



AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO EM INJETORES DO CICLO DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Luís Felipe Nunes Truta¹, Boniek Evangelista Leite²

RESUMO

Com a crescente necessidade de substituição de combustíveis não-renováveis por combustíveis renováveis, o estudo a respeito do Biodiesel é fundamental para que possamos torna-lo uma opção viável para uma alternativa para os motores do ciclo Diesel, todavia, fatores como densidade e viscosidade, que diferem entre o Diesel e Biodiesel, fazem com que o comportamento que cada combustível apresenta dentro do injetor seja diferente, um dos exemplos disso é na formação de cavitação dentro do bico injetor, o estudo dessa cavitação torna possível encontrar melhores alternativas para torna o biodiesel uma opção mais viável, para isso, se faz necessário a modelagem e simulação do fenômeno de cavitação dentro do bico injetor de motores do ciclo Diesel operando com biodiesel, todavia, para uma melhor análise do fenômeno, o comparativo entre diferentes situações tornam a análise mais completa, como por exemplo além de analisar como a diferença de viscosidade entre os combustíveis influencia na formação de cavitação, fatores como o tempo de injeção também podem influenciar nesse fenômeno. Para realizar as análises de cavitação o *software Ansys Fluent®2015* se mostrou eficaz, e, utilizando o modelo matemático de Schnner e Sauer, disponibilizado pelo próprio software, foi possível analisar o impacto da viscosidade do combustível e do tempo de injeção na formação de cavitação

Palavras-Chave: Cavitação, Biodiesel, Modelo de Schnner e Sauer, Ansys Fluent

¹Aluno de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: luis.nunes@estudante.ufcg.edu.br

²Doutor em Engenharia de Processos, <PNPD>, Programa de pos Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: boniek3@gmail.com

*EVALUATION OF THE CAVITATION PHENOMENON IN DIESEL CYCLE INJECTORS
OPERATING WITH BIODIESEL: MODELING AND SIMULATION*

ABSTRACT

The growing need to replace non-renewable fuels with renewable fuels, the study of biodiesel is essential to make it a viable alternative to diesel cycle engines, however, factors such as density and viscosity, that differ between diesel and biodiesel, make the behavior, that each fuel presents inside the injector, different, for example, the formation of cavitation inside the injector nozzle, the study of this phenomenon makes it possible to find better alternatives to make biodiesel a more viable option, for this, it is necessary to model and simulate the cavitation phenomenon inside the injector nozzle of diesel cycle engines operating with biodiesel. To do a better analysis of the phenomenon, the comparison between different situations makes the analysis more complete, for example, in addition to analyzing how the difference in viscosity between the fuels influences in the formation of cavitation, factors such as injection time can also influence in this phenomenon. To perform the cavitation analysis, the Ansys Fluent®2015 software proved to be effective, and using the Schnner and Sauer mathematic model, provided by the software itself, it was possible to analyze the impact of fuel viscosity, injection time in cavitation formation.

Keywords: Cavitation, Biodiesel, Schnner and Sauer Model, Ansys Fluent

INTRODUÇÃO

Desde o século dezenove os motores de combustão interna tiveram seu desenvolvimento ligado a modelos termodinâmicos que descrevem o seu funcionamento.

Com a crise do petróleo na década de 70 procurou-se a substituição dos combustíveis de origem fóssil, considerados fontes não renováveis, por combustíveis de fontes renováveis, tornou-se um objetivo global.

No Brasil, o governo acabou apostando na cana de açúcar e nos óleos vegetais para alavancar o setor de biocombustíveis. Para motores do ciclo diesel o interesse pelos óleos vegetais decorre não só do consumo de biodiesel no mercado interno, mas também da produção descentralizada de energia, atuando com forte apoio à agricultura familiar e valorizando as potencialidades regionais (Amaral, 2006; Ramos et al, 2003).

