



# **IMPACTO DAS PROPRIEDADES FÍSICO- QUÍMICAS DE DIFERENTES MISTURAS DE BIODIESEL E DIESEL NO FUNCIONAMENTO DE MOTORES DO CICLO DIESEL**

Matheus Oliva Neiva

## **Projeto Final de Curso**

### **Orientadores:**

Prof. Maria Letícia Murta Valle, *D.Sc.*

Rosângela da Silva Leonardo, *D.Sc.*

**Fevereiro de 2022**

# **IMPACTO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE DIFERENTES MISTURAS DE BIODIESEL E DIESEL NO FUNCIONAMENTO DE MOTORES DO CICLO DIESEL**

*Matheus Oliva Neiva*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Yordanka Reyes Cruz, D.Sc

---

Eliana Mossé Alhadef, D.Sc.

Orientado por:

---

Maria Letícia Murta Valle, D.Sc.

---

Rosângela da Silva Leonardo, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2022

Neiva, Matheus Oliva.

Impacto das propriedades físico-químicas de diferentes misturas de biodiesel e diesel no funcionamento de motores do ciclo diesel. / Matheus Oliva Neiva. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

viii, 69 p.; il.

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2022.

Orientadores: Maria Letícia Murta Valle e Rosângela da Silva Leonardo.

1. Biodiesel. 2. Impactos. 3. Motor. 4. Monografia. (Graduação –UFRJ/EQ). 5. Maria Letícia Murta Valle e Rosângela da Silva Leonardo.

I. Impacto das propriedades físico-químicas de diferentes misturas de biodiesel e diesel no funcionamento de motores do ciclo diesel.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

## **IMPACTO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE DIFERENTES MISTURAS DE BIODIESEL E DIESEL NO FUNCIONAMENTO DE MOTORES DO CICLO DIESEL**

Matheus Oliva Neiva

Fevereiro, 2022.

Orientadores: Prof. Maria Letícia Murta Valle, DSc.  
Rosângela da Silva Leonardo, DSc

A preocupação ambiental associada ao uso do diesel oriundo de matéria prima fóssil vem aumentando, bem como os estudos sobre a utilização de combustíveis de origem renovável. Nas últimas décadas, o biodiesel vem surgindo como uma alternativa viável e sustentável para suprir a demanda energética. Em diversos países, inclusive o Brasil, o aumento do teor de biodiesel no diesel comercializado já é uma realidade. Porém, as avaliações do impacto da substituição do diesel pelo biodiesel sobre a atomização dos motores são escassas.

Com esse objetivo, foram empregados modelos utilizados pelo setor automotivo, para descrever e analisar as características da atomização dos combustíveis em motores de ciclo diesel *common-rail*. Os parâmetros analisados foram o diâmetro médio de Sauter, o alcance, o ângulo de cone e o tempo de ruptura do spray de combustível. Para estimar esses parâmetros são necessários propriedades físico-químicas, como massa específica, tensão superficial e viscosidade cinemática, obtidos experimentalmente ou por ajustes disponíveis na literatura para diversos tipos de biodiesel e suas misturas com o diesel. Foram avaliadas misturas de biodiesel de origem vegetal como soja, girassol, algodão e palma e biodiesel de origem animal como de sebo bovino.

Os resultados mostraram que, de maneira geral, o aumento do teor do biodiesel leva a uma diminuição da qualidade de atomização e da eficiência do motor, além de permitir associar as características químicas do biodiesel com os impactos observados. O comportamento obtido para os diferentes tipos de biodiesel indica que as características de atomização são função do grau de insaturação das amostras, sendo as alterações mais acentuadas com a elevação do teor de compostos saturados, onde o biodiesel de sebo bovino apresentou as maiores alterações entre os combustíveis estudados.

# ÍNDICE

Capítulo I – Introdução .....	1
Capítulo II – Objetivo geral e específicos.....	4
Capítulo III – Referencial teórico .....	5
III.1 – Combustíveis .....	5
III.1.1 – Óleo diesel combustível.....	5
III.1.2 – Biodiesel.....	8
III.2 – Propriedades físico-químicas dos combustíveis.....	14
III.3 – Motores a combustão interna .....	17
III.3.1 – Motor de ciclo diesel.....	17
III.3.2 – Sistema de injeção common-rail.....	18
III.3.3 – Atomização na câmara de injeção.....	19
Capítulo IV – Materiais e métodos.....	21
IV.1 – Propriedades do diesel e biodiesel avaliados .....	21
IV.1.1 – Diesel e biodiesel usados na determinação experimental.....	21
IV.1.2 – Preparo das blendas diesel/biodiesel.....	23
IV.2 – Seleção de biodieseis para as simulações .....	24
IV.3 – Método de análise das propriedades do diesel, biodiesel e suas blendas .....	25
IV.3.1 – Massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C.....	25
IV.3.2 – Tensão superficial a 40°C.....	26
IV.4 – Estimativa das propriedades do diesel, biodiesel e suas blendas .....	29
IV.4.1 – Estimativa da massa específica e viscosidade dos combustíveis.....	29
IV.4.2 – Estimativa da tensão superficial dos combustíveis.....	30
IV.5 – Modelos para o cálculo dos parâmetros de atomização.....	31
Capítulo V – Resultados e Discussão .....	34
V.1 – Propriedades físico-químicas experimentais dos combustíveis .....	34
V.1.1 – Massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C .....	34
V.1.2 – Tensão superficial a 40°C .....	36
V.2 – Propriedades físico-químicas estimadas dos combustíveis.....	37
V.2.1 – Estimativa de massa específica dos combustíveis.....	37
V.2.2 – Estimativa de viscosidade cinemática dos combustíveis.....	38
V.2.2 – Estimativa de tensão superficial dos combustíveis .....	40
V.3 – Parâmetros de atomização estimados para os combustíveis .....	42
V.3.1 – Diâmetro médio de Sauter (DMS).....	42
V.3.2 – Alcance do spray de combustível .....	48

V.3.3 – <i>Ângulo de cone</i> .....	53
V.3.4 – <i>Tempo de ruptura</i> .....	54
Capítulo VI – <i>Conclusões</i> .....	59
Capítulo VII – <i>Referências bibliográficas</i> .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Primeiro trem de combustível da Anglo Mexican no Brasil em 1930 .....	6
Figura 2: Reações envolvidas na transesterificação de triglicerídeos. ....	9
Figura 3: Principais matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil.....	10
Figura 4: Etapas de operação do motor de ciclo diesel de quatro tempos .....	17
Figura 5: Sistema de injeção common-rail .....	18
Figura 6: Características externas do spray de combustível .....	19
Figura 7: Injeção do spray de combustível na câmara de injeção .....	20
Figura 8: Preparo das blendas utilizando provetas graduadas .....	23
Figura 9: Amostras preparadas e identificadas .....	23
Figura 10: Análise de massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C .....	25
Figura 11: Análise de tensão superficial a 40°C .....	26
Figura 12: Força aplicada por tempo para a amostra B20 .....	27
Figura 13: Esquema de funcionamento do método do Anel de Du Noüy .....	28
Figura 14: Tensão superficial a 40°C calculado por tempo para a amostra B20 .....	28
Figura 15: Comportamento do DMS das amostras com o aumento do teor de biodiesel.....	44
Figura 16: Aumento percentual do DMS das amostras com o aumento do teor de biodiesel .....	44
Figura 17: Diferença percentual para o DMS entre amostras experimentais e simuladas .....	45
Figura 18: Aumento percentual do DMS das misturas em relação ao diesel puro .....	47
Figura 19: Comportamento do alcance do spray com o aumento do teor de biodiesel .....	49
Figura 20: Redução percentual do alcance das amostras com o aumento do teor de biodiesel ...	50
Figura 21: Diferença percentual para o alcance entre amostras experimentais e simuladas .....	52
Figura 22: Redução percentual do alcance das misturas em relação ao diesel puro .....	52
Figura 23: Comportamento do tempo de ruptura com o aumento do teor de biodiesel .....	55
Figura 24: Aumento percentual do tempo de ruptura das misturas em relação ao diesel puro.....	55
Figura 25: Diferença percentual para o tB entre amostras experimentais e simuladas .....	56
Figura 26: Aumento percentual do tempo de ruptura (tB) das amostras simuladas.....	58

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do óleo diesel de uso rodoviário.....	7
Tabela 2: Classificação dos combustíveis diesel quanto ao teor máximo de enxofre .....	8
Tabela 3: Principais ácidos graxos saturados e insaturados presentes nos óleos .....	11
Tabela 4: Teor de ácidos graxos esterificados em diferentes tipos de biodiesel.....	12
Tabela 5: Especificações do biodiesel .....	13
Tabela 6: Modelos para simulação de propriedades físico-químicas .....	16
Tabela 7: Boletim de análise do Diesel S10 A Ipiranga .....	21
Tabela 8: Características físico-químicas do biodiesel de soja metílico utilizado no trabalho.....	22
Tabela 9: Teor de ácidos graxos esterificados presentes nos tipos de biodiesel estudados.....	24
Tabela 10: Parâmetros da análise de tensão superficial a 40°C .....	27
Tabela 11: Massa específica: coeficientes de correlação linear obtidos na literatura .....	29
Tabela 12: Viscosidade: coeficientes de correlação polinomial obtidos na pesquisa literária .....	30
Tabela 13: Condições operacionais dos motores diesel de injeção direta .....	31
Tabela 14: Condições operacionais de injeção dos motores diesel .....	32
Tabela 15: Modelos para cálculo dos parâmetros de atomização do motor a diesel.....	33
Tabela 16: Resultados de massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C .....	34
Tabela 17: Resultados de tensão superficial a 40°C.....	36
Tabela 18: Estimativa de massa específica para diversos tipos de misturas.....	37
Tabela 19: Estimativa de viscosidade cinemática para diversos tipos de misturas.....	38
Tabela 20: Comparativo de valores obtidos para viscosidade cinemática das misturas.....	40
Tabela 21: Comparativo de valores obtidos para tensão superficial das misturas .....	41
Tabela 22: Estimativa de tensão superficial para diversos tipos de misturas .....	42
Tabela 23: Diâmetro médio de Sauter (DMS) calculado para as amostras experimentais .....	43
Tabela 24: DMS para as amostras simuladas por ajustes matemáticos.....	46
Tabela 25: Alcance do spray de combustível (S) calculado para as amostras analisadas .....	48
Tabela 26: Alcance do spray (S) para as amostras simuladas por modelos matemáticos .....	51
Tabela 27: Tempo de ruptura (tB) calculado para as amostras experimentais .....	54
Tabela 28: Tempo de ruptura (tB) para as amostras simuladas por modelos matemáticos .....	57



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 Equação do método do Anel de Du Noüy .....	28
Equação 2 Modelo proposto por Chunxi et al. (2000), baseado na equação de Wilson .....	30
Equação 3 Modelo para obtenção do parâmetro da equação de Wilson .....	30
Equação 4 Modelo simplificado para cálculo de tensão superficial.....	31
Equação 5: Correlação de Elkobt .....	33
Equação 6: Equação de Sitikei .....	33
Equação 7: Correlação de Dent .....	33
Equação 8: Equação de Abramovich.....	33
Equação 9: Equação de Hiroyasu & Arai .....	33
Equação 10 Equação da diferença percentual .....	39

## Capítulo I – Introdução

Em 23 de fevereiro de 1893 o franco-alemão Rudolph Diesel patenteou um motor que tinha um novo sistema de funcionamento, baseado no ciclo termodinâmico denominado ciclo diesel. Inicialmente esse motor era movido a óleo de amendoim ou carvão pulverizado e, até o início do século XX, foram utilizadas como combustíveis várias espécies de óleos de vegetais. Porém, o alto custo de produção das sementes dificultou seu uso nesse novo motor. Com a grande quantidade de petróleo disponível à época e o baixo custo para o refino de seu óleo, ocorreu a substituição dos óleos vegetais por um óleo destilado do petróleo, o óleo diesel (Silva & Freitas, 2008).

Devido à sua alta disponibilidade e densidade energética, no início do século XX, o petróleo se tornou o principal combustível utilizado nos setores de transporte, indústria e agricultura. Um dos problemas gerados pelo alto consumo dos combustíveis fósseis é a poluição ambiental decorrente da emissão de gases de efeito estufa, do descarte de resíduos ou do derramamento de óleo que podem ocorrer em mares e solos.

Com a necessidade de se encontrar um combustível alternativo que diminuísse o consumo de petróleo, começaram os incentivos a utilização de óleos vegetais, o que levou muitos países, inclusive o Brasil, a investir em programas de produção de óleos vegetais com o objetivo de substituir o óleo diesel, como o Pró-Óleo, Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos, criado em 1975 com o objetivo de gerar um excedente de óleos vegetais capaz de competir com os custos do petróleo e reduzir a importação de diesel (Abreu et al, 2006).

A partir dessa necessidade de um novo combustível surgiu o biodiesel, um combustível biodegradável que tem sua origem principal em fontes renováveis como os óleos vegetais e gorduras animais. O biodiesel pode ser obtido por três processos distintos, craqueamento, esterificação e transesterificação. A transesterificação é uma reação química, aonde triglicerídeos e álcoois, na presença de um catalisador (ácido, básico ou enzimático), produzem um éster e glicerina. No Brasil, o processo mais utilizado é a transesterificação de glicerídeos, utilizando metanol ou etanol, na presença de um catalisador básico.

O biodiesel pode ser utilizado puro ou numa mistura com o diesel em diferentes proporções. Quando ocorre a mistura diesel/biodiesel o combustível passa ser nomeado de acordo com a percentagem volumétrica da participação do biodiesel, por exemplo, B2 é quando o percentual volumétrico de biodiesel na mistura é 2% em volume, B20 quando

é 20% em volume e B100, o biodiesel puro.

Uma das principais vantagens de se utilizar o biodiesel como combustível em motores do ciclo diesel é a menor emissão de poluentes. Resultados obtidos mostram que, com o biodiesel, as emissões são isentas de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Quando comparado com o diesel, a fuligem é reduzida em 60%, o monóxido de carbono e os hidrocarbonetos apresentam uma queda de 50%. Entretanto, pesquisas realizadas na União Europeia relacionam o aumento de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) ao biodiesel, em relação ao diesel de petróleo (Barnwal & Sharma, 2005).

Um estudo realizado em 1998 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (USDE), mostrou que as emissões de dióxido de carbono pelas misturas B20 e B100 foram respectivamente 15,7% e 78,5% menores do que a do óleo diesel derivado do petróleo (USDA & USDE, 1998).

Os benefícios da utilização do biodiesel são diversos e em todos os continentes países se mobilizam para integrar o mesmo a sua matriz energética. No que diz respeito ao Brasil, o biodiesel vem sendo integrado ao diesel que abastece as frotas desde 2008, quando foi incorporado cerca de 2% em volume de biodiesel ao diesel comercial. O teor vem crescendo com o passar dos anos, chegou a 12% em 2020 e atualmente corresponde a cerca de 10% em todo o território nacional (Costa & Pereira, 2020).

Após estudos preliminares, a Resolução CNPE nº 16/2018 (CNPE, 2018) autorizou a elevação do percentual de biodiesel na mistura, até o patamar de 15% até 2023. Empresas como a Volvo já iniciam testes para utilização de biodiesel até 30% em motores de ciclo diesel utilizados em suas frotas de caminhões e o mesmo também é realidade em alguns setores do agronegócio (MAPA, 2015).

Esse aumento no teor de biodiesel no diesel não pode, no entanto, ocorrer sem um estudo apropriado dos impactos da utilização do biodiesel nos motores. Segundo Faria et al. (2010) e Carvalho et al. (2016) o teor de biodiesel tende, de forma geral, a diminuir os parâmetros de eficiência do funcionamento dos motores. O aumento do teor de biodiesel prejudica a qualidade da atomização do combustível na câmara de combustão levando o motor a operar fora de limites de projeto.

Para o bom desempenho de um motor de combustão interna, a qualidade do combustível utilizado é de suma importância, sobretudo em motores do ciclo diesel. Nesses motores, a qualidade da combustão está diretamente ligada à atomização do

combustível na câmara de combustão. A atomização do combustível depende das suas características, como por exemplo, da tensão superficial. O efeito do biodiesel, componente das misturas diesel/biodiesel, sobre a qualidade da atomização merece ser avaliado já que, as propriedades físico-químicas de ambos são muito distintas. Uma atomização deficiente resulta em um aumento do consumo de combustível e de emissões, além do desgaste do motor (Faria et al. 2010 e Carvalho et al. 2016).

## Capítulo II – Objetivo geral e específicos

O presente trabalho teve como objetivo investigar e simular os impactos causados por diferentes misturas de diesel e biodiesel de origem vegetal como soja, girassol, algodão e palma ou biodiesel de origem animal como sebo bovino em motores de combustão do ciclo diesel *common-rail*, e associar esses impactos à composição química dos diferentes combustíveis analisados. Para tal, fazem-se necessários os objetivos específicos:

- Pesquisar em bases de artigos e patentes um panorama atual sobre a utilização de misturas de diesel e biodiesel em motores de ciclo diesel, características químicas dos combustíveis e misturas, impactos já relatados da sua utilização e dados experimentais para efeito comparativo.
- Medir experimentalmente parâmetros físico-químicos como massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial de misturas com diferentes teores de diesel e biodiesel de soja metílico.
- Simular parâmetros físico-químicos, como massa específica, tensão superficial e viscosidade cinemática, de misturas diesel e biodiesel com diferentes teores e de diferentes origens, utilizando modelos matemáticos presentes na literatura pesquisada.
- Utilizar os parâmetros físico-químicos obtidos para descrever e analisar as características da atomização dos combustíveis em motores de ciclo diesel *common-rail* utilizando os parâmetros diâmetro médio de Sauter, alcance, ângulo de cone e tempo de ruptura do spray de combustível.
- Correlacionar os impactos preditos durante os cálculos com as características químicas das misturas utilizadas e com os impactos e dados experimentais relatados na pesquisa de bases.

## **Capítulo III – Referencial teórico**

### **III.1 – Combustíveis**

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, combustíveis são substâncias que quando queimadas liberam calor e podem ser utilizadas para realização de trabalho, como acionamento de motores. Combustíveis podem ser oriundos de fontes renováveis ou não renováveis e são em sua grande maioria oriundos de matéria prima fóssil (EPE, 2020).

Os combustíveis fósseis são classificados como sendo misturas de hidrocarbonetos fracionadas em misturas refinadas. A composição pode variar de hidrocarbonetos mais leves como gases e gasolina, intermediárias, querosene e o diesel e frações pesadas como gasóleo, óleo combustível e asfalto (Ferreira, 2008).

Com a alta demanda de produção de combustíveis oriundos de petróleo e o crescente aumento do impacto ambiental causado pelo seu uso, surge a necessidade de utilização de combustíveis de origem renovável como os biocombustíveis. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia (ANP, 2021).

#### **III.1.1 – Óleo diesel combustível**

Conforme a ANP, o óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos e, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio. É utilizado principalmente nos motores ciclo diesel (de combustão interna e ignição por compressão) em veículos rodoviários, ferroviários, marítimos e em geradores de energia elétrica (ANP, 2021).

É atribuído ao óleo diesel características como volatilidade moderada, alta inflamabilidade, toxicidade mediana, odor característico e livre de suspensões que é obtido da destilação do petróleo na faixa de 150°C a 400°C.

Essa mistura de n-parafinas, parafinas ramificadas, cicloalcanos de até três anéis e poliaromáticos é nomeada em homenagem ao engenheiro franco-alemão Rudolf Christian Karl Diesel que desenvolveu o motor de ciclo diesel e foi homenageado pela indústria do petróleo após seu falecimento.

No Brasil, conforme informações do portal Shell Brasil LTDA, a distribuição do óleo diesel se iniciou em 1910 com a empresa *Anglo-Mexican Petroleum Products Company* que em 1952 instaurou os primeiros postos de distribuição no Brasil e posteriormente recebeu o nome de Shell Brasil LTDA. A Figura 1 é um registro da operação em 1930.

Figura 1: Primeiro trem de combustível da Anglo Mexican no Brasil em 1930



Fonte: Portal Shell Brasil LTDA

No Brasil, conforme ANP, o consumo de diesel no primeiro semestre de 2021 correspondeu a uma média de 4,94 bilhões de litros por mês. Em 2021, o principal setor de consumo foi o agronegócio, seguido pelo transporte rodoviário. Esse não é o comportamento usual já que normalmente o setor de transporte rodoviário é o maior consumidor de diesel, tendo essa inversão ocorrido devido ao momento de pandemia.

Estudos indicam que cerca de  $\frac{1}{4}$  do diesel consumido no Brasil é importado pois, embora o país seja considerado autossuficiente em petróleo, as características do petróleo extraído e das instalações de refino fazem com que seja necessário a importação para abastecimento do mercado interno (ANP, 2021).

As especificações do diesel utilizado na frota brasileira são definidas e regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A norma mais atual acerca das características do diesel é a Resolução ANP N° 50, de 23.12.2013, DOU 24 de dezembro de 2013 que estabelece as especificações do óleo diesel de uso rodoviário. Essas especificações estão contidas no Regulamento Técnico ANP n° 4/2013, parte integrante da Resolução, além das obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional. A Tabela 1 contém as especificações para o diesel S10 e S500. O diesel S500 possui no máximo 500 partes por milhão de enxofre em sua composição, enquanto o S10 possui o limite máximo de apenas 10 partes por milhão.

Tabela 1: Especificações do óleo diesel de uso rodoviário

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	
		TIPO A e B	
		S10	S500
Aspecto		Límpido e isento de impurezas	
Cor		(1)	Vermelho (2)
Cor ASTM, máx.		3,0	
Teor de biodiesel	% volume	(3)	
Enxofre total, máx.	mg/kg	10,0	500
Destilação: 10% vol, recuperados, mín.		180,0	Anotar
Destilação: 50% vol, recuperados		245,0 a 295,0	245,0 a 310,0
Destilação: 85% vol, recuperados, máx.	°C	-	360,0
Destilação: 90% vol, recuperados		-	Anotar
Destilação: 95% vol, recuperados, máx		370,0	-
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	815,0 a 850,0 (4)	815,0 a 865,0
Ponto de fulgor, mín.	°C		38,0
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C		(5)
Número de cetano, mín. ou Número de cetano derivado (NCD), mín.		48	42
Resíduo de carbono Ramsbot-tom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa		0,25
Cinzas, máx.	% massa		0,010
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx			1
Teor de Água, máx.	mg/kg	200	500
Contaminação total, máx.	mg/kg	24	-
Água e sedimentos, máx.	% volume	-	0,05
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, máx.	% massa	11	-
Estabilidade à oxidação, máx.	mg/100mL	2,5	-
Índice de Acidez	mg KOH/g	Anotar	-
Lubricidade, máx.	µm		(6)
Condutividade elétrica, mín.	pS/m	25	25

(1). Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.

