

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**DENIS NASCIMENTO**

**SEPARAÇÃO DE ÁGUA NO DIESEL  
BRASILEIRO PELO EMPREGO DE  
MEIOS FILTRANTES COALESCENTES**

**Taubaté - SP**

**2023**

**DENIS NASCIMENTO**

**SEPARAÇÃO DE ÁGUA NO DIESEL  
BRASILEIRO PELO EMPREGO DE  
MEIOS FILTRANTES COALESCENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Energia e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

**Taubaté - SP**

**2023**

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi**  
**Universidade de Taubaté - Unitau**

N244s Nascimento, Denis  
Separação de água no diesel brasileiro pelo emprego de meios filtrantes  
coalescentes/ Denis Nascimento. -- 2023.  
82 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de  
Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara, Departamento de  
Engenharia Mecânica.

1. Separação de água. 2. Diesel. 3. Biodiesel. 4. Filtro barreira. 5. Filtro  
coalescente. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia  
Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 658.5

**DENIS NASCIMENTO**

**SEPARAÇÃO DE ÁGUA NO DIESEL BRASILEIRO PELO  
EMPREGO DE MEIOS FILTRANTES COALESCENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Energia e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Data: 30 de Junho de 2023

Resultado: Aprovado

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. EVANDRO LUÍS NOHARA  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Presidente da banca – Orientador

Universidade de Taubaté



Prof. Dr. JOSÉ RUBENS DE CAMARGO  
Membro Interno

Universidade de Taubaté



Prof. Dra. VALDIRENE APARECIDA DA SILVA  
Membro Externo

Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
do Estado de São Paulo



Dedico este trabalho a minha esposa, Ana e aos meus pais, Janete e Dyonisio, por serem a razão de eu sempre seguir em frente e buscar meus objetivos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar saúde e me suportar nos momentos difíceis, à toda minha família, esposa, pais, a Parker Hannifin e a Universidade de Taubaté, ao Professor Dr. Evandro Luís Nohara, que sempre me deram o apoio necessário para conduzir esta pesquisa da melhor maneira possível.

*“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”*

Leonardo da Vinci.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho envolve a busca pelo melhor meio filtrante para separação de água do diesel durante toda a vida útil do filtro separador de água, utilizados em caminhões e ônibus, abastecidos com diesel B15, o qual age como surfactante entre a água e o diesel, além de possuir uma tensão interfacial entre o diesel B15 e gotículas de água muito menor em relação ao diesel puro de petróleo, o que dificulta a sua separação. Foram testadas diversas configurações de meios filtrantes, os tradicionais filtros do tipo barreira, comumente encontrados no mercado de autopeças, com diferentes porosidades (10, 20 e 30  $\mu\text{m}$ ), além de filtros coalescentes que utilizam tecnologias multicamadas, responsáveis pela filtração das impurezas do diesel em sua primeira camada, pela coalescência na água na segunda camada e pela separação da água na terceira camada. Os filtros foram instalados em caminhões e ônibus de duas montadoras e foram realizados testes de separação de água, seguindo a norma ISO16332:2018, com filtros novos, em meia vida e fim de vida útil, para que fosse verificada a melhor configuração para atender os requisitos das montadoras de se obter uma separação de água superior a 75% durante toda a vida útil do filtro. Os veículos foram abastecidos com diesel B15, o qual possui em sua composição 15% de biodiesel oriundo de diversas fontes produzidas no Brasil, como óleos de soja, milho, algodão, além de gorduras animais e até mesmo óleo usado em frituras. A análise dos resultados obtidos mostra que os filtros tipo barreira na condição de novos se comportam muito bem independente de sua porosidade, alcançando bons níveis de separação de água do diesel (superior a 75%). Entretanto, após o início da rodagem nos veículos, mesmo na condição de pouco saturados, já demonstram uma queda de eficiência. A eficiência dos filtros coalescentes é dependente da porosidade do papel filtrante utilizado em seu primeiro estágio, além da própria característica de repelência a água do meio filtrante. Foi observado que com a utilização de papéis filtrantes com maior porosidade, as sujidades do diesel chegam às demais camadas de filtração, dificultando o seu funcionamento e diminuindo sua eficiência. Entretanto, com papel filtrante com porosidade de 10 $\mu\text{m}$  impregnado com resinas sintéticas poliméricas, é possível atingir o nível desejado de separação de água do diesel até o final da vida útil do filtro.

**Palavras-chave:** Separação de água, diesel, biodiesel, filtro barreira, filtro coalescente.

## ***ABSTRACT***

The objective of this work is to find the best media for water separation throughout all water separator filter life, used in trucks and buses, filled with diesel B15, which reacts as a surfactant between water and diesel, besides that, it has a smaller interfacial tension between the diesel B15 and the water droplets than when compared with pure diesel from petroleum, making the water separation more difficult. They were tested many different media configurations, including the standard barrier filters, commonly found in the auto parts market, with different porosities (10, 20 e 30  $\mu\text{m}$ ), in addition to a coalescer filter, that uses multilayer technology, responsible for impurities filtration of the diesel in his first layer, for water coalescence in the second layer and for water separation in the third layer. The filters were installed in trucks and buses of two vehicles manufacturers and water separation tests were performed, according to the standard ISO16332, with new filters, filters in the middle of life and in the end of life, to check the best configuration to meet the requirements of automakers to obtain a water separation bigger than 75% during all filter life. The vehicles were filled with diesel B15 from different sources in Brazil, such as soil bean oil, corn, cotton, animal grease, and even used oil from frying. The result analysis shows the barrier filter when new, have good behavior, besides their porosity, meeting more than 75% of water separation from diesel, however, after the begging of durability test in the vehicles, even when they are not saturated, they show an efficiency decreasing. The efficiency of the coalescer filter is dependent on the media porosity used in the first layer, besides the characteristics of water repellence. It was observed that using media with bigger porosity, the dirt of the fuel arrives in the other layers of the filter, hindering its operation and reducing its efficiency. Nevertheless, with a filtration media with 10 micron porosity impregnated with polymeric synthetic resins is possible to achieve the desired water separation efficiency during all filter life.

**Keywords:** Water Separation, diesel, biodiesel, barrier filter, coalescer filter

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de alimentação de combustível .....	18
Figura 2. Formas da água no diesel .....	20
Figura 3. Sistema de alimentação de combustível .....	23
Figura 4. A reação de transesterificação .....	25
Figura 5. Bico Injetor Degradado .....	29
Figura 6. Fonte de contaminação interna .....	31
Figura 7. Moléculas de água no biodiesel .....	33
Figura 8. Água no diesel (ppm) .....	34
Figura 9. Concentração de água no diesel em relação aos dias .....	35
Figura 10. Molécula Anfifílica .....	36
Figura 11. IFT no Diesel .....	36
Figura 12. Eficiência de filtragem em relação a queda de IFT .....	37
Figura 13. Ângulo de contato da água no meio filtrante .....	38
Figura 14. Separabilidade de Água do Diesel .....	38
Figura 15. Tamanho da gotícula de água no diesel .....	39
Figura 16. Biodiesel em contato com o meio filtrante .....	42
Figura 17. Separação de Água pela quilometragem de filtros usados .....	43
Figura 18. Biodiesel em contato com o meio filtrante .....	44
Figura 19. Tipos de Meio filtrante de um filtro tipo barreira .....	47

