou seja, com a mesma quantidade de gasolina e biogás esse tipo de motor consegue atingir a mesma eficiência e potência. Enquanto para a eficiência volumétrica, apresentada na figura 14, o biogás apresenta resultados diferentes para 2250 e 3750 rpm.

Figura 14 – Gráfico da Eficiência Volumétrica - Gasolina x Biogás.

Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

Pode-se observar que os valores obtidos para os dois tipos de combustíveis são bem semelhantes. Portanto, podemos entender que o biogás seria um ótimo substituto para a gasolina em um motor do modelo Volkswagen Gol 1.0 8v 2010. Porém, para uma análise mais profunda, realizou-se uma comparação com um motor com as especificações mais próximas possíveis do primeiro modelo e com um maior número de cilindros. O segundo modelo analisado foi um Volkswagen Gol 1.8 8v 2002, na figura 15 está a ficha técnica do modelo.

Figura 15 – Ficha técnica do modelo Volkswagen Gol 1.8 8v 2002.

MOTOR			
Instalação	Dianteiro	Aspiração	Natural
Disposição	Longitudinal	Alimentação	Injeção multiponto
Cilindros	4 em linha	Comando de válvulas	Único no cabeçote
Tuchos	Hidráulicos		
Cilindrada unitária	445 cm ³	Acionamento comando	Correia dentada
Válvulas por cilindro	2	Diâmetro do cilindro	81 mm
Razão de compressão	10:1	Curso do pistão	86,4 mm
Deslocamento	1781 cm ³	Potência máxima	99 cv a 5250 rpm
Código do motor	AP-1800	Torque máximo	15,5 kgfm a 3000 rpm
Peso/potência	10,20 kg/cv	Torque específico	8,7 kgfm/litro
Peso/torque	65,2 kg/kgfm	Potência específica	55,6 cv/litro

Fonte: Adaptado de <https://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=17103>.

A partir da aplicação dos dados da ficha técnica e dos mesmos combustíveis utilizados no primeiro modelo, obteve-se do *software* DIESEL-RK os seguintes resultados apresentados nas figuras 16 e 17.

Figura 16 – Dados Técnicos do Motor 1.8 com Gasolina.

Fuel:	Petrol regular
----- PARAMETERS OF EFFICIENCY AND POWER -----	
5250.0	- RPM - Engine Speed, rev/min
146.30	- P_eng - Piston Engine Power, kW
18.778	- BMEP - Brake Mean Effective Pressure, bar
266.13	- Torque - Brake Torque, N m
0.06018	- m_f - Mass of Fuel Supplied per cycle, g
0.25915	- SFC - Specific Fuel Consumption, kg/kWh
0.25571	- SFC_ISO - Specific Fuel Consumption in ISO, kg/kWh
0.31572	- Eta_f - Efficiency of piston engine
22.334	- IMEP - Indicated Mean Effective Pressure, bar
0.37551	- Eta_i - Indicated Efficiency
15.120	- Sp - Mean Piston Speed, m/s
2.9669	- FMEP - Friction Mean Effective Pressure, bar (Intern.Exp)
0.86355	- Eta_m - Mechanical Efficiency of Piston Engine
----- ENVIRONMENTAL PARAMETERS -----	
1.0000	- po_amb - Total Ambient Pressure, bar
303.00	- To_amb - Total Ambient Temperature, K
1.0400	- p_Te - Exhaust Back Pressure, bar (after turbine)
0.98000	- po_afltr - Total Pressure after Induction Air Filter, bar
----- TURBOCHARGING AND GAS EXCHANGE -----	
1.9100	- p_C - Pressure before Inlet Manifold, bar
326.57	- T_C - Temperature before Inlet Manifold, K
0.15799	- m_air - Total Mass Airflow (+EGR) of Piston Engine, kg/s
0.47943	- Eta_TC - Turbocharger Efficiency
1.6517	- po_T - Average Total Turbine Inlet Pressure, bar
1068.9	- To_T - Average Total Turbine Inlet Temperature, K
0.16799	- m_gas - Mass Exhaust Gasflow of Pison Engine, kg/s
1.0001	- A/F_eq.t - Total Air Fuel Equivalence Ratio (Lambda)
0.99986	- F/A_eq.t - Total Fuel Air Equivalence Ratio
-0.58934	- PME \bar{P} - Pumping Mean Effective Pressure, bar
1.0221	- Eta_v - Volumetric Efficiency
0.02900	- x_r - Residual Gas Mass Fraction
1.0011	- Phi - Coeff. of Scavenging (Delivery Ratio / Eta_v)
0.0000	- BF_int - Burnt Gas Fraction Backflowed into the Intake, %
0.30933	- %Blow-by - % of Blow-by through piston rings

