



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CURSO DE GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**



**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE BODIESEL PRODUZIDO À PARTIR  
DE BOCAIÚVA E A INFLUÊNCIA DO USO DE DIFERENTES CATALISADORES E  
PROCESSOS DE TRANSESTERIFICAÇÃO**

**Davi Moreira Silva**

**Dourados - MS**

**2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CURSO DE GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**



**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE BODIESEL PRODUZIDO À PARTIR  
DE BOCAIÚVA E A INFLUÊNCIA DO USO DE DIFERENTES CATALISADORES E  
PROCESSOS DE TRANSESTERIFICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federal da Grande Dourados, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia, sob a orientação do Prof. Dr. Ramon Eduardo Pereira da Silva

Área de concentração: 3.05.02.01-2 -  
Termodinâmica

**Davi Moreira Silva**

**Dourados - MS**

**2022**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**ANEXO G ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Às 14:00 horas do dia 01 de junho de 2022, realizou-se

de forma remota via reunião em modo online e síncrona a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia, intitulado **ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE BIODIESEL PRODUZIDO À PARTIR DE ÓLEO DE BOCAIUVA (*Acrocomia aculeata*) E A INFLUÊNCIA DO USO DE DIFERENTES CATALISADORES E PROCESSOS DE TRANSESTERIFICAÇÃO** de autoria do discente DAVI MOREIRA SILVA, como requisito para a aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II. Após a defesa e posterior arguição, a banca examinadora concluiu que o Trabalho apresentado deve ser:

( x ) Aprovado ( ) Reprovado

O(A) discente declara ciência de que a sua aprovação está condicionada à entrega da versão final (encadernada, corrigida e assinada) do Trabalho de Conclusão de Curso, nos termos em que especifica o regulamento do componente curricular, em anexo ao Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Energia da UFGD. O(A) orientador(a) se responsabilizará pela verificação e aprovação das correções do manuscrito feitas pelo(a) discente para a elaboração da versão final.

**OBSERVAÇÕES ADICIONAIS**

Executar as correções / alterações sugeridas pela banca

**DISCENTE**

Nome: Davi Moreira Silva

Assinatura: 

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador: Ramon Eduardo Pereira Silva

Assinatura: 

Membro: Eduardo Manfredini Ferreira

Assinatura: 

Membro: Reginaldo Ribeiro de Sousa

Assinatura: 

## Resumo

Existem diversos benefícios advindos do uso de biodiesel, tanto em sua forma pura quanto misturado com óleo diesel. Os menores índices de poluição quando comparado ao uso de combustíveis exclusivamente fósseis e o fato de ser obtido a partir de fontes renováveis são alguns desses benefícios. Tendo isso em vista, foram realizados testes experimentais com o auxílio de um motor gerador, utilizando biodiesel produzido através do óleo de bociuíva, de nome científico *Acrocomia aculeata*, com o uso de diferentes catalisadores, hidróxido de potássio e hidróxido de sódio, e processos de transesterificação, com etanol e com metanol. O objetivo deste estudo é mostrar as análises energéticas e exergéticas dos combustíveis, e buscar reflexos dos métodos utilizados na obtenção do biodiesel nessas análises.

**Palavras-chave:** Biodiesel; Energia; Exergia; Emissão de Poluentes.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** DINIC - UFGD

## Abstract

There are several benefits arising from the use of biodiesel, both in its pure form and mixed with diesel. The lowers levels of emissions when compared to the use of exclusively fossil fuels and the fact that it is obtained from renewable sources are some of these benefits. Experimental tests were carried out with the aid of a motor generator, using biodiesel produced from bociuíva oil, scientifically known as *Acrocomia aculeata*, with the use of different catalysts, potassium hydroxide and sodium hydroxide, and transesterification processes, with ethanol and methanol. The objective of this study is to show the energetic and exergetic analyzes of the produced fuels, and to seek reflections of the methods used to obtain biodiesel in these analyses.