(2). O corante vermelho, especificado conforme a Tabela III da Resolução ANP N°50, deverá ser adicionado no teor de 20 mg/L de acordo com o artigo 12.

(3). No percentual estabelecido pela legislação vigente. Será admitida variação de  $\pm 0,5$  % volume. A norma EN 14078 é de referência em caso de disputa para a determinação do teor de biodiesel no óleo diesel B.

(4). Será admitida a faixa de 815 a 853 kg/m<sup>3</sup> para o óleo diesel B.

(5). Limites conforme Tabela II da Resolução ANP N°50.

(6). Limite varia com a metodologia utilizada. 460 µm (ISO 12156) ou 520 µm (ASTM D6079).

Fonte: Resolução ANP N° 50, de 23.12.2013, DOU 24 de dezembro de 2013



A resolução vigente também classifica os tipos de diesel produzidos em óleo diesel A ou B, sendo ambos oriundos de refino de petróleo e destinado a veículos dotados de motor do ciclo diesel a diferença sendo o diesel B acrescido de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente e o diesel A isento de biodiesel. Além disso eles são classificados conforme teor de enxofre indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação dos combustíveis diesel quanto ao teor máximo de enxofre

COMBUSTÍVEL – ÓLEO DIESEL	TEOR DE ENXOFRE MÁXIMO (mg/kg)
A S-10 e B S-10	10
A S-50 e B S-50	50
A S-500 e B S-500	500
A S-1800 e B S-1800	1800

Fonte: Resolução ANP Nº 50, de 23.12.2013, DOU 24 de dezembro de 2013

Atualmente a Resolução CNPE nº 16/2018 (CNPE, 2018) determina a adição do teor de biodiesel presente no diesel rodoviário a 13% desde março de 2021, porém devido ao encarecimento do preço dos combustíveis, o governo aprovou a Resolução nº 10, de 11 de maio de 2021, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) que determina o teor fixo de 10% de biodiesel no diesel para evitar incrementos no preço final do consumidor. A medida é vista como uma tentativa de frear os constantes aumentos no preço do combustível nos anos anteriores, mas ainda existe a previsão de atingir patamares de 15% em março de 2023, previstos pela Resolução CNPE nº 16/2018.

Os combustíveis S-10, S-50 e S-500 são utilizados para abastecimento de veículos automotivos, maquinário agrícola, máquinas do setor de construção civil e industrial enquanto o óleo diesel S-1800 é utilizado no transporte ferroviário e para geração de energia elétrica (ANP, 2020).

### **III.1.2 – Biodiesel**

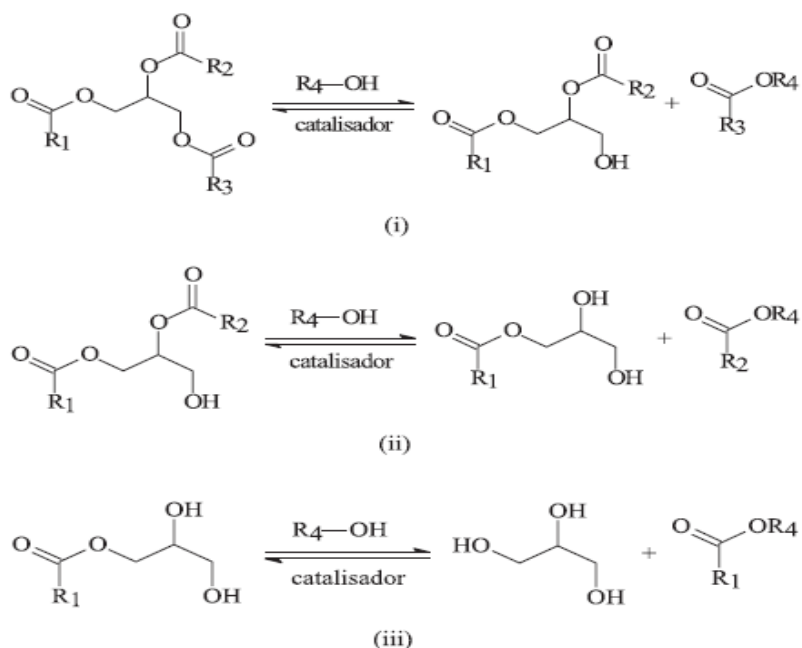
O biodiesel é um biocombustível em evidência no cenário energético mundial. Óleos vegetais extraídos foram utilizados, em emergências ou escassez, em motores de combustão interna como, por exemplo, durante a primeira e segunda guerra mundial. O avanço das tecnologias de motores e combustível inviabilizou a utilização do óleo vegetal diretamente no motor, porém diversos fatores levaram o biodiesel a receber muita atenção e incentivos por partes de pesquisadores e governos (Dantas, 2006).

Após crise do petróleo em 1973 ocorreu uma busca por combustíveis capazes de substituir os derivados de petróleo. Além disso, impulsionado pelo crescimento de preocupações associadas a problemas ambientais, o biodiesel surge como alternativa, viável e mais amigável ao meio ambiente para substituir combustíveis fósseis (Alcântara de Lima, 2012).

Para a produção de biodiesel pode-se utilizar matérias primas de origem vegetal e gordura animal. As mesmas podem ser transformadas em biocombustível por meio de três processos distintos: craqueamento, esterificação e transesterificação. A metodologia mais utilizada no Brasil e no mundo é a transesterificação (Foglia & Haas, 2006).

O método da transesterificação consiste na reação de gordura ou óleo com um álcool, geralmente metanol ou etanol, para formar ésteres e glicerol. A transesterificação pode ser catalisada por ácidos, bases ou enzimas, e as reações envolvidas estão mostradas na Figura 2 (Suarez et al., 2007).

Figura 2: Reações envolvidas na transesterificação de triglicerídeos.



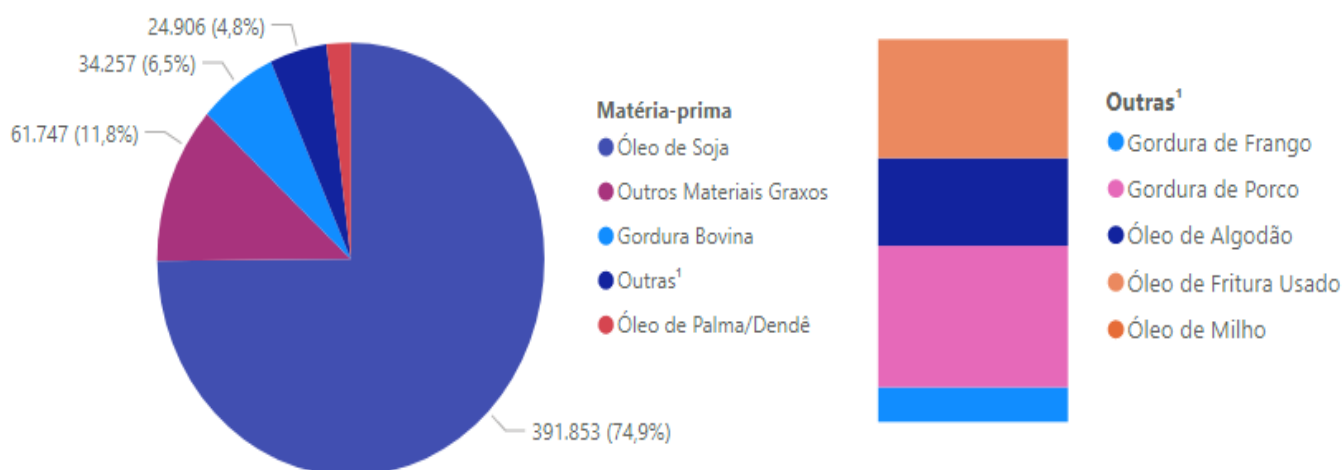
Fonte: Suarez et al. (2007).

A reação é composta por três reações consecutivas e reversíveis conforme observado na Figura 2. O glicerídeo formado em uma etapa é consumido na reação seguinte até a obtenção do triglicerídeo (Suarez et al., 2007).

A produção de biodiesel no Brasil é privilegiada pela possibilidade de cultivo de oleaginosas em toda a extensão do país e com baixa competição com as produções que visam suprir demandas de alimentação (ANP, 2021).

As principais matérias-primas para produção de biodiesel no país, encontram-se na Figura 3. Os dados são apresentados em metros cúbicos de matéria-prima e percentual. Outros materiais graxos contemplam de misturas de matérias-primas a reprocessamento de subprodutos gerados na produção de biodiesel (ANP, 2021).

Figura 3: Principais matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil



Fonte: Painel dinâmico matéria-prima ANP (2021)

Os óleos são constituídos, basicamente, de lipídios. Esses são uma classe estrutural muito complexa onde diversos tipos estruturais estão presentes, como os acilgliceróis, ácidos graxos e fosfolipídios (Florido, 2018).

Ácidos graxos estão presentes em menor quantidade, mas são constituintes das moléculas de acilgliceróis, logo o perfil de ácidos graxos exerce grande influência nas propriedades físico-químicas do óleo. A Tabela 3 apresenta os principais ácidos graxos saturados e insaturados que constituem os óleos (Florido, 2018).

O biodiesel produzido a partir de óleos com elevado teor de saturados é vantajoso, visto que possuem elevado número de cetano e são menos propensos à oxidação e degradação. Entretanto, um elevado teor de compostos saturados também confere uma tendência a cristalização em baixas temperaturas. Em função disso, utiliza-se biodiesel com alto teor de saturados associado a biodiesel com teores menores, como é o caso da mistura, muito utilizada, de biodiesel de sebo bovino com soja (Moraes, 2018).

Tabela 3: Principais ácidos graxos saturados e insaturados presentes nos óleos

CLASSIFICAÇÃO	NOME COMUM	NOME SISTEMÁTICO	NÚMERO DE CARBONO E INSATURAÇÕES
Saturados	Butírico	Ácido butanóico	C4:0
	Capróico	Ácido hexanóico	C6:0
	Caprílico	Ácido octanóico	C8:0
	Cáprico	Ácido decanóico	C10:0
	Láurico	Ácido dodecanóico	C12:0
	Mirístico	Ácido tetradecanóico	C14:0
	Palmítico	Ácido hexadecanóico	C16:0
	Estearíco	Ácido octadecanóico	C18:0
	Araquídico	Ácido eicosanóico	C20:0
	Behênico	Ácido docosanóico	C22:0
	Lignocênico	Ácido tetracosanóico	C24:0
Insaturados	Caproléico	Ácido 9-decenóico	C10:1
	Lauroléico	Ácido 9-dodecenóico	C12:1
	Miristoléico	Ácido 9-tetradecenóico	C14:1
	Palmitoléico	Ácido 9-cis-hexadecénico	C16:1
	Oléico	Ácido 9-cis-octadecenóico	C18:1
	Gadoléico	Ácido 9-ecosenóico	C20:1
	Linoléico	Ácido 9,12-octadecadienóico	C18:2
	Linolênico	Ácido 9,12,15-octadecatrienóico	C18:3

Fonte: Adaptado de Florido (2018)

No trabalho de Moraes (2018) e Machado et al. (2006), pode-se encontrar o valor do teor aproximado de ácidos graxos esterificados presentes no biodiesel oriundo das principais matérias-primas usadas na produção de biodiesel, como sebos bovino, de frango, de porco e os de origem vegetal: soja, girassol, oliva, nozes, colza, algodão, canola, linhaça, amendoim, gergelim e palma.

Os valores foram retirados de trabalhos presentes na literatura e compilados na Tabela 4, onde ND significa “não-detectado”, indicando que a análise utilizada para obter o valor em questão não detectou traços significativos do ácido graxo esterificado.

Tabela 4: Teor de ácidos graxos esterificados em diferentes tipos de biodiesel

BIODIESEL	COMPOSIÇÃO PERCENTUAL DE ÉSTERES METÁLICOS DE ÁCIDOS GRAXOS (%)															
	C12:0	C14:0	C15:0	C16:1	C16:0	C17:0	C18:3	C18:2	C18:1	C18:0	C20:1	C20:0	C22:1	C22:0	Σ SAT	Σ INS
Sebo Bovino	ND	4,36	1,62	2,23	26,42	1,54	ND	0,86	28,50	34,47	ND	ND	ND	ND	68,41	31,59
Sebo de Frango	ND	0,70	ND	5,40	20,90	ND	1,07	20,50	40,90	5,60	ND	ND	ND	ND	27,20	68,87
Sebo de Porco	ND	1,30	ND	2,60	23,50	0,40	ND	10,70	41,70	13,50	ND	ND	ND	ND	38,70	55,00
Sebo de Pato	ND	0,60	ND	9,00	39,80	ND	ND	ND	8,60	13,20	ND	ND	ND	ND	53,60	17,60
Soja	ND	0,10	ND	0,1	13,2	ND	7,50	55,20	24,40	4,2	ND	0,30	0,30	ND	16,50	83,00
Girassol	ND	0,10	ND	ND	6,50	ND	ND	63,10	19,80	4,30	ND	ND	ND	ND	10,90	82,90
Oliva	ND	ND	ND	ND	12,40	ND	0,90	7,00	75,00	3,60	ND	ND	ND	ND	16,20	83,90
Nozes	ND	ND	ND	ND	8,60	ND	11,50	59,00	18,00	2,90	ND	ND	ND	ND	11,50	88,50
Colza	ND	ND	ND	ND	2,70	ND	8,0	12,10	12,60	0,90	7,40	ND	49,80	0,70	4,30	89,60
Algodão	ND	1,10	ND	0,70	22,00	ND	ND	49,30	21,00	2,60	ND	ND	ND	ND	25,70	71,00
Canola	ND	ND	ND	ND	5,00	ND	10,00	31,00	63,00	2,00	ND	ND	2,00	ND	6,00	95,50
Linhaça	ND	ND	ND	6,70	ND	ND	50,00	18,20	20,70	4,60	ND	ND	ND	ND	4,60	95,60
Amendoim	ND	0,50	ND	ND	12,50	ND	ND	41,00	61,00	6,00	ND	ND	1,00	ND	14,00	76,00
Gergelim	ND	ND	ND	ND	9,20	ND	ND	48,00	46,00	7,70	ND	ND	ND	ND	14,90	82,00
Palma	ND	2,40	ND	ND	46,30	ND	ND	12,00	53,00	6,30	ND	ND	ND	ND	45,80	54,00

ND = não-detectado

Fonte: Adaptado de Moraes (2018) e Machado et al. (2006)

As especificações do biodiesel acrescentado ao combustível utilizado na frota brasileira são definidas e regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A norma mais atual acerca das características do biodiesel é a Resolução ANP N° 45, de 25.08.2014– DOU 26.08.2014 contida no Regulamento Técnico ANP N° 3/2014. Estabelece as especificações e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional, descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Especificações do biodiesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE
Aspecto	-	LII (1)
Massa específica a 20° C	kg/m <sup>3</sup>	850 a 900
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3,0 a 6,0
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24
Ponto de fulgor, mín.	°C	100,0
Teor de éster, mín.	% massa	96,5
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020
Enxofre total, máx.	mg/kg	10
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5
Fósforo, máx.	mg/kg	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.	-	1
Número Cetano	-	Anotar
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(2)
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02
Glicerol total, máx.	% massa	0,25
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7
Diacilglicerol, máx.	% massa	0,20
Triacilglicerol, máx.	% massa	0,20
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,20
Índice de Iodo	g/100g	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	h	12

(1). Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio.

(2). Limites conforme Tabela II da Resolução ANP N° 45. Para os estados não contemplados na tabela o ponto de entupimento a frio permanecerá 19°C.

Fonte: Resolução ANP N° 45, de 25.08.2014– DOU 26.08.2014

### III.2 – Propriedades físico-químicas dos combustíveis

Avaliar as propriedades físico-químicas dos combustíveis é essencial para garantir o correto funcionamento do motor e a padronização do produto ofertado (Resolução ANP N°50). Dentre as principais propriedades físico-químicas no que diz respeito a qualidade do combustível estão: a viscosidade, massa específica, número de cetano, ponto de fulgor, ponto de fluidez, ponto de névoa e poder calorífico. No que diz respeito ao desempenho do motor a tensão superficial também será uma propriedade importante, embora não regulamentada pela ANP.

A viscosidade dinâmica pode ser definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação ocorrida no fluido. Já a viscosidade cinemática é uma relação da viscosidade dinâmica de um fluido dividido por sua massa específica. De forma geral, a viscosidade dos fluidos aumenta com o decréscimo da temperatura. Conhecimento sobre a viscosidade do combustível é essencial para eficiência do sistema de injeção do combustível, já que, na atomização, a formação de gotículas maiores diminui a área superficial por unidade de volume, reduzindo a taxa de vaporização. Em se tratando do biodiesel, a viscosidade é afetada de maneira significativa por diversos fatores como o comprimento da cadeia carbônica e presença de insaturações (Florida, 2018).

Dados de massa específica são utilizados pelo setor automotivo para modelar os processos de combustão. A massa específica do biodiesel é ligeiramente superior ao do óleo diesel combustível e é influenciada pela composição em ésteres de ácidos graxos. A massa específica do biodiesel geralmente varia entre 0,86 e 0,90 g/cm<sup>3</sup> enquanto a do diesel varia de 0,81 a 0,87 g/cm<sup>3</sup> (Alptekin et al., 2008). A massa específica do diesel puro, do biodiesel puro e de suas misturas diminui com o aumento da temperatura, podendo ter decréscimos de 2% a 3% quando comparando valores obtidos a 15°C com valores a 40°C (Barbosa et al., 2015).

A tensão superficial é um parâmetro muito importante no entendimento de processos que envolvam contato de fases. Diz respeito ao efeito que ocorre na interação entre duas fases químicas e é de vital importância nos estudos de qualidade de injeção e atomização do combustível. De forma geral o biodiesel possui valores mais elevados de tensão superficial quando comparado ao diesel e essa é uma das principais desvantagens técnicas do biocombustível no funcionamento do motor de ciclo diesel (Zuniga & Paula, 2011).

O número de cetano é utilizado para avaliar a qualidade de ignição e combustão de combustíveis usados em motores de combustão interna do ciclo diesel. É semelhante a escala de octanagem de gasolina. O número de cetano do biodiesel depende da distribuição dos ácidos graxos no óleo ou gordura original da qual o biodiesel foi produzido (Florido, 2018 e Zuniga & Paula, 2011).

Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um líquido inflamável emite vapores em quantidade suficiente para uma mistura e ignição momentânea. O ponto de fluidez pode ser definido como a mais baixa temperatura em que o líquido escoar livremente. Já o ponto de névoa é a temperatura na qual cristais parafínicos atingem diâmetros maiores que 0,5  $\mu\text{m}$  e tornam-se visíveis. O poder calorífico diz respeito a quantidade de energia térmica que será liberada na câmara de combustão do motor.

As características citadas são relevantes no estudo do funcionamento de motores de combustão interna e a Tabela 6 é um compilado com diversos modelos presentes na literatura e retirados dos trabalhos de Saxena et al. (2013), Alpetekin et al. (2008) e Chunxi et al (2000) para simulação de propriedades físico-químicas diversas de biodiesel puro, misturas de biodiesel e diesel e misturas de diferentes tipos de biodiesel.



Tabela 6: Modelos para simulação de propriedades físico-químicas

PROPRIEDADE	EQUAÇÃO DO MODELO	PROPRIEDADE FÍSICO-QUÍMICAS NECESSÁRIAS	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
Massa específica	$\rho_i = 0.8463 + \frac{4.9}{M_i} + 0.0118N$	$M_i$ = mols do FAME de maior teor $N$ = n° de insaturações	Biodiesel puro	Verduzco et al. (2012)
	$\rho = A+BT+CT$ $D = Ax + B$	$A, B$ e $C$ = correlação de dados experimentais $T$ = Temperatura da mistura $A$ e $B$ = correlação de dados experimentais $x$ = massa específica do biodiesel $A, B, C$ e $D$ = correlação de dados experimentais $r_{mix}$ = razão da mistura $T$ = Temperatura da mistura	Misturas diesel/biodiesel Misturas diesel/biodiesel	Verduzco et al. (2011) Alptekin et al. (2008)
Viscosidade	$\rho_{cal} = A + B \cdot r_{mix} + C \cdot T + D \cdot T \cdot r_{mix}$	$r_{mix}$ = razão da mistura $T$ = Temperatura da mistura	Misturas diesel/biodiesel	Mehta et al. (2010)
	$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^n y_i \ln \mu_i$ $\eta = 0.235N_C - 0.699N_{DB} - 3.648$ $\eta = 0.235N_C - 0.468N_{DB}$ $\eta = Ax^2 + Bx + C$	$\mu_i$ = viscosidade do composto puro $i$ $y_i$ = fração molar do composto puro $i$ $N_c$ = média ponderada do n° de carbonos $N_B$ = média ponderada do n° de insaturações $N_c$ = média ponderada do n° de carbonos $N_B$ = média ponderada do n° de insaturações $A, B$ e $C$ = correlação de dados experimentais $x$ = massa específica do biodiesel $x_i$ = fração molar do componente puro $i$	Misturas diesel/biodiesel Biodiesel puro Biodiesel puro	Allen et al. (1999) Gopinath et al. (2009) Yung et al. (2011)
Tensão Superficial	$\sigma_m = \sum_i x_i \sigma_i - RT \sum_i \frac{x_i}{\sum_j x_j A_{ij}} \sum_j x_j \left( \frac{\partial A_{ij}}{\partial A} \right)_{T,P,x}$	$A_{ij}$ = <i>parametro da equação de Wilson</i> $A$ = área superficial, $T$ = Temp., $R$ = Const. Gases	Mistura diesel/biodiesel ou biodiesel/biodiesel	Alptekin et al. (2008) Chunxi et al. (2000)
Número de Cetano	$CN_{BDF} = \sum_i x_i CN_{FAME,i}$	$x_i$ = fração do FAME $CN_{FAME}$ = NC do FAME puro	Biodiesel puro	Clement et al. (1996)
Ponto de Fulgor	$CN_{BDF} = 3.930N_C - 15.936N_{DB}$ $T_f = 23.362N_C + 4.854N_{DB}$	$N_c$ = média ponderada do n° de carbonos $N_B$ = média ponderada do n° de insaturações $N_c$ = média ponderada do n° de carbonos $N_B$ = média ponderada do n° de insaturações	Biodiesel puro Biodiesel puro	Yung et al. (2011)
Ponto de Névoa	$CP = 18.134N_C - 0.790U_{FAME}$	$N_c$ = média ponderada do n° de carbonos $U_{FAME}$ = composição média do FAME	Biodiesel puro	

FAME = fatty acid methyl ester

### III.3 – Motores a combustão interna

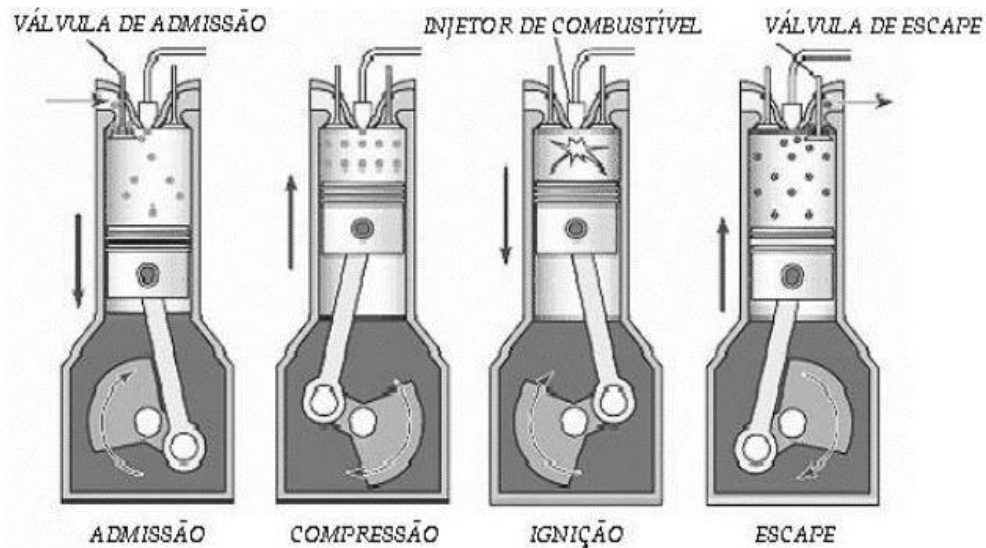
Motores a combustão interna são máquinas térmicas capazes de realizar trabalho pela conversão da energia química dos combustíveis, gerada na combustão, em força motriz (Brunetti, 2012).