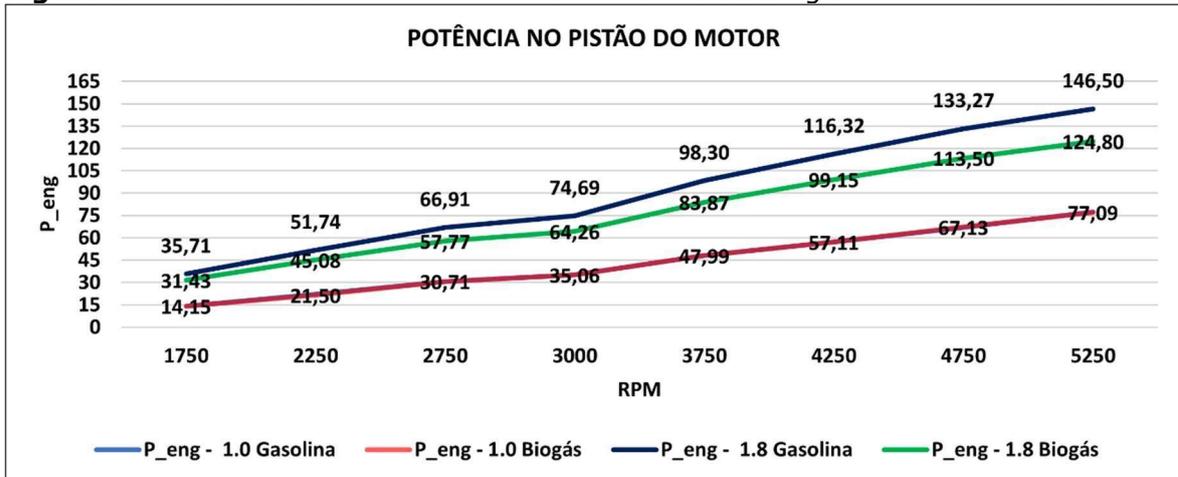
Fonte: Próprio autor pelo *Software* DIESEL-RK. Figura 17– Dados Técnicos do Motor 1.8 com Biogás.

Figura 17 – Dados Técnicos do Motor 1.8 com Biogás.Fuel: 55%CH₄+35%CO₂+10%N₂

PARAMETERS OF EFFICIENCY AND POWER		
5250.0	- RPM	- Engine Speed, rev/min
124.08	- P_eng	- Piston Engine Power, kW
15.926	- BMEP	- Brake Mean Effective Pressure, bar
225.71	- Torque	- Brake Torque, N m
0.13890	- m_f	- Mass of Fuel Supplied per cycle, g
0.70526	- SFC	- Specific Fuel Consumption, kg/kWh
0.25773	- SFC_ISO	- Specific Fuel Consumption in ISO, kg/kWh
0.31297	- Eta_f	- Efficiency of piston engine
19.257	- IMEP	- Indicated Mean Effective Pressure, bar
0.37844	- Eta_i	- Indicated Efficiency
15.120	- Sp	- Mean Piston Speed, m/s
2.8194	- FMEP	- Friction Mean Effective Pressure, bar (Intern.Exp)
0.84959	- Eta_m	- Mechanical Efficiency of Piston Engine
ENVIRONMENTAL PARAMETERS		
1.0000	- p_amb	- Total Ambient Pressure, bar
303.00	- T_amb	- Total Ambient Temperature, K
1.0400	- p_Te	- Exhaust Back Pressure, bar (after turbine)
0.98000	- p_afiltr	- Total Pressure after Induction Air Filter, bar
TURBOCHARGING AND GAS EXCHANGE		
1.9100	- p_C	- Pressure before Inlet Manifold, bar
326.57	- T_C	- Temperature before Inlet Manifold, K
0.13872	- m_air	- Total Mass Airflow (+EGR) of Piston Engine, kg/s
0.48020	- Eta_TC	- Turbocharger Efficiency
1.6371	- p_o_T	- Average Total Turbine Inlet Pressure, bar
986.46	- T_o_T	- Average Total Turbine Inlet Temperature, K
0.16252	- m_gas	- Mass Exhaust Gasflow of Pison Engine, kg/s
1.0002	- A/F_eq.t	- Total Air Fuel Equivalence Ratio (Lambda)
0.99983	- F/A_eq.t	- Total Fuel Air Equivalence Ratio
-0.51218	- PMEFP	- Pumping Mean Effective Pressure, bar
0.98861	- Eta_v	- Volumetric Efficiency
0.03154	- x_r	- Residual Gas Mass Fraction
1.0013	- Phi	- Coeff. of Scavenging (Delivery Ratio / Eta_v)
0.0000	- BF_int	- Burnt Gas Fraction Backflowed into the Intake, %
0.30315	- %Blow-by	- % of Blow-by through piston rings