**Keywords:** Biodiesel; Energy; Exergy; Emissions.

## Introdução

É possível encontrar diversas pesquisas a respeito de combustíveis alternativos, especialmente nos anos que sucederam a crise do petróleo na década de 1970, sendo nítido no Brasil o foco no Etanol, evidenciado pela criação do programa nacional do álcool (Proálcool) e mais recentemente, pelo lançamento dos primeiros veículos com tecnologia flexível em 2003. No mesmo ano foram iniciados os estudos para a introdução do biodiesel na matriz energética nacional, sendo que atualmente o etanol e o biodiesel são importantes componentes dessa matriz e representam um diferencial do Brasil em relação ao resto do mundo.

Nos dias de hoje, o interesse nos biocombustíveis ocorre principalmente pela diminuição dos níveis de emissões de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx) quando comparados ao diesel puro (Pinto et al., 2005; De Caro et al., 2001). Outro fator importante é que, por possuir características semelhantes ao óleo diesel comum, praticamente não requer alterações em motores já existentes.

É possível obter óleo vegetal para a produção de biodiesel a partir da bociuíva, uma palmeira nativa do Brasil e que pode ser encontrada desde o México até a Argentina, sendo sua ocorrência mais abundante nas Antilhas, Costa Rica, Paraguai e Brasil (Salis; Mattos, 2009).

A matéria-prima mais utilizada no país para a produção de biodiesel é a soja, a qual representa quase 69% da origem do biodiesel nacional, enquanto a gordura animal representa 13%, outros materiais graxos 11% e o uso de outras oleaginosas apenas 7%, segundo o balanço energético nacional (BEN) de 2018. Porém, o uso de soja como base não é o mais indicado devido à instabilidade de seu óleo, o que o torna mais predisposto a sofrer variações nas suas características físico-químicas. Seu teor de óleo é inferior quando comparado à bociuíva, além de praticamente metade da soja produzida nacionalmente ser exportada para outros países, o que pode influenciar o custo de produção de acordo com os valores no mercado externo. Este estudo permite analisar a viabilidade técnica da bociuíva como uma alternativa ou complemento ao óleo diesel para operação em motores de ignição por compressão, visando diversificar a matéria-prima para a produção de biodiesel, reduzindo a dependência da soja como matéria-prima.

## Metodologia

Foram produzidas quatro amostras de biodiesel, sendo uma amostra feita com etanol e hidróxido de potássio, uma amostra feita com etanol e hidróxido de sódio, outra amostra feita com metanol e hidróxido de potássio e a última feita com metanol e hidróxido de sódio. Portanto, foram realizados ensaios com B00 (diesel sem adição de biodiesel) para determinação de uma *baseline*. A referência das amostras utilizadas e suas respectivas nomenclaturas utilizadas no restante desta publicação está localizada na tabela 01 abaixo.

Tabela 01 – Referência das amostras utilizadas

Amostra	B00	B100 eKOH	B100 eNaOH	B100 mKOH	B100 mNaOH
Rota de obtenção	Óleo diesel puro (0% biodiesel)	Biodiesel puro (100%) Etanol + Hidróxido de potássio	Biodiesel puro (100%) Etanol + Hidróxido de sódio	Biodiesel puro (100%) Metanol + Hidróxido de potássio	Biodiesel puro (100%) Metanol + Hidróxido de sódio

Fonte: Própria (2021).

Com as amostras de biodiesel prontas, foram realizados três ensaios com o motogerador com as amostras B100. Antes do início dos ensaios, esperou-se 1800 segundos para garantir que o motogerador se encontrava na temperatura ideal de operação e em funcionamento estável após o monitoramento dos parâmetros de funcionamento por meio de um termopar acoplado ao sistema de escape. A potência demandada foi controlada por meio de um banco de resistores que, neste caso, foi de 1050 Watts.

Cada ensaio teve duração de 180 segundos e consistiu na medida do consumo de combustível do motogerador, na medição da carga, em Watts, que efetivamente foi entregue e na coleta das emissões dos gases de exaustão, foi instalado um tubo na admissão do motor onde foi instalado um tubo de pitot. Garantiu-se a distância de no mínimo quinze vezes o diâmetro do tubo de admissão entre a entrada deste tubo e o medidor pitot de maneira a se garantir o completo desenvolvimento do fluxo. Com base nesses dados, são realizadas as análises energéticas e exergéticas e são determinados os níveis de  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{SO}_2$ , onde é possível verificar quais as influências dos diferentes métodos de obtenção de biodiesel no produto.

