**Análise do desempenho de um motor diesel utilizando misturas de diesel, óleo vegetal hidratado e álcoois**

**Pedro B. Ventin-Muniz1,2, Felipe Andrade-Torres 1,3, Ednildo Andrade-Torres 1**

1Laboratório de Energia, Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Brasil. Email: pventin\_@hotmail.com

2 Área Automotiva, SENAI CIMATEC, Brasil. Email: pedro.muniz@fieb.org.br

3Laboratório de Motores, Universidade Federal do Recôncavo Baiano, Brasil. Email: ftorres@ufrb.edu.br

**Resumo**

A crescente demanda energética prevista para os próximos anos e o aumento alarmante dos níveis de poluentes emitidos na atmosfera têm feito pesquisadores buscarem combustíveis alternativos. Álcoois e o óleo vegetal hidratado (HVO) são biocombustíveis em potencial devido à sua disponibilidade e propriedades físico-químicas para uso em motores de ignição por compressão. O uso de misturas de álcoois, HVO e diesel podem causar redução na emissão de poluentes. O menor poder calorífico dos álcoois pode reduzir o consumo específico de combustível, mas isso deve ser compensado pelo maior número de cetano do HVO. O objetivo deste artigo é apontar um teor de misturas que envolvem diesel, HVO e álcoois de acordo com a revisão da literatura. Os volumes indicados para a mistura devem conter 20 a 24% de HVO e 4 a 6% de álcool; além do diesel.

**Palavras chave:** Diesel; HVO; Álcoois; Motor.

**Abstract**

The growing energy demand forecast for the coming years and the alarming increase in the levels of pollutants emitted into the atmosphere have made researchers look for alternative fuels. Alcohols and hydrated vegetable oil (HVO) are possible biofuels due to their availability and physicochemical properties for use in CI engines. The use of mixtures of alcohols, HVO and diesel can cause a reduction in the emission of pollutants due to the higher oxygen content and lower viscosity of the fuel. The lower calorific value of alcohols can reduce the specific fuel consumption, but this must be offset by the higher cetane number of HVO. The objective of this article is to point out a content of mixtures involving diesel, HVO and alcohols according to the literature review. The volumes indicated for the mixture must contain 20 to 24% of HVO and 4 to 6% of alcohol; in addition to diesel.

**Keywords:** Diesel; HVO; alcohols; Motor.

# Introdução

Em um cenário internacional, o mundo tem enfrentando problemas relacionados ao aumento populacional e das crescentes demandas urbanas e industriais. Estima-se que a população global que vive nos grandes centros urbanos deverá aumentar para 9,5 bilhões de pessoas até 2050 [1]. Dentre as necessidades urbanas e industrias, a demanda energética vem crescendo, principalmente em países populosos como a Índia, China e o Brasil [2].

A poluição do ar é um dos principais perigos para a saúde humana [3][4] uma vez que a composição da poluição, a concentração e o tempo de exposição são fatores que podem causar efeitos prejudiciais na saúde [4]. A queima dos combustíveis fósseis pelos motores de combustão interna é frequentemente associada ao aumento da poluição e aos efeitos de mudanças climáticas [5]. Estas emissões de poluentes ocorrem devido à combustão incompleta dos combustíveis, apresentando variações nas concentrações de acordo com os equipamentos e combustíveis utilizados.

Dentre os poluentes emitidos pelos motores de ignição por compressão, o material particulado (MP) e a fuligem são alguns dos que podem provocar um elevado risco a saúde e ao meio ambiente [3]. O MP é uma mistura de partículas sólidas e líquidas que são encontradas em suspensão no ar atmosférico, e apresentam uma variação do seu diâmetro aerodinâmico (Figura 1). As partículas emitidas são comumente classificadas pelo seu diâmetro aerodinâmico (dp): nanopartículas (dp <50 nm); partículas ultrafinas (50 nm <dp> 100 nm); partículas finas (100 nm <dp> 1µm) e partículas grossas (dp >1 µm). Partículas inferiores à 2,5 µm podem penetrar na corrente sanguínea através dos alvéolos pulmonares [6]. Alguns estudos demonstram que a exposição prolongada ao MP provocam o aumento da mortalidade cardiovascular, além do desenvolvimento de doenças respiratórias [4].