Figura 20. Tipos de Meio filtrante de um filtro tipo barreira .....	48
Figura 21. Papel filtrante com não tecido .....	48
Figura 22. Disposição das fibras de um meio filtrante multi-layer .....	49
Figura 23. Malha de Não Tecido .....	50
Figura 24. Malha de Tecido Figura .....	50
Figura 25. Processo de fabricação Meltblown .....	51
Figura 26. Meio Filtrante Multicamadas .....	51
Figura 27. Fluxograma do plano de testes .....	52
Figura 28. Filtro Separador de Água Emax .....	53
Figura 29. Filtro tipo Barreira .....	54
Figura 30. Filtro Coalescente .....	55
Figura 31. Tubo com meio filtrante Coalescente .....	55
Figura 32. Tubo com meio filtrante bloqueador de água .....	56
Figura 33. Protótipo para teste.....	56
Figura 34. Meio filtrante plissado.....	57
Figura 35. Fluxograma para montagem dos protótipos.....	57
Figura 36. Bancada de testes de separação de água .....	58
Figura 37. Titulador Karl Fischer .....	59
Figura 38. Tensiômetro .....	60
Figura 39. Gerador de Gotículas de água .....	60

Figura 40. Analisador de partículas .....	61
Figura 41. Diagrama da bancada de teste de separação de água .....	63
Figura 42. Diesel antes e depois da passagem pelo filtro na bancada de testes .....	64
Figura 43. Eficiência de Separação de Água x km rodado lote A.....	66
Figura 44. Eficiência de Separação de Água x km rodado lote B.....	67
Figura 45. Eficiência de Separação de Água x km rodado lote C.....	68
Figura 46. Filtro Barreira limpo (esquerda) e em fim de vida (direita).....	69
Figura 47. Eficiência de Separação de Água x km rodado lote D.....	70
Figura 48. Aspecto visual do meio filtrante após teste de rodagem de 9.559 km (Lote C) .....	71
Figura 49. Filtro Coalescente limpo e em fim de vida .....	71
Figura 50. Eficiência de Separação de Água x km rodado lote F.....	73
Figura 51. Eficiência de Separação de Água x km rodado lote G.....	74
Figura 52. Comparativo de Eficiência de Separação de Água x km rodado de todos os lotes.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do biodiesel no Brasil .....	27
Tabela 2. Interação água diesel .....	33
Tabela 3. Gotículas de água dispersas em biodiesel em pressão atmosférica e a 4bar .	39
Tabela 4. Classificação ISO4406 .....	45
Tabela 5. Quantidade de partículas e concentração de água .....	46
Tabela 6. Tipos de Filtros testados .....	53
Tabela 7. Eficiência de separação de água – Lote A .....	65
Tabela 8. Eficiência de separação de água – Lote B .....	67
Tabela 9. Eficiência de separação de água - Lote C .....	68
Tabela 10. Eficiência de separação de água - Lote D .....	70
Tabela 11. Eficiência de separação de água - Lote E .....	72
Tabela 12. Eficiência de separação de água - Lote F .....	73
Tabela 13. Eficiência de separação de água – Lote G .....	73
Tabela 14. Eficiência de separação de água - Lote H .....	74

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1 – Lei de Sedimentação de Stokes .....	42
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CNPE: Conselho Nacional de Políticas Energéticas

ISO: International Organization for Standardization

LCO: *Light Cycle Oil* (Óleo leve de reciclo)

ULSD: *Ultra Low Sulfur Diesel* (Diesel de Baixíssimo Teor de Enxofre)

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

IFT: *Interfacial Tension* (Tensão Interfacial)

DSD: *Droplet Size Distribution* (Distribuição de tamanho de gota)

Dv50: *Droplet Size* >50% (Tamanho de gota >50%)

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

$v_s$ : velocidade de sedimentação

$P_p$ : massa específica do diesel

$P_f$ : massa específica da água

$\mu$ : viscosidade dinâmica ou absoluta

g: aceleração da gravidade

R: raio das partículas de água

ppm: partes por milhão

# SUMÁRIO

## Capítulo 1

Introdução .....	18
1.1 Objetivo Geral .....	20
1.2 Objetivos Específicos .....	20
1.3 Justificativa .....	21

## Capítulo 2

Revisão Bibliográfica .....	22
2.1 Motores Diesel e o Sistema de Injeção de Combustível .....	22
2.2 Combustível: Diesel/Biodiesel .....	23
2.3 Presença de água no diesel/biodiesel e suas características .....	30
2.4 Importância da Filtragem do combustível e separação de água .....	40
2.5 Meio Filtrante .....	46
2.5.1 Celulose .....	47
2.5.2 Não tecidos .....	49
2.5.3 Meio filtrantes coalescentes .....	51

## Capítulo 3

Materiais e Métodos .....	52
3.1 Materiais .....	52
3.1.1 Filtros .....	52
3.1.1.1 Filtro Barreira .....	54
3.1.1.2 Filtro Coalescente .....	54
3.1.2 Equipamentos .....	57
3.1.2.1 Bancada de Testes .....	57
3.1.2.2 Titulador Volumétrico Karl Fischer .....	58
3.1.2.3 Tensiômetro .....	59
3.1.2.4 Gerador de gotículas de água .....	60

3.1.2.5 Analisador de distribuição de tamanho de partícula por difração a laser .....	61
3.1.3 Veículos .....	61
3.1.4 Combustível .....	61
3.2 Métodos .....	62
3.2.1 Norma do teste .....	62
3.2.2 Parâmetros de teste .....	63
3.2.3 Testes em bancada .....	64
3.2.4 Testes em bancada após rodagem em veículos .....	64

## Capítulo 4

Resultados e Discussão .....	65
4.1 Testes com elemento filtrante de papel de celulose com uma camada e porosidade de 10 micra (lote A) .....	65
4.2 Testes com elemento filtrante de papel de celulose com uma camada e porosidade de 20 micra (lote B) .....	66
4.3 Testes com elemento filtrante de papel de celulose com uma camada e porosidade de 30 micra (lote C) .....	67
4.4 Testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de 10 $\mu$ m (lote D) .....	69
4.5 Testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose laminado com camada de não tecido do polímero 2 via meltblown com porosidade de 10 $\mu$ m (lote E) .....	72
4.6 Testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de 10 $\mu$ m (lote F) .....	72
4.7 Testes multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de 20 $\mu$ m (lote G) .....	73
4.8 Testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de 30 $\mu$ m (lote H) .....	74
4.9 Comparativo de Eficiência de Separação de Água de Todos os Lotes.....	75

Capítulo 5

Conclusões.....	77
Referências .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

O motor a combustão do ciclo diesel foi patenteado em 1892 pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel, que por conta de sua eficiência foi difundido em diversas aplicações em todo o mundo, caminhões, locomotivas para o transporte de cargas, ônibus para o transporte de pessoas, máquinas agrícolas e construção e até mesmo geradores de energia elétrica (DIESEL e GULDNER, 1903).

Os motores diesel mais modernos contam com um sistema de injeção de combustível chamado de Common-rail, que apesar de mais eficiente em relação às versões anteriores, são também muito sensíveis à má qualidade do combustível, sofrendo danos como corrosão, arranhões ou riscos nos componentes de seu sistema, formação de lodo e sedimentos, os quais podem ser causados pela presença de água no combustível (AROUNI et al, 2019).

A Figura 1 apresenta um esquema do sistema de alimentação de combustível formado pelo tanque de combustível, um pré-filtro de separação de água, bomba de transferência de combustível, filtro principal de contaminantes, bomba de alta pressão e sistema de injeção.