Figura 1 – Conjunto motogerador utilizado durante os ensaios



Fonte: Própria (2021).

Com esses dados em mãos, é possível efetuar a análise energética adotando algumas aproximações como a condição padrão de temperatura e pressão (298,15K e 1 atm), uma eficiência de 100% do gerador e realizando o cálculo das frações mássicas nos gases de escape para calcular a entalpia específica do mesmo, além do cálculo do PCI das amostras. É importante notar que a análise realizada é comparativa, ou seja, o grau de incerteza é o mesmo para todos os ensaios realizados e as incertezas dos equipamentos utilizados estão descritas na tabela 02 abaixo.

Tabela 02 – Precisão dos equipamentos utilizados

Medida	Dispositivo	Precisão	Unidade
Massa	Balança digital	±1,00	g
Tempo	Cronômetro digital	±0,01	s
Temperatura	Termopar tipo K	±0,10	°C
Fluxo de ar na entrada	Anemômetro de tubo de pitot	±1,00	m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Potência de freio	Multímetro digital	±0,10	W
O <sub>2</sub>	Sensor eletroquímico	±0,10	%
CO <sub>2</sub>	Sensor infravermelho (NDIR)	±0,30	%
CO	Sensor eletroquímico	±10	ppm
NO <sub>x</sub>	Sensor eletroquímico	±5	ppm
CH <sub>4</sub>	Sensor infravermelho (NDIR)	±1	ppm

Fonte: Própria (2021).

A análise exergética foi realizada seguindo o mesmo comportamento das taxas de energia da análise energética. Neste caso, considerou-se as entropias específicas. A exergia específica dos gases de exaustão foi assumida como a somatória das exergias termomecânicas e químicas da composição dos gases de combustão pela fração mássica dos componentes. A exergia destruída foi considerada como a exergia restante em relação à exergia dos gases de exaustão e a potência medida.

Para representar a quantidade de combustível necessária para gerar uma unidade de potência, é utilizado o cálculo do consumo específico de combustível (bsfc), o que, juntamente com a análise de eficiência térmica e a eficiência exergética, permitiram a análise do desempenho das amostras.

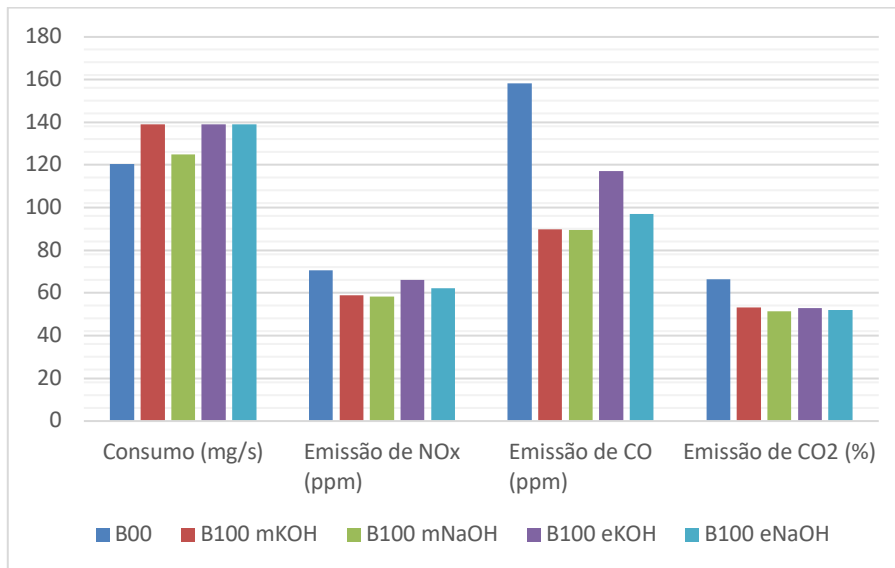
## Resultados e Discussão

Após a análise dos dados de consumo obtidos, foi calculado o valor médio para os três ensaios realizados com cada combustível. Conforme esperado, pelo seu PCI maior, o menor consumo observado foi o do B00, seguido pela amostra B100 produzida pela rota metálica e com hidróxido de sódio (com um consumo médio 5% maior). As demais amostras apresentaram um consumo similar, cerca de 15% maior que o do B00.