Outros poluentes também podem apresentar riscos à saúde, como o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os óxidos de nitrogênio (NOx) e óxidos de enxofre (SOx); além de representar riscos ao meio ambiente.

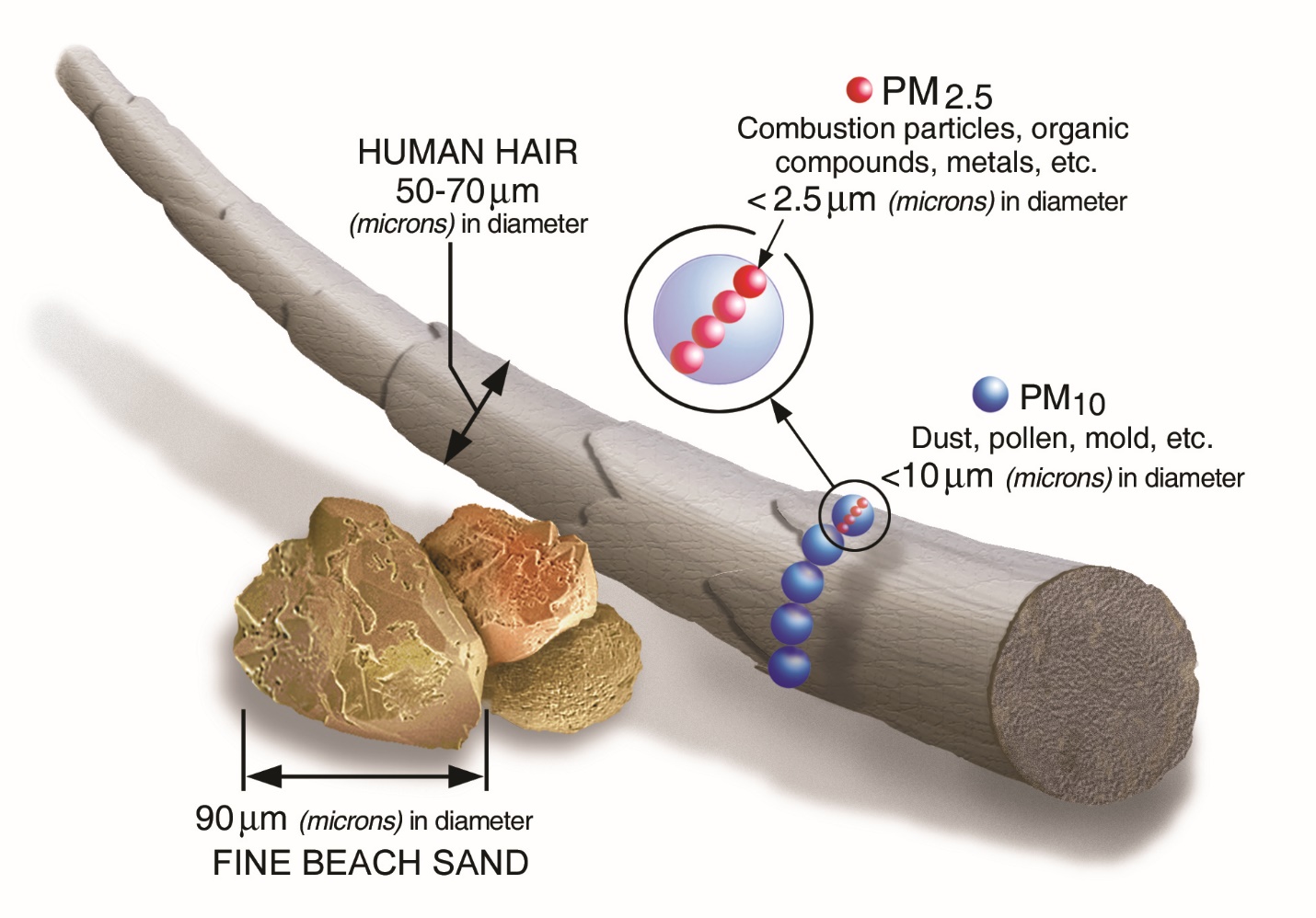
****

Figura 1. Comparação do tamanho de partículas do Material Particulado. Fonte: epa.gov/pm-pollution.

