

Utilização do Biodiesel de Mamona em Micro-turbinas a Gás – Testes de Desempenho Térmico e Emissões

Marco Antonio R. Nascimento (UNIFEI) marcoantonio@unifei.edu.br

Electo Silva Lora (UNIFEI) electo@unifei.edu.br

Oswaldo José Venturini (UNIFEI) osvaldo@unifei.edu.br

Manuel Rendon Maldonado (UNIFEI) nrendon@unifei.edu.br

Rubenildo Viera Andrade (UNIFEI) ruben@unifei.edu.br

Paulo Sérgio Pedroso Corrêa Jr (UNIFEI) paulocorrea@unifei.edu.br

Marco Antônio Haikal Leite (CENPES) mahaikal@petrobras.com.br

Universidade Federal de Itajubá / Núcleo de Excelência em Geração
Termelétrica e Distribuída em – NEST (IEM/UNIFEI)
Av BPS 1303, CP 50, Itajubá, MG, CEP 37.500-903 - Brasil

Resumo

A operação de equipamentos de potência como uma micro-turbina a gás, a partir de combustíveis renováveis constitui uma alternativa interessante quando se fala em sustentabilidade, principalmente em regiões isoladas com abundante disponibilidade de combustíveis oriundos da biomassa. Dentro desse contexto, este artigo apresenta os resultados de desempenho térmico e emissões dos testes realizados em micro-turbina a gás, operando com misturas de Diesel e biodiesel, mostrando a influência da utilização desse combustível no comportamento térmico da máquina, e nas emissões de gases como CO, NO_x e SO₂. Os resultados dos testes experimentais são mostrados em forma de gráficos, onde pode ser constatado que o biodiesel e suas misturas não alteram de forma significativa o comportamento térmico da micro-turbina e, ao mesmo tempo possibilitam reduções consideráveis nas emissões de contaminantes gasosos.

Abstract

The operation of power equipment such as a gas micro-turbine using renewable fuels is an interesting alternative when sustainability is concerned, mainly in isolated areas with abundant availability of fuels that come from biomass. Within this scenario, this article presents the results of tests regarding thermal performance and emissions of a gas micro-turbine operating with Diesel and biodiesel mixtures, showing the influence of the use of this fuel on the thermal behavior of the machine and on the emissions of gases such as CO, NO_x and SO₂. The results of the experimental tests are shown in graphs, from where it can be observed that the biodiesel and its mixtures do not change the thermal behavior of the micro-turbine significantly, and at the same time, they may considerably reduce the emission of gaseous pollutants.

1. Introdução

Diversos centros de pesquisas têm realizado estudos relacionados com a utilização do biodiesel em motores alternativos de combustão interna e constatado o grande potencial deste combustível, porém há pouca informação sobre a utilização do biodiesel em turbinas a gás. Assim visando suprir esta carência de informação, este trabalho faz uma análise experimental da utilização do biodiesel em micro-turbinas a gás, buscando avaliar a influência da utilização deste combustível no desempenho térmico e nas emissões destes acionadores primários.

Os testes foram realizados com uma micro-turbina de 30 kW (Diesel), a qual foi adaptada para operar com misturas Diesel e biodiesel nas proporções: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 75 e 100% respectivamente. Os testes foram realizados a plena carga e também em cargas parciais, porém sempre em regime permanente.

Nos testes experimentais o biodiesel utilizado foi de mamona, que dentre todos os tipos de biodiesel é o de maior viscosidade. Para evitar problemas de sobre carga da bomba dosadora da

micro-turbina devido à elevada viscosidade deste combustível, foi projetado um sistema de pré-aquecimento no reservatório de biodiesel, com a finalidade de diminuir a sua viscosidade.

Os testes revelaram que a potência da micro-turbina durante a operação com biodiesel é praticamente a mesma que quando operando com diesel. Observou-se que, quando a micro-turbina opera com biodiesel puro, o consumo específico de combustível foi maior que o Diesel, isto devido ao menor poder calorífico do biodiesel puro.

2 - Descrição da micro-turbina

O termo “micro-turbina” refere-se a uma turbina a gás com capacidade de geração de até 300 kW, composta de compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico. Durante o seu funcionamento, o ar é aspirado da atmosfera e comprimido, passando para a câmara de combustão, onde é aquecido pela combustão. Nesta câmara ocorre a reação de combustão, produzindo gases quentes, que escoam através da turbina, onde se expandem, produzindo potência mecânica para acionar o eixo do compressor e da carga, que pode ser um gerador elétrico [1], [2]. As micro-turbinas podem ser de ciclo simples Figura (1), com um ou dois eixos e também com ciclo regenerativo. A micro-turbina com ciclo regenerativo utiliza um trocador de calor para recuperar a energia dos gases de exaustão da turbina, melhorando a eficiência térmica do sistema [3], como mostra a Figura (2).