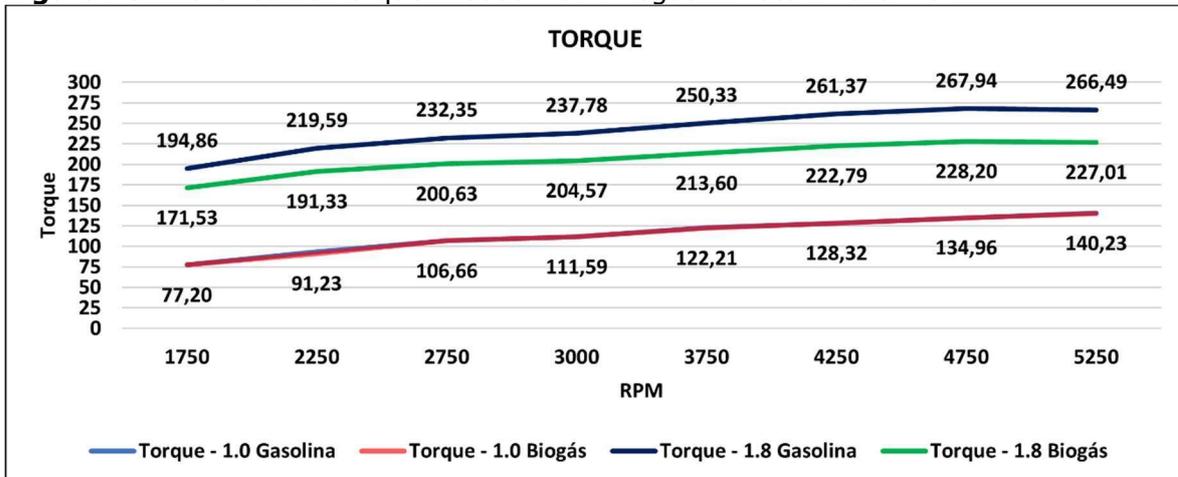
Fonte: Próprio autor pelo *Software* DIESEL-RK.

Através de um comparativo entre os dois modelos, motor 1.0 e 1.8, e os seus respectivos resultados obtidos do *software* DIESEL – RK, pode-se analisar as diferentes eficiências e potências quando há variação das características do motor. Esses comparativos podem ser visualizados nas figuras 18, 19, 20 e 21.

Figura 18 – Gráfico da Potência no Pistão – Gasolina x Biogás – Motor 1.0 e 1.8.

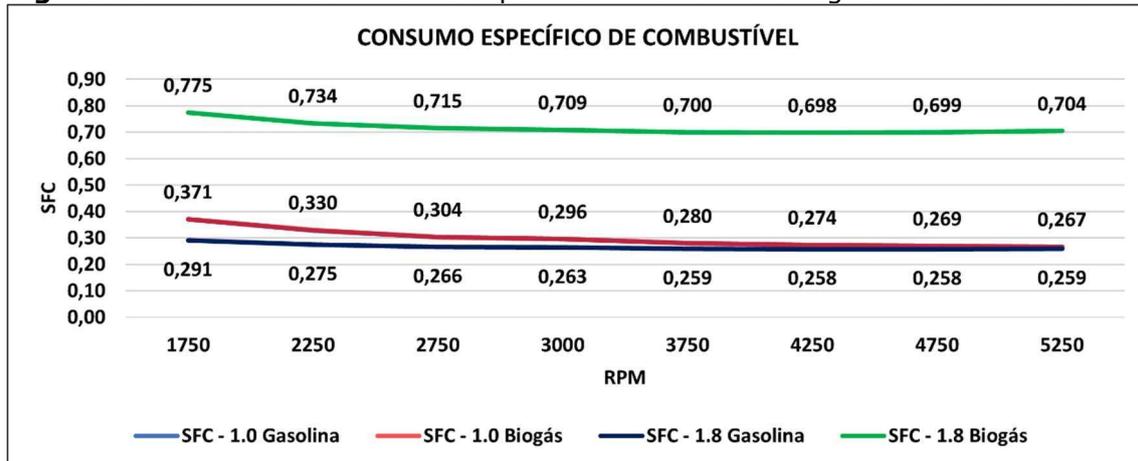
Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

É importante ressaltar que devido aos valores obtidos para o motor 1.0 nos dois tipos de combustíveis serem muito próximos, a linha que representa P_eng – 1.0 Gasolina e P_eng – 1.0 Biogás estão se sobrepondo.