O monóxido de carbono é um gás venoso incolor e inodoro, produto da combustão incompleta na câmara de combustão de um motor [7], devido à falta de oxigênio capaz de oxidar a mistura ar/combustível [8].

A formação de NOx está associada ao pico de pressão e a temperatura dentro do cilindro, à concentração de oxigênio presente na mistura ar/combustível e à duração da reação de combustão [7].

O setor de transporte é um dos maiores consumidores de combustíveis fósseis e vem utilizando dos biocombustíveis para a redução da dependência do petróleo [9]. Além da redução da dependência dos combustíveis fósseis, os biocombustíveis podem representar uma alternativa na redução dos poluentes emitidos. Dentre os mais variados biocombustíveis os álcoois como: o metanol, o butanol e o etanol vem sendo praticados como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Comumente estes são utilizados em motores de ignição por centelha devido as suas propriedades físico-químicas mais próximas à gasolina [2]. Contudo diversos pesquisadores avaliam o uso de álcoois junto a misturas envolvendo o Diesel fóssil. O biodiesel é um biocombustível derivado da biomassa, grãos comestíveis, algas, além de óleos e graxas residuais. A sua obtenção é possível graças a um processo de transterificação, o qual permite que a matéria-prima reaja com uma combinação de álcool e catalisadores, possibilitando o surgimento do biodiesel [10].

O uso do biodiesel vem sendo estudado por diversos pesquisadores ao longo do tempo, e a sua aplicação tem sido avaliada de forma parcial ou total em relação ao Diesel fóssil.

A substituição parcial ou total do diesel por biodiesel trouxe alguns inconvenientes como o aumento de óxidos de nitrogênio, do consumo específico de combustível e da emissão de MP para partículas inferiores à 2,5 µm [11]. Estes resultados são semelhantes ao encontrados por outros pesquisadores e são associados a maior viscosidade cinemática do biodiesel em relação ao Diesel. A maior viscosidade proporciona uma formação de zonas ricas de combustível, o que leva a uma maior queima incompleta devido à baixa oxidação das partículas de CO e HC. O aumento do NOx é associado as maiores temperaturas de combustão no cilindro devido as maiores pressões encontradas na câmera de combustão. Esta combinação de maior pressão e temperatura, junto a presença das moléculas de oxigênio e nitrogênio proporcionam a geração dos óxidos de nitrogênio. Nesse caso, os álcoois podem ser utilizados junto ao biodiesel e/ou diesel para provocar uma redução na temperatura de combustão devido ao seu alto calor latente.

A combinação de uma mistura envolvendo o uso de álcoois, biodiesel e Diesel foi avaliada por diversos pesquisadores, contudo apresentam alguns pontos negativos como o aumento do consumo específico de combustível dado a redução do PCI da mistura gerada [6]. Neste caso, um possível substituto do biodiesel pode ser o óleo vegetal hidratado (HVO). Este biocombustível apresenta a mesma matéria-prima que o biodiesel, porém o seu processo de produção utiliza o hidroprocessamento ao invés da trasnterificação.

Este processo resulta em um combustível com melhores propriedades físico-químicas em comparação ao biodiesel, o que pode significar uma combustão mais completa (Tabela 1). O seu uso tem apresentado bons resultados quando utilizado junto ao Diesel, porém devido ao seu alto número de cetano, alguns estudos observaram uma maior emissão dos óxidos de nitrogênio. Portanto, o uso de uma mistura envolvendo o HVO, Diesel e álcoois pode representar uma alternativa visando a redução dos poluentes emitidos pela queima de combustível.

Tabela 1. Características físico-químicas do Diesel, biodiesel e HVO.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Propriedades físico-químicas | | | | |
| Propriedades | Método | Diesel | Biodiesel | HVO |
| Densidade à 15 ºC (kg/m3) | EN ISO 12185 | 843,8 | 885,9 | 775,8 |
| Viscosidade cinemática a 40 ºC (mm²/s) | EN ISO 3104 | 2,24 | 4,19 | 2,65 |
| Poder calorífico inferior (MJ/kg) | UNE 51123 | 42,54 | 37,30 | 43,73 |
| Número de cetano | ASTM D613 | 44,7 | 55,4 | 81,8 |

Fonte: Adaptado de Lapuerta [12].