A combustão e o desempenho de um motor ciclo Diesel em relação às emissões dependem da qualidade da mistura ar-combustível e da quantidade de combustível injetada. Uma mistura homogênea resulta em uma menor emissão de particulados e numa maior eficiência do motor.

A qualidade da mistura ar-combustível é afetada pelas características do escoamento no injetor de combustível, com isso o fenômeno de cavitação tem influência na qualidade da mistura injetada na câmara de combustão.

Diante da maior utilização de combustíveis derivados da biomassa (biodiesel) com propriedades físico-químicas distintas do óleo diesel comercial em motores do ciclo Diesel, há uma necessidade de estudos para a otimização do desempenho e emissões desses motores para o uso do combustível vegetal em maior percentual. Pois os sistemas de injeção de combustíveis dos motores atuais estão calibrados para uma utilização de no máximo de 20% de biodiesel, com isso tem-se problemas na utilização do combustível vegetal, para maiores concentrações de biodiesel, há o efeito negativo de entupimento de injetores, filtros e a má dispersão na câmara de combustão.

Para a otimização do escoamento e análise do fenômeno de cavitação do combustível em motores de ignição por compressão, a utilização de métodos computacionais como ferramenta é um método científico viável. O uso dessa ferramenta é benéfico em vários aspectos, principalmente na redução dos custos durante a fase de experimentação em protótipos.

O escoamento e a cavitação de combustíveis de alta viscosidade em motores diesel é um fenômeno de grande complexidade, pois envolve simultaneamente mecânica dos

fluidos e transferência de calor, todavia, a modelagem e simulação de casos desse tipo é de fundamental importância para que possamos entender o fenômeno para assim utilizá-lo para tornar os injetores de motores a diesel mais eficientes quando operados com biodiesel.

OBJETIVOS

Objetivo geral: Estudar numericamente o escoamento no interior de injetores de alta pressão operando com biodiesel, e avaliar a ocorrência e o efeito da cavitação no canal de injeção

Objetivos específicos:

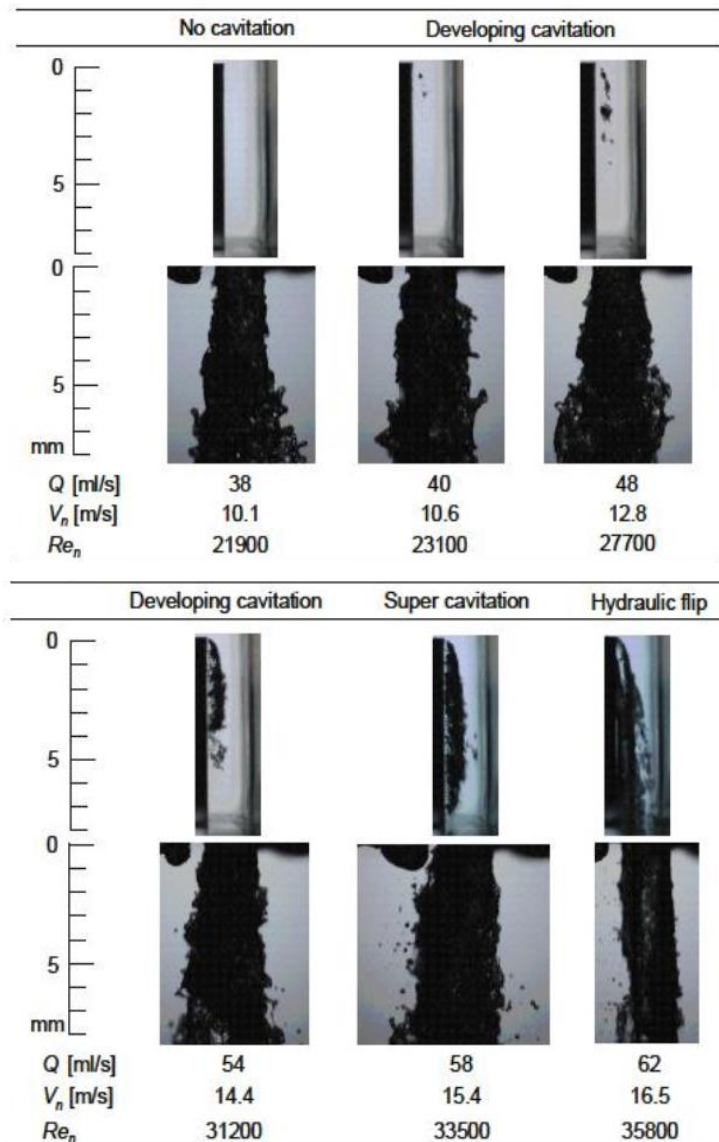
- Definir um modelo matemático tridimensional transiente capaz de representar fielmente o fenômeno de cavitação do biodiesel em um injetor de alta pressão;
- Analisar os efeitos da cavitação no escoamento do injetor operando biodiesel via software *Ansys FLUENT®*;
- Avaliar o efeito da viscosidade do combustível na formação de cavitação no escoamento do injetor;
- Avaliar o efeito do tempo de injeção de combustível na formação de cavitação no escoamento do injetor;