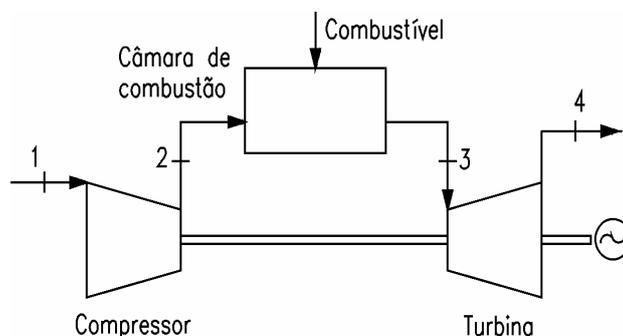


Figura 1 - Diagrama esquemático do ciclo simples de um eixo

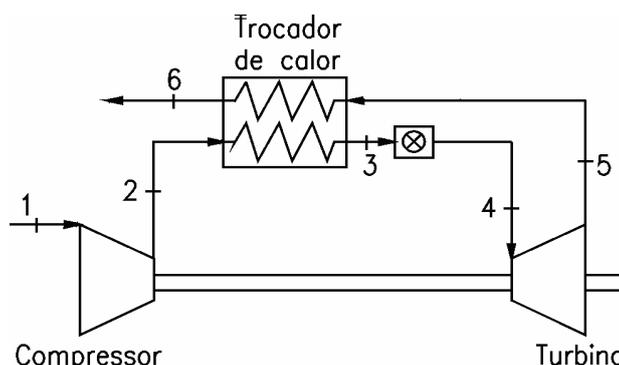


Figura 2 - Diagrama esquemático do ciclo regenerativo

3 - Características dos óleos vegetais

Os óleos vegetais são os combustíveis derivados da biomassa que exibem maior similaridade com o Diesel [4], em particular, quanto ao poder calorífico, o que os torna candidatos naturais à substituição deste combustível. A Tabela (1) mostra uma lista das oleaginosas mais utilizadas para a produção de biodiesel, incluindo valores do teor de óleo e a designação científica e comum.

Tabela 1 - Principais características das oleaginosas [5].

Nome Comum	Nome Científico	Origem do Óleo	Óleo (%)
Soja	Glycine Max	Grão	18
Amendoim	Orachis Hypogaea	Fruto	40 - 43
Girassol	Hellathus Annus	Grão	33 - 48
Mamona	Rícinus Communis	Bagos	43 - 45
Dendê	Elacis Guineesis	Amêndoa	20
Colza	Brassica Campestris	Grão	40 - 48
Algodão	Gossipium Hirsutum	Semente	15
Babaçu	Orbignya Martiana	Amêndoa	66

3.1 - Biodiesel

O biodiesel é o principal produto da reação de transesterificação de triglicerídeos (qualquer óleo ou gordura vegetal e animal) utilizando como reagente um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol). A razão estequiométrica para o processo é de três mols de álcool para um mol de ácido graxo, produzindo três mols de éster ou biodiesel, e um mol de glicerol [6]. A reação é apresentada na Figura (3).

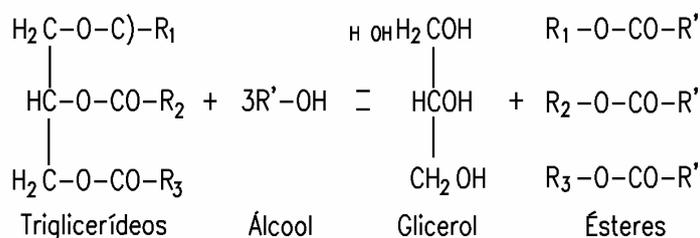


Figura 3 - Reação química de transesterificação.

Mundialmente passou-se a adotar uma nomenclatura apropriada para identificar a concentração do biodiesel na mistura [7]. A nomenclatura proposta é BDXX, onde XX é a percentagem em volume do biodiesel na mistura. Por exemplo, o BD2, BD5, BD20 e BD100 são combustíveis com uma concentração de 2%, 5%, 20% e 100% de biodiesel, respectivamente.