# Metodologia

Diversas pesquisas experimentais são realizadas afim de verificar alternativas para os problemas ambientais causados pela queima dos combustíveis fósseis. Contudo, estes trabalhos apresentam variações do volume de HVO e álcoois nas misturas com Diesel mineral. Portanto este trabalho visa sintetizar as diversas pesquisas experimentais realizados com o uso de Diesel, HVO e/ou álcoois por pesquisadores, apresentando as suas principais conclusões e indicar uma mistura ótima para o funcionamento de um motor de ignição por compressão. Para tal foram selecionados diversos artigos de modo que cada um apresentasse contribuições sobre o tema proposto, o que indicava tratar-se de uma revisão de literatura ou experimentos realizados.

A busca bibliográfica foi realizada em julho de 2022, utilizando o buscador Periódico CAPES, disponível em https://www.periodicos.capes.gov.br. As palavras-chave utilizadas foram: Óleo vegetal hidratado; HVO; Diesel; Aditivo; Álcool; Álcoois; Motor de combustão interna; Motor diesel. Estas palavras foram relacionadas entre si ou pesquisadas de forma individual, afim de identificar os trabalhos.

Os artigos dos últimos 10 anos foram selecionados para que cada um apresentasse contribuições sobre o tema proposto, o que indicava tratar-se de uma revisão de literatura ou experimentos realizados na língua inglesa. Alguns artigos foram selecionados independentemente da data de publicação devido à sua relevância científica para este trabalho.

# Resultados

Os combustíveis são substâncias utilizadas nos motores de ignição para a geração de trabalho mecânico. Os motores de ignição por compressão podem operar com diversas combinações de combustíveis devido as suas características como alta taxa de compressão e a ausência de centelha. Os combustíveis mais utilizados por esses motores em aplicações rodoviárias são o Diesel fóssil e o biodiesel. O uso de álcoois como aditivos e o HVO vem se apresentando como alternativas visando a redução das emissões de poluentes e o aumento do desempenho destes equipamentos.

## Óleo vegetal hidratado

O óleo vegetal hidratado se apresenta como uma opção ao biodiesel. Este é um biocombustível originado através de um processo de hidrotratamento onde o H2 no processo irá converter a matéria-prima em compostos parafínicos [13]. O HVO não apresenta oxigênio na sua estrutura molecular devido a hidrogenização das ligações duplas nas cadeias de triglicerídeos [12], o que o torna mais próximo ao Diesel fóssil. O seu subproduto é o propanol, que apresenta um valor comercial maior em relação a glicerina, gerada pela transterificação [14].

## Álcoois

Os álcoois são substâncias utilizadas junto ao Diesel fóssil visando reduzir as emissões de HC’s, NOx e fuligem devido à redução de temperatura provocada na câmera de combustão [6]. As estruturas aromáticas presentes nos combustíveis são associadas a formação da fuligem [15], portanto a presença do oxigênio nos álcoois também influencia na redução da quantidade dos precursores de fuligem uma vez que participa realizando a sua oxidação [16]. A redução do MP também é associada a presença de moléculas de oxigênio presentes nos álcoois, o que proporcionam uma combustão mais completa [17]. Dada as características físico-químicas, os álcoois adicionados ao Diesel podem provocar alterações na densidade, na viscosidade e no número de cetano das misturas; o que resulta em variações no desempenho do equipamento [18]. Os principais álcoois utilizados em misturas envolvendo o Diesel são: o metanol, o etanol, o propanol, o butanol e o pentanol [19]. Cada um destes pode trazer diferentes características a mistura de combustível, uma vez que a sua estrutura molecular afeta a combustão [16]. A presença de altos teores dos álcoois pode provocar um aumento no consumo específico de combustível, uma redução na qualidade da atomização do jato de injeção e a perda da estabilidade química da mistura.

## Efeitos na combustão

Uma pesquisa realizada avaliou o uso de uma mistura entre HVO e 20% de éter di-n-pentílico (DNPE - *Di-n-pentyl ether*).