METODOLOGIA

Para realização da avaliação do fenômeno se faz necessário primeiramente entender o que causa a cavitação em bicos injetores de motores do ciclo diesel e o que influência na sua formação.

Cavitação pode ser definido como a formação de zonas de vapor, ou bolhas, dentro de uma região com fluxo de líquidos. Esse fenômeno ocorre nos bicos injetores quando a pressão no local fica abaixo da pressão de vaporização do combustível, essa baixa pressão geralmente é encontrada na zona mais próxima a parede do canal de injeção, ocasionando assim a formação de regiões que possuem uma maior fração de vapor do que de líquido, assim moldando o fluxo do combustível, como podemos ver na **Figura.1**.

Figura 1. Exemplo formação de cavitação em uma análise experimental, a parte mais escura representa a formação cavitação.



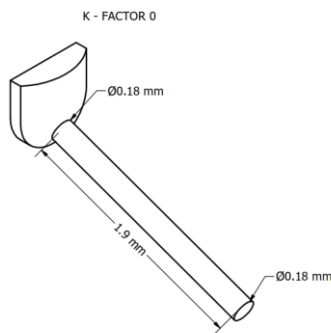
Fonte: Bicer Et. al.

Após compreender o processo de formação da cavitação, se deu início a uma busca para encontrar uma ferramenta para realização da simulação computacional que fosse adequada para a análise desse fenômeno, o *software* escolhido foi o *Ansys FLUENT®2015*, pois o mesmo conta com opções de métodos de modelar cavitação que podem ser escolhidos de acordo com a necessidade de cada problema.

Em seguida a escolha da ferramenta, foi então analisado qual o domínio físico de interesse para o estudo, foi escolhido o canal interno de um bico injetor, e visando simplificação na simulação e maior eficiência no tempo computacional, foi adotado um

modelo de $\frac{1}{4}$ de geometria de um bico injetor. A dimensão da geometria é baseada no trabalho de Zhou Chen et al., 2018, e pode ser vista na **Figura.2** e **Tabela.1**.

Figura 2. Geometria construída para simulação, volume interno do injetor.



Fonte. Desenhos de autoria própria baseados nos valores de Zhou Chen et al., 2018.