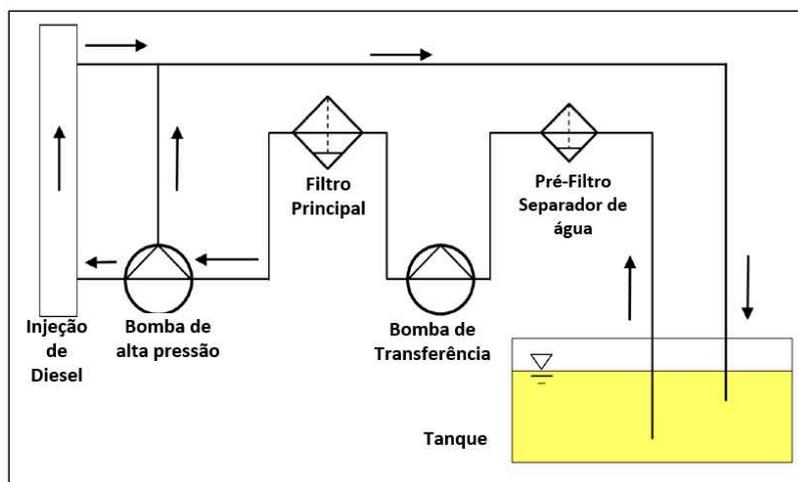


Figura 1 - Sistema de alimentação de combustível. Fonte: (YOSHINO, 2015).

A função principal do pré-filtro é a separação de água tanto livre quanto emulsionada para evitar todos os problemas gerados pela água, como corrosão e proliferação de bactérias e fungos. Uma separação de água maior do que 93% é imprescindível para sistemas de injeção *Common-rail* (BOSCH, 2005). De acordo com a Figura 1, a bomba de transferência succiona o combustível do tanque e o encaminha até

a bomba de alta pressão, passando através do pré-filtro separador de água e também pelo filtro principal, este responsável pela filtração das partículas mais finas.

A demanda por biocombustíveis vem aumentando em relação aos combustíveis fósseis, tanto por uma demanda ambiental, quanto pelo simples fato de o petróleo ser finito. No Brasil e em outros países já se iniciou uma mistura de um combustível denominado biodiesel no diesel tradicional, utilizado principalmente em caminhões, caminhonetes, máquinas agrícolas e motores estacionários. Em 2018 uma nova Resolução CNPE, nº16, foi publicada determinando que a quantidade de biodiesel adicionada ao combustível de 11 % até o limite de 15 % no ano de 2023, entretanto em 20 de março de 2023 esta portaria foi alterada, modificando a data para este aumento do biodiesel no combustível para 2026, ficando estabelecido que em 2023 a quantidade de biodiesel seria de 12 %, em 2024 seria de 13 % , em 2025 seria de 14% e por fim em 2026 15% de biodiesel seria acrescentado ao combustível. Com o aumento do teor de biodiesel na mistura do diesel, comercializado no Brasil, os meios filtrantes atualmente utilizados em filtros separadores de água para caminhões, máquinas agrícolas, de construção e terraplanagem, também chamados de pré-filtro, possuem meio filtrante tipo barreira hidrofóbicos, ou seja, repelem a água livre por meio de resinas que são utilizadas na celulose, sendo estas o tipo mais comum encontrado no mercado de filtros para diesel.

No entanto, estes filtros, não possuem desempenho suficiente para a separação da água emulsificada no combustível. Esta umidade tem teor aumentado devido a adição de biodiesel que age como surfactante, que reduz a tensão interfacial entre combustível e a água, ocasionando a ligação entre a água e o diesel, o que resulta em uma mistura estável, deixando-os miscíveis. Com a passagem de água para o sistema de alimentação de combustível do motor, podem ser gerados pontos de corrosão que causam danos aos mecanismos do veículo, como a ferrugem no sistema, além de ser um ambiente perfeito para a proliferação de bactérias, algas e fungos que podem danificar os componentes do motor. A água presente no biodiesel pode causar o crescimento de microrganismos, hidrólise do combustível pela formação de ácidos graxos livres (LOBO; FERREIRA, 2009), corrosão nos componentes metálicos do sistema de injeção de combustível (KNOTHE, 2018), gerando inclusive partículas que podem entupir o sistema de alimentação de combustível, além da perda de lubricidade do combustível devido a forma da água emulsificada (PATEL; CHASE, 2014). Na Figura 2 é mostrada a mistura entre água e diesel, quando ela está dissolvida, quando as moléculas estão dispersas uma a uma pela massa do óleo, emulsificada, quando existe uma grande quantidade de água no óleo

e é possível observá-la em suspensão e em estado livre, quando a água está separada do óleo e se deposita no fundo do recipiente.



Figura 2 - Formas da água no diesel. Fonte: (LOBO, 2019).

### 1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um meio filtrante capaz de separar de maneira satisfatória a água emulsificada na mistura de biodiesel/diesel por toda a vida útil do filtro.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Testar a eficiência de separação de água de filtros com meio filtrante de papel de celulose constituído de um único estágio de acordo com a norma ISO 16332:2018, com filtros novos e filtros usados (após teste de rodagem em caminhões e ônibus).

Configuração 1: Papel de celulose impregnado com fibra de vidro e porosidade de  $10\mu\text{m}$ .

Configuração 2: Papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de  $20\mu\text{m}$ .

Configuração 3: Papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de  $30\mu\text{m}$ .

- Testar a eficiência de separação de água de acordo com a norma ISO 16332:2018 com filtros novos e filtros usados (após teste de rodagem em caminhões e ônibus), com 5 configurações de filtro com meio filtrante constituído de três estágios (primeiro estágio: papel de celulose, segundo estágio: tubo coalescente, terceiro estágio: tubo bloqueador hidrofóbico), pela modificação somente do primeiro estágio:

Configuração 1: Papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de 10 $\mu$ m

Configuração 2: Papel de celulose laminado com camada de não tecido (polímero 2 via *meltblown*) com porosidade de 10 $\mu$ m

Configuração 3: Papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de 10 $\mu$ m

Configuração 4: Papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de 20 $\mu$ m

Configuração 5: Papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de 30 $\mu$ m

### 1.3 Justificativa

Com o aumento do teor de biodiesel na mistura do diesel vendido no Brasil, os meios filtrantes atualmente utilizados em filtros separadores de água, também denominados pré-filtro, e que possuem meio filtrante tipo barreira hidrofóbicos, repelem a água livre com ajuda de resinas que são utilizadas na impregnação da celulose. Esse tipo de filtro é o mais comum encontrado no mercado de filtros para diesel e não tem desempenho suficiente para a separação da água que está emulsificada no combustível quando o filtro está em fim de vida útil, pois a sujeira acumulada no filtro, que contém misturas de asfalteno formado na oxidação do diesel, além de vestígios de glicerina resultantes do processo de fabricação do biodiesel e sujeiras em geral oriundas de tanques de abastecimento e do contato com o ar, cobrem a resina responsável pela separação da água do diesel, fazendo com que o pré-filtro perca a sua função primária. Com a passagem de água para o sistema de alimentação de combustível do motor, podem ser gerados pontos de corrosão que causam danos ao veículo. Em função disso, o presente trabalho envolve o estudo de um meio filtrante capaz de separar a água do diesel durante toda a sua vida útil, garantindo assim que o sistema de injeção de diesel do veículo estará protegido dos problemas causados pela contaminação de água em seu sistema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Motores Diesel e o Sistema de Injeção de Combustível

Em 1892 o engenheiro alemão Rudolf Diesel patenteou o seu motor de combustão interna. A vantagem de seu motor era e ainda é a sua eficiência e por isso foi espalhado por diferentes tipos de mercado e hoje é utilizado principalmente nos segmentos onde se utilizam os veículos para percorrer uma grande quilometragem, para que seu custo seja superado pela economia de combustível (SALIH, 2017). Nos motores Ciclo Diesel, o ciclo de trabalho é realizado pela queima do combustível juntamente com o ar aquecido com alta compressão no interior do cilindro (SENAI, 2016). No motor diesel ou motor de ignição por compressão, somente o ar é admitido no cilindro através do coletor de admissão, sendo comprimido em alta temperatura e pressão e quando entra em contato com o diesel vaporizado, reações químicas ocorrem causando a explosão instantânea ou autoignição do combustível. Uma das mais importantes propriedades do óleo diesel é a sua característica de autoignição em temperaturas e pressões presentes no cilindro, quando esse combustível é injetado (KNOTHE, 2018).