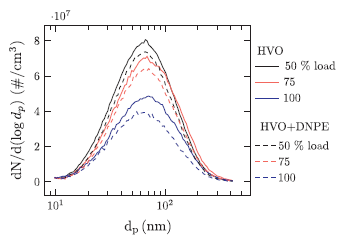
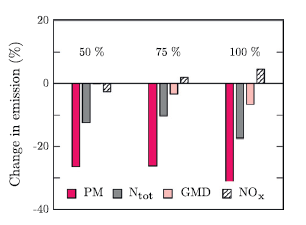


Figura 2. Mudanças relativas nas emissões causadas pelo uso de 20% de DNPE com o combustível HVO com 50%, 75% e 100% de carga do motor. Fonte: Happonem [16].

O experimento contou com um motor Diesel em um regime de rotação constante (1500 rpm) e variação de carga (50%, 75% e 100%). Os resultados demonstraram uma redução para a massa de MP, no número total de partículas e nos diâmetros médios geométricos. A emissão do NOx apresentou um comportamento variado. A massa do MP reduziu cerca de 25 a 30% e a emissão total no número de partículas (Ntot) de 10 a 17%. As alterações na emissão de NOx ficaram abaixo de 5% em todas as cargas medidas [16].

Um trabalho similar realizou o uso de biobutanol onde o mesmo foi avaliado junto a uma mistura de óleo de rícino e HVO. A adição de 5% do rícino foi justificada devido à baixa lubrificação do biobutanol. O HVO foi adicionado junto a mistura em concentrações de 5/95, 10/90 e 20/80 v/v; comparados a 100% do Diesel fóssil e 100% de HVO [20]. O teste ocorreu em regime de rotação constante e carga variável. O aumento da concentração do biobutanol nas misturas promoveram um aumento do consumo específico de combustível, além de maiores emissões do HC. Houveram significativas reduções da fumaça emitida, do CO e CO2. A redução da razão da massa entre o carbono e o hidrogênio (C/H) na mistura em comparação ao Diesel foi justificada como um dos motivos para a redução dos valores encontrados. Todas as misturas avaliadas com a adição do butanol promoveram reduções na emissão de NOx, sendo a mistura contendo 5% de biobutanol com melhores resultados. A avaliação do gráfico de temperatura e pressão do cilindro indicaram que a adição do 20% de biobutanol provocou a elevação da temperatura de pico na combustão; além da duração e pressão de combustão. A adição de maiores concentrações de biobutanol provocou um aumento na densidade da mistura, além do teor de oxigênio. Estes fatores já eram esperados devido as características deste álcool e as propriedades físico-químicas dos combustíveis avaliados são demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2. Características físico-químicas do Diesel, HVO e misturas com Butanol.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Propriedades físico-químicas | | | | | |
| Propriedades | Diesel | HVO | HVO B5 | HVO B10 | HVO B20 |
| Densidade à 15 ºC (kg/m3) | 830,4 | 780,0 | 780,4 | 782,4 | 786,4 |
| Conteúdo de O2 (% m/m) | 0 | 0 | 1,11 | 2,21 | 4,40 |
| Poder calorífico inferior (MJ/kg) | 43,1 | 44,1 | 43,54 | 42,98 | 41,87 |
| Número de cetano | 51 | 70 | 67,3 | 64,6 | 59,3 |

Fonte: Adaptado de Valeika [20].

Apenas o consumo mássico de combustível do HVO e HVOB5 foram menores em relação ao Diesel fóssil. A combinação dos menores valores de densidade e maior PCI (poder calorífico inferior) contribuem para a redução do consumo específico de combustível. A análise do BTE (eficiência térmica) indicou uma diferença de até 1% das misturas de biobutanol em relação ao Diesel. A menor viscosidade cinemática permite uma melhor injeção do combustível na câmera de combustão. Esta injeção junto ao maior teor de oxigênio da mistura permitem uma combustão mais eficiente e justifica os valores próximos de BTE.

Michal [21] realizou um experimento nos regimes WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*) e WHSC (*World Harmonized Steady-State Cycle*). Os álcoois analisados foram o n-butanol e o isobutanol adicionados ao HVO em concentrações de 30%. O estudo realizou uma comparação entre diversas misturas, como: Diesel fóssil (D100), HVO (HVO100), biodiesel (B100), HVO30 (30% HVO + 70% Diesel), B30 (30% Biodiesel + 70% Diesel), nBu30 (30% n-butanol + 70% HVO) e iBu30 (30% isobutanol + 70% HVO).