3.2 - Viscosidade e densidade do biodiesel

A viscosidade, densidade e poder calorífico do biodiesel são diferentes do Diesel. Essas características são muito importantes para estimar o desempenho da micro-turbina a gás, e definir as medidas que deverão ser tomadas para a utilização desse tipo de combustível. A literatura [8] mostra que o biodiesel de mamona é quase seis vezes mais viscoso que o Diesel. Nos testes com biodiesel de mamona, há necessidade de um sistema de pré-aquecimento, com a finalidade de diminuir a viscosidade [9]. A Tabela (2) apresenta as características físico-químicas do biodiesel, obtido a partir de diferentes oleaginosas e do Diesel.

Tabela 2 - Características físico-químicas do biodiesel e do Diesel [10][11].

Característica	Mamona	Soja	Algodão	Diesel
Ponto de Névoa	- 6	3	nd	1
Índice de Cetano	60	59,4	57,5	45,8
Inflamabilidade [°C]	208	185,3	184	55
Teor de Cinzas	0,01	0,01	0,01	0,014
Teor de Enxofre	0	0,03	nd	0,24
Resíduo de Carbono	0,09	nd	0,2	0,35
Viscosidade 40 °C [cSt]	17,55	4,0	4,67	3,0
Densidade a 15 °C [g/m³]	0,9308	0,8851	0,8830	0,8302

nd: não disponível

4 - Parâmetros adimensionais de correção

Usualmente, a performance de uma turbina a gás é referida às condições padrão ISO: 288,15 K (15°C) e 101325 Pa (1,014 bar), que são condições de referência [12]. Para os testes de desempenho térmico na micro-turbina a gás, foram utilizados os coeficientes de correção theta (θ) e delta (δ), que são obtidos levando em consideração as temperaturas e pressões de admissão da micro-turbina a gás, de acordo com as equações (1) e (2):

$$\delta = \frac{P_1}{101325} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

$$\theta = \frac{T_1}{288,15} \quad [\text{K}] \quad (2)$$

Onde, P_1 é a pressão de admissão e T_1 é a temperatura de admissão. Os parâmetros adimensionais de correção da micro-turbina a gás são apresentados na Tabela (3).

Tabela 3 - Parâmetros adimensionais de correção.

Parâmetro de Desempenho	Grupo adimensional	Grupos corrigidos
Temperatura na seção (T)	$\frac{C_p * (T / T_1 - 1)}{k * R}$	$\frac{T}{\theta}$ (3)
Pressão na seção (P)	$\frac{C_p * ((P / P_1)^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{k * R}$	$\frac{P}{\delta}$ (4)
Fluxo de massa (m)	$\frac{m * \sqrt{(T_1 * R)}}{D_1^2 * P_1 * \sqrt{k}}$	$\frac{m * \sqrt{\theta}}{\delta}$ (5)
Rotação (N)	$\frac{N * D_1}{\sqrt{(k * R * T_1)}}$	$\frac{N}{\sqrt{\theta}}$ (6)
Vazão de Combustível (m_c)	$\frac{m_c * PCI * \sqrt{R} * ECC}{C_p * D_1^2 * P_1 * \sqrt{(T_1 * k)}}$	$\frac{m_c * PCI * ECC}{\delta * \sqrt{\theta}}$ (7)
Potência (W)	$\frac{W_{EX}}{k * D_1^2 * P_1 * \sqrt{(k * R * T_1)}}$	$\frac{W_{EX}}{\delta * \sqrt{\theta}}$ (8)

Onde:

k	Razão entre os calores específicos	D_1	Diâmetro
PCI	Poder calorífico inferior do combustível	m_c	Vazão em massa de combustível
C_p	Calor específico à pressão constante	R	Constante do gás
W_{EX}	Trabalho útil de eixo	N	Rotação
P	Pressão	ECC	Eficiência da Câmara de Combustão
m	Vazão em massa		

4.1 Determinação do poder calorífico e densidade

A determinação das características das misturas do biodiesel, como o poder calorífico, densidade e a viscosidade, são importantes para a condução dos testes com a micro-turbina. O sistema de controle da micro-turbina requer como dado para sua operação, o valor do poder calorífico, pois este é utilizado para manter os parâmetros aero-termodinâmicos de projeto, adequando assim o seu funcionamento [13].

Quando é utilizado um combustível diferente deve-se ajustar o sistema controlador da micro-turbina através de dois parâmetros (FUEL I e FUEL II) [15] de ajuste do sistema de combustível, que são obtidos em função do poder calorífico inferior (PCI) e da densidade. Os parâmetros FUEL I e FUEL II são dados por:

$$\text{FUEL I} = \left(\frac{0,8358}{\rho_f} \right) \cdot \left(\frac{40510,73}{\text{PCI}_f} \right) \quad (9)$$

$$\text{FUEL II} = \left(\frac{\text{PCI}_f}{40510,73} \right) \quad (10)$$

Onde, ρ_f é a densidade do combustível utilizado [g/ml] e PCI_f é o poder calorífico inferior do combustível utilizado [kJ/kg].