Modernos sistemas de injeção de combustíveis foram desenvolvidos para aplicações com diesel, chamados de *Common-Rail*. O conceito tradicional de injeção de combustível em linha ou por bomba de pistões rotativos que operam com baixa pressão está sendo gradualmente abandonados devido a requisitos ambientais introduzidos em diversos países (JOCANOVIC, 2017).

O sistema de injeção de combustível denominado *Common-Rail* está presente nos motores diesel modernos e são muito vulneráveis a danos severos provocados por corrosão, arranhões, lodo biológico e sedimentos provocados pela presença de água no sistema de combustível. Separadores de água são necessários para coalescer e remover a água do combustível antes que ela afete componentes críticos (AROUNI, 2019), os quais necessitam que o combustível esteja o mais limpo possível e livre de água (JOCANOVIC, 2017). Na Figura 3 é mostrado o sistema de alimentação de combustível de um motor diesel.

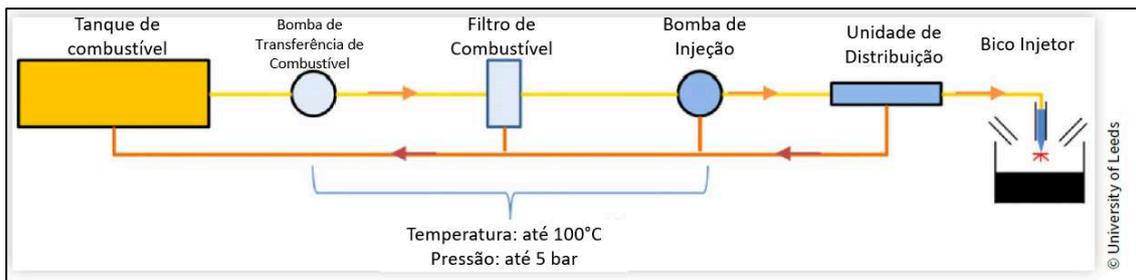


Figura 3 - Sistema de alimentação de combustível. Fonte: (AROUNI, 2018).

A coalescência é a formação de grandes partículas que são afetadas pela força gravitacional a partir da união de pequenas gotículas líquidas em suspensão (OLIVEIRA, 2013)

## 2.2 Combustível: Diesel/Biodiesel

O óleo diesel é muito utilizado no setor automotivo, porém, também é bastante utilizado em setores agrícolas, ferroviário, marítimo, geração de energia e em países mais frios inclusive para o aquecimento domiciliar. Portanto, suas propriedades e misturas variam muito conforme o local (BRUNETTI, 2012). De acordo com Brunetti: “A formulação do óleo diesel inclui correntes tradicionais obtidas da destilação atmosférica (nafta pesada, querosene, diesel leve e diesel pesado), correntes hidrotratadas (óleo leve de reciclo ou *light cycle oil* – LCO, provenientes do craqueamento catalítico e nafta pesada de coque e os gasóleos de coque provenientes do coqueamento retardado)” (BRUNETTI, 2012).

MAIA (MAIA, 2015) cita que a humanidade está motivada a buscar novas alternativas para fontes energéticas, que sejam renováveis, pois existe uma grande preocupação com a degradação do meio ambiente, principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis, pois no mundo atual cerca de 40 % de toda energia consumida no planeta vêm deles. No Brasil 20 % de toda a energia consumida vem do diesel.

Atualmente o diesel, conhecido como *ultralow sulfur diesel* (ULSD), em tradução livre, diesel de baixíssimo teor de enxofre, no Brasil conta com 10 ppm de enxofre, e vem substituindo o diesel comum, o qual contém 500 ppm. Esta modificação é crítica para a separação de água do diesel, pois o novo diesel ULSD possui uma tensão interfacial menor em relação a água, dificultando sua separação, quando emulsificada. Este problema é atribuído aos aditivos presentes no combustível (YANG, 2007).

O constante aumento do valor do petróleo e as políticas ambientais que tentam diminuir os impactos na natureza causados pela queima dos combustíveis fósseis, são dois pontos fundamentais que vem ajudado no desenvolvimento de novas tecnologias, como o biodiesel, que apesar de fornecer aproximadamente 10% a menos energia do que o diesel de petróleo, tem desempenho no motor praticamente igual se observado características como torque e potência (LOBO, 2009).

O biodiesel pode diminuir em 78 % as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, se levado em consideração a reabsorção realizada pelas plantas utilizadas na sua obtenção se for comparado as emissões feitas pelo diesel de petróleo. (LIMA 2004 apud NADALETI, 2015). Em estudo realizado apenas com ônibus urbanos na cidade do Rio de Janeiro, foi possível verificar uma redução de 39% somente nas emissões de CO<sub>2</sub> (MURTA, 2022).

É possível realizar a mistura total do biodiesel no diesel de petróleo, o que faz dele uma boa alternativa para combustível renovável, sendo inclusive aprovada a sua utilização pura, porém alguns cuidados devem ser tomados, como pinturas acrílicas, a utilização de borrachas fluoradas para vedações, como teflon ou viton, além da presença de água que se torna mais constante (LORA, 2012). O biodiesel não contém nenhum composto a base de petróleo em sua composição, porém pode ser misturado em qualquer proporção com o diesel convencional e criar uma mistura estável (FREGOLENTE, 2012).

Na história atual, óleos vegetais estão sendo testados como alternativa, porém Rudolf Diesel já citava em artigos da década de 1910 a utilização de tais óleos para geração de energia e inclusive em uma exposição em Paris em 1900, mostrou um motor de ciclo diesel movido a óleo de amendoim (MAIA, 2015). Atualmente no diesel uma porção de biodiesel é misturada ao combustível para que se possa ter uma redução em seu impacto ambiental (AROUNI, 2018).

Os óleos vegetais tem um bom desempenho como combustíveis, em termos de eficiência energética, o ponto negativo é o seu custo, se comparados aos combustíveis fósseis. No entanto, um problema que sempre foi discutido era a sua alta viscosidade, o qual no final dos anos 1970, um interesse mundial na obtenção de novas formas de combustíveis ajudou nos estudos de quatro teorias para solucionar este problema: a transesterificação, a pirólise, diluição no diesel de petróleo e a microemulsificação, sendo a transesterificação o método mais comum e utilizado até hoje (KNOTHE, 2018).

Na Figura 4, é mostrado o processo de transesterificação, onde R representa uma mistura de várias cadeias de ácidos graxos.