Os motores a combustão interna podem ser classificados em dois grupos: os motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel. No primeiro a combustão é iniciada por centelhamento enquanto no segundo a queima ocorre em decorrência da pressão e da temperatura da câmara de combustão (Michels & Grzeca, 2014).

#### III.3.1 – Motor de ciclo Diesel

Os motores de ciclo Diesel podem operar em ciclos de dois ou quatro tempos. Motores de ciclos de dois tempos são utilizados para grandes aplicações como geração de energia e motores navais, caracterizados por motores de baixa rotação. Já motores de ciclo Diesel de quatro tempos são utilizados em veículos rodoviários. Os ciclos de quatro tempos dizem respeito aos quatro estágios da conversão de energia química em trabalho, descritas a seguir e representada na Figura 4 (Podorodeczki, 2016).

Figura 4: Etapas de operação do motor de ciclo Diesel de quatro tempos



Fonte: Podorodeczki (2016)

- Admissão: entrada de ar enquanto o pistão está descendo.
- Compressão: a subida do pistão aumenta a pressão da câmara de admissão, comprimindo o ar e admitindo a entrada de combustível ao final da etapa.

- Ignição: etapa onde, devido ao aumento de pressão, atinge-se temperaturas entre 700°C e 800°C e ocorre a ignição e combustão da mistura, impulsionando o pistão para baixo.
- Escape: a válvula de exaustão é aberta e libera os gases oriundos da combustão.

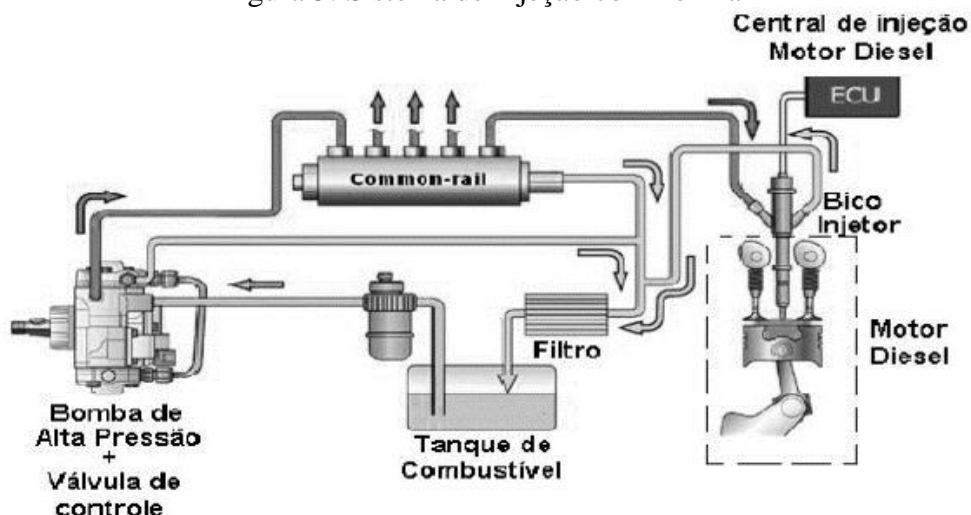
A operação do motor pode se dar a baixa carga, carga moderada e plena carga. Essas faixas são diferenciadas pela quantidade de combustível injetado e na quantidade fixa de ar admitido pelo sistema de turbo-compressão, bem como temperatura de operação (Faria et al., 2010 & Carvalho et al., 2016).

### III.3.2 – Sistema de injeção *common-rail*

A injeção de combustível e ar na câmara de admissão era feita de forma mecânica, por meio de reguladores centrífugos, até meados de 1980. Preocupações ambientais motivaram a redução de gases poluentes o que resultou no desenvolvimento de sistemas semi-eletrônicos de injeção até ser atingido o sistema de injeção atual, totalmente eletrônico, o *common-rail* (Podorodeczki, 2016).

Nesse sistema de injeção, uma bomba de alta pressão com válvula de controle é acionada eletronicamente mantendo apenas a pressão necessária para o trabalho que o motor está sendo submetido. Dessa forma, a admissão de ar e combustível é controlada no nível necessário para atender a demanda exigida pela central de injeção. Esse controle de injeção de volume e pressão é superior ao sistema mecânico e possibilita a redução da emissão de gases poluentes. Na Figura 5 segue um esquema de operação do sistema de injeção *common-rail* (Podorodeczki, 2016).

Figura 5: Sistema de injeção *common-rail*



Fonte: Podorodeczki (2016)

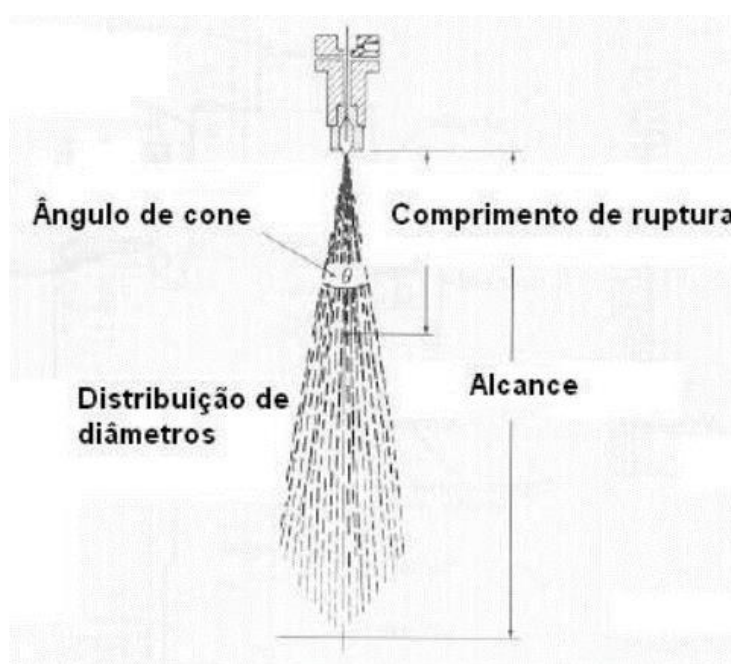
A função do sistema de injeção é promover um elevado grau de atomização do combustível no cilindro do motor, de modo a obter uma penetração do spray suficiente e permitir a sua vaporização em tempo muito curto para utilizar toda a carga de ar. A injeção de combustível na câmara de admissão produz um regime de atomização cônico na câmara de combustão. Esse comportamento é classificado como regime de atomização de desintegração e produz gotículas muito menores que o diâmetro do bico do injetor (Gonçalves, 2016).

### III.3.3 – Atomização na câmara de injeção

A atomização pode ser influenciada pela geometria do bico injetor, pelo líquido que será atomizado e pelo ambiente onde ocorrerá a atomização. A geometria do bico injetor define o regime e o formato do spray. As propriedades dos líquidos que exercem influência no processo de atomização são massa específica, tensão superficial e viscosidade. A temperatura e a pressão são os principais fatores do ambiente que exercem influência na atomização (Perera, 2015).

Os principais parâmetros avaliados durante a atomização são: o diâmetro das partículas de combustível, o alcance do spray, o ângulo de cone e o tempo de ruptura do spray de combustível, estimado pelo comprimento de ruptura, conforme Figura 6 (Carvalho et al., 2016).

Figura 6: Características externas do spray de combustível



Fonte: Faria et al (2010)

O alcance é definido como a distância máxima atingida pelo spray de combustível na câmara de combustão. O ângulo de cone diz respeito a angulação de injeção do combustível na câmara. O tempo de ruptura é o tempo que decorre entre a injeção do combustível e a degradação secundária, sendo o tempo estimado com base no comprimento de ruptura (Faria et al., 2010).

O tempo de ruptura pode ser melhor compreendido verificando a Figura 7 onde vemos uma imagem real do momento da injeção do spray de combustível na câmara de combustão. O ponto de ruptura é o momento onde o spray de combustível deixa de ter características de um feixe líquido contínuo e vira uma nuvem totalmente atomizada.

Figura 7: Injeção do spray de combustível na câmara de injeção



Fonte: How Fuel Injection Systems Work (2001)

Para cálculo da distribuição de diâmetro de partículas é usado o diâmetro médio de Sauter. Esse seria o diâmetro que melhor representa a distribuição arbitrária de diâmetros de gota que compõem o spray. Trata-se da relação entre a área superficial e o volume do spray (Carvalho et al. 2016).

## Capítulo IV – Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais e as metodologias utilizados para a obtenção dos resultados pretendidos pelo estudo. São indicadas as características do diesel e biodiesel utilizados nas medições experimentais, a metodologia para obtenção das blendas, os critérios utilizados para seleção de misturas diesel/biodiesel presentes na literatura. São apresentadas as metodologias de análise e simulação das propriedades físico-químicas dos combustíveis e dos parâmetros de atomização do motor do ciclo diesel.

### IV.1 – Propriedades do diesel e biodiesel avaliados

#### IV.1.1 – Diesel e biodiesel usados na determinação experimental

O óleo diesel S10 A (isento de biodiesel), utilizado neste estudo, foi doado pela distribuidora de combustível Ipiranga Produtos de Petróleo S.A, localizada no município de Duque de Caxias, estado do Rio de Janeiro, e não continha nenhum tipo de aditivo.

Os resultados do boletim de análise da amostra, fornecido pela Ipiranga, atendiam às especificações da resolução ANP N°50/2013. Os dados foram obtidos na tese de doutorado de Leonardo (2019) e estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7: Boletim de análise do Diesel S10 A Ipiranga

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO	UNIDADE
Aspecto - Turbidez	D 4176	Anotar	LIMP	-
Aspecto – Material Particulado	D 4176	Anotar	ISEN	-
Cor	VIS 000	INAM	INAM	-
Cor ASTM	D 1500	3,0 máx.	L0,5	-
10% recuperados	D 86	180,0 mín.	209,9	°C
50% recuperados	D 86	245,0 a 295,0	278,2	°C
95% recuperados	D 86	370,0 máx.	354,0	°C
Ponto de entupimento	D 6371	8 máx.	-7	°C
Massa específica a 20°C	D 4052	815,0 a 850,0	828,7	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade cinemática a 40°C	D 445	2,04 a 4,5	3,0	mm <sup>2</sup> /s
Corrosividade ao cobre 3h 50°C	D 130	1 máx.	1	-
Estabilidade a oxidação	D 2274	2,5 máx.	0,6	mg/100 mL
Cinzas	D 482	0,010 máx.	<0,001	% massa
RCP nos 10% finais da destilação	D 524	0,25 máx.	0,07	% massa

Fonte: Leonardo (2019)

Continuação Tabela 7:

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO	UNIDADE
Número de cetano	D 613	48 mín.	54	-
Contaminação total	EN 12662	24 máx.	<1	mg/kg
Teor de água	D 6304	200 máx.	29	mg/kg
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	D 5186	11 máx.	2	% massa
Ponto de fulgor	D 93	38,0 mín.	60,0	°C
Índice de acidez total	D 974	Anotar	<0,02	mg KOH/g
Enxofre total	D 5453	10,0 máx.	5,8	mg/kg
Condutividade elétrica	D 2624	25 mín.	100	pS/m
Temperatura observada	D 2624	Anotar	23,0	°C

Fonte: Leonardo (2019)

Foi realizado o ensaio de estabilidade oxidativa a 110°C (Rancimat), que não foi feita pela distribuidora Ipiranga, no Laboratório de Combustíveis e Derivados de Petróleo LABCOM/EQ-UFRJ, conforme EN 15751. O resultado, presente tese de doutorado de Leonardo (2019), é >24h.

O biodiesel de soja metílico (B100), foi produzido pela usina Brejeiro Produtos Alimentícios Orlândia S/A Com. e Ind., localizada no município de Orlândia no estado de São Paulo e não continha nenhum tipo de antioxidante.

Os resultados das análises de caracterização do biodiesel de soja metílico, presentes na tese de doutorado de Leonardo (2019), foram realizados no LABCOM/EQ-UFRJ, conforme Tabela 8.

Tabela 8: Características físico-químicas do biodiesel de soja metílico utilizado no trabalho

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADO
Aspecto	-	-	Líquido amarelo límpido
Massa específica a 20°C	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D7042/16 <sup>a</sup> E	0,882
Viscosidade cinemática a 40°C	cSt (mm <sup>2</sup> /s)	ASTM D445/17 <sup>a</sup>	4,155
Estabilidade à oxidação a 110°C	h	EN 14112	6,76
Glicerina livre	% m/m	ASTM 6584/13	0,015
Monoglicerídeos	% m/m	ASTM 6584/13	0,867
Diglicerídeos	% m/m	ASTM 6584/13	0,383
Triglicerídeos	% m/m	ASTM 6584/13	0,348
Glicerina Total	% m/m	ASTM 6584/13	0,330

Fonte: Leonardo (2019)

#### IV.1.2 – Preparo das blendas diesel/biodiesel

As blendas diesel/biodiesel avaliadas neste trabalho foram preparadas utilizando provetas graduadas de 100mL e 50mL para o óleo diesel S10 A e o biodiesel de soja metílico, respectivamente, conforme Figura 8. Foram preparadas misturas nas proporções volumétricas de biodiesel de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40% e 50% (v/v). As amostras foram identificadas como B05 (5% v/v de biodiesel em diesel), B10 (10% v/v de biodiesel em diesel) e assim sucessivamente, conforme mostra a Figura 9. As blendas preparadas foram mantidas em freezer, cerca de  $-4^{\circ}\text{C}$ , sendo retiradas antes dos ensaios de massa específica, viscosidade e tensão superficial.

Figura 8: Preparo das blendas utilizando provetas graduadas



Figura 9: Amostras preparadas e identificadas





## IV.2 – Seleção de biodieseis para as simulações

Para seleção dos combustíveis que foram usados nas simulações foram seguidos os critérios mencionados a seguir:

- Disponibilidade de modelos matemáticos que permitissem a obtenção de dados de massa específica, viscosidade e tensão superficial das misturas.
- Disponibilidade e utilização das matérias-primas usadas, no Brasil, para produção de biodiesel, de acordo com as informações da ANP, apresentado na Figura 3.
- Composição das matérias-primas quanto aos teores de ácidos graxos saturados e insaturados, conforme Tabela 4.

Os combustíveis selecionados foram agrupados, conforme o teor de ácidos graxos em: saturadas, amostras majoritariamente compostas por ácidos graxos saturados, insaturadas, amostras majoritariamente compostas por ácidos graxos insaturadas e amostras com teores semelhantes de saturados e insaturados.

Após pesquisa na literatura quanto a disponibilidade de modelos matemáticos e utilização das matérias-primas no Brasil foram escolhidos os seguintes tipos de biodiesel:

- Saturados: biodiesel de sebo bovino.
- Insaturados: biodiesel de óleo soja, de óleo algodão e de óleo girassol.
- Teores semelhantes: biodiesel de óleo de palma.

Para correlacionar os impactos na atomização de motores do ciclo diesel com injeção *common-rail*, encontra-se na Tabela 9 os principais ésteres de ácidos graxos presentes nos diferentes tipos de biodiesel que foram estudados.

Tabela 9: Teor de ácidos graxos esterificados presentes nos tipos de biodiesel estudados

BIODIESEL	C12:0	C14:0	C16:1	C16:0	C18:3	C18:2	C18:1	C18:0	Σ SAT	Σ INS
Bovino	ND	4,36	2,23	26,42	ND	0,86	28,50	34,47	68,41	31,59
Soja	ND	0,10	0,10	13,20	7,50	55,20	24,40	4,20	16,50	83,00
Girassol	ND	0,10	ND	6,50	ND	63,10	19,80	4,30	10,90	82,90
Algodão	ND	1,10	0,70	22,00	ND	49,30	21,00	2,60	25,70	71,00
Palma	ND	2,40	ND	46,30	ND	12,00	53,00	6,30	45,80	54,00

Fonte: Adaptado de Moraes (2018) e Machado et al. (2006)

### IV.3 – Método de análise das propriedades do diesel, biodiesel e suas blends

#### IV.3.1 – Massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C

Para determinação da massa específica e viscosidade cinemática, ambas a 40°C, foi utilizada a metodologia descrita na norma ASTM D7042-20 Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity), equivalente à norma ABNT NBR 15983.

Os ensaios foram realizados no LABCOM/EQ-UFRJ e o equipamento utilizado foi o Viscosímetro Anton Paar Stabinger SVM 3000, mostrado na Figura 10. Foram realizadas as leituras da amostra de diesel S10 A (B0), das blends de biodiesel/diesel B05, B10, B15, B20, B25, B30, B40 e B50, bem como o biodiesel de soja metílico puro (B100).

Para cada determinação foram utilizados cerca de 5mL de cada amostra e, entre cada utilização, o equipamento foi limpo com igual volume de n-hexano. Só foi possível realizar uma determinação para cada amostra.

O equipamento realiza a medição da massa específica e da viscosidade dinâmica e calcula a viscosidade cinemática, exibindo as medidas e a temperatura de ensaio simultaneamente.

Figura 10: Análise de massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C



Como o sistema de injeção do motor diesel tem retornos de combustível a tanque que provocam um aumento da temperatura do combustível no tanque, é adequado estimar que o combustível deve chegar ao bico de injeção a temperaturas próximas a 40°C. Portanto, é interessante analisar a massa específica a esta temperatura, embora a especificação regulamentada pela ANP indique que a massa específica deve ser seja obtida a 20°C.

### IV.3.2 – Tensão superficial a 40°C

As determinações das medidas de tensão superficial foram realizadas no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano - IMA/UFRJ. Foram obtidas por meio de um tensiômetro digital Kruss Force Tensiometer, modelo K100, à temperatura de 40°C, controlada por um banho de circulação Ophterm, conforme Figura 11.

Foram realizadas as leituras da amostra de diesel S10 A (B0), das blends de biodiesel/diesel B05, B10, B15, B20, B25, B30, B40 e B50, bem como o biodiesel de soja metílico puro (B100).

Foram utilizados cerca de 40 mL de cada amostra. Só foi possível realizar uma determinação para cada amostra. As condições de análise do equipamento no ensaio encontram-se na Tabela 10.

Figura 11: Análise de tensão superficial a 40°C



Nesse equipamento, baseado no método do Anel de Du Noüy, um anel circular é imerso no líquido e, em seguida, retirado lentamente, e a tensão superficial é calculada a partir da medição da força máxima para que o anel seja puxado para cima. Gerando gráficos de força por tempo e cálculos de tensão superficial ao longo do tempo de análise.

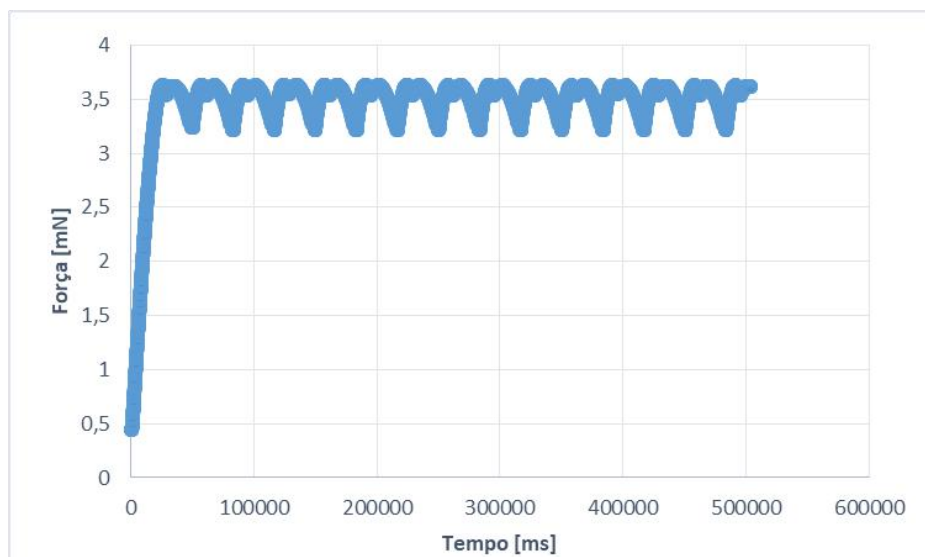
Tabela 10: Parâmetros da análise de tensão superficial a 40°C

PARÂMETROS DO EQUIPAMENTO	
Sonda:	Krüss Standard Ring
Fase gasosa:	Ar
Velocidade de detecção [mm/min]	6
Sensibilidade de detecção [g]	0,005
Velocidade de busca [mm/min]	6
Sensibilidade de busca [g]	0,005
Medidor de velocidade [mm/min]	3
Medidor de sensibilidade [g]	0,001
Profundidade dos imersores [mm]	3
Valores	15
Valores para média	5
Desvio-padrão SFT [mN/m]	65535
Correção	1
Distância de retorno [%]	10

Nesse equipamento, baseado no método do Anel de Du Noüy, um anel circular é imerso no líquido e, em seguida, retirado lentamente, e a tensão superficial é calculada a partir da medição da força máxima para que o anel seja puxado para cima. Gerando gráficos de força por tempo e cálculos de tensão superficial ao longo do tempo de análise.