De forma geral, todas as misturas avaliadas apresentaram uma redução no valor do torque máximo gerado pelo equipamento em comparação ao D100. As menores reduções ocorreram para a mistura HVO30, e o autor justificou que a menor densidade energética do volume de combustível ocasionou este comportamento, contudo não houve aumento no delay de ignição. Em relação ao consumo específico de combustível, as misturas que continham álcoois apresentaram um aumento de 4% e 3% para o B30. O HVO30 e o HVO100 apresentaram redução do consumo em 1% e 3% respectivamente. O autor justificou que o menor poder calorífico do biodiesel, isobutanol e n-butanol foram os responsáveis pelo aumento do consumo (Figura 3). Todas as misturas contendo HVO apresentaram valores reduzidos de NOx. O maior impacto da adição dos álcoois ocorreu na avaliação das emissões de MP, onde as misturas de n-butanol e isobutanol ao HVO proporcionaram uma redução em mais de 50% da massa total de MP. Além disso, o carbono elementar e os PAH’s (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) diminuíram em aproximadamente 75-80% em comparação ao combustível Diesel [21].

Uma pesquisa avaliou o uso de álcoois de cadeias longas (n-octanol, 2-etilhexanol e 2-propilheptanol) adicionadas em HVO e Diesel ou biodiesel [15]]. As misturas que não continham diesel fóssil apresentaram a menor geração de MP, além da fuligem. Em comparação ao Diesel fóssil, as misturas apontaram uma redução no tamanho de partículas de MP, contudo estas sofreram um aumento no número das partículas ultrafinas. O autor concluiu que os álcoois podem ser utilizados como aditivos junto aos combustíveis devido as reduções de poluentes apresentadas.

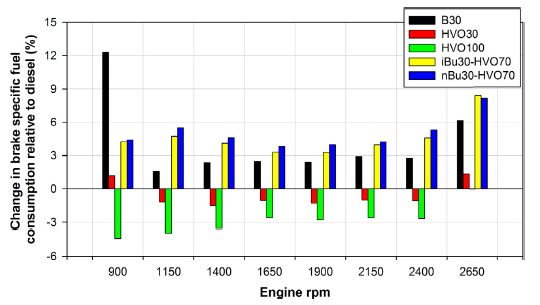


Figura 3. Consumo específico de combustível no torque máximo em comparação ao Diesel fóssil. Fonte: Michal [21].

Zhang [22]avaliou a adição de álcoois renováveis (n-butanol, isobutanol, 2-etilhexanol e n-octanol) a uma mistura de Diesel. O HVO e o peróxido de di-terciário-butila (DTBP) foram utilizados para melhorar o número de cetano das misturas. Os resultados alcançados indicaram que quando os combustíveis avaliados apresentaram o número de cetano semelhantes ao Diesel fóssil, estes exibiram desempenhos de operação parecidos, como o início da combustão e o processo de liberação de calor.

## Definição de mistura ótima entre combustíveis

O uso de misturas envolvendo o Diesel mineral e o biodiesel foi popularizado em diversas regiões do mundo. Contudo esta aplicação proporciona a variação de importantes propriedades físico-químicas da mistura formada impactando na maior emissão de alguns poluentes como o NOx. Afim de garantir que a mistura proposta possa ser utilizada respeitando os parâmetros de operação dos equipamentos, a mistura final deverá atender aos requisitos mínimos estabelecidos pelas agências reguladores [23] (Ex: Norma DIN EN 590:2009 na Europa; e a Resolução ANP nº 30/2016 no Brasil).

Como relatado anteriormente, o HVO pode apresentar melhores propriedades físico-químicas junto ao Diesel

fóssil, e vem proporcionando um funcionamento adequado como utilizado em soluções parciais junto ao Diesel. O seu ponto negativo é o alto custo e as suas variações me relação aos óxidos de nitrogênio.

Muitos álcoois possuem problemas de solubilidade quando utilizados junto a misturas de HVO/Diesel, devido a suas características físico-químicas. Neste caso, é preferível que os álcoois adicionados as misturas apresentem propriedades próximas ao Diesel fóssil [16], como:

* Número de cetano mínimo >50;
* Ponto de fulgor >55 ºC;
* Ponto de ebulição entre 180-340 ºC;
* Teor de oxigênio entre 2-3% da massa de combustível.