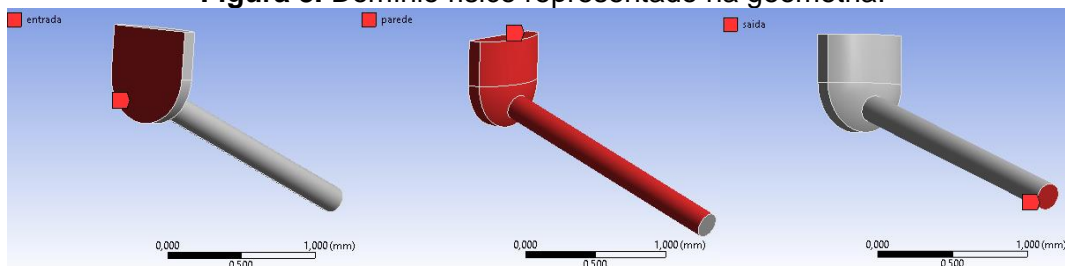
Tabela.1 - Dimensões canais do bico injetor

Geometria	Diâmetro Entrada (mm)	Diâmetro Saída (mm)	Comprimento (mm)	K-Factor
Cilíndrica	0,18	0,18	1,9	0

Fonte. Desenhos de autoria própria baseados nos valores de Zhou Chen et al., 2018.

Após definição do domínio físico e da geometria, foi gerada a malha numérica utilizando o software *Ansys MESH* ®2015, e em seguida a malha foi importada para o *Ansys Fluent*®2015, como podemos ver na **Figura.3**, onde temos uma região de entrada de pressão, as regiões de parede e a região de saída da pressão.

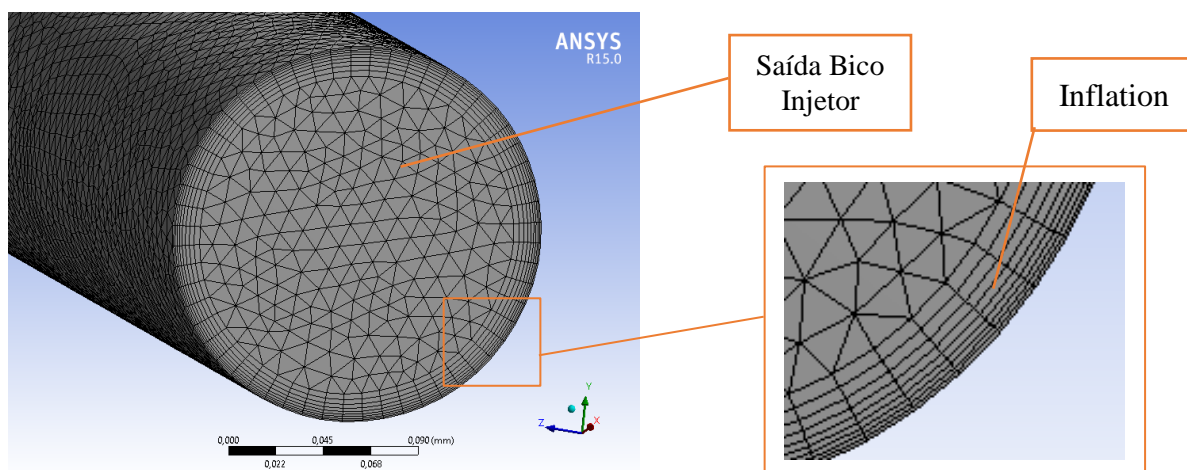
Figura 3. Domínio físico representado na geometria.



Fonte. Autoria própria.

Para a malha foram utilizados elementos Tetraédricos e Hexaédricos, com tamanho máximo de 0,01 mm, foi aplicado também a função *Inflation*, como ilustrado na **Figura.4**, com o objetivo de melhor adaptar a malha nas regiões próximas a parede do canal do bico injetor, local onde é esperada a formação de cavitação.

Figura 4. Representação da malha após aplicação da função *Inflation*.



Fonte. Autoria Própria

Podemos ver o resultado do refinamento da malha com a função *Inflation* nas extremidades da saída do bico injetors, porem a mesma se estende por todo o canal do bico injetor.

A etapa seguinte foi identificar as propriedades físicas dos combustíveis que seriam analisados, sendo eles Diesel e Biodiesel, para assim avaliarmos a influência da viscosidade na cavitação. Na **Tabela.2**, temos, as propriedades fisico-quimicas dos combustíveis nas fases de liquido e de vapor.