Os testes de poder calorífico superior e de densidade do biodiesel de mamona, foram feitos no laboratório do NEST/UNIFEI, utilizando um calorímetro IKA WORKS C-2000 [14], os resultados são mostrados na Tabela (4).

Tabela 4 - Propriedades dos combustíveis utilizados nos testes.

Misturas	PCS (MJ/kg)	Densidade á 25 °C
DF	45,098	0,8380
B5	44,578	0,8398
B10	44,240	0,8425
B15	43,955	0,8451
B20	43,567	0,8451
B25	43,034	0,8510
B30	42,686	0,8560
B50	41,890	0,8658
B75	39,362	0,8890
B100	38,144	0,9180

4.2 - Descrição do banco de ensaio e da metodologia do testes de desempenho.

O modelo a ser avaliado é uma micro-turbina Capstone 330 de combustível líquido (Diesel), potência de 30 kW, e eficiência de 26% nas condições ISO [15]. Para registrar os diferentes parâmetros térmicos, elétricos e de emissões, durante os testes com a micro-turbina, foi montado um sistema de medição e aquisição de dados utilizando um controlador lógico programável (CLP) e vários instrumentos para medir parâmetros de rendimento, como vazão de combustível, temperatura dos gases de exaustão e potência gerada. A Figura (4) mostra o esquema da micro-turbina com os pontos de medição. Os testes foram realizados com a micro-turbina operando em paralelo com a rede da concessionária. Para avaliar os níveis de emissão dos diferentes poluentes atmosféricos foi utilizado um analisador de gases da ECOLINE modelo 6000.

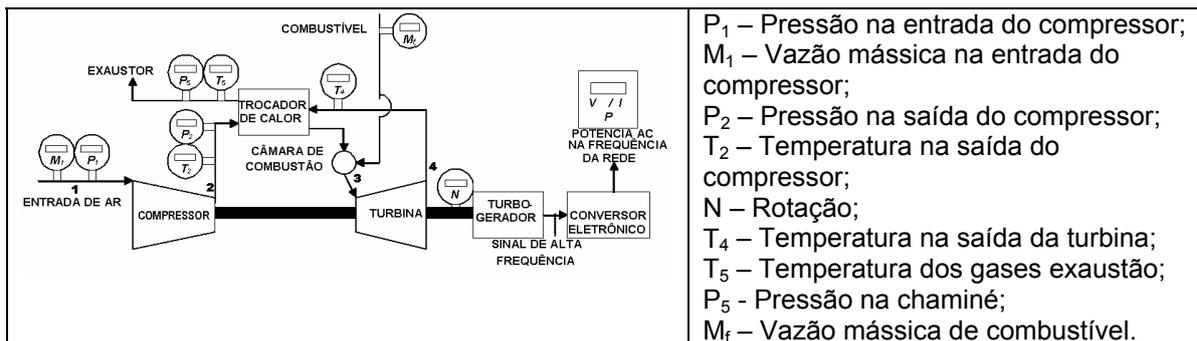


Figura 4 - Diagrama esquemático do sistema da micro-turbina.

4.2.1 - Cargas e tempos de operação

Inicialmente a micro-turbina foi acionada com Diesel e operou durante um período de 30 minutos, até atingir o regime permanente de operação, isto é, a condição de operação onde as variáveis não variam mais com o tempo. Esse regime pode ser controlado através da observação da temperatura dos gases de exaustão. Depois de atingida a condição de regime permanente, iniciou-se a substituição do Diesel pela mistura de biodiesel. Ao começar a operação da micro-turbina com uma nova mistura é conveniente esperar 20 minutos a plena carga, até ela atingir o regime permanente com o novo combustível. Para cada mistura de biodiesel alterou-se a potência da micro-turbina de 4 em 4 kW, até alcançar a condição de plena carga, deixando que a mesma estabilize durante um período de 10 minutos em cada condição, antes da realização da leitura dos dados.

5 - Resultados dos testes de desempenho térmico

A Figura (5) mostra os resultados da Potência corrigida (kW) versus Rotação corrigida (rpm) com a micro-turbina operando com Diesel e misturas de biodiesel. Pode-se observar que, com as misturas de biodiesel a potência foi ligeiramente menor (0,0010%), ou seja, quase a mesma potência em relação aos testes com o óleo Diesel.