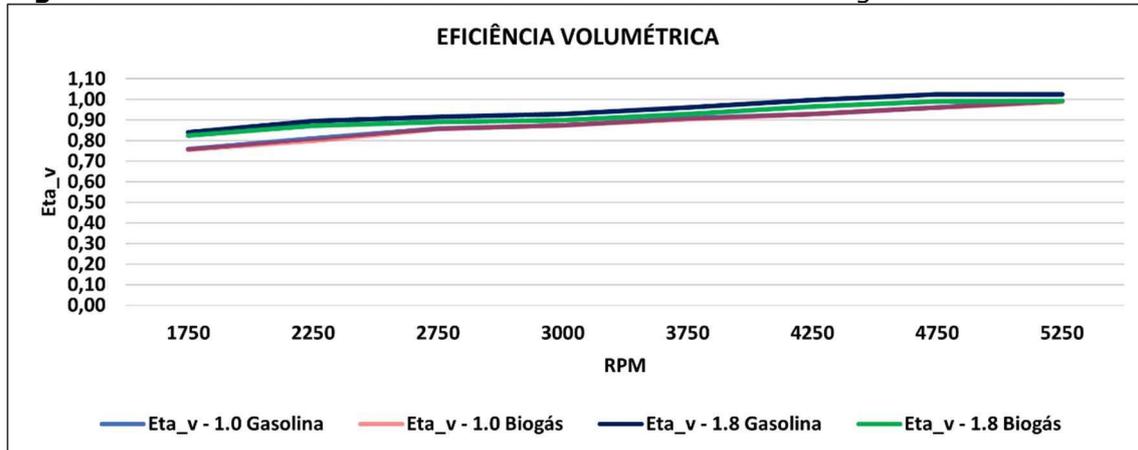
Figura 19 – Gráfico de Torque – Gasolina x Biogás – Motor 1.0 e 1.8.

Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

Nas figuras 18 e 19 referentes à Potência no Pistão e ao Torque, percebe-se que a eficiência do biogás no motor 1.8 se torna menor que a da gasolina. Além disso, a gasolina proporciona quase o dobro de Potência e Torque com o aumento da cilindrada.

Figura 20 – Gráfico de Consumo Específico – Gasolina x Biogás – Motor 1.0 e 1.8.

Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

Figura 21 – Gráfico da Eficiência Volumétrica – Gasolina x Biogás – Motor 1.0 e 1.8.

Fonte: Próprio autor pelo Excel (2023).

O consumo específico de combustível é o que mais apresenta discrepância de dados, sendo necessário quase o triplo de biogás no motor 1.8 para que ele chegue próximo da eficiência e potência apresentadas para o motor 1.8 com gasolina. Na eficiência volumétrica todos os valores se mantêm próximos, tendo uma diferença de valores nas menores rotações. Dessa forma, evidencia-se a capacidade que o biogás possui de substituir a gasolina, sendo mais vantajoso em motores com menores cilindradas, enquanto motores com altas cilindradas irão requerer um volume maior de biogás e apresentarão menos potência e eficiência.

4 Conclusão

Através do *software* DIESEL-RK obteve-se a ficha técnica com os dados e resultados do comportamento dos motores 1.0 e 1.8 quando em funcionamento, primeiramente, com gasolina e depois com biogás. A partir disso, com as análises e resultados apresentados graficamente para a realização de um comparativo, fica evidente que o biogás é uma ótima opção para substituir os combustíveis fósseis. Sendocapaz de executar uma quantidade muito próxima, se não a mesma, quantidade de potência e eficiência.

Como citado anteriormente, além do biogás, outros combustíveis podem ser aplicados para simulação nos mais diversos motores para diferentes estudos pelo DIESEL-RK. Quando simulado o desempenho de um motor quatro tempos, DI Diesel, com diâmetro de 100 mm curso do pistão de 80 mm e 2000 rpm, com os biocombustíveis D100, B100, B40D60 e B20D80, apresenta-se uma redução na potência para o B100, enquanto para a eficiência todos apresentaram uma queda, assim como para a pressão média e torque (BORGES, 2021). Para Leone (2020), também houve queda de potência que foi atribuída às características do biocombustível e do motor que precisaria de modificações.