Tabela 2. Propriedades Físico-Químicas dos combustíveis Biodiesel de óleo de Soja e Diesel.

	Biodiesel (liquido)	Diesel (liquido)	Biodiesel (Vapor)	Diesel (Vapor)
Densidade (kg/m³)	870	825	0,001	0,05
Viscosidade (kg/m.s)	0,0039	0,0021	1e-6	1e-6

Fonte. Battistoni et al., 2010.

Por fim os últimos dados necessários referentes aos combustíveis são suas respectivas pressões de Vaporização, tal informações foi retirada da Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) de cada combustível, tendo assim os valores apresentados na **Tabela.3**.

Tabela 3. Pressões de Vaporização dos Combustíveis

	Biodiesel	Diesel
Pressão de Vaporização (Pa)	420	400

Fonte. Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ)

Para dar procedimento a simulação foram feitas algumas considerações para o modelo matemático, sendo elas:

- Simulação baseada em pressão
- Domínio físico focando apenas no canal do bico injetor
- Malha Fixa
- Processo isotérmico

O modelo matemático utilizado é disponibilizado pelo próprio *Ansys FLUENT@2015*, sendo este o modelo de Schnner e Sauer (*Schner and sauer model*), este sendo o modelo de análise padrão do *software* e pode ser utilizado em modelos multifásicos tanto de mistura quanto eulerianos. O modelo multifásico utilizado foi o modelo para mistura com 2 fases eulerianas e para turbulência foi utilizado um modelo K-ε *Realizable* com um tratamento padrão para as proximidades das paredes.

Na cavitação a transferência de massa líquido-vapor é determinada pela equação de transporte de vapor:

$$\frac{\partial}{\partial t}(a\rho_v) + \nabla \cdot (a\rho_v\vec{V}_v) = R_e - R_c$$

Na qual:

v = Fase de vapor

a = Fração de volume de vapor

ρ_v = Densidade do vapor

\vec{V}_v = Velocidade da fase de vapor

R_e, R_c = Termos da fonte de transferência de massa conectados ao crescimento e colapso das bolhas de vapor, respectivamente

Com relação a dinâmica das bolhas no processo de simulação, em um líquido fluindo com deslramento de velocidade zero entre o fluido e as bolhas, a equação dinâmica da bolha pode ser derivada da equação generalizada de Rayleigh-Plesset e ser simplificada para:

$$\frac{D\mathfrak{R}_B}{Dt} = \sqrt{\frac{2 P_b - P}{3 P_l}}$$

Na qual

\mathfrak{R}_B = Raio da Bolha

σ = Coeficiente líquido de tensão superficial

ρ_l = Densidade do líquido

P_b = Pressão superficial da bolha

P = Pressão local de campo distante

As duas equações citadas anteriormente se aplicam a todos os modos de simular cavitação utilizando o *Ansys FLUENT® 2015*, desde ponto em diante será falado as equações referentes especificadamente ao modelo utilizado (*Schner and sauer model*).

A equação para a fração de volume de vapor tem uma forma geral:

$$\frac{\partial}{\partial t} (a\rho_v) + \nabla \cdot (a\rho_v \vec{V}_v) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{Da}{Dt}$$

E o termo fonte de massa líquida se dá por:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{da}{dt}$$

Esse modelo utiliza a seguinte expressão para conectar a fração de volume de vapor com o número de bolhas por volume de líquido:

$$a = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi \mathcal{R}_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi \mathcal{R}_B^3}$$

E por fim o modelo entrega a seguintes equações:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} a (1 - a) \frac{3}{\mathcal{R}_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}}$$

$$\mathcal{R}_B = \left(\frac{a}{1 - a} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Onde nelas temos:

R = Taxa de transferência de massa

\mathcal{R}_B = Raio da Bolha

Por fim é possível encontrar a fração de volume de vapor em determinado ponto, alimentado a equação de transporte de vapor com os dados obtidos pelo método, cálculo esse realizado também pelo *software*.