As amostras B100 metálicas apresentaram os menores índices de emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) em partes por milhão (ppm), cerca de 17% menores quando comparadas ao B00 e cerca de 8% menores que as amostras B100 etílicas. Isso também foi observado nos índices de emissão de monóxido de carbono (CO), onde as amostras B100 metálicas apresentaram uma redução de 43% em média quando comparadas ao B00, enquanto as amostras B100 etílicas apresentaram uma redução média de 32%.

No caso do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a redução média foi muito parecida entre todas as amostras de B100, com uma média de 20% na redução em porcentagem da concentração de CO<sub>2</sub> ao ser comparado com os resultados do B00. No caso das concentrações de sulfeto de hidrogênio e hidróxido de enxofre, os valores obtidos foram praticamente zero durante toda a duração dos ensaios e, portanto, não foram estudadas mais a fundo. Os dados de vazão mássica de combustível e emissões de poluentes são mostrados na Figura 2 para facilitar a comparação.

Figura 2 – Comparativo de consumo e emissão de poluentes das amostras B100 e B00

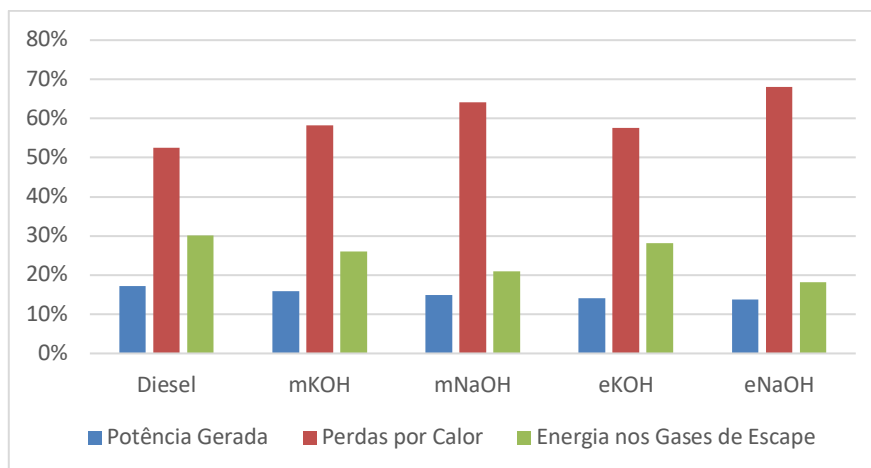


Fonte: Própria (2021).

No caso da análise energética, a quantidade de energia que entra no sistema ao utilizar as amostras B100 era cerca de 4% maior do que ao utilizar as amostras B00, ao compararmos a quantidade de combustível que entrava e multiplicar pelo PCI do combustível utilizado. Nenhuma amostra de biodiesel foi capaz de gerar a mesma quantidade de energia elétrica que o B00. A Figura 3 demonstra a distribuição do uso da energia do combustível no sistema durante a operação mais eficiente do motogerador (carga de 1050W), onde é possível visualizar que há uma maior perda por calor durante o uso de todas as amostras de B100, assim como uma redução na energia dos gases de escape, apesar da potência gerada ser parecida, variando entre 16 e 14%, frente os 17% quando abastecido com B00.