Experimentalmente, a tensão superficial é calculada a partir da medição da força máxima para que o anel seja puxado para cima, repetidas vezes. O Figura 12 mostra a aplicação de força ao longo do tempo para a amostra B20, onde é possível se observar o início do experimento e os diversos ciclos de aplicação de força até retirada do anel submerso na mistura.

Figura 12: Força aplicada por tempo para a amostra B20

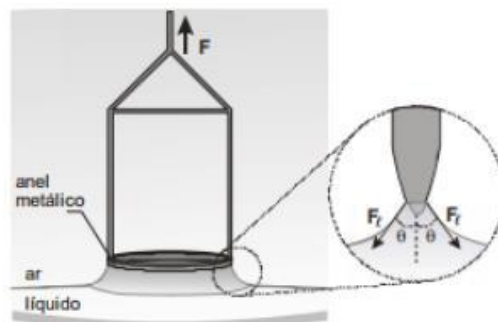


A força aplicada ao longo do tempo é utilizada para cálculo da tensão superficial conforme Equação 1, equação do método do Anel de Du Noüy, onde  $F$  é a força aplicada (mN),  $L$  é a distância entre o anel e a superfície do líquido (m) e  $\theta$  é o ângulo de contato. A Figura 13 esquematiza a medição realizada pelo tensiômetro (Mendes, 2021).

Equação 1

$$\sigma = \frac{F}{L \cos\theta}$$

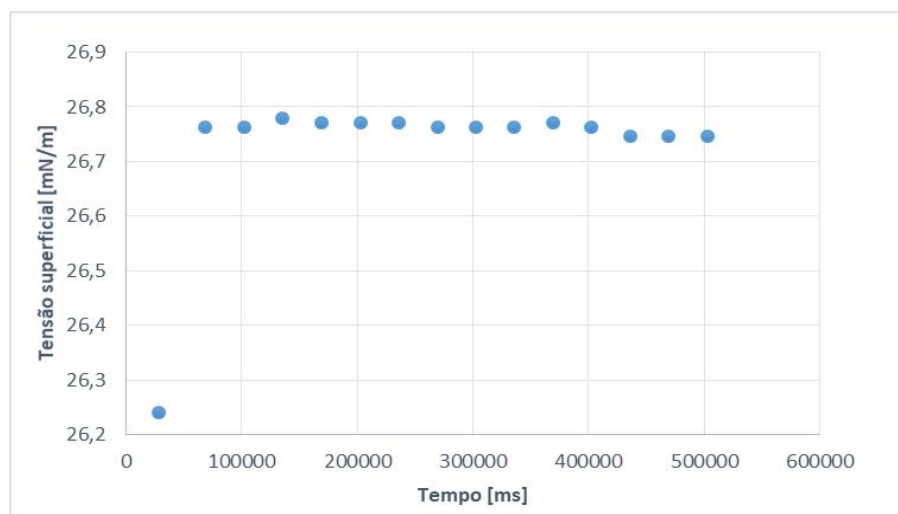
Figura 13: Esquema de funcionamento do método do Anel de Du Noüy



Fonte: Mendes (2021)

O Figura 14 mostra a tensão superficial ao longo do tempo de análise, calculado pela força aplicada e utilizando  $L$  e  $\theta$  obtidos pelo equipamento. O resultado indicado pelo equipamento é uma média entre as medições realizadas.

Figura 14: Tensão superficial a 40°C calculado por tempo para a amostra B20



#### IV.4 – Estimativa das propriedades do diesel, biodiesel e suas blendas

##### IV.4.1 – Estimativa da massa específica e viscosidade dos combustíveis

A estimativa dos parâmetros de massa específica e viscosidade foi realizada utilizando-se ajustes matemáticos obtidos nos trabalhos de Alptekin et al. (2008) e Cavalcanti (2016).

No trabalho de Alptekin et al. (2008) os óleos vegetais estudados foram usados para a produção de biodiesel, utilizando metanol, em escala laboratorial. Os diferentes tipos de biodiesel produzidos foram utilizados para fazer blendas nas proporções de 2%, 5%, 10%, 20%, 50% e 75% (v/v) usando-se *Shell extra diesel* (S.E), que é comercializado nos EUA. A massa específica a 15°C e a viscosidade cinemática a 40°C das misturas e dos combustíveis puros foram determinadas experimentalmente e correlacionados com o teor de biodiesel na mistura.

No trabalho de Cavalcanti (2016) sebo bovino foi usado como matéria-prima para produção de biodiesel, utilizando metanol, em reator de bancada de 3L. O biodiesel obtido foi utilizado para fazer blendas de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% (v/v) usando-se diesel metropolitano. Valores de massa específica e viscosidade cinemática, ambos a 40°C, das misturas preparadas e dos combustíveis puros foram obtidos por medições experimentais.

A massa específica de cada um dos biodieseis avaliados foi correlacionada com o teor de biodiesel na blenda como uma função linear da forma  $D = Ax + B$ , onde D é a massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ), x é a fração de biodiesel e A e B são coeficientes obtidos empiricamente, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Massa específica: coeficientes de correlação linear obtidos na literatura

MISTURA BIODIESEL/DIESEL	A ( $\text{g/cm}^3$ )	B ( $\text{g/cm}^3$ )	R <sup>2</sup>	REFERÊNCIA
Palma	$3 \times 10^{-4}$	0,8423	0,9999	Alptekin et al. (2008)
Girassol	$4 \times 10^{-4}$	0,8425	0,9997	
Soja	$4 \times 10^{-4}$	0,8424	0,9998	
Algodão	$4 \times 10^{-4}$	0,8427	0,9996	
Sebo Bovino	$4 \times 10^{-4}$	0,8190	0,9995	Cavalcanti (2016)

No estudo de viscosidade cinemática, os resultados foram correlacionados por uma equação do tipo  $\eta = Ax^2 + Bx + C$ , onde  $\eta$  é a viscosidade em  $\text{mm}^2/\text{s}$ , x é a fração de biodiesel e A, B e C são coeficientes obtidos empiricamente, conforme Tabela 12.

Tabela 12: Viscosidade: coeficientes de correlação polinomial obtidos na pesquisa literária

MISTURA BIODIESEL/DIESEL	A (mm <sup>2</sup> /s)	B (mm <sup>2</sup> /s)	C (mm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	REFERÊNCIA
Palma	2x10 <sup>-5</sup>	7,1x10 <sup>-3</sup>	3,4255	0,9983	Alptekin et al. (2008)
Girassol	4x10 <sup>-5</sup>	2,1x10 <sup>-3</sup>	3,4345	0,9984	
Soja	3x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-3</sup>	3,4305	0,9996	
Algodão	4x10 <sup>-5</sup>	2,5x10 <sup>-3</sup>	3,4340	0,9996	
Sebo Bovino	5x10 <sup>-5</sup>	0,0151	3,0127	0,9991	Cavalcanti (2016)

#### IV.4.2 – Estimativa da tensão superficial dos combustíveis

Para estimar os valores da tensão superficial das blends dos combustíveis analisados, inicialmente optou-se por utilizar o modelo proposto por Chunxi et al. (2000), baseado na equação de Wilson. Esse modelo matemático pode ser aplicado a sistema líquidos multicomponentes em uma ampla faixa de temperatura e pressão, e se encontra a seguir.

Equação 2

$$\sigma_m = \sum_i x_i \sigma_i - RT \sum_i \frac{x_i}{\sum_j x_j \Lambda_{ij}} \sum_j x_j \left( \frac{\partial \Lambda_{ij}}{\partial A} \right)_{T,P,x}$$

O 1º somatório é a contribuição dos componentes puros e o segundo a contribuição superficial em excesso decorrente da interação entre os compostos da mistura. Na equação  $\sigma_m$  é a tensão superficial da mistura (N/m<sup>2</sup>),  $x_i$  é a fração molar do componente i da mistura,  $\sigma_i$  é a tensão superficial do componente puro (N/m<sup>2</sup>), R é a constante dos gases, T a temperatura do sistema (K),  $\partial \Lambda_{ij} / \partial A$  é o parâmetro adimensional da equação de Wilson, relacionado a variação da interação energética dos componentes e a variação da área superficial da interface.

O parâmetro da equação de Wilson é estimado pela equação mostrada a seguir.

Equação 3

$$\left( \frac{\partial \Lambda_{ij}}{\partial A} \right)_{T,P,x} = - \frac{\Lambda_{ij}}{RT} \left( \frac{\partial (U_{ij} - U_{ii})}{\partial A} \right)_{T,P,x}$$

Essa equação é dependente dos parâmetros de interação energética entre dois componentes  $U_{ij}$ . Uma limitação do modelo é considerar que não existe diferença entre  $U_{ij}$  e  $U_{ji}$ . Sendo o parâmetro  $U$  de difícil obtenção, ele vem sendo pesquisado e existem diversos trabalhos que buscam tabelar os seus valores (Chunxi et al., 2000).

Para a interação entre os mais diversos ácidos graxos esterificados componentes das misturas de biodiesel não foram encontrados valores na literatura. Assim sendo, o cálculo estimado da tensão superficial foi efetuado usando apenas a contribuição dos componentes puros.

Os valores encontrados foram comparados com os experimentais e os erros foram levados em consideração. A equação utilizada para estimativa da tensão superficial encontra-se a seguir. Onde  $\sigma_m$  é a tensão superficial da mistura ( $N/m^2$ ),  $x_i$  é a fração molar do componente  $i$  da mistura,  $\sigma_i$  é a tensão superficial do componente puro ( $N/m^2$ ).

Equação 4

$$\sigma_m = \sum_i x_i \sigma_i$$

#### IV.5 – Modelos para o cálculo dos parâmetros de atomização

A operação do motor pode se dar a baixa carga, carga moderada e plena carga. Essas faixas são diferenciadas pela quantidade de combustível injetado e na quantidade fixa de ar admitido pelo sistema de turbo-compressão, bem como temperatura de operação (Faria et al., 2010 & Carvalho et al., 2016).

Os valores de temperatura e massa específica do ar no interior da câmara de combustão, usados neste trabalho, estão na Tabela 13. Os valores estão presentes no trabalho de Desantes (1988).

Tabela 13: Condições operacionais dos motores diesel de injeção direta

CONDIÇÃO OPERACIONAL DO MOTOR	TEMPERATURA DO AR ( $T_A$ ) [K]	MASSA ESPECÍFICA DO AR ( $\rho_A$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
Baixa carga	700	3,6
Carga moderada	1000	14,8
Plena carga	1300	59,0

Fonte: Desantes (1998)



Os demais parâmetros de operação dos motores foram descritos por Alloca (1992) e estão presentes na Tabela 14. A perda de carga através do furo do injetor foi considerada como sendo a diferença de pressão entre a pressão de injeção (900 bar) e a existente no interior da câmara de combustão no momento da injeção (30 bar), ou seja, 870 bar.

Tabela 14: Condições operacionais de injeção dos motores diesel

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Velocidade do jato de combustível ( $U_L$ )	200	m/s
Tempo decorrido a partir do início da injeção (t)	0,0002	s
Diâmetro do orifício do injetor ( $d_0$ )	0,000145	m
Perda de carga através do orifício do injetor ( $\Delta\rho_L$ )	870	bar

Fonte: Desantes (1998)

Os modelos que foram utilizados para cálculo dos parâmetros de atomização do motor de ciclo diesel estão descritos na Tabela 15. Também estão presentes as propriedades e parâmetros necessários para cada modelo e as faixas de aplicação de cada equação.

Tabela 15: Modelos para cálculo dos parâmetros de atomização do motor a diesel

PARÂMETRO	MODELO	EQUAÇÃO DO MODELO	PROPRIEDADES E PARÂMETROS	APLICAÇÃO
Diâmetro médio de Sauter	Equação 5: Correlação de Elkobt	$SMD = 6,156 v_L^{0,385} \cdot \sigma_L^{0,737} \cdot \rho_L^{0,737} \cdot \rho_a^{0,06} \cdot \Delta\rho_L^{-0,54}$	$v_L = \text{viscosidade cinemática do combustível } \left(\frac{m^2}{s}\right)$ $\sigma_L = \text{tensão superficial do combustível } \left(\frac{N}{m}\right)$ $\rho_L = \text{massa específica do combustível } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $\rho_a = \text{massa específica do ar da câmara de combustão } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $\Delta\rho_L = \text{perda de carga através do orifício do injetor (bar)}$	Baixa Carga Carga Moderada Plena Carga
	Equação 6: Equação de Sitikei	$S = 0,2d_0 \cdot \left(\frac{U_L t}{d_0}\right)^{0,48} \cdot \left(\frac{U_L d_0}{v_L}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_a}\right)^{0,35}$	$v_L = \text{viscosidade cinemática do combustível } \left(\frac{m^2}{s}\right)$ $\rho_L = \text{massa específica do combustível } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $\rho_a = \text{massa específica do ar da câmara de combustão } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $U_L = \text{velocidade do jato de combustível na câmara de combustão } \left(\frac{m}{s}\right)$	Baixa Carga Carga Moderada
Alcance do spray	Equação 7: Correlação de Dent	$S = 3,01 \cdot \left[\left(\frac{\Delta P_L}{\rho_a}\right)^{0,5} \cdot d_0 t\right]^{0,5} \cdot \left(\frac{295}{T_A}\right)^{0,25}$	$d_n = \text{diâmetro do orifício do injetor (m)}$ $t = \text{tempo decorrido do início da injeção de combustível (s)}$ $v_L = \text{viscosidade cinemática do combustível } \left(\frac{m^2}{s}\right)$ $\rho_L = \text{massa específica do combustível } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $\rho_a = \text{massa específica do ar da câmara de combustão } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $d_n = \text{diâmetro do orifício do injetor (m)}$ $t = \text{tempo decorrido do início da injeção de combustível (s)}$ $T_A = \text{temperatura do ar no interior da câmara de combustão (K)}$ $\Delta\rho_L = \text{perda de carga através do orifício do injetor (bar)}$	Plena Carga
Ângulo de cone	Equação 8: Equação de Abramovich	$\tan \theta = 0,13 \cdot \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_L}\right)$	$\rho_L = \text{massa específica do combustível } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $\rho_a = \text{massa específica do ar da câmara de combustão } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Baixa Carga Carga Moderada Plena Carga
Tempo de ruptura	Equação 9: Equação de Hiroyasu & Arai	$t_B = 28,65 \cdot \rho_L \cdot d_0 \cdot (\rho_a \cdot \Delta\rho_L)^{-0,5}$	$\rho_L = \text{massa específica do combustível } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ $\rho_a = \text{massa específica do ar da câmara de combustão } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Baixa Carga Carga Moderada Plena Carga

Fonte: Adaptado de Faria et al. (2010) & Carvalho et al. (2016)

## Capítulo V – Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas medições experimentais e nas simulações das propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados. São exibidos os resultados calculados dos parâmetros de atomização do motor do ciclo diesel, bem como interpretação dos resultados.

### V.1 – Propriedades físico-químicas experimentais dos combustíveis

#### V.1.1 – Massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C

Os valores massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C obtidos experimentalmente, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados de massa específica a 40°C e viscosidade cinemática a 40°C

BLENDAS	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	VISCOSIDADE DINÂMICA (mPa.s)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (mm <sup>2</sup> /s)
B0	0,8163	2,512	3,078
B5	0,8187	2,546	3,110
B10	0,8211	2,584	3,147
B15	0,8236	2,626	3,188
B20	0,8259	2,668	3,231
B25	0,8283	2,712	3,273
B30	0,8310	2,763	3,325
B40	0,8360	2,867	3,430
B50	0,8410	2,979	3,542
B100	0,8674	3,676	4,238

Comparando os resultados experimentais da viscosidade cinemática a 40°C obtidos neste trabalho com os resultados reportados por Leonardo (2019), os valores para o diesel S10 A foram 3mm<sup>2</sup>/s (em 2017) e 3,078 mm<sup>2</sup>/s (em 2021). Enquanto que, para o biodiesel de soja metílico, os valores foram 4,155 mm<sup>2</sup>/s (2017) e 4,2382 mm<sup>2</sup>/s (2021). É observado um erro percentual de 2,6% e 2,0%, respectivamente para cada combustível avaliado.

Com relação aos resultados de densidade obtidos em 2017, cujas análises foram realizadas a 20°C, os valores foram 0,8290 g/cm<sup>3</sup> (diesel S10 A) e 0,8822 g/cm<sup>3</sup> (biodiesel de soja metílico). Neste trabalho, cerca de 5 anos depois, os resultados obtidos de densidade realizadas à 40°C, foram de 0,8163 g/cm<sup>3</sup> para o diesel S10 A e 0,8674 g/cm<sup>3</sup> para o

biodiesel de soja metílico. O erro percentual observado foi de 1,5% e 1,7%, respectivamente. Esses valores estão na faixa de decréscimo de densidade, devido a variação de temperatura, relatados no trabalho de Barbosa et al. (2015).

Além disso, também foi utilizada tabela de conversão de densidade de combustível (Sindi Petróleo, 2015), utilizada em fiscalização de postos, para converter o valor da densidade a 40°C para densidade a 20°C, cujo valor encontrado foi de 0,8295 g/cm<sup>3</sup>, apresentando um erro percentual de 0,1%.

As comparações entre os resultados obtidos por Leonardo (2019) e os obtidos nesse estudo indicam que não ocorreram mudanças significativas nestas duas propriedades de interesse dos combustíveis avaliados, devido às condições adequadas de armazenamento durante este período (amostras mantidas em freezer).

Os resultados experimentais foram tratados utilizando o software Microsoft Excel para correlacionar a variação de massa específica com o aumento da % volumétrica de biodiesel como função de equações lineares da forma  $D = Ax + B$ , onde D é a massa específica (g/cm<sup>3</sup>), x é a fração de biodiesel (% v/v) e A e B são coeficientes obtidos. Os resultados experimentais possuem ajuste  $D = 5 \times 10^{-4}x + 0,8159$ . O coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9995$  indica alta correlação entre os dados obtidos experimentalmente.

Para a viscosidade cinemática, os resultados foram correlacionados utilizando uma equação do tipo  $y = Ax^2 + Bx + C$ , onde y é a viscosidade em mm<sup>2</sup>/s, x é a fração de biodiesel e A, B e C são coeficientes obtidos. Os resultados experimentais deste trabalho possuem ajuste  $\eta = 5 \times 10^{-5}x^2 + 6,9 \times 10^{-3}x + 3,0744$ . O coeficiente de correlação  $R^2 = 1$  indica alta correlação entre os dados obtidos experimentalmente.

Os resultados de massa específica e viscosidade cinemática obtidos experimentalmente permitiram ajustes coerentes com os descritos na literatura. No trabalho de Alptekin et al. (2008) o ajuste para o biodiesel de soja resultou na equação  $D = 4 \times 10^{-4}x + 0,8424$  para a massa específica e  $\eta = 3 \times 10^{-5}x^2 + 2 \times 10^{-3}x + 3,4305$ . A ordem de grandeza entre os coeficientes obtidos é semelhante, sendo as diferenças resultantes dos valores distintos de massa específica e viscosidade cinemática entre o *Shell extra diesel*, utilizado por Alptekin et al. (2008) e o diesel S10 Ipiranga utilizado neste trabalho.

É necessário pontuar a diferença de temperatura das análises de massa específica, 15°C no trabalho de Alptekin et al. (2008) e 40°C neste estudo. Conforme estudo de Barbosa et al. (2015) é esperado um decréscimo de 2% a 3% no valor da massa específica quando se compara os resultados de misturas a 40°C com os obtidos a 15°C.

### V.1.2 – Tensão superficial a 40°C

Os resultados experimentais de tensão superficial a 40°C obtidos encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados de tensão superficial a 40°C

AMOSTRA	TENSÃO SUPERFICIAL (mN/m)
B0	26,17
B5	26,13
B10	26,37
B15	26,50
B20	26,64
B25	26,98
B30	26,76
B40	27,14
B50	27,46
B100	29,68

Observando-se os resultados percebe-se que a tensão superficial do biodiesel metílico de soja é superior ao do diesel S10 A, conforme esperado. Percebe-se que com o aumento do teor de biodiesel na mistura a tensão superficial das amostras aumenta gradativamente.

As pesquisas sobre a correlação de experimentos para obtenção de ajustes para determinação de tensão superficial não recomendam ajustes de correlação linear, polinomial ou de outros tipos, como ocorre para massa específica e viscosidade.

Uma explicação para a dificuldade de obtenção de modelos para a tensão superficial é a dificuldade de se prever o comportamento das forças de coesão e interações intermoleculares, bem como grandes diferenças de comportamento da interface líquido-ar dependendo do ambiente onde o líquido está exposto.

Devido ao tempo de análise e disponibilidade do equipamento, foi necessário realizar as amostras B30, B40 e B50 em momento posterior as amostras B0, B5, B10, B15, B20, B25 e B100 o que ocasionou os valores um pouco menores de tensão superficial, que serão discutidos mais à frente.

## V.2 – Propriedades físico-químicas estimadas dos combustíveis

### V.2.1 – Estimativa de massa específica dos combustíveis

Os resultados estimados da massa específica, foram obtidos com as correlações lineares da forma  $D = Ax + B$ , onde  $D$  é a massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ),  $x$  é a fração de biodiesel (% v/v) e  $A$  e  $B$  são coeficientes obtidos empiricamente nos experimentos dos autores, conforme descrito na Tabela 11. Os resultados estimados estão compilados na Tabela 18.