A última etapa para realizar as simulações fica sendo fornecer ao *software* as condições de contorno, sendo elas a pressão na entrada, pressão na saída e limitar o espaço físico pelas paredes, para que possamos realizar comparativos entre as diferentes geometrias e combustíveis, as condições de contorno se mantiveram as mesmas para todas as malhas geradas e podem ser vistas na **Tabela4**.

Tabela 4. Condições de contorno nas regiões de entrada e saída

Região	Variável	Valor
Entrada	Gauge Total Pressure (Pa)	1e+08
	Supersonic/Initial Gauge Pressure (Pa)	9.5e+07
	Turbulence Specification Method	K and ϵ
	Turbulent Kinect Energy (m ² /s ²)	0.02
	Turbulalent Dissipation Rate (m ² /s ²)	1
Saída	Gauge Pressure (Pa)	8e+06
	Turbulence Specification Method	K and ϵ
	Turbulent Kinect Energy (m ² /s ²)	0.02
	Turbulalent Dissipation Rate (m ² /s ²)	1

Fonte: Aatoria Própria

Refente a inizilização da solução e ao calculo em sí, configurações utilizadas em todas as geometrias estão presentes da **Tabela.5 e Tabela.6.**

Tabela.5 - Configuração etapa Solution Initiazation

Variável	Valor
Initization Methods	Standard Initialization
Reference Frame	Relative to Cell Zone
Gauge Pressure (Pa)	9.5e+07

Fonte. Aatoria Própria

Tabela.6 - Configuração etapa Run Calculation.

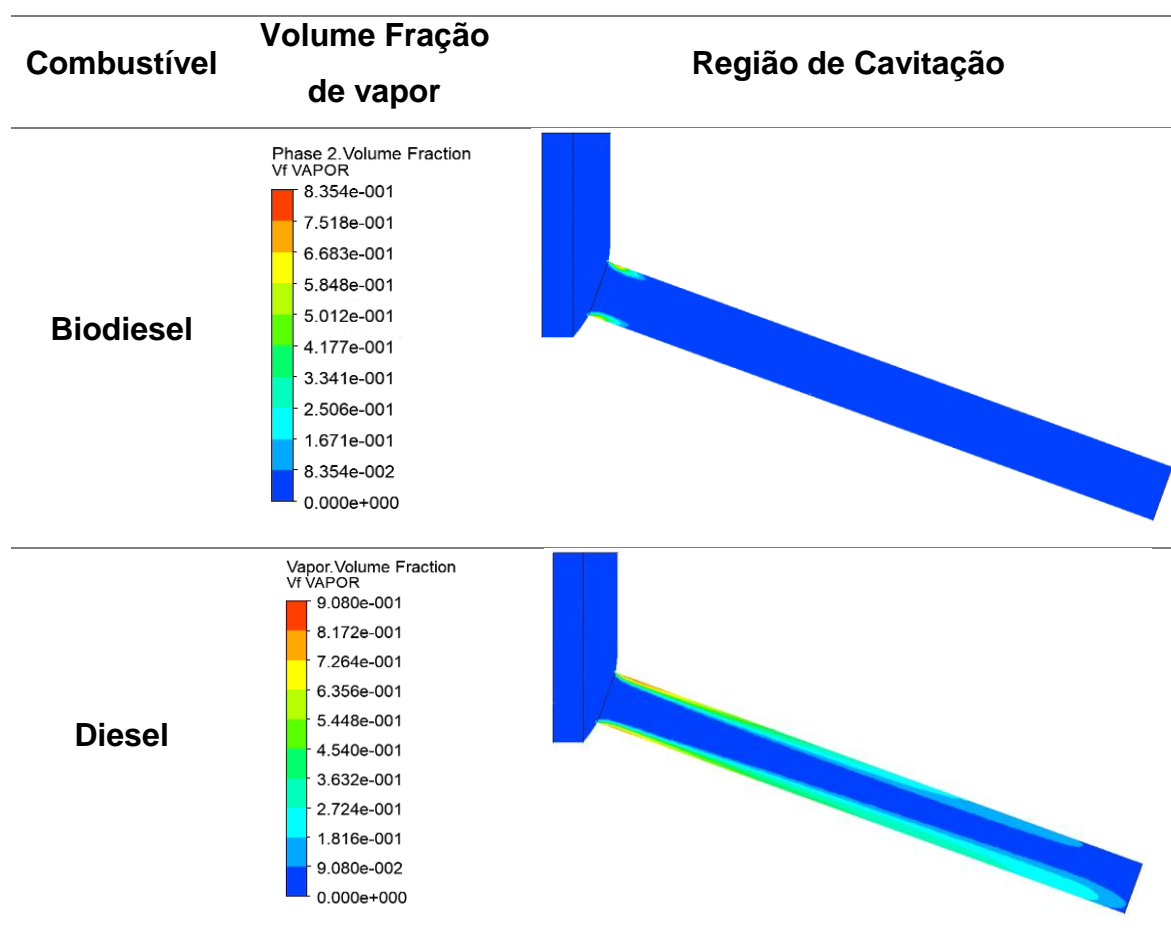
Variável	Valor
Time Step Size (s)	1e-06
Number of Time Steps - Tempo 1	20
Number of Time Steps - Tempo 2	4000