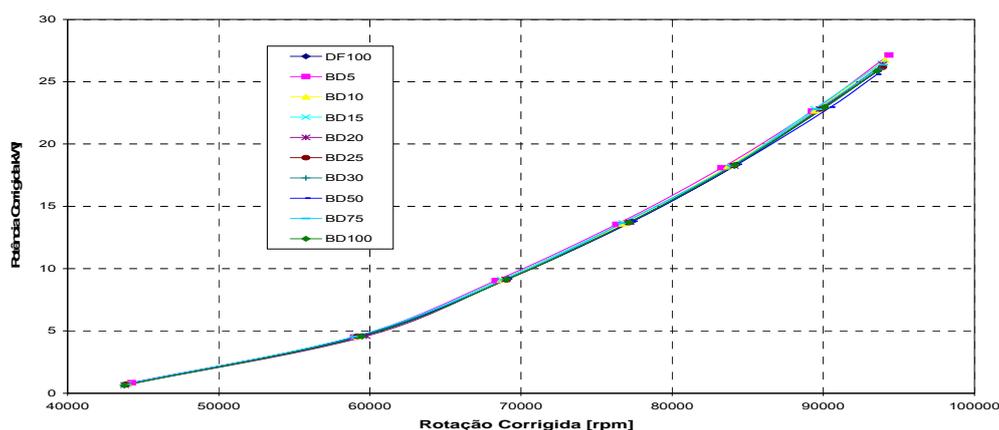


Figura 5 - Rotação da micro-turbina para cargas parciais

Analisando o consumo específico do biodiesel, pode-se notar que, há um aumento no consumo a cargas parciais, isto ocorre devido ao poder calorífico do biodiesel ser menor do que do Diesel, a Figura (6) apresenta a comparação de biodiesel/Diesel.

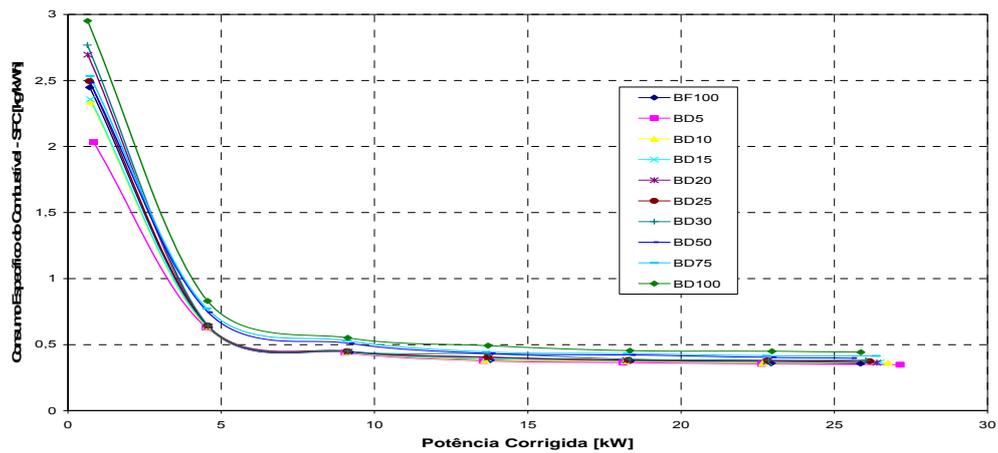


Figura 6 - Consumo específico de combustível

Observa-se que, a Figura (7) o *heat rate* não teve diferença a cargas parciais acima de 5 kW para as diferentes misturas e combustível puro, não prejudicando o desempenho térmico da máquina.