Tabela 18: Estimativa de massa específica para diversos tipos de misturas

BLENDAS	MASSA ESPECÍFICA DAS MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL ( $\text{g/cm}^3$ )				
	PALMA (15°C)	GIRASSOL (15°C)	SOJA (15°C)	ALGODÃO (15°C)	SEBO BOVINO (40°C)
B0	0,8423	0,8425	0,8424	0,8427	0,8190
B1	0,8426	0,8429	0,8428	0,8431	0,8194
B2	0,8429	0,8433	0,8432	0,8435	0,8197
B5	0,8438	0,8445	0,8444	0,8447	0,8209
B10	0,8453	0,8465	0,8464	0,8467	0,8227
B15	0,8468	0,8485	0,8484	0,8487	0,8245
B20	0,8483	0,8505	0,8504	0,8507	0,8264
B25	0,8498	0,8525	0,8524	0,8527	0,8282
B30	0,8513	0,8545	0,8544	0,8547	0,8301
B35	0,8528	0,8565	0,8564	0,8567	0,8319
B40	0,8543	0,8585	0,8584	0,8587	0,8337
B45	0,8558	0,8605	0,8604	0,8607	0,8356
B50	0,8573	0,8625	0,8624	0,8627	0,8374
B55	0,8588	0,8645	0,8644	0,8647	0,8393
B60	0,8603	0,8665	0,8664	0,8667	0,8411
B65	0,8618	0,8685	0,8684	0,8687	0,8429
B70	0,8633	0,8705	0,8704	0,8707	0,8448
B75	0,8648	0,8725	0,8724	0,8727	0,8466
B80	0,8663	0,8745	0,8744	0,8747	0,8485
B85	0,8678	0,8765	0,8764	0,8767	0,8503
B90	0,8693	0,8785	0,8784	0,8787	0,8521
B95	0,8708	0,8805	0,8804	0,8807	0,8540
B100	0,8723	0,8825	0,8824	0,8827	0,8558

A massa específica do biodiesel geralmente varia entre 0,86 e 0,90 g/cm<sup>3</sup> enquanto a do diesel varia de 0,81 a 0,87 g/cm<sup>3</sup> (Alptekin et al., 2008). Verifica-se que a massa específica das misturas aumenta com o aumento do teor de biodiesel presente, conforme descrito na literatura.

Observando os valores de massa específica dos biodieseis puros (B100) percebe-se que o biodiesel composto majoritariamente por ácidos graxos esterificados saturados (sebo bovino) possui menor massa específica quando comparados aos majoritariamente saturados (soja, algodão e girassol). Isso ocorre devido a maior quantidade de interações entre os átomos de hidrogênio, presentes em maior número nas moléculas majoritariamente saturadas.

### V.2.2 – Estimativa de viscosidade cinemática dos combustíveis

Os resultados estimados da viscosidade, estão apresentados na Tabela 19. Foram obtidos utilizando as correlações polinomiais de 2º ordem da forma  $\eta = Ax^2 + Bx + C$ . Nessa equação,  $\eta$  é a viscosidade cinemática em mm<sup>2</sup>/s, x é a fração de biodiesel e A, B e C são coeficientes obtidos empiricamente na literatura, conforme descrito na Tabela 12.

Tabela 19: Estimativa de viscosidade cinemática para diversos tipos de misturas

BLENDAS	VISCOSIDADE CINEMÁTICA DAS MISTURAS DE BODIESEL/DIESEL (mm <sup>2</sup> /s)				
	PALMA (40°C)	GIRASSOL (40°C)	SOJA (40°C)	ALGODÃO (40°C)	SEBO BOVINO (40°C)
B0	3,426	3,435	3,431	3,434	3,013
B1	3,433	3,437	3,433	3,437	3,028
B2	3,440	3,439	3,435	3,439	3,043
B5	3,462	3,446	3,441	3,448	3,090
B10	3,499	3,460	3,454	3,463	3,169
B15	3,537	3,475	3,467	3,481	3,251
B20	3,576	3,493	3,483	3,500	3,335
B25	3,616	3,512	3,499	3,522	3,422
B30	3,657	3,534	3,518	3,545	3,511
B35	3,699	3,557	3,537	3,571	3,603
B40	3,742	3,583	3,559	3,598	3,697

Continuação: Tabela 19

BLENDAS	VISCOSIDADE CINEMÁTICA DAS MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL (mm <sup>2</sup> /s)				
	PALMA (40°C)	GIRASSOL (40°C)	SOJA (40°C)	ALGODÃO (40°C)	SEBO BOVINO (40°C)
B45	3,786	3,610	3,581	3,628	3,794
B50	3,831	3,640	3,606	3,659	3,893
B55	3,877	3,671	3,631	3,693	3,995
B60	3,924	3,705	3,659	3,728	4,099
B65	3,972	3,740	3,687	3,766	4,206
B70	4,021	3,778	3,718	3,805	4,315
B75	4,071	3,817	3,749	3,847	4,427
B80	4,122	3,859	3,783	3,890	4,541
B85	4,174	3,902	3,817	3,936	4,658
B90	4,227	3,948	3,854	3,983	4,777
B95	4,281	3,995	3,891	4,033	4,899
B100	4,336	4,045	3,931	4,084	5,023

Para biodiesel obtido de diferentes matérias-primas é esperado uma faixa de viscosidade entre 3,0 até 6,0 mm<sup>2</sup>/s (Resolução ANP N°45) enquanto para o diesel é esperado uma faixa de 2,5 a 4,5 mm<sup>2</sup>/s (Resolução ANP N°50). As estimativas obtidas estão contidas nessas faixas e, conforme esperado, a viscosidade cinemática das misturas aumenta com o aumento do percentual de adição de biodiesel nas misturas.

A Tabela 20, mostra os valores da viscosidade cinemática experimental obtido para o diesel, o biodiesel e as suas blendas neste trabalho e os valores simulados usando o ajuste proposto por Alptekin et al. (2008). É calculada a diferença percentual entre os valores, conforme Equação 10.

Equação 10

$$|\% \text{ DIFERENÇA}| = \left| \frac{\text{Valor Experimental} - \text{Valor Simulado}}{\text{Valor Experimental}} \right| \times 100$$



Tabela 20: Comparativo de valores obtidos para viscosidade cinemática das misturas

BLENDAS	EXPERIMENTAIS A 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	ESTIMADOS COM AJUSTE A 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	% DIFERENÇA
B0	3,078	3,431	11,47
B5	3,110	3,441	10,64
B10	3,147	3,454	9,76
B15	3,188	3,467	8,75
B20	3,231	3,483	7,80
B25	3,273	3,499	6,90
B30	3,325	3,518	5,80
B40	3,430	3,559	3,76
B50	3,542	3,606	1,81
B100	4,238	3,931	7,24

Na comparação entre os valores experimentais obtidos e os valores ajustados pelo modelo de Alptekin et al. (2008) são observadas variações de 1,81% até 11,47%, que são explicadas, principalmente, pela diferença de viscosidade cinemática entre o diesel puro e o biodiesel puro que foram utilizados nos trabalhos. Para que a diferença percentual fosse menor, seria necessário comparar combustíveis com propriedades mais semelhantes.

### V.2.2 – Estimativa de tensão superficial dos combustíveis

A estimativa da tensão superficial a 40°C foi feita usando apenas a contribuição dos componentes puros, conforme Equação 4. Como mencionado anteriormente a simplificação foi feita devido à ausência de dados de interação energética para os mais diversos ésteres que compõem os diferentes tipos de biodiesel.

Por se tratar de uma estimativa que ignora a contribuição superficial em excesso decorrente da interação entre os compostos da mistura é esperado erros relevantes entre os resultados experimentais medidos e simulados. Sendo assim, iniciou-se a análise pela comparação entre os resultados obtidos experimentalmente à 40°C e os simulados pela Equação simplificada. A comparação entre esses valores está apresentada na Tabela 21.

Tabela 21: Comparativo de valores obtidos para tensão superficial das misturas

BLENDAS	EXPERIMENTAIS A 40°C (mN/m)	ESTIMADOS COM EQUAÇÃO SIMPLIFICADA (mN/m)	% DIFERENÇA
B5	26,13	26,35	0,82
B10	26,37	26,52	0,57
B15	26,50	26,70	0,75
B20	26,64	26,87	0,85
B25	26,98	27,05	0,24
B30	26,76	27,22	1,72
B40	27,14	27,57	1,59
B50	27,46	27,93	1,68

Embora fosse esperada uma maior diferença entre os valores experimentais e os estimados, verificou-se uma elevada concordância entre os valores obtidos, sendo a maior diferença percentual, calculada conforme Equação 10, igual a 1,72%. Assim, a aproximação feita ao modelo proposto por Chunxi et al. (2000) se mostrou adequada e foi utilizada na simulação de dados de tensão superficial dos demais tipos de biodiesel.

Conforme discutido, devido ao tempo de análise e disponibilidade do equipamento, foi necessário realizar algumas amostras em momentos distintos. As amostras B5, B10, B15, B20 e B25 possuem valores mais próximos ao calculado com a simplificação do modelo proposto por Chunxi et al. (2000) enquanto as amostras B30, B40 e B50, analisadas em momento posterior, possui valores mais discrepantes. Isso evidencia que o tempo extra de armazenamento deve ter modificado as propriedades da mistura.

Para as simulações foram usados os valores de tensão superficial a 40°C reportado pela Shell para o *Shell extra diesel*, utilizado por Alptekin et al. (2008), o valor reportado por Cavalcanti (2016) para o diesel metropolitano e valores obtidos do trabalho de Allen et al. (1999) para os diferentes tipos de biodiesel.

Para todas as misturas estudadas, a elevação do teor de biodiesel ocasionou um aumento dos valores da tensão superficial da mistura. O aumento é mais acentuado para o biodiesel com maior valor de tensão superficial, caso do grupo dos saturados, composto pelo biodiesel de sebo bovino. Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22: Estimativa de tensão superficial para diversos tipos de misturas

BLENDAS	TENSÃO SUPERFICIAL DAS MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL (mN/m)				
	PALMA (40°C)	GIRASSOL (40°C)	SOJA (40°C)	ALGODÃO (40°C)	SEBO BOVINO (40°C)
B0	25,84	25,84	25,84	25,84	26,66
B1	25,87	25,87	25,87	25,85	26,69
B2	25,89	25,90	25,90	25,86	26,72
B5	25,97	26,00	25,99	25,89	26,81
B10	26,09	26,15	26,15	25,94	26,96
B15	26,22	26,31	26,30	25,99	27,11
B20	26,34	26,46	26,46	26,04	27,26
B25	26,47	26,62	26,61	26,09	27,41
B30	26,59	26,78	26,77	26,13	27,56
B35	26,72	26,93	26,92	26,18	27,71
B40	26,84	27,09	27,08	26,23	27,86
B45	26,97	27,24	27,23	26,28	28,01
B50	27,09	27,40	27,39	26,33	28,17
B55	27,22	27,56	27,54	26,38	28,32
B60	27,34	27,71	27,69	26,43	28,47
B65	27,47	27,87	27,85	26,48	28,62
B70	27,59	28,02	28,00	26,53	28,77
B75	27,72	28,18	28,16	26,58	28,92
B80	27,84	28,34	28,31	26,62	29,07
B85	27,97	28,49	28,47	26,67	29,22
B90	28,09	28,65	28,62	26,72	29,37
B95	28,22	28,80	28,78	26,77	29,52
B100	28,34	28,96	28,93	26,82	29,67

### V.3 – Parâmetros de atomização estimados para os combustíveis

#### V.3.1 – Diâmetro médio de Sauter (DMS)

O cálculo do diâmetro médio de Sauter (DMS) das amostras cujas propriedades físico-químicas foram obtidas experimentalmente ou simuladas foi realizado utilizando-se a correlação de Elkobt, conforme Equação 5, apresentada na Tabela 15 e presente a seguir, e se aplica as condições de baixa, moderada e plena carga de operação do motor.

Equação 5

$$SMD = 6,156v_L^{0,385} \cdot \sigma_L^{0,737} \cdot \rho_L^{0,737} \cdot \rho_a^{0,06} \cdot \Delta\rho_L^{-0,54}$$

Para o cálculo do DMS, além de viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s), tensão superficial (N/m) e massa específica (kg/m<sup>3</sup>) dos combustíveis, que foram obtidos anteriormente e convertidos para unidades adequadas, foram usados os valores de massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>) e perda de carga através do orifício do injetor (bar). Esses últimos estão indicados nas Tabelas 13 e 14. Os resultados obtidos para as misturas de diesel S10 A e biodiesel metílico de soja realizadas experimentalmente encontram-se na Tabela 23.

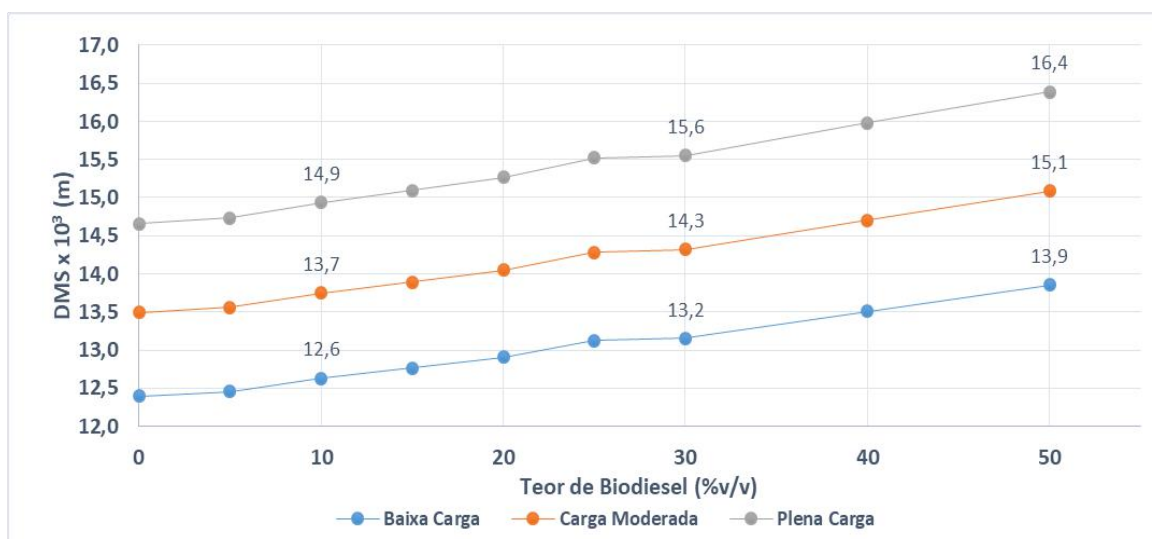
Tabela 23: Diâmetro médio de Sauter (DMS) calculado para as amostras experimentais

MISTURAS DE DIESEL (%v/v)	BAIXA CARGA	CARGA MODERADA	PLENA CARGA
	DMS x 10 <sup>3</sup> (m)	DMS x 10 <sup>3</sup> (m)	DMS x 10 <sup>3</sup> (m)
B0	12,4	13,5	14,7
B5	12,5	13,6	14,7
B10	12,6	13,7	14,9
B15	12,8	13,9	15,1
B20	12,9	14,1	15,3
B25	13,1	14,3	15,5
B30	13,2	14,3	15,6
B40	13,5	14,7	16,0
B50	13,9	15,1	16,4
B100	16,1	17,5	19,0

Analisando-se a Equação 5 percebe-se que os fatores de grande impacto no cálculo de diâmetro médio de Sauter (DMS) são a viscosidade, massa específica e a tensão superficial das amostras. Conforme o teor de biodiesel nas amostras aumenta, cresce o valor dessas propriedades e, por consequência, o diâmetro médio de Sauter.

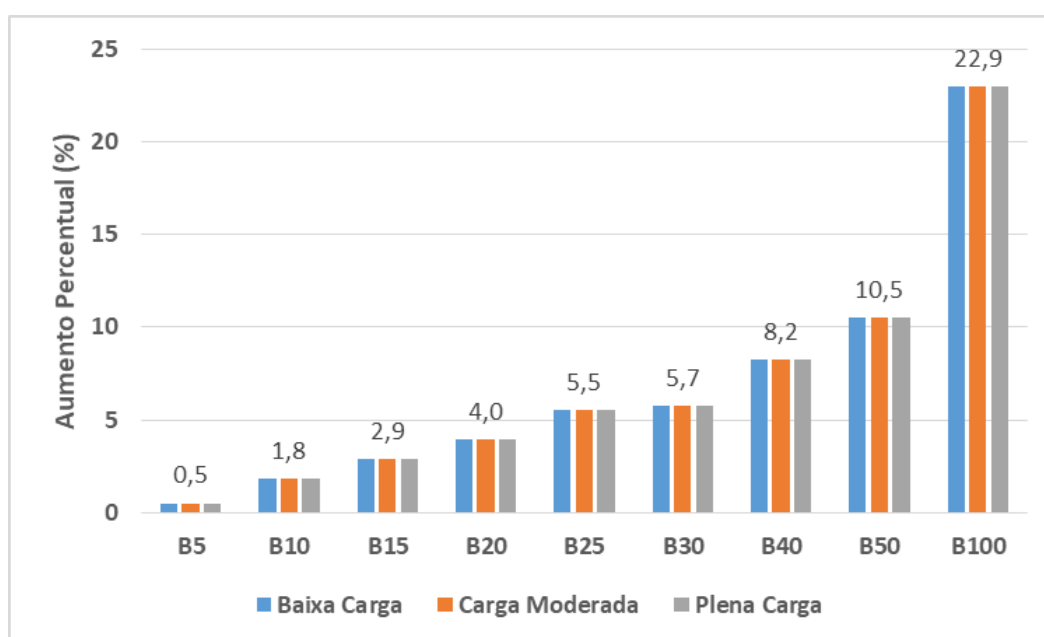
Esse comportamento é mais facilmente percebido analisando-se a Figura 15. Foi excluído o ponto referente à amostra B100 para facilitar a visualização da variação do diâmetro médio de Sauter.

Figura 15: Comportamento do DMS das amostras com o aumento do teor de biodiesel



A Figura 16 mostra o aumento percentual do diâmetro Médio de Sauter (DMS), comparando-se o biodiesel e as blendas com o do diesel. As únicas variáveis da Equação 5 são as propriedades do combustível, sendo os demais parâmetros fixos nas diferentes condições de operação do motor. Logo, embora as condições de operação do motor, pressão e temperatura, sejam diferentes, o valor de aumento percentual do DMS é idêntico para as três faixas de operação.

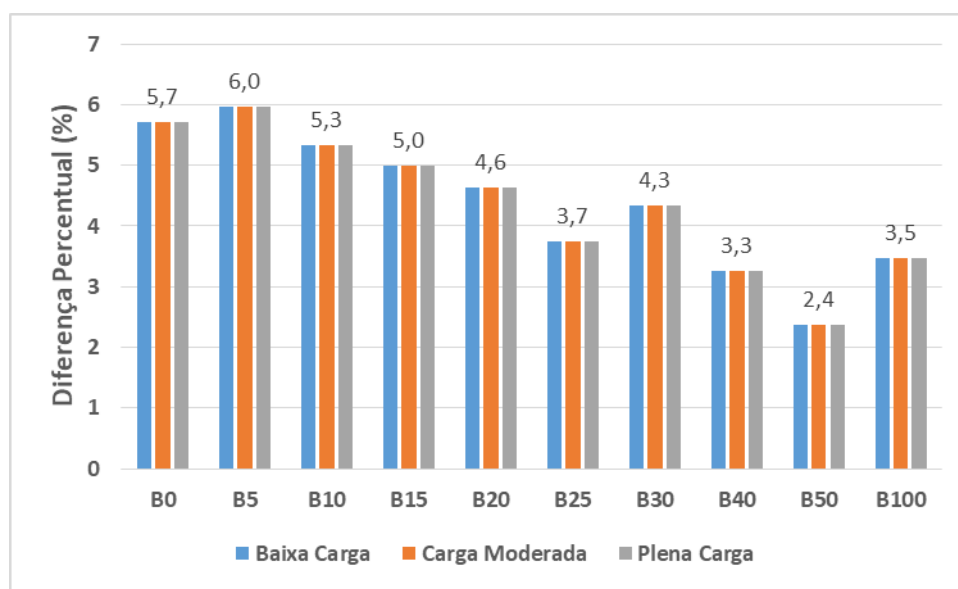
Figura 16: Aumento percentual do DMS das amostras com o aumento do teor de biodiesel



Uma análise semelhante pode ser feita para todos os tipos de biodiesel cujas propriedades foram simuladas usando-se os modelos matemáticos.

A Figura 17 apresenta a diferença percentual entre o valor do diâmetro médio de Sauter obtido para as amostras experimentais e os resultados obtidos através da simulação com ajuste matemático proposto por Alptekin et al. (2008). O comparativo foi realizado utilizando a Equação 10.

Figura 17: Diferença percentual para o DMS entre amostras experimentais e simuladas



Os resultados obtidos experimentalmente e simulados são muito semelhantes, com as diferenças percentuais variando na faixa de 2,4% a 6,0%. Novamente, como as únicas variáveis da Equação 5 são as propriedades do combustível, o valor de aumento percentual do DMS é idêntico para as três faixas de operação, embora as condições de operação do motor, pressão e temperatura, sejam diferentes.

A Tabela 24 apresenta um comparativo entre os diâmetros médio de Sauter (DMS) calculados para o diesel puro (B0), biodiesel puro (B100) e para as misturas B1, B2, B5, B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, B50, B55, B60, B65, B70, B75, B80, B85, B90 e B95.