O éter di-n-pentílico é avaliado como uma das melhores alternativas para adição a misturas de Diesel fóssil e HVO dado os parâmetros acima. Contudo outros estudos demonstraram que o biobutanol pode ser aplicado como um aditivo devido ao seu teor de oxigênio e baixo custo de produção.

Observado a revisão da literatura para os resultados alcançados pelos pesquisadores, e os aspectos econômicos da mistura final, é possível determinar uma faixa de misturas entre:

* 69 a 76% de Diesel fóssil;
* 20 a 24% de Óleo vegetal hidratado;
* 4 a 6% de álcool.

Essa estimativa está alinhada com as investigações realizadas por pesquisadores que avaliaram misturas envolvendo Diesel, o biodiesel e álcoois através de modelos matemáticos [23]. Deste modo, a mistura estudada irá apresentar aspectos semelhantes ao Diesel fóssil, como:

* PCI (Poder calorífico inferior);
* Densidade;
* Viscosidade cinemática;
* Índice de cetano.

A concentração do HVO permite atingir resultados já demonstrados por outros pesquisadores em relação a sua melhor combustão e desempenho do motor devido ao seu maior índice de cetano. O uso do álcool nas concentrações indicadas pode apresentar pouco impacto em relação ao consumo de combustível dos equipamentos. Além disso, outros benefícios causados pelo seu maior teor de oxigênio em relação à oxidação dos poluentes é um importante fator que direciona a mistura final para estes parâmetros.

# Conclusão

O uso de misturas de álcoois, HVO e diesel possuem o potencial de reduzir a demanda por combustíveis fósseis além de provocar uma significativa redução das emissões de poluentes. O uso dos álcoois pode fornecer oxigênio para a mistura de combustível, o que pode provocar a redução na formação de fuligem e diversas partículas associadas à formação de doenças. O maior calor latente dos álcoois possibilita a redução da temperatura no cilindro, o que é associado a maior formação das emissões dos óxidos de nitrogênio. A concentração da emissão de material particulado é outro fator que pode apresentar redução quando comparado ao diesel.

A combinação de álcoois e HVO permite unir as suas características positivas como o teor de oxigênio e o alto número de cetano respectivamente; e reduzir os aspectos negativos. Ao utilizar uma baixa concentração de álcool, é esperado que o consumo específico de combustível não seja tão afetado, tendo em vista que o HVO poderá provocar uma elevação do desempenho do equipamento. É esperada uma redução nas emissões de CO e HC com base nesta mistura ternária em comparação com o diesel puro. No entanto, são necessários a realização de testes de desempenho e emissões de poluentes em motores de ignição por compressão afim de validar as misturas determinadas através deste direcionamento.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Programa de Pós-graduação do CIEnAm (Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente) da UFBA pelo suporte ao desenvolvimento deste trabalho.

# Referências

[1] C. He *et al.*, “Future global urban water scarcity and potential solutions,” *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-25026-3.

[2] O. I. Awad *et al.*, “Utilization of additive from waste products with gasoline fuel to operate spark ignition engine,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 7714, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11599-6.

[3] L. Kirago, M. J. Gatari, Ö. Gustafsson, and A. Andersson, “Black carbon emissions from traffic contribute substantially to air pollution in Nairobi, Kenya,” *Commun Earth Environ*, vol. 3, no. 1, p. 74, Dec. 2022, doi: 10.1038/s43247-022-00400-1.

[4] D. S. Vilas Boas, M. Matsuda, O. Toffoletto, M. L. B. Garcia, P. H. N. Saldiva, and M. V. Marquezini, “Workers of São Paulo city, Brazil, exposed to air pollution: Assessment of genotoxicity,” *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, vol. 834, pp. 18–24, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.mrgentox.2018.08.002.

[5] E. Dobrzyńska, M. Szewczyńska, M. Pośniak, A. Szczotka, B. Puchałka, and J. Woodburn, “Exhaust emissions from diesel engines fueled by different blends with the addition of nanomodifiers and hydrotreated vegetable oil HVO,” *Environmental Pollution*, vol. 259, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113772.

[6] L. L. N. Guarieiro *et al.*, “Assessment of the use of oxygenated fuels on emissions and performance of a diesel engine,” *Microchemical Journal*, vol. 117, pp. 94–99, 2014, doi: 10.1016/j.microc.2014.06.004.