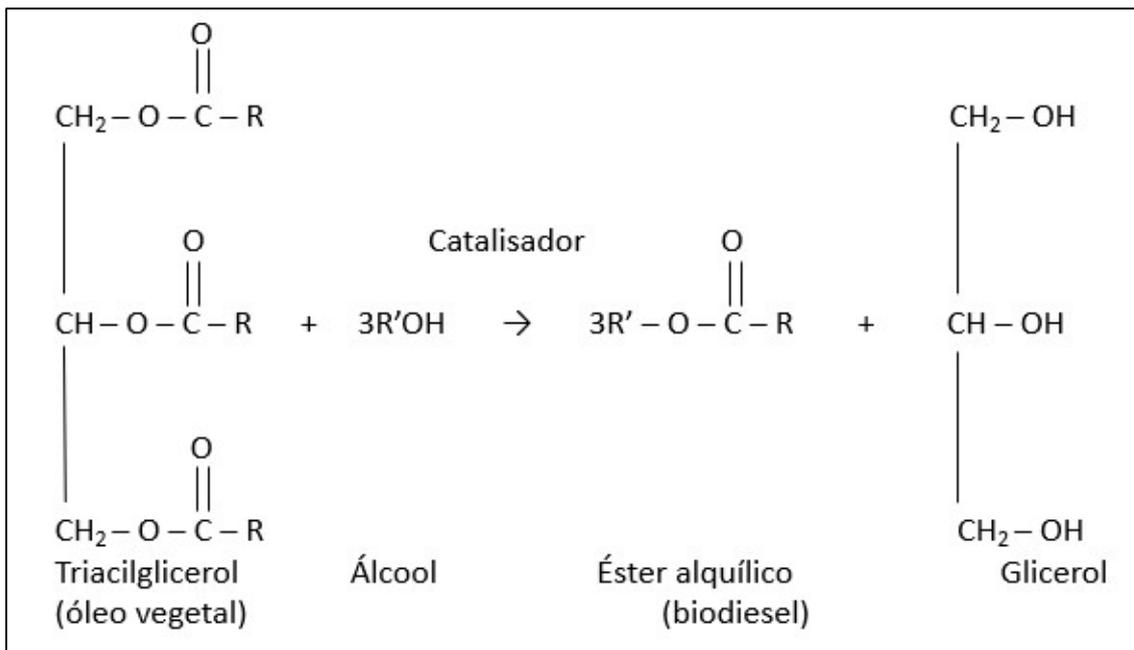


Figura 4 - A reação de transesterificação. Fonte: (KNOTHE 2018).

No processo de transesterificação dos óleos e gorduras para a produção de biodiesel, o metanol e etanol são os álcoois mais utilizados. O metanol é mais reativo e exige uma menor temperatura para a reação, já o etanol, além de ter produção em grande escala no Brasil, é menos tóxico e o biodiesel obtido tem maior número de cetano e melhor lubrificidade, o ponto negativo fica por conta da dispersão de glicerina que ele promove, dificultando sua separação (LOBO, 2009).

No Brasil a primeira patente relativa a um biodiesel é a PI 8007957, submetida no ano de 1980 e concedida em 1983 a Expedito de Sá Parente, que seria a primeira patente do mundo para a produção em grande escala do combustível (NOVO, 2019).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP – Resolução 7/2008), diz que o biodiesel é um composto de monoalquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa derivados de óleo vegetais ou gorduras animais” (ANP, 2008 apud BRUNETTI, 2012).

De acordo com Stanfel, o biodiesel é uma mistura de éster metílico de ácido graxo derivado de uma transesterificação dos triglicerídeos de origem animal ou vegetal (STANFEL, 2012). O biodiesel é um surfactante e as misturas que contém ao menos 2% dele tem uma tensão superficial menor do que 25 dynes/cm. De acordo com NOVO (NOVO, 2019), “Os biocombustíveis são considerados fontes de energia menos poluentes do que as fontes convencionais. Além disso, são renováveis, visto que se regeneram a curto prazo”. Um outro método para a redução de emissões e melhorar a eficiência dos

motores, seria a implementação de um controle da viscosidade do óleo lubrificante no motor para que sua eficiência seja aumentada quando o óleo possuir a viscosidade correta para o sistema, ou seja, um sistema para ajuste da viscosidade do óleo para melhorar a eficiência do motor (DRAGSTED, 2004).

Um problema apresentado por Maia é que não existe uma normatização e critérios para estes biocombustíveis, seja no Brasil ou no exterior. Apesar disso as características e propriedades dos padrões de qualidade são: ponto de fulgor, teor de água e sedimentos, viscosidade, cinzas, teor de enxofre, corrosividade, número de cetano, ponto de névoa, resíduo de carbono, acidez, teor de glicerina total e livre (MAIA, 2015). A Tabela 1 contempla as especificações do Biodiesel Brasileiro (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO E GÁS, 2023).

**Tabela 1** - Características do biodiesel no Brasil. Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO E GÁS, 2023).

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto		-1			
Massa específica a 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	850 a 900	7148	1298	EN ISO 3675
Viscosidade cinemática a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	3,0 a 5,0	14065	4052	EN ISSO 12185
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0 (2)		6304	EN ISO 12937
Teste de filtração por imersão a frio (TFIF), máx.	s	anotar		7501	
Ponto de fulgor, mín.	°C	100	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín.	% massa	96,5	15764		EN 14103
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,02	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	15867	5453	EN ISSO 20846
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	2,5	15553		EN ISSO 20884
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	2,5	15553		EN 14538
Fósforo, máx. (5)	mg/kg	3	15553		EN 14538
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.		1	14359	130	EN ISO 2160
Número de cetano		Anotar		613	EN ISO 5165
				7668	EN 15195
				8183	EN 16715
Ponto de entupimento de filtro a frio (PEFF), máx.	°C	-6	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	14448	664	EN 14104
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15908	6584	EN 14105
Glicerol total, máx.	% massa	0,2	15908	6584	EN 14105
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,5	15908	6584	EN 14105
Diacilglicerol, máx.	% massa	0,2	15908	6584	EN 14105
Triacilglicerol, máx.	% massa	0,2	15908	6584	EN 14105
Contaminação total, máx.	mg/kg	24	15995		EN 12662
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,2	15343		EN 14110
Estabilidade à oxidação a 110 °C, mín.	h	13			EN 14112
					EN 15751

Após a produção do biodiesel, existem dois fatores importantes para o controle da qualidade do biodiesel, envolvendo a presença de água e sedimentos. No geral o biodiesel é insolúvel em água, porém pode absorver até 1500 ppm de água dissolvida, 30 vezes mais que o diesel de petróleo. As especificações para combustíveis ASTM D975:2023 e ASTM D6751:2019 informam que 500 ppm seria o máximo aceitável, o qual é um verdadeiro desafio, principalmente em relação ao biodiesel, que deveria se manter seco, mesmo que a maioria dos reservatórios tenha água condensada em sua base. Sedimentos e materiais em suspensão também são prejudiciais para o sistema. (KNOTHE, 2018).

Na resolução da ANP, nº07 de 2008, existe uma análise preliminar do aspecto do biodiesel, na qual a ideia é avaliar se existem impurezas no biodiesel, mas é feita de forma visual, identificando apenas materiais em suspensão ou se o biodiesel está turvo (LOBO, 2009). Um ponto positivo do biodiesel é que ele apresenta uma melhora na lubrificidade do combustível que é diminuída com a chegada do diesel com baixo teor de enxofre (KNOTHE, 2018).

O biodiesel pode ser produzido a partir de óleos de diversas fontes, como: soja, algodão, amendoim girassol, gorduras de origem animal, mamona e até mesmo de óleo de fritura (MAIA, 2015). A matéria-prima base do biodiesel é escolhida geralmente com base em fatores geoestratégicos e os processos de fabricação podem variar de acordo com esta escolha (KNOTHE, 2018). No Brasil, a Lei 11.097 de 13 de janeiro de 2005 foi introduzido o biodiesel na matriz energética por meio de sua mistura ao diesel mineral utilizado no país, sendo definido como um biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão para substituição parcial ou total dos combustíveis de origem fóssil.

Com o biodiesel na matriz energética brasileira, foram iniciados os leilões para compra do biodiesel, que foram marcados pela variedade de matéria-prima, com destaque para o biodiesel obtido de mamona (MAIA, 2015).

Segundo Knothe, “o biodiesel é miscível com diesel de petróleo em qualquer proporção” e suas blendas são chamadas por acrônimos que começam com a letra B junto com o número da porcentagem de biodiesel (KNOTHE, 2018). Por exemplo, em uma mistura de combustível que tenha 88% de diesel de petróleo e 12% de biodiesel de quaisquer matérias-primas, seu nome será B12 (KNOTHE, 2018).