Tabela 24: DMS para as amostras simuladas por ajustes matemáticos

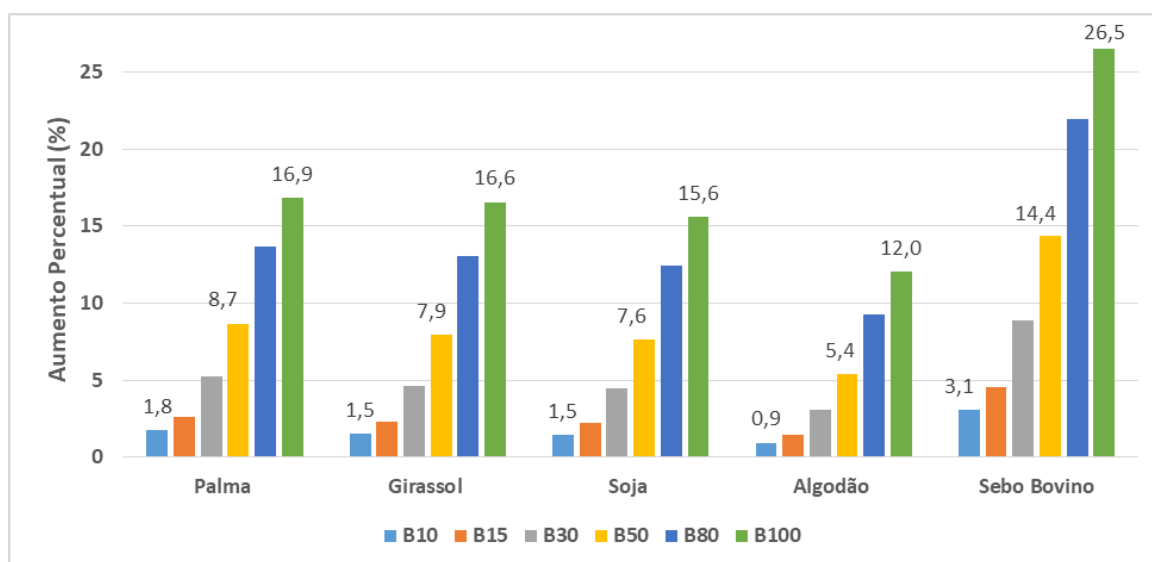
DIÂMETRO MÉDIO DE SAUTER (DMS) DAS MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL x 10 <sup>3</sup> (m)															
%V/V	PALMA METÁLICO			GIRASSOL METÁLICO			SOJA METÁLICO			ALGODÃO METÁLICO			SEBO BOVINO		
	BC	CM	PC	BC	CM	PC	BC	CM	PC	BC	CM	PC	BC	CM	PC
B0	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	12,5	13,6	14,8
B1	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	12,5	13,6	14,8
B2	13,1	14,3	15,5	13,2	14,3	15,6	13,1	14,3	15,5	13,1	14,3	15,5	12,6	13,7	14,9
B5	13,2	14,4	15,6	13,2	14,4	15,6	13,2	14,4	15,6	13,2	14,3	15,6	12,7	13,8	15,0
B10	13,3	14,5	15,8	13,3	14,5	15,7	13,3	14,5	15,7	13,2	14,4	15,7	12,9	14,0	15,2
B15	13,5	14,6	15,9	13,4	14,6	15,9	13,4	14,6	15,9	13,3	14,5	15,7	13,1	14,2	15,5
B20	13,6	14,8	16,1	13,5	14,7	16,0	13,5	14,7	16,0	13,4	14,6	15,8	13,3	14,5	15,7
B25	13,7	14,9	16,2	13,6	14,8	16,1	13,6	14,8	16,1	13,4	14,6	15,9	13,5	14,7	16,0
B30	13,8	15,0	16,3	13,8	15,0	16,3	13,7	14,9	16,2	13,5	14,7	16,0	13,7	14,9	16,2
B35	14,0	15,2	16,5	13,9	15,1	16,4	13,8	15,1	16,4	13,6	14,8	16,1	13,9	15,2	16,5
B40	14,1	15,3	16,7	14,0	15,2	16,5	13,9	15,2	16,5	13,7	14,9	16,2	14,1	15,4	16,7
B45	14,2	15,5	16,8	14,1	15,4	16,7	14,1	15,3	16,6	13,8	15,0	16,3	14,4	15,6	17,0
B50	14,3	15,6	17,0	14,2	15,5	16,8	14,2	15,4	16,8	13,9	15,1	16,4	14,6	15,9	17,3
B55	14,5	15,8	17,1	14,4	15,6	17,0	14,3	15,6	16,9	14,0	15,2	16,5	14,8	16,1	17,5
B60	14,6	15,9	17,3	14,5	15,8	17,2	14,4	15,7	17,1	14,0	15,3	16,6	15,1	16,4	17,8
B65	14,7	16,1	17,4	14,6	15,9	17,3	14,6	15,8	17,2	14,1	15,4	16,7	15,3	16,6	18,1
B70	14,9	16,2	17,6	14,8	16,1	17,5	14,7	16,0	17,4	14,2	15,5	16,8	15,5	16,9	18,4
B75	15,0	16,4	17,8	14,9	16,3	17,7	14,8	16,1	17,5	14,3	15,6	17,0	15,8	17,2	18,6
B80	15,2	16,5	17,9	15,1	16,4	17,8	15,0	16,3	17,7	14,5	15,7	17,1	16,0	17,4	18,9
B85	15,3	16,7	18,1	15,2	16,6	18,0	15,1	16,4	17,9	14,6	15,9	17,2	16,3	17,7	19,2
B90	15,5	16,8	18,3	15,4	16,8	18,2	15,2	16,6	18,0	14,7	16,0	17,4	16,5	18,0	19,5
B95	15,6	17,0	18,5	15,6	16,9	18,4	15,4	16,7	18,2	14,8	16,1	17,5	16,7	18,2	19,8
B100	15,8	17,1	18,6	15,7	17,1	18,6	15,5	16,9	18,4	14,9	16,2	17,6	17,0	18,5	20,1

BC = BAIXA CARGA, CM = CARGA MODERADA E PC = PLENA CARGA

Em seguida, é apresentada a Figura 18 comparando o aumento percentual do diâmetro médio de Sauter (DMS) das misturas B10, B15, B30, B50, B80 e B100, em relação ao diesel. Estão em evidência os valores do aumento percentual do DMS das misturas B10, atual teor de biodiesel adicionado ao diesel no Brasil, B50 e B100 (biodiesel puro). Os demais resultados estão presentes no ANEXO 1.

Como o parâmetro de atomização para carga baixa, moderada e plena dos motores é calculado usando-se as mesmas propriedades físico-químicas estimadas, os aumentos percentuais são iguais para as três faixas de operação, embora as condições de temperatura e pressão mudem.

Figura 18: Aumento percentual do DMS das misturas em relação ao diesel puro



O biodiesel composto majoritariamente por ésteres de ácidos graxos saturados (sebo bovino) apresentou maior aumento percentual no DMS com a elevação do seu teor nas misturas. Em segundo lugar, está o biodiesel de palma que possui teores equivalentes de saturados e insaturados e, por último, o grupo dos insaturados (girassol, soja e algodão), que tiveram o menor aumento percentual.

Isso evidencia que, de forma geral, o teor elevado de ácidos graxos saturados nas matérias-primas usadas para a produção do biodiesel acarreta o aumento do diâmetro das partículas durante a injeção do combustível. Como consequência, há uma diminuição na qualidade da atomização do combustível.

O aumento da distribuição média das partículas diminui a transferência de massa no processo de combustão resultando em aumento no consumo de combustível e na emissão de poluentes (Carvalho et al., 2016).



### V.3.2 – Alcance do spray de combustível

O cálculo do alcance do spray de combustível para as misturas foi realizado utilizando-se a Equação 6, de Sitikei, para as condições de baixa carga e carga moderada. Para a condição de plena carga de operação do motor foi utilizada a Equação 7, correlação de Dent.

Equação 6

$$S = 0,2d_0 \cdot \left(\frac{U_L t}{d_0}\right)^{0,48} \cdot \left(\frac{U_L d_0}{v_L}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_a}\right)^{0,35}$$

Equação 7

$$S = 3,01 \cdot \left[\left(\frac{\Delta P_L}{\rho_a}\right)^{0,5} \cdot d_0 t\right]^{0,5} \cdot \left(\frac{295}{T_A}\right)^{0,25}$$

Para o cálculo foram utilizados os valores da viscosidade cinemática ( $m^2/s$ ) e massa específica ( $kg/m^3$ ), dos combustíveis, que foram obtidos anteriormente e convertidos para unidades adequadas. Além disso, foram utilizados valores de massa específica do ar ( $kg/m^3$ ) e demais condições de operações da câmara de combustão, conforme descrito na Tabela 13 e na Tabela 14. Os resultados obtidos para as misturas de diesel S10 A e o biodiesel de soja realizadas experimentalmente encontram-se na Tabela 25.

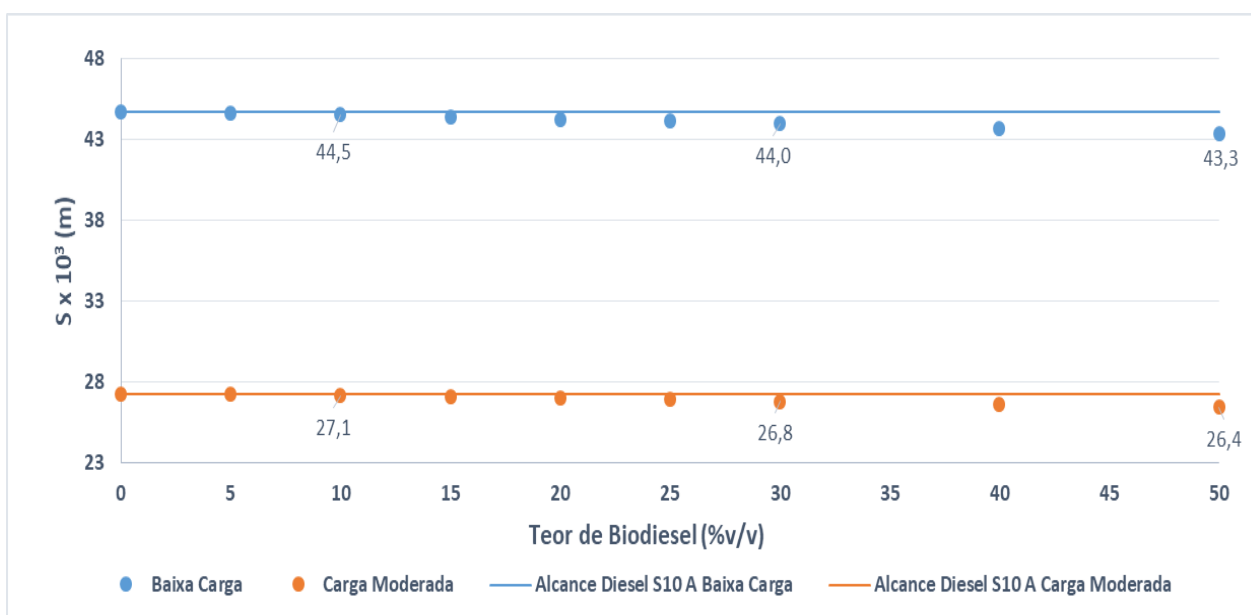
Tabela 25: Alcance do spray de combustível (S) calculado para as amostras analisadas

MISTURAS DE DIESEL (%v/v)	BAIXA CARGA	CARGA MODERADA
	S x 10 <sup>3</sup> (m)	S x 10 <sup>3</sup> (m)
B0	44,7	27,3
B5	44,6	27,2
B10	44,5	27,1
B15	44,4	27,1
B20	44,3	27,0
B25	44,1	26,9
B30	44,0	26,8
B40	43,7	26,6
B50	43,3	26,4
B100	41,5	25,3

A correlação de Dent, para plena carga do motor, é função das condições operacionais do sistema e não das propriedades físico-químicas do combustível. Logo para todas as amostras calculadas obtém-se um valor fixo de  $6,93 \times 10^{-4}$  metros.

Já o alcance estimado para o regime de baixa carga e de carga moderada, pela equação de Sitikei, é função das propriedades do diesel/biodiesel presente na mistura. Na Figura 19, podemos perceber uma diminuição do alcance do combustível conforme o teor de biodiesel nas misturas aumenta. As linhas sólidas indicam o alcance do diesel S10 A.

Figura 19: Comportamento do alcance do spray com o aumento do teor de biodiesel

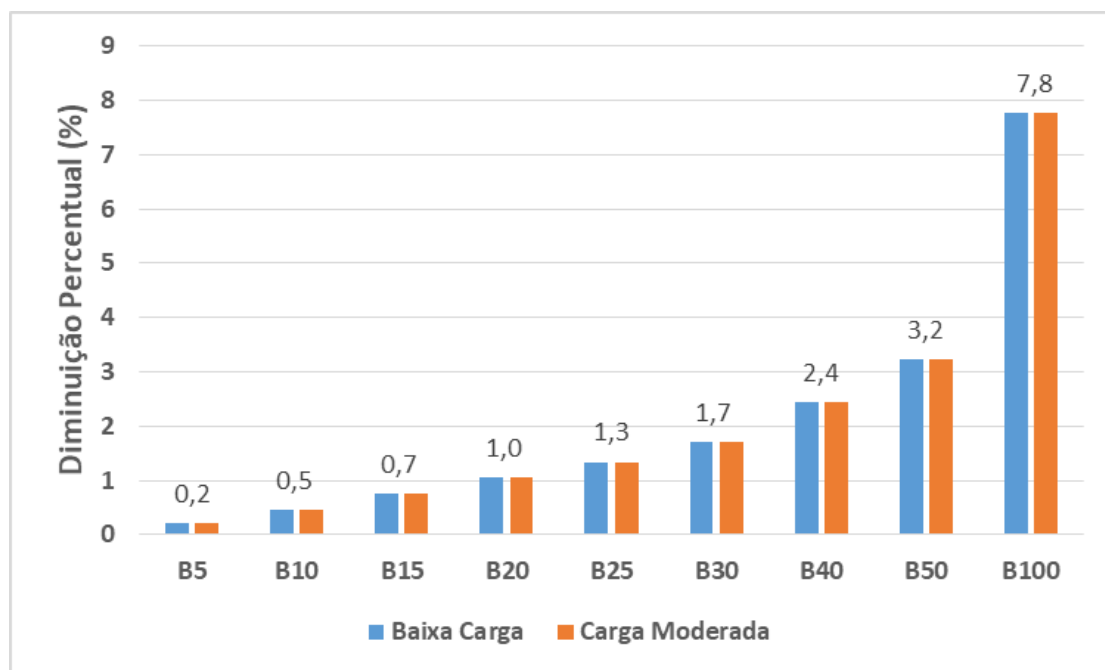


Quando o sistema passa de baixa para a plena carga, a massa de ar dentro da câmara de combustão aumenta, acarretando em uma maior resistência ao escoamento do fluxo de combustível. Este fato resulta em uma diminuição do alcance à medida que a potência do motor cresce e, por isso, o alcance do spray no motor a carga moderada e plena é menor que a baixa carga.

A diminuição percentual do alcance do spray de combustível atinge valor de 0,46% o B10, 1,68% para a amostra B30 e 7,20% para o biodiesel puro. Isso pode ocasionar um motor operando fora dos limites de projeto resultando em uma mistura ar-combustível insatisfatória na câmara de combustão (Faria et al., 2010).

A Figura 20 mostra a diminuição percentual do alcance do spray de combustível. As únicas variáveis da Equação 6 são as propriedades do combustível. Logo, embora as condições de operação do motor mudem em termos de pressão e temperatura, temos novamente apenas um valor de valor de aumento percentual fixo para as duas faixas.

Figura 20: Redução percentual do alcance das amostras com o aumento do teor de biodiesel



Segundo o trabalho de Faria et al. (2010), para efeitos da qualidade da atomização, quanto menor o alcance do combustível menor é a possibilidade de o combustível atingir preencher de forma homogênea a câmara de combustão, ocasionando, assim, uma combustão incompleta com conseqüentemente redução do desempenho do motor e aumento de emissão de gases poluentes.

Há estudos que sugerem que a redução do alcance pode evitar que o combustível atinja as paredes mais frias do motor. Porém, partindo do pressuposto que o funcionamento ideal do motor ocorre com o diesel puro, esse seria o alcance máximo e a possibilidade de o spray atingir as paredes seria pequena.

Embora existam divergências na literatura quando a ao efeito no desempenho do motor de ciclo diesel com a redução do alcance do spray. É importante ressaltar que no projeto do motor é calculado um alcance ideal e que qualquer modificação pode resultar perda de eficiência (Carvalho et al., 2016).

Uma análise semelhante à realizada para as amostras experimentais pode ser feita para todos os tipos de biodiesel cujo propriedades foram simuladas usando-se os modelos matemáticos. O alcance do spray (S) foi calculado para o diesel puro (B0), biodiesel puro (B100) e para as misturas B1, B2, B5, B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, B50, B55, B60, B65, B70, B75, B80, B85, B90 e B95. Os resultados estão presentes na Tabela 26.

Tabela 26: Alcance do spray (S) para as amostras simuladas por modelos matemáticos

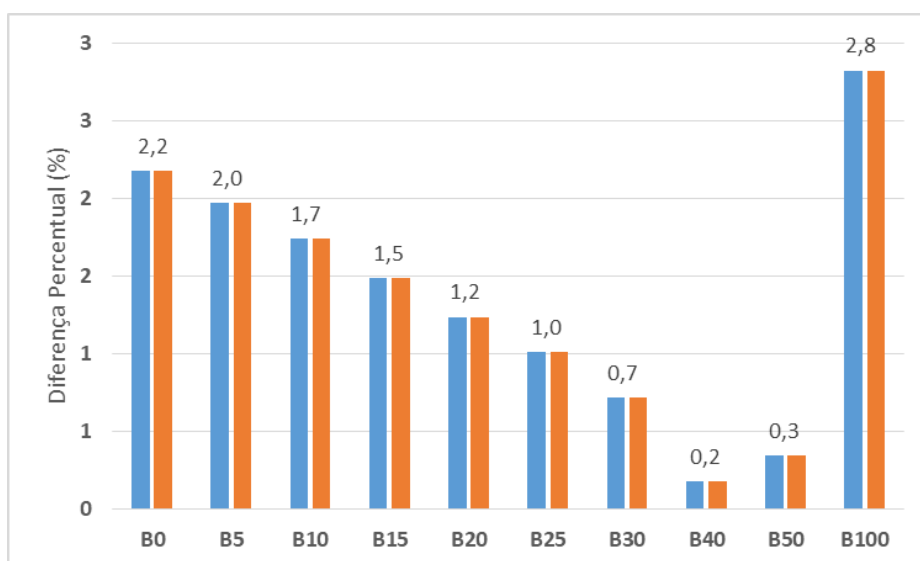
ALCANCE DO SPRAY DE COMBUSTIVEL DAS MISTURAS DE BODIESEL/DIESEL x 10 <sup>3</sup> (m)										
%V/V	PALMA		GIRASSOL		SOJA		ALGODÃO		SEBO BOVINO	
	BC	CM	BC	CM	BC	CM	BC	CM	BC	CM
B0	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	45,1	27,5
B1	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	45,0	27,4
B2	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	45,0	27,4
B5	43,7	26,6	43,8	26,7	43,8	26,7	43,8	26,7	44,8	27,3
B10	43,6	26,6	43,7	26,7	43,8	26,7	43,7	26,7	44,5	27,1
B15	43,5	26,5	43,7	26,7	43,7	26,7	43,7	26,6	44,2	26,9
B20	43,3	26,4	43,7	26,6	43,7	26,7	43,7	26,6	43,9	26,7
B25	43,2	26,4	43,7	26,6	43,7	26,6	43,6	26,6	43,6	26,6
B30	43,1	26,3	43,6	26,6	43,7	26,6	43,6	26,6	43,3	26,4
B35	43,0	26,2	43,6	26,6	43,6	26,6	43,5	26,5	43,0	26,2
B40	42,9	26,1	43,5	26,5	43,6	26,6	43,4	26,5	42,7	26,0
B45	42,7	26,1	43,4	26,5	43,5	26,5	43,4	26,4	42,4	25,8
B50	42,6	26,0	43,4	26,4	43,5	26,5	43,3	26,4	42,1	25,6
B55	42,5	25,9	43,3	26,4	43,4	26,5	43,2	26,3	41,8	25,5
B60	42,4	25,8	43,2	26,3	43,4	26,4	43,1	26,3	41,5	25,3
B65	42,2	25,7	43,1	26,3	43,3	26,4	43,0	26,2	41,2	25,1
B70	42,1	25,7	43,0	26,2	43,2	26,4	42,9	26,2	40,9	24,9
B75	42,0	25,6	42,9	26,2	43,2	26,3	42,8	26,1	40,6	24,8
B80	41,8	25,5	42,8	26,1	43,1	26,3	42,7	26,0	40,3	24,6
B85	41,7	25,4	42,7	26,0	43,0	26,2	42,6	26,0	40,1	24,4
B90	41,6	25,3	42,6	26,0	42,9	26,2	42,5	25,9	39,8	24,3
B95	41,4	25,3	42,5	25,9	42,8	26,1	42,4	25,8	39,5	24,1
B100	41,3	25,2	42,4	25,8	42,7	26,0	42,2	25,7	39,3	23,9

BC = BAIXA CARGA E CM = CARGA MODERADA

Sendo correlação de Dent, para plena carga do motor, função das condições operacionais do sistema, como massa específica e temperatura do ar. Para todas as amostras calculadas obtém-se um valor fixo de  $6,93 \times 10^{-4}$  metros para o alcance do spray de combustível.

A Figura 21 apresenta a diferença percentual entre o valor do alcance do spray de combustível obtido para as amostras experimentais e os resultados obtidos através da simulação com ajuste matemático proposto por Alptekin et al. (2008). O comparativo foi realizado utilizando a Equação 10.