Fonte. Aatoria Própria

RESULTADOS

Para a análise dos resultados, os mesmos foram organizados em 3 tabelas diferentes, onde em cada tabela foi analisada o impacto de uma variável em estudo para a formação do fenômeno de cavitação, sendo elas; Viscosidade do combustível, **Tabela.7**, Tempo de injeção, **Tabela.8** e Geometria do injetor, **Tabela.9**.

Tabela.7 - Análise impacto Viscosidade do combustível.



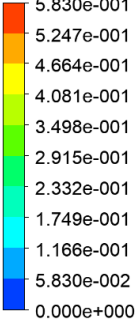
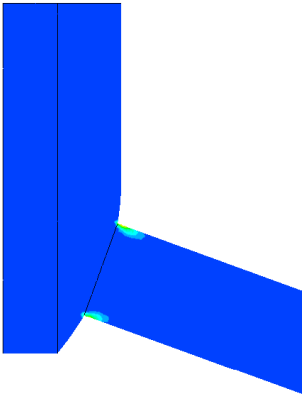
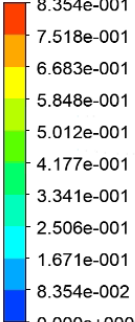
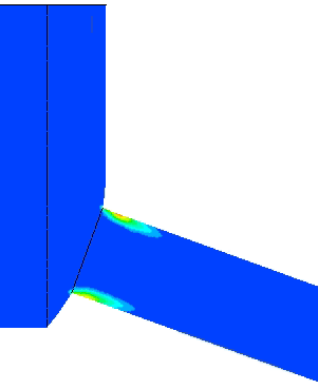
Fonte. Autoria Própria

Para análise do impacto da viscosidade do combustível foram utilizados óleo Diesel e biodiesel com viscosidade respectivamente de 0,0021 kg/m.s e 0,0039 kg/m.s, na fase líquida e ambos possuem $1e^{-6}$ kg/m.s na fase de vapor, a pressão de injeção foi mantida constante em todos os casos ($1e^{08}$ Pa) e foram realizados 4000 passos de tempo com $1e^{-06}$ s em cada passo de tempo, totalizando o tempo de injeção de 4 milissegundos.