Quanto mais biodiesel na mistura do combustível, maior é o risco do crescimento de micro-organismos, devido a menor estabilidade química e da alta solubilidade da água no biodiesel. A vida e atividade destes micro-organismos está conectada diretamente com

a presença de água no combustível (KOMARIAH, 2018), além de poder reagir com elementos químicos do combustível gerando ácidos que podem corroer o sistema e gerar partículas que podem saturar os filtros e orifícios causando falha no sistema de injeção. Outro dano causado pela água é a perda de lubrificidade do combustível quando está presente na forma emulsificada (PATEL,2014). Na Figura 5a, é ilustrado um bico injetor novo, na Figura 5b o injetor iniciou o processo de degradação devido ao uso de combustíveis de má qualidade e na Figura 5c ilustra um injetor que sofreu com desgaste devido a exposição de água presente no combustível com o passar tempo.

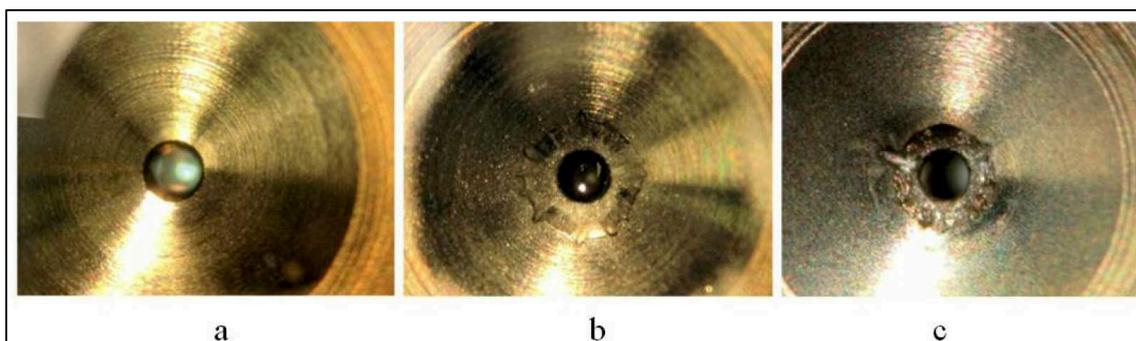


Figura 5 - Bico Injetor Degradado. Fonte: (JOCANOVIC et al 2017).

O biodiesel também pode sofrer uma degradação eletrolítica, por conta da presença de água. A presença de mono- e diglicerídeos, os quais fazem parte da reação de transesterificação do combustível ou mesmo o glicerol, podem ajudar na capacidade do combustível em se emulsificar com a água (KNOTHE, 2018).

De acordo com Lobo, tanto a presença de contaminantes, como fósforo, cálcio magnésio, enxofre provenientes de sua matéria-prima, quanto as estruturas moleculares dos ésteres presentes no biodiesel podem impactar em sua qualidade, como posição e quantidades de insaturações e agrupamentos (LOBO, 2009). Um processo de fabricação pouco eficiente pode ser responsável por resíduos, como: glicerina livre, sabões, álcool residual, catalisadores e água. De acordo com Lobo, “a absorção de umidade e os processos de degradação oxidativa durante o armazenamento do biodiesel contribuem para a presença de água, peróxidos e ácidos carboxílicos de baixa massa molecular” (LOBO, 2009).

Com uma grande proporção de biodiesel na mistura do combustível, se aumenta o risco do desenvolvimento de microrganismos devido à baixa estabilidade química do biodiesel e alta solubilidade da água no biodiesel. A atividade destes microrganismos está diretamente ligada com a presença de água, oxigênio dissolvido, a faixa de temperatura

ótima para o seu desenvolvimento, o ambiente neutro ou alcalino e a presença de compostos apropriados para sua vida no combustível devido ao uso de alguns tipos de aditivos, principalmente os que contêm nitrogênio (KOMARIAH et al, 2018).

### **2.3 Presença de água no diesel/biodiesel e suas características**

De acordo com Oliveira, a contaminação do óleo por água é a contaminação mais comum entre os líquidos e quando a água está acima de seu limite de saturação, fica em forma gotas grandes e é denominada água livre. Se em estado de repouso é possível inclusive observar a divisão entre água e óleo, já que a água é mais densa e se precipita para o fundo do reservatório, porém devido a agitação ou a mistura com outros elementos químicos se transforma em água emulsionada (OLIVEIRA, 2013).

A capacidade de reter água do biodiesel é maior do que a do diesel, chegando a ser cerca de 10 a 15 vezes maior, sendo que a natureza higroscópica do biodiesel é a responsável por esse fenômeno. A indústria do biodiesel não tem muitas informações sobre os efeitos causados e a quantidade desta água absorvida e na mistura durante a armazenagem ou transporte. A hidrofobicidade de ambos combustíveis são diferentes devido a presença de grupos tipo éster no biodiesel, o que ocasiona uma absorção de grande quantidade de água, uma vez que fica com uma polaridade muito mais alta do que a do diesel de petróleo (FREGOLENTE, 2012).

A água pode estar presente no combustível de forma dissolvida ou livre. A incidência de água no óleo sucede na oxidação de partes do sistema de combustível e contaminação do fluido. A corrosão metálica é quando ocorre uma modificação química de um substrato metálico quando em contato a substâncias que possuem a presença de moléculas de água, que em conjunto com o oxigênio ou íons de hidrogênio em um meio condutor, uma forma clara de ver esta ocorrência é se tiver a presença de ferrugem nos componentes que fazem parte do sistema de injeção de combustível do veículo (OLIVEIRA, 2013).

A água emulsionada no diesel é responsável pela redução da lubricidade do combustível. A água no biodiesel pode ser a responsável pela proliferação de microrganismos, assim como pode causar a hidrólise do combustível gerando ácidos graxos livres (LOBO, 2009). Outro problema está relacionado com as emissões do motor, a qual pode exceder a legislação do país, e a utilização de filtros com performance melhorada são essenciais para manter estes requisitos e prolongar a vida útil do motor (PATEL 2014).

Para a quantificação da água no diesel, a norma ASTM D6751:2023 adota um método por centrifugação, enquanto a RANP 07/08 e a EN14214:2019 utilizam a análise colouométrica, conhecida como Karl Fischer (LOBO e FERREIRA, 2009).

Além da formação de ferrugem causada pela corrosão dos metais em contato com a água, os metais também podem ser afetados por ácidos que são produzidos por bactérias que crescem e se desenvolvem na água (OLIVEIRA, 2013). Além dos ácidos gerados pelas bactérias, também é possível a sua geração através da hidrólise de ésteres com a presença de água, gerando ácidos graxos de cadeia longa aumentando acidez do composto (KNOTHE, 2018).

Vários componentes do sistema de injeção diesel são fabricados a partir de aços de alto teor de carbono, sendo assim possuem tendência de sofrer corrosão se em contato com a água. As avarias causadas no sistema de injeção de diesel têm como causadora principal a água que em excesso pode inclusive entrar no sistema e provocar problemas que não podem ser solucionados (KNOTHE, 2018). Possíveis fontes de contaminações internas do combustível estão descritas na Figura 6:

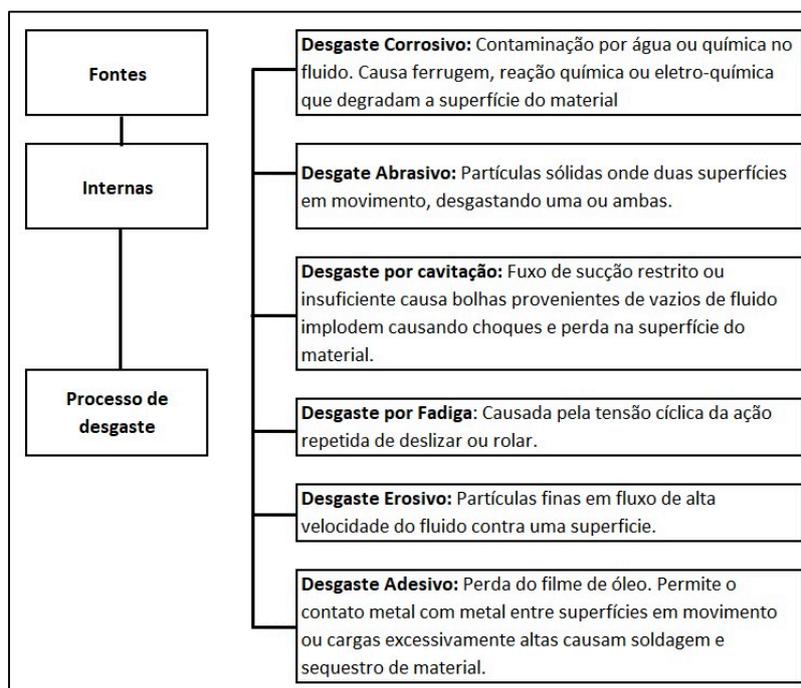


Figura 6 - Fonte de contaminação interna. Fonte: (OLIVEIRA 2013).

As principais causas para a entrada de água no tanque de combustível são: a entrada de umidade através do ar (principalmente no inverno), no momento do abastecimento e a condensação de água no tanque (PETITEAUX, 2009), que pode fazer

com que um combustível de boa qualidade, totalmente aprovado em sua produção, se torne um combustível fora da especificação (YOSHINO et al, 2015).

A contaminação de água nos combustíveis é o maior fator de impacto de performance nos motores diesel. (PATEL, 2014). Além disso, também pode ser responsável pela oxidação eletrolítica no biodiesel (LOBO, 2009).

O biodiesel é mais higroscópico do que o diesel puro de petróleo e possui uma afinidade maior com a água por causa da presença de ésteres alquílicos e estrutura molecular insaturada, que faz com que a quantidade de água aumente no combustível. (AROUNI, 2018). E possui característica estrutural polar devido a grupos de ésteres carboxilatos, e com a adição de biodiesel no diesel é aumentada a capacidade de absorção de água no combustível (KOMARIAH, 2018). A afinidade com a água é atribuída a natureza polar dos alquil-ésteres e ácidos insaturados que estão presentes no biodiesel (YANG et al, 2008).

A mistura de biodiesel no diesel faz aumentar a quantidade de água no combustível, além de reduzir a tensão interfacial entre eles, chamado pela sigla IFT, entre a água e o combustível, formando emulsões mais estáveis e gerando pequenas gotículas de água (AROUNI, 2018).

Existe um limite da quantidade de água que pode estar presente no diesel, definido pela EN 590:2009, que é de 200 ppm, um nível aceitável pelas montadoras de motores diesel da Europa e EUA. Porém, esta quantidade pode aumentar por conta de condensação, armazenamento inadequado do combustível, transferência, abastecimento e transporte entre refinaria e postos (AROUNI, 2018).

Petiteaux, realizou um teste no qual verificou-se a interação da água com o diesel, e no teste foram utilizados diesel de petróleo puro, biodiesel 100 % SME (éster metílico de soja) e uma mistura de diesel com 20 % de biodiesel RME (éster metílico de óleo de colza), os combustíveis foram misturados com 20 % de água deionizada, e os resultados estão apresentados na Tabela 2, onde é mostrado que no diesel puro 100 % da água adicionada é removida e sua tensão interfacial entre combustível e água é de 16 mN/m e valores de quantidade de água de 70 ppm antes e depois do teste, já com o SME, 87 % da água consegue ser recuperada após 1 hora e sua tensão interfacial com a água é de 11 mN/m e antes mesmo do teste iniciar já conta com 500 ppm de água e restando após 24 horas 1050 ppm de água, enquanto o B20, tem 98,5 % de sua água recuperada e uma tensão interfacial com a água de 13 mN/m e possui 190 ppm de água antes do teste e após 24 horas sobram 230 ppm (PETITEAUX, 2009).

Tabela 2 - Interação água diesel. Fonte: (PETITEAUX e MONSALIER 2009).

	Diesel puro	SME	B20 (RME)
Água recuperada após 1 hora	100 %	87 %	98,5 %
Quantidade de água antes do teste	70 ppm	500 ppm	190 ppm
Quantidade de água no combustível após 24 horas da mistura	70 ppm	1050 ppm	230 ppm
Tensão Superficial (mN/m)	16 ± 1	11 ± 1	13 ± 1

No tanque do veículo onde a agitação é mínima, a água e o diesel podem formar uma única interface pois os líquidos não são miscíveis. Porém quando a água passa através da bomba de combustível sendo exposta a tensão de cisalhamento do combustível, se transforma em sua forma emulsificada. Na Figura 7 é mostrada a quebra das moléculas de água em partículas menores após a passagem pela bomba, por conta do cisalhamento que ocorre durante o processo (AROUNI, 2018).

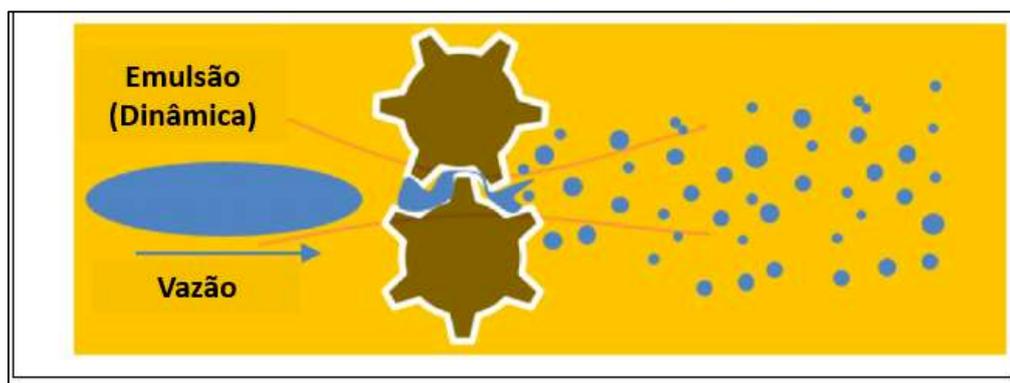


Figura 7 - Moléculas de água no biodiesel. Fonte: (AROUNI Et al. 2018).

Uma emulsificação pode ser definida como a mistura de dois líquidos nos quais gotículas macroscópicas ou ultramicroscópicas são misturadas umas nas outras. Em uma emulsão termodinamicamente instável o sistema consiste em ao menos duas fases de líquidos imiscíveis, porém um terceiro líquido pode agir como surfactante fazendo a

ligação destes líquidos com o auxílio de um agitador mecânico (AVESH, 2015), que é o que ocorre quando o combustível passa pela bomba, sendo o biodiesel este agente de ligação dos líquidos imiscíveis.

A água dissolvida não tem grande impacto na qualidade do combustível ou na performance do motor, no entanto, em baixas temperaturas pode auxiliar no congelamento do combustível causando problemas no sistema de injeção de combustível (KULKARNI et al, 2012).

Normalmente se presta atenção somente na água livre ou emulsificada presente no combustível, porém a água que está dissolvida pode causar uma hidrólise no biodiesel quebrando as moléculas de combustível, aumentando a sua surfactância, devido a formação de ácidos carboxílicos, além de promover o crescimento de bactérias e a oxidação do combustível (YANG et al, 2008). O surfactante é um composto que diminui a tensão superficial entre dois líquidos, ou entre um líquido e um sólido, e podem agir como detergentes e emulsificadores (AVESH, 2015). Na Figura 8 é ilustrado o aumento da quantidade de água no combustível em ppm em relação a porcentagem de biodiesel na mistura.