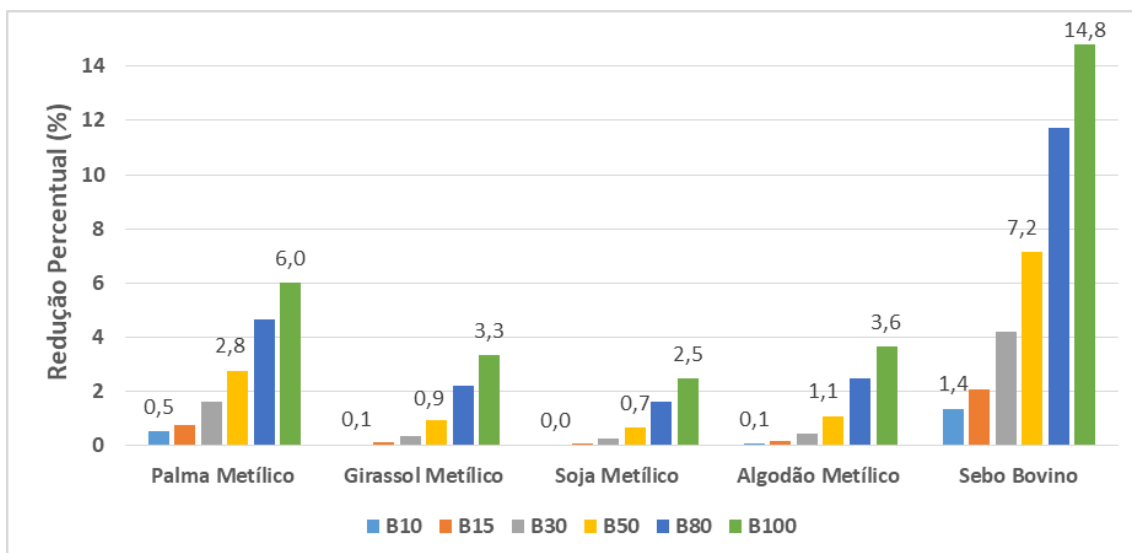
Figura 21: Diferença percentual para o alcance entre amostras experimentais e simuladas



Os resultados obtidos experimentalmente e simulados são muito semelhantes, com as diferenças percentuais variando na faixa de 0,2% a 2,8%. Novamente, como as únicas variáveis da Equação 6 são as propriedades do combustível, o valor de aumento percentual do alcance é idêntico para as três faixas de operação, embora as condições de operação do motor, pressão e temperatura, sejam diferentes.

Na Figura 22 está a redução percentual do alcance do spray de combustível das misturas B10, B15, B30, B50, B80 e B100, em relação ao diesel. Estão em evidência os valores da redução percentual do alcance misturas B10, atual teor de biodiesel adicionado ao diesel no Brasil, B50 e B100 (biodiesel puro). Os demais resultados estão presentes no ANEXO 2.

Figura 22: Redução percentual do alcance das misturas em relação ao diesel puro



Percebe-se novamente que, nas amostras estudadas, o grupo composto majoritariamente por ésteres de ácidos graxos saturados (sebo bovino) apresenta maior redução percentual nas misturas estudadas. Em seguida, está o biodiesel de palma que possui teores equivalentes de saturados e insaturados e, por fim, pelo grupo dos insaturados (girassol, soja e algodão), que tiveram a menor redução percentual.

No regime de plena carga do motor, em função da quantidade de ar e pressão na câmara de combustão, o alcance do spray é muito reduzido. Dessa forma, o valor do alcance do spray de combustível é relevante apenas a baixa carga e moderada carga.

### V.3.3 – Ângulo de cone

O cálculo do ângulo de cone do combustível para as misturas preparadas experimentalmente e simuladas foi realizado utilizando-se a Equação 8, equação de Abramovich, para as condições de baixa carga, carga moderada e plena carga.

Equação 8

$$\tan \theta = 0,13. \left( 1 + \frac{\rho_a}{\rho_L} \right)$$

A equação é função da massa específica do combustível utilizado ( $\text{kg/m}^3$ ) e da massa específica do ar na câmara de combustão ( $\text{kg/m}^3$ ). A massa específica na câmara de combustão depende do projeto do motor e do regime de operação: baixa carga, carga moderada e plena carga. Nesse trabalho foram utilizados os valores sugeridos por Desantes (1988), presentes na Tabela 13.

Não foi observada alteração do ângulo do cone em função do combustível utilizado para nenhuma mistura, sejam as mesmas preparadas no laboratório ou simuladas por ajustes matemáticos.

Observando-se a equação nota-se que apenas grandes alterações de massa específica causariam impacto no resultado final. Como a massa específica do ar de projeto aumenta quando o regime passa de baixa carga até plena carga o ângulo do cone varia. O ângulo de cone calculado para as condições operacionais de baixa carga foi de  $7,4^\circ$ , para carga moderada foi de  $7,5^\circ$  e plena carga do motor foi de  $7,9^\circ$ .

### V.3.4 – Tempo de ruptura

O tempo de ruptura foi estimado com base no comprimento de ruptura do spray de combustível. Para seu cálculo foi utilizada a Equação 9, equação de Hiroyasu & Arai.

Equação 9

$$t_B = 28,65 \cdot \rho_L \cdot d_0 \cdot (\rho_a \cdot \Delta\rho_L)^{-0,5}$$

A equação necessita da massa específica do combustível ( $\text{kg/m}^3$ ), da massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ), diâmetro do injetor  $d_0$  (m) e perda de carga através do bico do injetor (bar), os últimos descrito na Tabela 13 e na Tabela 14.

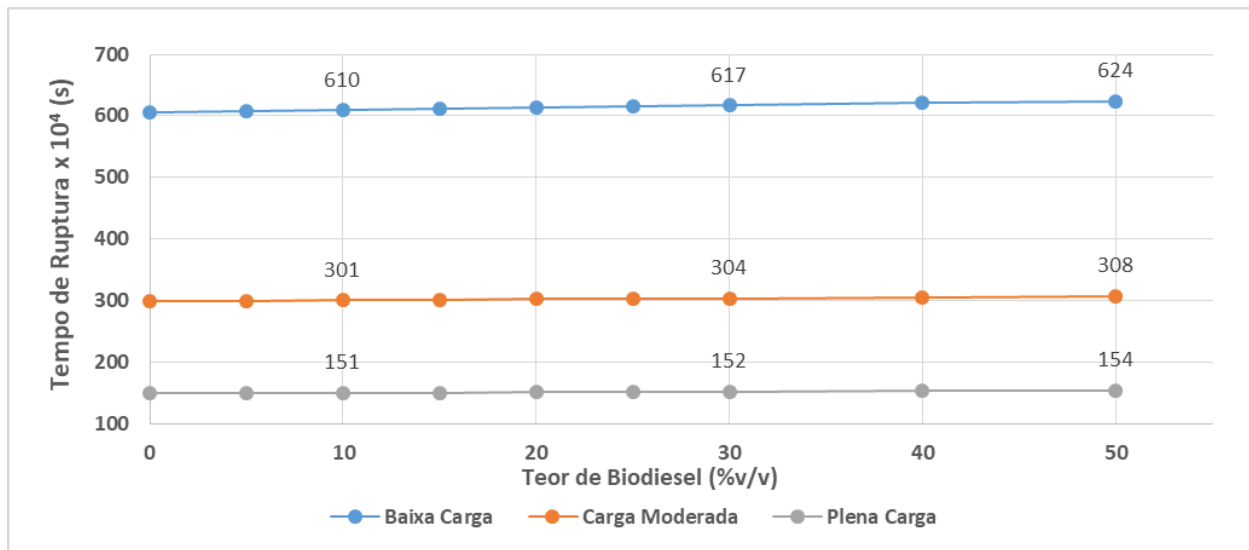
Os resultados obtidos para as misturas de diesel S10 A e biodiesel metílico de soja cujas propriedades foram determinadas experimentalmente, encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27: Tempo de ruptura (tB) calculado para as amostras experimentais

MISTURAS DE DIESEL (% v/v)	BAIXA CARGA	CARGA MODERADA	PLENA CARGA
	tB x 10 <sup>4</sup> (s)	tB x 10 <sup>4</sup> (s)	tB x 10 <sup>4</sup> (s)
B0	606	299	150
B5	608	300	150
B10	610	301	151
B15	611	302	151
B20	613	302	151
B25	615	303	152
B30	617	304	152
B40	621	306	153
B50	624	308	154
B100	644	318	159

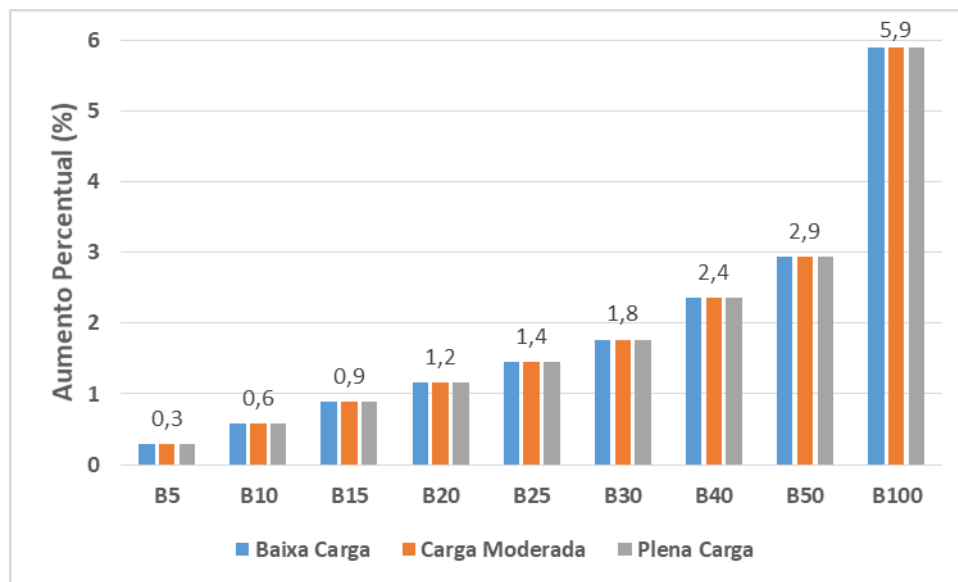
Os valores estimados para o tempo de ruptura mostram um aumento à medida que o teor de biodiesel na mistura cresce. Entretanto, a variação observada é pequena para as misturas, sendo mais acentuada para o comparativo entre as faixas de operação do motor, comportamento melhor observado no Figura 23, onde foi excluído o ponto B100 para facilitar a análise.

Figura 23: Comportamento do tempo de ruptura com o aumento do teor de biodiesel



A Figura 24 mostra o aumento percentual do tempo de ruptura (tB), comparando-se o valor das blendas com o valor B0. Embora as condições de operação do motor mudem em termos de pressão e temperatura, temos apenas um valor de valor de aumento percentual fixo para as três faixas.

Figura 24: Aumento percentual do tempo de ruptura das misturas em relação ao diesel puro



Assim como na análise do alcance do spray de combustível, quando o sistema passa de baixa carga para carga moderada e plena carga, a massa de ar dentro da câmara de combustão aumenta, acarretando em uma maior resistência ao escoamento do fluxo de combustível e, conseqüentemente, uma redução no tempo de ruptura entre as faixas de operação.

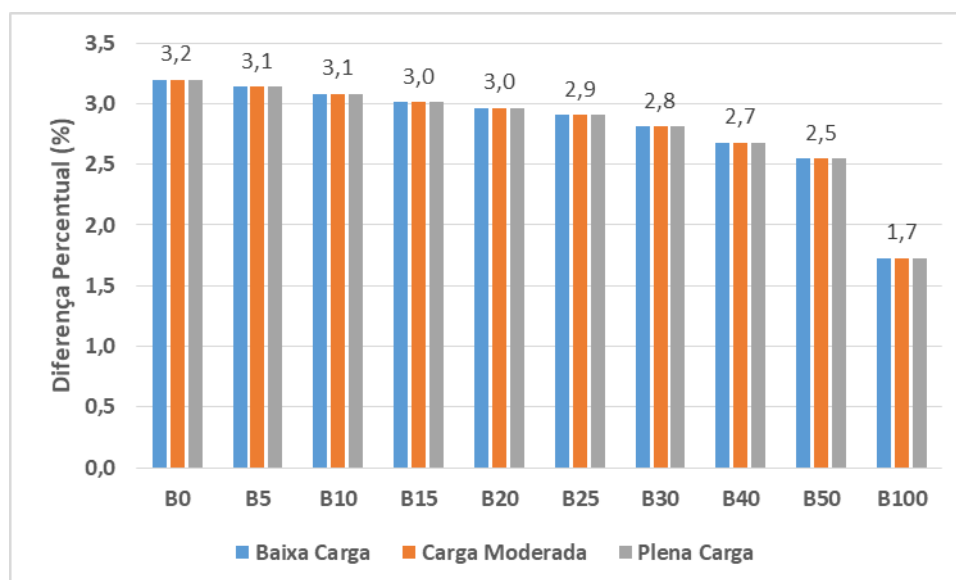


O aumento do tempo de ruptura, reduz a extensão da desintegração secundária o que pode gerar gotas com diâmetros maiores, ou seja, um aumento no diâmetro das partículas. Como já foi mencionado, esse aumento ocasiona menor eficiência de atomização e consequente aumento no consumo de combustível e emissão de poluentes.

Novamente, uma análise semelhante foi feita para todos os tipos de biodiesel cujo propriedades foram simuladas usando-se os modelos matemáticos.

A Figura 25 apresenta a diferença percentual entre o valor do tempo de ruptura (tB) obtido para as amostras experimentais e os resultados obtidos através da simulação com ajuste matemático proposto por Alptekin et al. (2008). O comparativo foi realizado utilizando a equação 10.

Figura 25: Diferença percentual para o tempo de ruptura entre amostras experimentais e simuladas



Os resultados obtidos experimentalmente e simulados são muito semelhantes, com as diferenças percentuais variando na faixa de 1,7% a 3,2%. Novamente, como as únicas variáveis da Equação 9 são as propriedades do combustível, o valor de aumento percentual do tempo de ruptura é idêntico para as três faixas de operação, embora as condições de operação do motor, pressão e temperatura, sejam diferentes.

Encontra-se na Tabela 28 um comparativo com os tempos de ruptura (tB) calculados para o diesel puro (B0), biodiesel puro (B100) e para as misturas B1, B2, B5, B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, B50, B55, B60, B65, B70, B75, B80, B85, B90 e B95. Os valores obtidos mostram uma tendência do aumento do tempo de ruptura conforme o teor de biodiesel aumenta, para todos os tipos de biodiesel estudados.

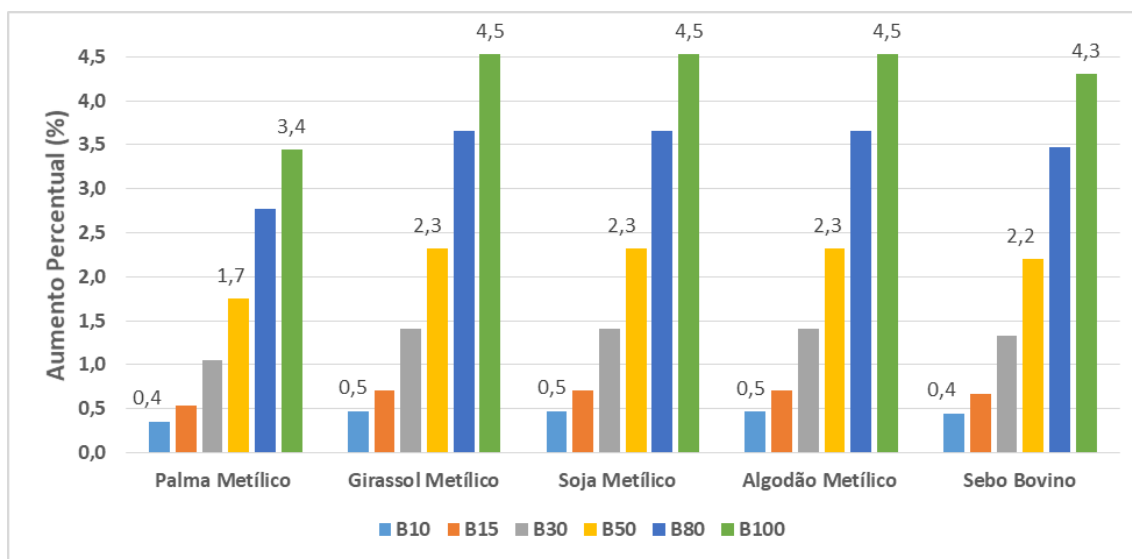
Tabela 28: Tempo de ruptura (tB) para as amostras simuladas por modelos matemáticos

TEMPO DE RUPTURA (tB) DAS MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL x 10 <sup>4</sup> (s)															
%V/V	PALMA METÁLICO			GIRASSOL METÁLICO			SOJA METÁLICO			ALGODÃO METÁLICO			SEBO BOVINO		
	BC	CM	PC	BC	CM	PC	BC	CM	PC	BC	CM	PC	BC	CM	PC
B0	625	308	154	625	308	154	625	308	154	626	309	155	608	300	150
B1	625	308	154	626	309	155	626	309	155	626	309	155	608	300	150
B2	626	309	155	626	309	155	626	309	155	626	309	155	609	300	150
B5	626	309	155	627	309	155	627	309	155	627	309	155	609	301	151
B10	627	309	155	628	310	155	628	310	155	629	310	155	611	301	151
B15	629	310	155	630	311	156	630	311	156	630	311	156	612	302	151
B20	630	311	156	631	311	156	631	311	156	631	311	156	613	303	152
B25	631	311	156	633	312	156	633	312	156	633	312	156	615	303	152
B30	632	312	156	634	313	157	634	313	157	634	313	157	616	304	152
B35	633	312	156	636	314	157	636	314	157	636	314	157	618	305	153
B40	634	313	157	637	314	157	637	314	157	637	314	157	619	305	153
B45	635	313	157	639	315	158	639	315	158	639	315	158	620	306	153
B50	636	314	157	640	316	158	640	316	158	640	316	158	622	307	154
B55	637	314	157	642	316	159	642	316	158	642	317	159	623	307	154
B60	639	315	158	643	317	159	643	317	159	643	317	159	624	308	154
B65	640	316	158	645	318	159	645	318	159	645	318	159	626	309	155
B70	641	316	158	646	319	160	646	319	160	646	319	160	627	309	155
B75	642	317	159	648	319	160	648	319	160	648	319	160	628	310	155
B80	643	317	159	649	320	160	649	320	160	649	320	160	630	311	156
B85	644	318	159	651	321	161	651	321	161	651	321	161	631	311	156
B90	645	318	159	652	322	161	652	322	161	652	322	161	633	312	156
B95	646	319	160	654	322	161	654	322	161	654	322	161	634	313	157
B100	648	319	160	655	323	162	655	323	162	655	323	162	635	313	157

BC = BAIXA CARGA, CM = CARGA MODERADA E PC = PLENA CARGA

Em seguida, é apresentado a Figura 26 comparando o aumento percentual do tempo de ruptura (tB) das misturas B10, B15, B30, B50, B80 e B100, em relação ao diesel. Estão em evidência os valores do aumento percentual do tempo de ruptura das misturas B10, atual teor de biodiesel adicionado ao diesel no Brasil, B50 e B100 (biodiesel puro). Os demais resultados estão presentes no ANEXO 3.

Figura 26: Aumento percentual do tempo de ruptura (tB) das amostras simuladas



O grupo dos insaturados (soja, girassol e algodão) possuem o maior aumento percentual dos valores de tempo de ruptura, seguido de perto pelo biodiesel de sebo bovino (saturado) e, por fim, pelo biodiesel de palma (teores semelhantes). As variações são pequenas e dificultam uma análise do impacto em termo dos teores de ácidos graxos saturados ou insaturados, visto que o biodiesel com teor semelhante apresentou menor aumento e não um comportamento intermediário como nas demais análises.

Verificar os resultados do tempo de ruptura (tB) dos biodieseis puros também se mostra relevante. Percebe-se que o biodiesel de sebo bovino possui o menor valor de tB, embora um dos maiores aumentos percentuais comparando-se ao biodiesel puro, seguido pelo biodiesel de palma e o grupo dos insaturados.

Essa análise é feita mesmo com a diferença de temperatura entre os dados obtidos para o grupo saturado e teor semelhante (15°C) e o grupo insaturado (40°C). Essa diferença de temperatura acarreta uma redução de 2% a 3% no valor da massa específica, segundo trabalho de Barbosa et al. (2015), que pode gerar uma diferença de 1,9% a 2,8% no cálculo do tempo de ruptura (tB). Essa diferença não inviabiliza a análise feita e não modificaria os comportamentos observados.

## Capítulo VI – Conclusões

As medições experimentais de massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial permitiram uma maior compreensão sobre o comportamento das propriedades físico-químicas das misturas. De forma geral, o aumento do teor de biodiesel metílico de soja nas misturas preparadas com diesel S10 A causa um aumento do valor de todas as propriedades verificadas. Esse comportamento também foi verificado nas simulações realizadas para prever as características físico-químicas das misturas de diversos tipos de biodiesel selecionados, com os ajustes matemáticos obtidos de trabalhos presentes na literatura.

A simulação das propriedades físico-químicas das misturas permitiu o cálculo dos parâmetros de atomização dos combustíveis no motor do ciclo diesel com injeção *common-rail*: diâmetro médio de Sauter (DMS), alcance do spray de combustível (S), ângulo de cone e tempo de ruptura (tB).

Para o diâmetro médio de Sauter, o aumento percentual das misturas se comporta da seguinte forma: sebo bovino > palma > girassol > soja > algodão. Percebe-se, portanto, que o aumento da distribuição do diâmetro de partículas é função do grau de instauração do biodiesel. Quanto maior o grau de saturação do biodiesel, maior será o diâmetro das partículas. Como consequência do aumento do teor de compostos saturados, há uma diminuição na qualidade da atomização do combustível o que prejudica a transferência de massa no processo de combustão, resultando em aumento no consumo de combustível e emissão de poluentes.

Os resultados de DMS obtidos experimentalmente e simulados para o biodiesel de soja metílico são muito semelhantes, com as diferenças percentuais variando na faixa de 2,4% a 6,0%. Já o comparativo de aumento percentual para os valores estimados possui variações acentuadas, principalmente para o biodiesel de sebo bovino. Para as amostras B50 de todos os biodieseis as variações estão na faixa de 5,4% a 14,4%.

Para o alcance do combustível dentro da câmara de injeção o comportamento da redução percentual foi o seguinte: sebo bovino >> palma > algodão > girassol > soja. Assim como na análise do diâmetro das partículas percebe-se que a redução do alcance do spray de combustíveis está relacionada ao aumento do teor de compostos saturados, sendo a redução bem mais acentuada para os combustíveis majoritariamente saturados. A redução do alcance do spray pode ocasionar uma má distribuição do combustível no cilindro do motor. Os valores adequados são objeto do projeto do motor e a combustão é mais eficiente

quando esse valor está mais próximo do especificado. Entretanto, esse parâmetro se torna pouco relevante quando o motor atua a plena carga e, nesse caso, independe da composição das blendas diesel/biodiesel e da natureza do biodiesel.

Os resultados de alcance do spray de combustível obtidos experimentalmente e simulados para o biodiesel de soja metílico são próximos, com as diferenças percentuais variando na faixa de 0,2% a 2,8%. Já o comparativo de redução percentual para os valores estimados possui variações acentuadas para o biodiesel de sebo bovino. Para as amostras B50 de todos os biodieseis as variações estão na faixa de 0,7% a 7,2%.