No caso com biodiesel teve um pico de 8,354% de fração de vapor, já para o caso com diesel, o pico foi de 9,08%, mostrando que para o combustível de menor viscosidade a

formação de cavitação é maior, também é possível perceber que no caso com Biodiesel a cavitação é mais focada na entrada do canal do bico injetor, enquanto no Diesel a cavitação se dá por todos o canal do bico injetor.

Tabela.8 - Análise impacto do tempo de injeção

Número de passos de tempo	Volume Fração de Vapor	Região de Cavitação
20	<p>Phase 2, Volume Fraction Contour 1</p> 	
4000	<p>Phase 2, Volume Fraction V1 VAPOR</p> 	

Fonte. Autoria Própria

Para analisar o impacto do tempo de injeção, na formação da cavitação, a pressão de injeção foi mantida constante em todos os casos ($1e^{08}$ Pa) e foi mantido o combustível Biodiesel em todas as análises.

Tendo em mente o passo de tempo de $1e-06$ s, foram analisados 2 momentos da cavitação, o primeiro sendo com 20 passos de tempo, momento no qual a cavitação começou a estabilizar, e o segundo sendo com 4000 passos de tempo, que totalizaria 4 milissegundos sendo esse o tempo total de injeção, após 20 passos de tempo vemos um pico de 5,83% de fração de vapor e vemos que a região de cavitação é logo na entrada do

canal do bico injetor, ao completar os 4 milissegundos, vemos que o pico de fração de vapor passa a ser 8,354% e a região de cavitação começa a se expandir ao longo do canal do bico injetor.

CONCLUSÃO

Por fim podemos concluir que dentre os fatores analisados nesse estudo, a viscosidade do combustível é o que influencia majoritariamente na formação de cavitação, todavia, através de alterações no tempo de injeção, é possível ver o modo com o qual o biodiesel pode se tornar uma alternativa viável para o Diesel. A depender do fluxo desejado, pode-se diminuir o tempo de injeção para que a cavitação seja menor ou aumentar o tempo de injeção até que a cavitação seja a mais adequada ao caso.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. PIBIC/CNPq-UFCG.

Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem, LPFI, pelo suporte na realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. Amaral, W. A. N. (2006). Pólo Nacional de Biocombustíveis: missão e desafios para sustentabilidade da produção de biodiesel. Anais do II Simpósio do Agronegócio de Plantas Oleaginosas: Matérias-Primas para Biodiesel. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, p. 1-6.
2. Balanço Energético Nacional; ministério de minas e energia, 2019, pp 29.
3. Ramos, L. P.; Domingos, A. K.; Kucek, K. T.; Wilhelm, H. M. (2003). Biodiesel: um projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil. Biotecnologia: Ciência e Desenvolvimento, v. 31, p. 28-37.
4. Zhou Chen, Zhixia He, Weiwei Shang, Lian Duan, Han Zhou, Genmiao Guo, Wei Guan (2018). Experimental study on the effect of nozzle geometry on string cavitation in real-size optical diesel nozzles and spray characteristics. Fuel 232 (2018). ELSEVIER
5. F.J. Salvador, J. Martínez-López, J.-V. Romero, M.-D. Roselló. (2011). Influence of biofuels on the internal flow in diesel injector nozzles. Mathematical and Computer Modelling 54 (2011). ELSEVIER.
6. Battistoni, M.; Grimaldi, C. N. (2010). Analysis of Transient Cavitating Flows in Diesel Injectors Using Diesel and Biodiesel Fuels. SAE International Journal of Fuels and Lubricants · August 2010
7. Baris BICER, Ayana TANAK, Takumi FUKUDA, Akira SOU, NUMERICAL SIMULATION OF CAVITATION PHENOMENA IN DIESEL INJECTOR NOZZLES

Assinatura do(a) aluno(a): *Luiz Felipe M. Truta*

Assinatura do(a) orientador(a): *Boniek Evangelista Leite*

Campina Grande – PB, 30/09/2021