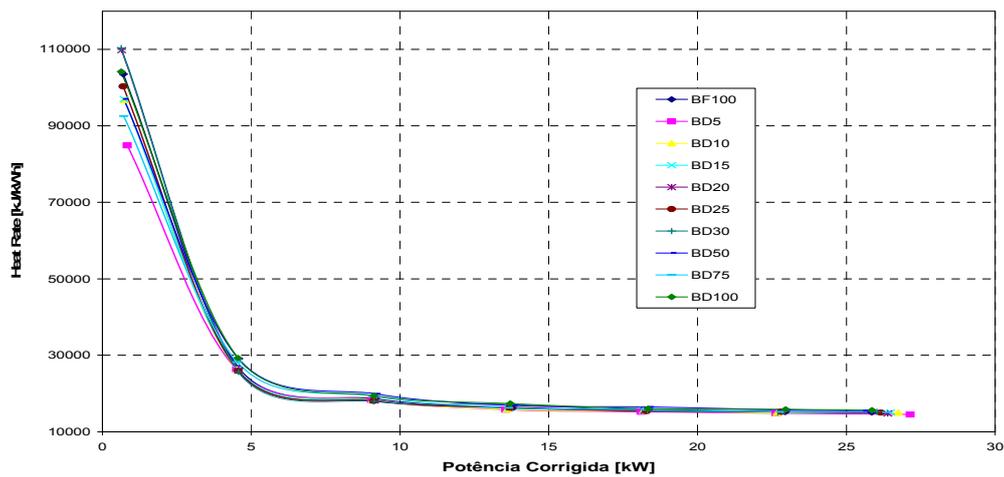


Figura 7 - Heat rate absoluto em cargas parciais

Na Figura (8) tem-se a vazão volumétrica estimada de combustível (l/h), pode-se observar que quando a micro-turbina opera com BD100, há um consumo maior em relação a todas as misturas e ao próprio Diesel. Para concentrações baixas de biodiesel o consumo permaneceu o mesmo do Diesel, e quando o motor, atinge a potência máxima de 26 kW com o biodiesel BD100 houve um consumo de 13 l/h, e com Diesel o consumo foi de 11 l/h, ou seja 2 l/h a menos que o biodiesel BD100. Como o poder calorífico do biodiesel é inferior ao do Diesel a um aumento no consumo de combustível a fim de manter a temperatura de saída da turbina

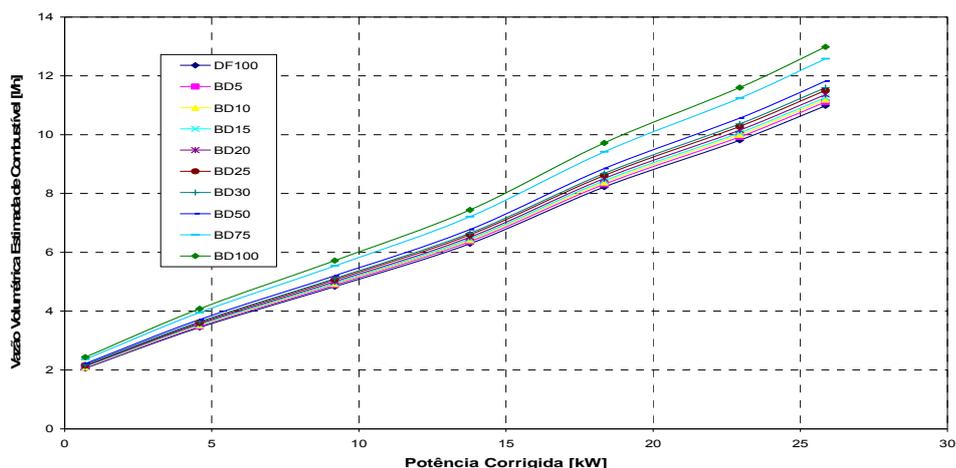


Figura 8 - Vazão volumétrica estimada de combustível

6 - Resultados dos testes de emissões

Analisando o gráfico apresentado na Figura (9), que relaciona o percentual de emissões de monóxido de carbono com a variação da potência da micro-turbina é possível notar que as emissões para o biodiesel puro são superiores às do diesel, sendo que para potências acima de 20 kW as emissões para o diesel foram inferiores.

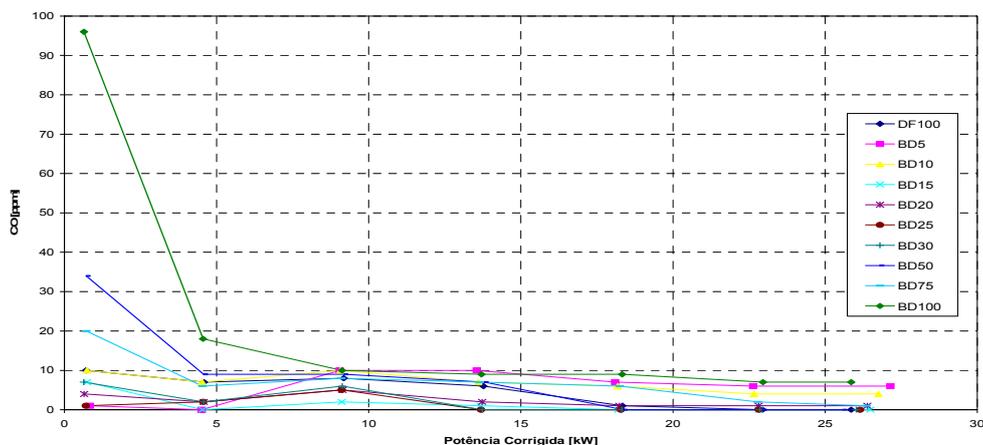


Figura 9 - Comportamento das emissões de CO

As emissões de NOx para o diesel puro se apresentaram coerentes, sendo superiores às das diferentes composições de biodiesel, isto motivado principalmente pela formação de NOx térmico devido ao maior poder calorífico do diesel. No entanto, as emissões, para as diferentes composições de biodiesel, apresentaram um comportamento não muito adequado a essa proposição, todavia vale lembrar que o controle da máquina procura manter uma temperatura constante na saída da turbina através do aumento da vazão de combustível. Há ainda que se considerar a viscosidade do biodiesel, que é maior do que a do diesel, bem como, a composição elementar de ambos os combustíveis.