Os cálculos de ângulo de cone não apresentaram diferenças entre as misturas, apenas entre as faixas de operação do motor. Somente variações muito grandes de massa específica causariam impactos significativos no ângulo de cone, o que não é o caso de nenhuma mistura estudada. O ângulo de cone calculado para as condições operacionais de baixa carga foi de 7,4°, para carga moderada foi de 7,5° e plena carga do motor foi de 7,9°.

O aumento do tempo de ruptura das amostras, em função do tipo de biodiesel, foi o seguinte: algodão, girassol e soja > sebo bovino > palma. Nesse caso não foi possível correlacionar o grau de insaturação com o impacto no tempo de ruptura. Os valores estimados são muito próximos e a variação percentual observada em relação ao diesel, por exemplo, para as amostras B50 de todos os biodieseis estão na faixa de 1,7% a 2,3%. Os resultados de tempo de ruptura (tB) obtidos experimentalmente e simulados para o biodiesel de soja metílico são muito próximos, com as diferenças percentuais variando na faixa de 1,7% a 3,2%.

As características de atomização das misturas de combustíveis em motores de ciclo diesel *common-rail* avaliadas por modelos utilizados pelo setor automobilístico e evidenciam que, de forma geral, o aumento do teor de biodiesel nos combustíveis aumenta o diâmetro média das partículas, diminui o alcance do spray de combustível e aumenta o tempo de ruptura durante a atomização. Isso pode acarretar numa diminuição da qualidade da atomização do combustível dificultando a transferência de massa e vaporização do combustível, resultando no aumento do consumo e da emissão de gases poluentes. A diminuição da qualidade de atomização das misturas de biodiesel e diesel se mostra mais relevante em combustíveis cujo teor de ésteres de ácidos graxos saturados é mais elevado.

Para atender as especificações da ANP, o biodiesel produzido a partir de matéria prima com elevado teor de saturados é normalmente utilizado em conjunto com misturas com menor teor de saturados. Esse estudo mostra que essa mistura também pode ser

vantajosa com o objetivo de mitigar efeitos sobre os parâmetros que afetam a qualidade da atomização.

O aumento da porcentagem volumétrica de biodiesel ao óleo diesel comercializado altera as propriedades do combustível, por exemplo, diminui a sua resistência a oxidação. Isso acarreta a degradação do combustível, que pode inviabilizar sua utilização. Além de todas as alterações decorrentes da presença do biodiesel sobre as propriedades do combustível, os impactos do teor de biodiesel sobre a atomização na câmara de combustão também devem ser considerados.

## Capítulo VII – Referências bibliográficas

ABREU, F. R.; VIEIRA, J. N.; RAMOS, S. Y.; **PROGRAMA NACIONAL PARA A PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL DIRETRIZES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS.** REVISTA DE POLÍTICA E AGRICULTURA, ANO XV – Nº 3 – JUL. /AGO. /SET. 2006.

ALLEN, C. A. W.; WATTS. K. C.; ACKMAN. R. G.; **PREDICTING THE SURFACE TENSION OF BIODIESEL FUELS FROM THEIR FATTY ACID COMPOSITION.** JAOCS, VOL. 76, NO. 3 (1999).

ALLOCA, L.; BELARDINI, P.; BERTOLI, C. ET AL. **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF A DIESEL SPRAY,** SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, (1992). Nº DE SÉRIE: 920576.

ALPTEKIN, E., CANAKCI, M., **DETERMINATION OF THE DENSITY AND THE VISCOSITIES OF BIODIESEL– DIESEL FUEL BLENDS.** RENEWABLE ENERGY VOL. 33 PAG. 2623– 2630 (2008).

BARBOSA, L.S. ET AL., **MODELAGEM EMPÍRICA NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE DIFERENTES MISTURAS DE BIODIESEL DE COCO/DIESEL DE PETRÓLEO A DIFERENTES TEMPERATURAS** 8º SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS REALIZADO EM CUIABÁ/MT, DE 15 A 17 DE ABRIL DE 2015. ISBN 978-85-85905-11-8

BARNWAL, B.K.; SHARMA, M.P. **PROSPECTS OF BIODIESEL PRODUCTION FROM VEGETABLE OILS IN INDIA.** RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, V.9, N.4, P.368-378, 2005.

**BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP 2020.** EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR/ANP/PT-BR/ASSUNTOS/QUALIDADE-DE-PRODUTOS/BIOCOMBUSTIVEIS](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis). ACESSO EM: 21 DE SETEMBRO DAS 2021 ÀS 14:18 HORAS.

**BIODIESEL – ANP 2021.** EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR/ANP/PT-BR/ASSUNTOS/PRODUCAO-E-FORNECIMENTO-DE- BIOCOMBUSTIVEIS/BIODIESEL /APRESENTACAO](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/apresentacao). ACESSO EM: 21 DE SETEMBRO DE 2021 ÀS 14:27 HORAS.

BRUNETTI, F. **MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.** SÃO PAULO: EDITORA EDGARD BLUCHER, 2012.

CARVALHO, R.A.; TEIXEIRA, R.M.; ET AL. **ESTUDO DA ADIÇÃO E BIODIESEL NO DIESEL S10 E S500 E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL E NA ATOMIZAÇÃO** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO/ESCOLA DE QUÍMICA & IPIRANGA – PRODUTOS DE PETRÓLEO S.A. RIO DE JANEIRO, 2016.

CHUNXI, L., WENCHUAN, W., ZIHAO, W.; **A SURFACE TENSION MODEL FOR LIQUID MIXTURES BASED ON THE WILSON EQUATION.** FLUID PHASE EQUILIBRIA VOL. 175, PAG.185–196 (2000).

COSTA, A.S.; PEREIRA, C.A.F. (2020). **ANÁLISE TÉCNICO-SOCIAL DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL E NO DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DO NORTE DE MINAS GERAIS.** DRD - DESENVOLVIMENTO REGIONAL EM DEBATE, 10, 789–809. [HTTPS://DOI.ORG/10.24302/DRD.V10I0.2885](https://doi.org/10.24302/DRD.V10I0.2885)

CAVALCANTI, L. A. P.; **MODELOS DE REGRESSÃO APLICADOS PARA PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS MISTURAS DO BIODIESEL DE SEBO BOVINO COM O DIESEL**. REVISTA CIATEC – UPF, VOL.8 (2), P.P.22-33, 2016.

CLEMENTS, L.D, **BLENDING RULES FOR FORMULATING BIODIESEL FUEL**, THIRD LIQUID FUEL CONFERENCE, NASHVILLE, TN, SEP15-17. 1996

DANTAS, M. B., **OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO TERMO ANALÍTICO DE BIODIESEL DE MILHO (ZEA MAYS L.)**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA, JOÃO PESSOA, PB, 2006.

DESANTES, J. M.; ARRÈGLE, J.; PASTOR J.V. **INFLUENCE OF THE FUEL CHARACTERISTICS ON THE INJECTION PROCESS IN A D.I. DIESEL ENGINE**, SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (1998) 1185-1195. N° DE SÉRIE: 980802

DE LIMA, A. E. A.; **AValiação e comparação do número de cetano obtido por métodos alternativos (normatizados e não normatizados) – uma análise estatística** DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA, JOÃO PESSOA, PB, 2012.

**EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE): O QUE SÃO COMBUSTÍVEIS (2020)**. DISPONIVEL EM: [HTTPS://WWW.EPE.GOV.BR/PT/ABCDENERGIA /O-QUE-SAO-COMBUSTIVEIS](https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-sao-combustiveis). ACESSO EM: 31 DE SETEMBRO DE 2021 ÀS 14 HORAS.

FARIA, M.D.; PINTO, R.R.; ET AL. **EFEITO DO BIODIESEL NA ATOMIZAÇÃO DO COMBUSTÍVEL EM MOTORES DIESEL DE INJEÇÃO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO/ESCOLA DE QUÍMICA & PETROBRÁS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. RIO DE JANEIRO, 2010.

FERREIRA, A.C.; **MODELOS DE OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE ÓLEO DIESEL: UMA APLICAÇÃO INDUSTRIAL**. TESE DE DOUTORADO, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA, CAMPINAS, SP, 2008.

FLORIDO, P.M.; **PROPRIEDADES FÍSICAS DE SISTEMAS DE INTERESSE PARA A INDÚSTRIA DE ÓLEOS E DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL: DETERMINAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS, MODELAGEM E PREDIÇÃO**. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, FACULDADE DE ZOOTÉCNICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS, PIRASSUNUNGA, 2018.

GONÇALVEZ, G. G; **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE INJEÇÃO EM SISTEMA DIESEL**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, JOINVILE, 2016.

GOPINATH, A., PUHAN, S., NAGARAJAN, G., 2009. **RELATING THE CETANE NUMBER OF BIODIESEL FUELS TO THEIR FATTY ACID COMPOSITION: A CRITICAL STUDY**, D: J. AUTOMOBILE ENG. 223, P. 565. (2009)

HAAS, M. J.; FOGLIA, T. A.; **MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS E TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL. MANUAL DO BIODIESEL**. TRADUÇÃO: LUIZ PEREIRA RAMOS, SÃO PAULO. ED. BLUTCHER 2006.

**HOW FUEL INJECTION SYSTEMS WORK**. HOW STUFF WORKS – 2001. DISPONIVEL EM: [HTTPS://AUTO.HOWSTUFFWORKS.COM/FUEL-INJECTION.HTM](https://auto.howstuffworks.com/fuel-injection.htm). ACESSO EM 24 DE JANEIRO DE 2022 ÀS 15:13.



LEONARDO, R.S. **CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE SEDIMENTOS OU GOMAS FORMADOS NO BIODIESEL DE SOJA COMERCIAL, DIESEL S10 E SUAS BLENDS, UTILIZANDO ANÁLISE TÉRMICA.** TESE DE DOUTORADO (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS) ORIENT. MARIA LETÍCIA MURTA VALLE E JO DWECK, ESCOLA DE QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, RJ, BRASIL, 2019.

MACHADO, G. C; CHAVES, J. B; ANTONIASSI, R.; **COMPOSIÇÃO EM ÁCIDOS GRAXOS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA EQUÍMICA DE ÓLEOS HIDROGENADOS DE COCO BABAÇU.** REVISTA CERES VOL: 53(308) PAG:463-470, ANO: 2006.

MEHTA, R.N., CHAKRABORTY M.M., MAHANTA, P., PARIKH, P.,. **EVALUATION OF FUEL PROPERTIES OF BUTANOL-BIODIESEL BLENDS AND THEIR IMPACT ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS** , IND. ENG. CHEM. RES. 49, P.7660, 2010.

MENDES, M. T.; **TENSÃO SUPERFICIAL / INTERFACIAL DE LÍQUIDOS.** APRESENTAÇÃO EM POWERPOINT. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ, INSTITUTO DE MACROMOLÉCULAS PROFESSORA ELOISA MANO – IMA, RIO DE JANEIRO, 2021

MICHELS, A., GRZECA, M.; **ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES AUTOMOTIVOS DE OITO E DEZESSEIS VÁLVULAS.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS, SANTA MARIA, RS, 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **USOS DE BIODIESEL NO BRASIL E NO MUNDO – 1ª EDIÇÃO.** RELATÓRIO APRESENTADO À CÂMARA SETORIAL DA CADEIA PRODUTIVA DE OLEAGINOSAS E BIODIESEL EM JUNHO DE 2015. BRASÍLIA, 2015.

MORAES, M. S. A.; **BIODIESEL DE SEBO: AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES E TESTES DE CONSUMO EM MOTOR A DIESEL.** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, INSTITUTO DE QUÍMICA, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA, PORTO ALEGRE, 2018.

**ÓLEO DIESEL – ANP 2020.** EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR/ANP/PT-BR/ASSUNTOS/PRODUCAO-DE-DERIVADOS-DE-PETROLEO-E-PROCESSAMENTO-DE-GAS-NATURAL/PRODUCAO-DE-DERIVADOS-DE-PETROLEO-E-PROCESSAMENTO-DE-GAS-NATURAL/OLEO-DIESEL](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel). ACESSO EM: 21 DE SETEMBRO DAS 2021 ÀS 14:33 HORAS.

**PAINEL DINÂMICO MATÉRIA-PRIMA ANP (2021).** EM: [HTTPS://WWW.GOV.BR/ANP/PT-BR/CENTRAIS-DE-CONTEUDO/PAINEIS-DINAMICOS-DA-ANP/PAINEIS-E-MAPA-DINAMICOS-DE-PRODUTORES-DE-COMBUSTIVEIS-E-DERIVADOS/PAINEL-DINAMICO-DE-PRODUTORES-DE-BIODIESEL](https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel). ACESSO EM: 21 DE SETEMBRO DAS 2021 ÀS 15:03 HORAS.

PERERA, S. C.; **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE SPRAYS DE ÓLEO VEGETAL DE SOJA OBTIDOS DE UM ATOMIZADOR DE DIESEL.** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, PORTO ALEGRE, JULHO DE 2015.

PODORODECZKI, P. R.; **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM INJEÇÃO ELETRÔNICA COMMON-RAIL ALIMENTADO COM MISTURAS DIESEL – BIODIESEL EM DINAMÔMETRO DE CHASSIS.** PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL, PORTO ALEGRE, RS, 2016.

**PORTAL SHELL BRASIL: NOSSA HISTÓRIA.** EM: <HTTPS://WWW.SHELL.COM.BR/SOBRE-A-SHELL/NOSSA-HISTORIA.HTML>. ACESSO EM: 21 DE SETEMBRO DAS 2021 ÀS 14:24 HORAS.

RAMÍREZ, VERDUZCO L.F., GARCÍA, FLORES, B. E., RODRÍGUEZ, RODRÍGUEZ, J.E., JARAMILLO, JACOB, A.R.,. **PREDICTION OF THE DENSITY AND VISCOSITY IN BIODIESEL BLENDS AT VARIOUS TEMPERATURES FUEL 90**, PP. 1751, 2011.

RAMIREZ-VERDUZCO L.F., RODRIGUEZ-RODRIGUEZ J.E., JARAMILLO-JACOB A.R.,; **PREDICTING CETANE NUMBER, KINEMATIC VISCOSITY, DENSITY AND HIGHER HEATING VALUE OF BIODIESEL FROM ITS FATTY ACID METHYL ESTER COMPOSITION**, FUEL 91, P. 102., 2012

**RESOLUÇÃO ANP Nº 45, DE 25.08.2014, DOU 26 DE AGOSTO DE 2014.** AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS EM: <HTTPS://ATOSOFICIAIS.COM.BR/ANP/RESOLUCAO-N-45-2014?ORIGIN=INSTITUICAO&Q=45/2014>. ACESSO EM 24 DE SETEMBRO DE 2021 ÀS 15:55.

**RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013, DOU 24 DE DEZEMBRO DE 2013.** AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS EM: <HTTPS://ATOSOFICIAIS.COM.BR/ANP/RESOLUCAO-N-50-2013?ORIGIN=INSTITUICAO&Q=50/2013>. ACESSO EM 24 DE SETEMBRO DE 2021 ÀS 15:48.

**RESOLUÇÃO CNPE Nº 16, DE 29 DE OUTUBRO DE 2018.** CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA – CNPE EM: [HTTP://ANTIGO.MME.GOV.BR/DOCUMENTS/36074/265770/RESOLUCAO\\_16\\_CNPE\\_29-10-18.PDF/03661CF7-007D-EB99-10B4-61EE59C30941](HTTP://ANTIGO.MME.GOV.BR/DOCUMENTS/36074/265770/RESOLUCAO_16_CNPE_29-10-18.PDF/03661CF7-007D-EB99-10B4-61EE59C30941). ACESSO EM 24 DE SETEMBRO DE 2021 ÀS 16:16.

SAXENA, P., JAWALE, S., JOSHIPURA, M.; **A REVIEW ON PREDICTION OF PROPERTIES OF BIODIESEL AND BLENDS OF BIODIESEL.** CHEMICAL, CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING TRACKS OF 3RD NIRMA UNIVERSITY INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING (NUICONE 2012), PROCEDIA ENGINEERING VOL. 51, PAG. 395 – 402, 2013.

SILVA, P.R.; FREITAS, T.F.; **BIODIESEL: O ÔNUS E O BÔNUS DE PRODUZIR COMBUSTÍVEL.** CIÊNCIA RURAL, SANTA MARIA, V.38, N.3, P.843-851, MAI-JUN, 2008.

SINDI PETRÓLEO; **TESTES DE QUALIDADE: TABELAS DE CONVERSÃO DE PRODUTOS 1ª EDIÇÃO** (2015).

SUAREZ, P. A. Z; MENEGHETE, S. M. P.; ET AL. **TRANSFORMAÇÃO DE TRIGLICERÍDEOS EM COMBUSTÍVEIS, MATERIAIS POLIMÉRICOS E INSUMOS QUÍMICOS: ALGUMAS APLICAÇÕES DA CATÁLISE NA OLEOQUÍMICA.** QUÍMICA NOVA, VOL. 30, NO. 3, PÁG. 667-676, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **AN OVERVIEW OF BIODIESEL AND PETROLEUM DIESEL LIFE CYCLES.** 1998. 47P.

YUNG, C.S. AND LIU, Y.A., **SELECTION OF PREDICTION METHODS FOR THERMOPHYSICAL PROPERTIES FOR PROCESS MODELING AND PRODUCT DESIGN OF BIODIESEL MANUFACTURING**, IND. ENG. CHEM. RES. 50, P. 6809, 2011.

ZUNIGA, A. D.G., PAULA M. M, ET AL; **REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BODIESEL** REVISTA - PESTICIDAS: R. ECOTOXICOL E MEIO AMBIENTE, CURITIBA, V. 21, P. 55-72, JAN-DEZ 2011

ANEXO 1: Aumento percentual do DMS das misturas em relação ao diesel puro

AUMENTO PERCENTUAL DO DIÂMETRO MÉDIO DE SAUTER (DMS) DAS  
MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL (%)

BLENDAS	PALMA	GIRASSOL	SOJA	ALGODÃO	SEBO BOVINO
B1	0,18	0,15	0,15	0,09	0,31
B2	0,35	0,30	0,29	0,18	0,62
B5	0,89	0,74	0,73	0,46	1,54
B10	1,77	1,50	1,47	0,95	3,05
B15	2,65	2,27	2,22	1,45	4,55
B20	3,52	3,05	2,97	1,97	6,03
B25	4,39	3,84	3,73	2,50	7,48
B30	5,26	4,65	4,50	3,05	8,91
B35	6,12	5,46	5,27	3,62	10,32
B40	6,98	6,28	6,05	4,20	11,70
B45	7,84	7,11	6,83	4,80	13,06
B50	8,68	7,95	7,62	5,40	14,40
B55	9,53	8,79	8,41	6,03	15,72
B60	10,37	9,64	9,20	6,66	17,01
B65	11,20	10,50	10,00	7,30	18,28
B70	12,02	11,36	10,80	7,96	19,52
B75	12,84	12,22	11,60	8,62	20,74
B80	13,66	13,09	12,40	9,29	21,94
B85	14,47	13,95	13,21	9,97	23,12
B90	15,27	14,83	14,01	10,66	24,27
B95	16,06	15,70	14,81	11,35	25,40
B100	16,85	16,57	15,62	12,05	26,51

ANEXO 2: Redução percentual do alcance das misturas em relação ao diesel puro

REDUÇÃO PERCENTUAL DO ALCANCE DO SPRAY DE COMBUSTÍVEL (S) DAS  
MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL (%)

BLENDAS	PALMA	GIRASSOL	SOJA	ALGODÃO	SEBO BOVINO
B1	0,05	0,00	0,00	0,01	0,13
B2	0,10	0,00	0,00	0,01	0,27
B5	0,25	0,02	0,01	0,03	0,68
B10	0,51	0,05	0,03	0,09	1,37
B15	0,77	0,10	0,07	0,16	2,06
B20	1,04	0,17	0,12	0,24	2,77
B25	1,32	0,26	0,18	0,34	3,49
B30	1,60	0,36	0,26	0,46	4,21
B35	1,88	0,48	0,34	0,59	4,93
B40	2,18	0,61	0,44	0,74	5,67
B45	2,47	0,76	0,55	0,91	6,41
B50	2,77	0,92	0,67	1,09	7,15
B55	3,08	1,10	0,81	1,28	7,90
B60	3,39	1,30	0,95	1,49	8,66
B65	3,70	1,50	1,11	1,72	9,42
B70	4,02	1,73	1,27	1,95	10,18
B75	4,34	1,96	1,45	2,20	10,94
B80	4,67	2,21	1,64	2,47	11,71
B85	5,00	2,47	1,84	2,74	12,48
B90	5,34	2,75	2,04	3,03	13,25
B95	5,68	3,04	2,26	3,33	14,02
B100	6,02	3,34	2,49	3,64	14,79

ANEXO 3: Aumento percentual do tempo de ruptura das misturas em relação ao diesel puro

AUMENTO PERCENTUAL DO TEMPO DE RUPTURA (tB) DAS MISTURAS DE BIODIESEL/DIESEL (%)					
BLENDAS	PALMA	GIRASSOL	SOJA	ALGODÃO	SEBO BOVINO
B1	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04
B2	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09
B5	0,18	0,24	0,24	0,24	0,22
B10	0,35	0,47	0,47	0,47	0,45
B15	0,53	0,71	0,71	0,71	0,67
B20	0,71	0,94	0,94	0,94	0,89
B25	0,88	1,17	1,17	1,17	1,11
B30	1,06	1,40	1,40	1,40	1,33
B35	1,23	1,63	1,63	1,63	1,55
B40	1,40	1,86	1,86	1,86	1,77
B45	1,58	2,09	2,09	2,09	1,98
B50	1,75	2,32	2,32	2,32	2,20
B55	1,92	2,54	2,55	2,54	2,41
B60	2,09	2,77	2,77	2,77	2,63
B65	2,26	2,99	2,99	2,99	2,84
B70	2,43	3,22	3,22	3,22	3,05
B75	2,60	3,44	3,44	3,44	3,26
B80	2,77	3,66	3,66	3,66	3,47
B85	2,94	3,88	3,88	3,88	3,68
B90	3,11	4,10	4,10	4,10	3,89
B95	3,27	4,32	4,32	4,31	4,10
B100	3,44	4,53	4,53	4,53	4,30