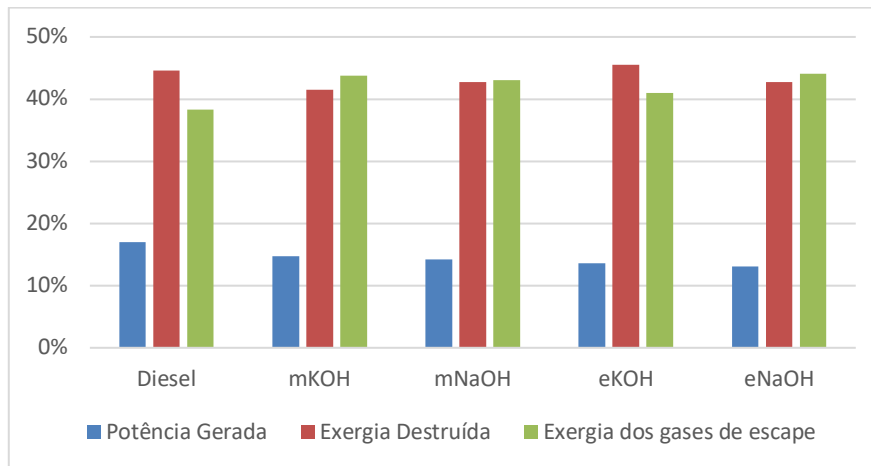
No caso da análise exérgica, podemos avaliar com o auxílio da Figura 4 que o resultado obtido demonstra um resultado equilibrado tanto para as amostras de biodiesel, quanto para o diesel puro. Como esperado, o comportamento para a exergia destruída é exibida de forma contrária ao que acontece para a taxa de exergia do escapamento. É importante notar também que embora a entalpia específica para o O<sub>2</sub> seja mais baixa, a entropia específica é mais alta, em junção com o aumento da sua proporção nas amostras B100, levando a uma contribuição mais exérgica do oxigênio. Ou seja, a conversão exérgica é mais equilibrada do que a conversão energética no caso das amostras de biodiesel, pois há uma maior paridade entre a exergia destruída e a taxa de exergia dos gases de escape se comparado as taxas de perdas por calor e a energia nos gases do escape.

Figura 3 - Distribuição da energia do combustível no sistema



Fonte: Própria (2021).

Figura 4 - Distribuição da exergia do combustível no sistema



Fonte: Própria (2021).

## Conclusões

Com base nos resultados obtidos anteriormente, entre as amostras de biodiesel, a que apresentou consistentemente vantagem frente as demais foi a amostra obtida pela rota metílica e com o uso de hidróxido de sódio como catalisador. O consumo obtido pela mesma foi apenas 5% maior que o do óleo diesel puro e ao mesmo tempo apresentou as maiores reduções nos índices de  $\text{NO}_x$ , CO e  $\text{CO}_2$ , apesar de ter maiores perdas por calor e menor eficiência. A segunda amostra que se aproximou dos resultados foi a obtida pela rota metílica e com o uso de hidróxido de potássio como catalisador.

Em conclusão, pode-se determinar que, para a produção do biodiesel de bocaiuva, o álcool mais indicado é o metanol, influenciando mais o produto final do que o catalisador escolhido. Com relação ao catalisador, as amostras com hidróxido de sódio obtiveram uma performance levemente superior quando comparada as amostras com hidróxido de potássio. Outro fator importante é frisar que as amostras produzidas com etanol sofreram com a maior umidade durante o processo de transesterificação, sendo necessário realizar mais um processo de desumidificação e, por consequência, a quantidade de produto obtido foi menor. É importante notar também que os catalisadores escolhidos são os mais utilizados para a produção de biodiesel por conta de suas vantagens econômicas frente às demais opções.

A rotação do motogerador foi afetada durante os ensaios com as amostras etanoicas pois, em alguns casos, não foi possível obter a carga requerida, sendo necessária a realização de mais de um ensaio. Os benefícios do uso de biodiesel do ponto ambiental se confirmaram com aqueles observados na literatura, assim como o maior consumo e a menor eficiência obtidos.

## Referências bibliográficas

ANP, Biodiesel, 2019. Disponível em <<http://anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>>

SALIS, S. M., MATTOS, P. P. Floração e Frutificação da Bocaiúva (*Acrocomia aculeata*) e do Carandá (*Copernicia alba*) no Pantanal, 2009. Disponível em <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAP-2010/57274/1/COT78.pdf>>

DE CARO, P. S. et al. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines, 2001. Disponível em: <[http://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00117-4](http://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00117-4)>

GARCIA, C. M., Transesterificação de óleos vegetais, 2006. Disponível em <<http://biq.iqm.unicamp.br/arquivos/teses/vtIs000386845.pdf>>

MORAN, M. J., Shapiro, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 7th edition, John Wiley & Sons, 2011.

NETO, P. R. C., ROSSI, L. F. S., Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras, 1999. Disponível em <<https://www.scielo.br/pdf/qn/v23n4/2654.pdf>>



OLIVEIRA, S. V., REYS, M. A., Estruturação e consolidação da produção do biodiesel – base de soja – no Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em <<http://w3.ufsm.br/extensaorural/art5ed17.pdf>>

PINTO, A. C. et al. Biodiesel: an overview, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532005000800003>>