A Figura (10) mostra o valor de NO, e se pode constatar que este diminuiu significativamente com o aumento da potência, para valores próximos de 10 kW. Acima deste valor, as emissões de NO tiveram um ligeiro aumento com o aumento da potência.

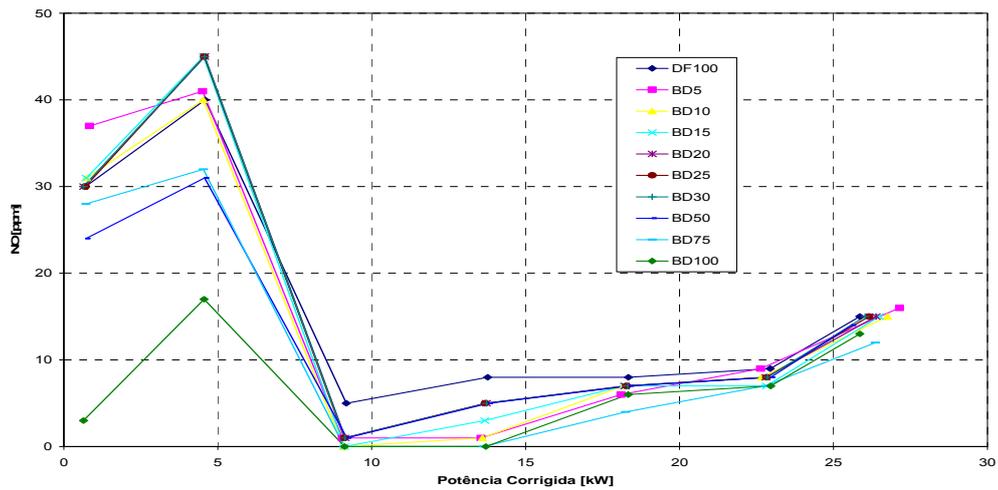


Figura 10 - Comportamento das emissões de NO

Enquanto que o NO_2 permaneceu inalterado e com valor quase nulo. Pode-se verificar esse comportamento no gráfico apresentado na Figura (11).