[7] H. K. Rashedul, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. M. Ashraful, S. M. Ashrafur Rahman, and S. A. Shahir, “The effect of additives on properties, performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine,” *Energy Conversion and Management*, vol. 88. Elsevier Ltd, pp. 348–364, 2014. doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.034.

[8] M. Lapuerta, O. Armas, and J. Rodríguez-Fernández, “Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 2. Elsevier Ltd, pp. 198–223, 2008. doi: 10.1016/j.pecs.2007.07.001.

[9] F. A. Torres *et al.*, “A comparative study of biofuels and fischer–tropsch diesel blends on the engine combustion performance for reducing exhaust gaseous and particulate emissions,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061538.

[10] M. J. C. Rezende *et al.*, “Biodiesel: An overview II,” *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 32, no. 7. Sociedade Brasileira de Quimica, pp. 1301–1344, 2021. doi: 10.21577/0103-5053.20210046.

[11] Y. Zhang, D. Lou, Z. Hu, and P. Tan, “Particle number, size distribution, carbons, polycyclic aromatic hydrocarbons and inorganic ions of exhaust particles from a diesel bus fueled with biodiesel blends,” *J Clean Prod*, vol. 225, pp. 627–636, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.344.

[12] M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, J. R. Agudelo, and A. L. Boehman, “Blending scenarios for soybean oil derived biofuels with conventional diesel,” *Biomass Bioenergy*, vol. 49, pp. 74–85, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.12.002.

[13] I. Bortel, J. Vávra, and M. Takáts, “Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine,” *Renew Energy*, vol. 140, pp. 680–691, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.067.

[14] R. Arvidsson, S. Persson, M. Fröling, and M. Svanström, “Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha,” *J Clean Prod*, vol. 19, no. 2–3, pp. 129–137, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.02.008.

[15] J. Preuß, K. Munch, and I. Denbratt, “Performance and emissions of long-chain alcohols as drop-in fuels for heavy duty compression ignition engines,” *Fuel*, vol. 216, pp. 890–897, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2017.11.122.

[16] M. Happonen *et al.*, “Diesel exhaust emissions and particle hygroscopicity with HVO fuel-oxygenate blend,” in *Fuel*, Jan. 2013, vol. 103, pp. 380–386. doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.006.

[17] H. Hosseinzadeh-Bandbafha, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, M. Khanali, and A. Demirbas, “A comprehensive review on the environmental impacts of diesel/biodiesel additives,” *Energy Conversion and Management*, vol. 174. Elsevier Ltd, pp. 579–614, Oct. 15, 2018. doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.050.

[18] M. Vijay Kumar, A. Veeresh Babu, and P. Ravi Kumar, “The impacts on combustion, performance and emissions of biodiesel by using additives in direct injection diesel engine,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 1. Elsevier B.V., pp. 509–516, Mar. 01, 2018. doi: 10.1016/j.aej.2016.12.016.

[19] K. Nanthagopal, R. S. Kishna, A. E. Atabani, A. H. Al-Muhtaseb, G. Kumar, and B. Ashok, “A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxygenated enhancer in compression ignition engine,” *Energy Conversion and Management*, vol. 203. Elsevier Ltd, Jan. 01, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2019.112244.

[20] G. Valeika, J. Matijošius, K. Górski, A. Rimkus, and R. Smigins, “A study of energy and environmental parameters of a diesel engine running on hydrogenated vegetable oil (HVO) with addition of biobutanol and castor oil,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14133939.

[21] M. Vojtisek-Lom *et al.*, “Blends of butanol and hydrotreated vegetable oils as drop-in replacement for diesel engines: Effects on combustion and emissions,” *Fuel*, vol. 197, pp. 407–421, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.02.039.

[22] T. Zhang, L. Jacobson, C. Björkholtz, K. Munch, and I. Denbratt, “Effect of using butanol and octanol isomers on engine performance of steady state and cold start ability in different types of Diesel engines,” *Fuel*, vol. 184, pp. 708–717, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.07.046.

[23] S. M. Krishna, P. Abdul Salam, M. Tongroon, and N. Chollacoop, “Performance and emission assessment of optimally blended biodiesel-diesel-ethanol in diesel engine generator,” *Appl Therm Eng*, vol. 155, pp. 525–533, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.012.