Para o motor MAN Innovator 4C utilizando óleo marítimo realizou, testes com porcentagens da carga nominal, sendo essas porcentagens 25%, 50%, 75% e 100%, em que, os resultados foram próximos da potência nominal e curva de pressão experimental e ainda se obteve bons resultados para a emissão de SO₂ e NO_x a 100% e 50% com 16% de diferença máxima (CAMARA, 2015).

Em comparações dos resultados das simulações para o modelo EA211 Volkswagen com os dados apresentados na ficha técnica original Mendonça (2020) destacou as divergências que ocorrem entre os dados reais e os apresentados no DIESEL-RK, por exemplo, a potência máxima do motor em 6250 rpm varia cerca de 10,8% a menos que o valor real. Porém, quando realizados ajustes, aproximando o modelo do *software* com o da realidade, a distância desses valores se torna menor.

Como pode-se observar o *software* DIESEL-RK é bastante utilizado nas mais diversas aplicações e para variados fins de estudos. Baseado no que foi apresentado, o biogás se mostrou um recurso eficaz diante da urgência que o mundo enfrenta com o aquecimento global. Sendo assim, torna-se interessante o aprofundamento no assunto para que o biogás se efetive como uma nova forma de combustível, diminuindo a poluição do ar, e conseqüentemente, tratando os resíduos tanto rurais, quanto urbanos, e melhorando a qualidade de vida de todos.

Referências

1. BORGES, Luana Izzicupo. **Avaliação técnica do uso de biodiesel em um motor de combustão interna através dos softwares Chemical Equilibrium with Applicationse Diesel-RK.** 2021.
2. CAMARA, Michel Millem. **Simulação computacional de motor diesel marítimo utilizando software DIESEL RK.** 2015. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio De Janeiro - Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013444.pdf>. Acesso em: 27 agosto de 2023.
3. CarrosnaWeb. Disponível em: <https://www.carrosnaweb.com.br/default.asp>. Acesso em: 25 agosto de 2023.
4. COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100070&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 17 de maio de 2023.
5. COSTA, Bruno Nunes da; GUARDIA, Luis Gustavo Palma. **Conversão de um motor de ciclo otto para uso de gás natural ou BIOGÁS.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia (EE) Higienópolis, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/29195>. Acesso em: 25 de março de 2023.
6. DIESEL-RK. Diesel-RK é uma ferramenta de simulação de motor. Disponível em: <https://diesel-rk.com/Eng/index.php?page=History>. Acesso em: 25 agosto de 2023.
7. GARLET, Roberto Antonio. **Análise de desempenho de um motor ciclo otto a biometano em comparação com gasolina e etanol.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/26485>. Acesso em: 15 de abril de 2023.
8. HONORATO, Thiago Pacheco. **Estudo dos parâmetros de desempenho de um**

- motor ciclo Otto relacionado a segurança veicular no tráfego urbano.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/49070>. Acesso em: 15 de abril de 2023.
9. LEONE, Felipe; FERREIRA NETO, Vicente Isidio. **Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software diesel-RK com utilização de diesel, biodiesel e suas misturas.** 2020.
10. MACHADO, Deisi Oliveira. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás.** 2014. Trabalho de conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul. 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/3716>. Acesso em: 15 de abril de 2023.
11. MAIA, Djeine Cristina Schiavon *et al.* **Desenvolvimento de um sistema para purificação de biogás utilizando fe/edta como absorvente.** *Engevista*, v. 17, n. 2, p.219-231, 2015. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9020#:~:text=O%20Fe%20EDTA%20uti%20lizado%20na,influ%C3%Aancia%20sobre%20a%20atividade%20catal%C3%ADtica.>>. Acesso em: 14 de maio de 2023.
12. MENDONÇA, Fabrício Rogério Silva de. **Análise e simulação de um motor quatro tempos a gasolina.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
13. OLIVEIRA, Tiago Luis. **Análise energética, exergética e experimental em um motor de combustão interna usando como combustível os fluidos do processo de pirólise assistida por micro-ondas.** 2018. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10393?locale=en>. Acesso em: 15 de abril de 2023.
14. SOUZA, S. N. M. de *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. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/238732343_Custo_da_eletricidade_gerada_em_conjunto_motor_gerador_utilizando_biogas_da_suinocultura. Acesso em: 25 maio de 2023.