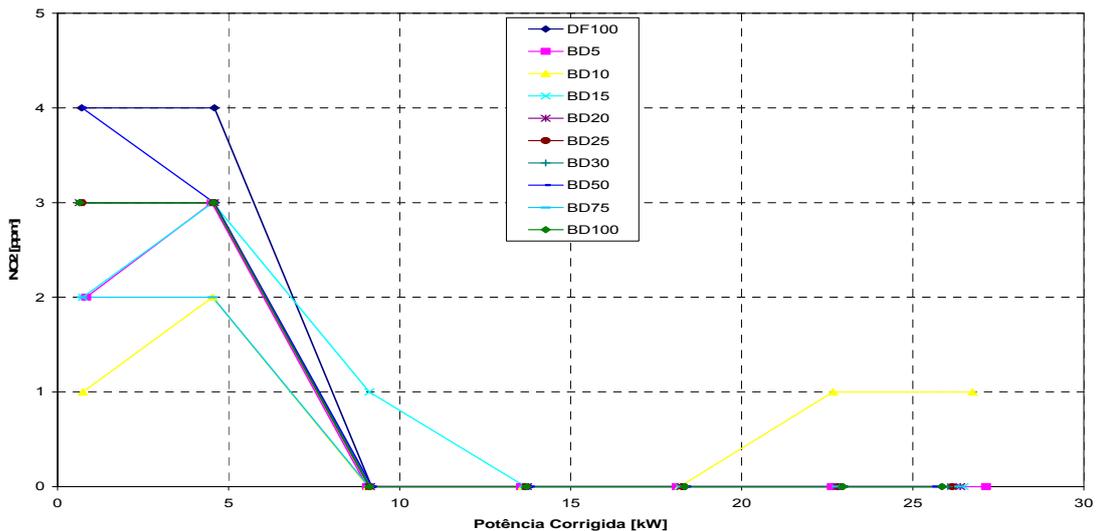


Figura 11 - Comportamento das emissões de NO_2

7 - CONCLUSÕES

Pode-se observar que não houve variações significativas no *heat rate* do biodiesel e suas misturas quando comparadas com o Diesel. Os testes de desempenho térmico mostram que o biodiesel puro tem um consumo específico maior que o Diesel, isto devido ao menor poder calorífico inferior do biodiesel puro comparado com o Diesel. Houve redução na vazão de ar de admissão do compressor para as misturas de biodiesel/Diesel. Nota-se que o Diesel e o biodiesel puro não apresentaram diferenças na vazão de ar. A razão é que a geometria e as velocidades são mantidas iguais, independentemente do combustível. Não houve mudança do funcionamento da micro-turbina durante os testes de desempenho térmico e não se perceberam vibrações, ruídos, falhas de funcionamento ou dificuldade na partida da máquina.

Foi observado o acúmulo de material na superfície do biodiesel ao deixá-lo em repouso. Esse material viscoso dificultou a alimentação do combustível no tanque de aquecimento. É

recomendável estudar melhor o conteúdo de glicerina no biodiesel, já que esse material pode-se acumular no sistema de combustível da micro-turbina, criando problemas quando operar por mais tempo.

Dependendo do biodiesel a ser utilizado é importante dispor de um sistema de pré-aquecimento, para com isto diminuir a viscosidade do mesmo, já que o biodiesel testado é bem mais viscoso que o Diesel.

Os valores de NO e NO₂ diminuíram significativamente com o aumento da potência, e como é típico na combustão, a maior parte do NO_x forma-se como NO. Os resultados dos testes mostraram que a operação da micro-turbina com Diesel puro, se caracteriza por uma maior emissão de NO_x do que durante a operação com biodiesel puro.

Com relação às leituras de SO₂, verificamos que este poluente permaneceu praticamente nulo para o biodiesel e com valores em torno de 1 ppm para o Diesel.

Os valores de CO para o biodiesel se mostraram um pouco mais elevado do que os valores de CO para o Diesel. Em geral, o acréscimo no teor do biodiesel nas misturas leva a redução na emissão de NO, sendo que os menores valores correspondem ao BD75 e ao BD100.

8 - Palavras-chave: Biodiesel, Micro-turbina, Emissões de Poluentes.

9 - Agradecimento: O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio do CENPES.

10 - Referências Bibliográficas

- [1] **Pilavachi, P.A., 2002;** *Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power*, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 2003-2014;
- [2] **Silva, E.,Do Nascimento, M.A., 2004,** "Geração Termelétrica" Volume 1, Editora Inter-ciência, RJ, Brasil;
- [3] **Saravanamuttoo, H., 2001,** "Gás Turbine Theory" Prentice Hall;
- [4] **PARENTE, S. E. José.** - Biodiesel o Livro: Aventura Tecnológica num País Engraçado, 30 março de 2003. Acesso em Setembro de 2004, no site em <http://www.tecbio.com.br>;
- [5] **ABIOVE** - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (2003). - Custo na produção de oleaginosas. Acesso em Fevereiro de 2005, no site: <http://www.abiove.com.br/abiov.html>;
- [6] **MEHER.L.C, SAGAR Vidya.D, NAIK.S.N** - Technical Aspects of production by Transesterification a Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2004) – 21;
- [7] **EPA. - United States Environmental Protection Agency,** - A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, Draft Technical Report. Epa 420-P-02-001, October, Washington, 2002;
- [8] **REVISTA TÉCNICA: RESÍDUOS.** Ano VIII - Nº 44 Set/Out de 1998, pp.43-45;
- [9] **FEM-UNICAMP,** "Medição de nível, interface e viscosidade de líquidos", http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Nivel_Viscosidade. Densidade do biodiesel, acesso em abril de 2005;
- [10] **PIOCH, Daniel** - Geração de Energia a Partir de óleos Vegetais "Puros" Primeiro Seminário Energético de Comunidade Extrativista - SAECX 2004 Módulo 1 – Biomassa – 3 e 4 julho de 2004;
- [11] **MA, F. & HaNNA, M.A.** Biodiesel production: a review. Bioresource Technology, v. 70, p. 1-15, 1999;
- [12] **Gomes, E.E.B.** Análise Técnico-econômica e Experimental de Micro-turbinas a Gás Operando com Gás Natural e Óleo Diesel, 2002;
- [13] **RABELO, I. D.** Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Centro Federal de Educação Tecnologia do Paraná;
- [14] **IKA,** "Analytical Line Calorimeters C 2000", http://www.esslab.com/ika_calorimeters.pdf, IKA CATALOG, 2003;
- [15] **Capstone Turbine Corporation,** Micro-turbine Model 330 System Operation Manual, USA, 2001.