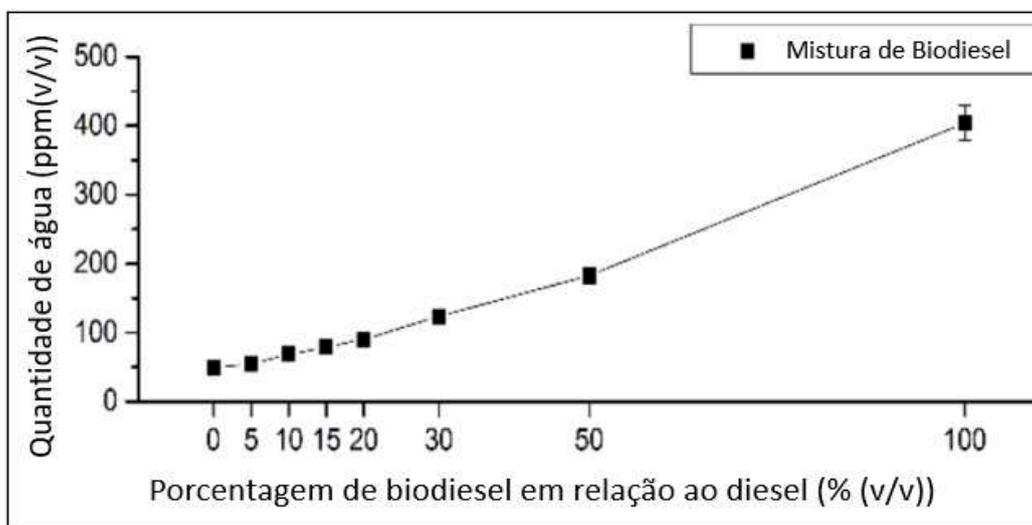


Figura 8. Água no diesel (ppm). Fonte: (AROUNI, et al 2018).

Outro teste foi realizado por Yoshino e mostra a absorção de água de diversas misturas de diesel e biodiesel durante 16 dias de contato direto com a água. De acordo com a Figura 9, enquanto os combustíveis com baixo teor de biodiesel praticamente permanecem com a mesma quantidade de água absorvida (B0, B5, B20 e B50), o

biodiesel puro (B100) em 2 dias já salta de aproximadamente 500 ppm para 1300 ppm (YOSHINO, 2013).

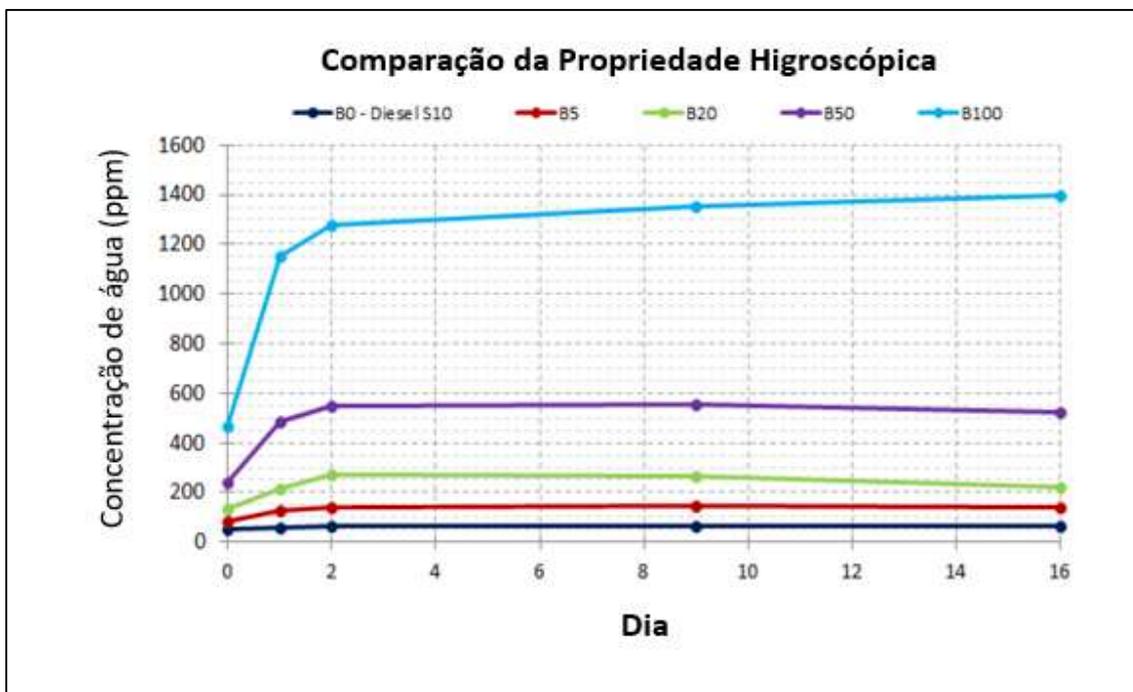


Figura 9 - Concentração de água no diesel em relação aos dias. Fonte: (YOSHINO, et al. 2015).

O biodiesel tende a agir como um surfactante, pois em geral são compostos por moléculas anfífilas, que são formadas por uma região hidrofílica que é solúvel em água e outra região hidrofóbica que não se solubiliza com a água, mas é solúvel em lipídeos e solventes orgânicos. (SCHWAB, 1988 apud LORA e VENTURINI, 2012), conforme ilustrado pela Figura 10 que reduzem a tensão superficial da água e a estabilizam em pequenas gotículas no combustível. Os surfactantes podem prevenir o aumento destas gotículas aumentando a resistência a coalescência e diminuindo a eficiência de sua separação do diesel (AROUNI, 2018). Os surfactantes são utilizados para diminuir a tensão superficial da água (DATTA et al. 2018). São compostos que abaixam a tensão superficial de um ou dois líquidos, eles podem agir como detergentes, agentes umectantes, emulsificantes, espumantes e dispersantes (AVESH, 2015), dificultando assim a separação da água do diesel (PATEL 2014).

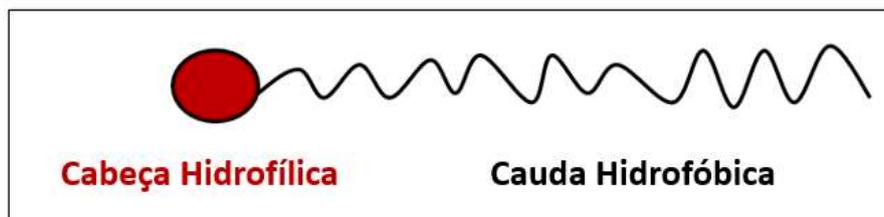


Figura 10 - Molécula Anfifílica. Fonte: (Autor).

De acordo com Yoshino em um teste utilizando a norma ISO 16332 com a adição de 5 % de biodiesel em uma amostra de diesel, a eficiência de separação de água do diesel caiu de 95 % para 85 %, por conta da queda da tensão superficial da água (IFT) de 22,9 mN/m para 12,9 mN/m (YOSHINO, 2009).

O aumento da surfactância pode refletir na diminuição da tensão interfacial entre o diesel e a água, além de dificultar a separação das micro partículas de água. Com o baixo IFT, quanto menor for o tamanho da gotícula de água, mais difícil será a sua separação, mesmo utilizando meios filtrantes coalescentes a base de compósitos. Se o IFT for alto, as gotículas de água ficam maiores, gerando emulsões menos estáveis e mais fáceis de se separar do diesel (YANG, 2007).

Com o aumento da quantidade de biodiesel na mistura, ocorre uma queda significativa no IFT entre a água e o diesel, o que explica a maior emulsificação entre eles (PRADO, 2013). Na Figura 11, é ilustrada a queda da tensão interfacial entre combustível e água em relação a porcentagem de biodiesel na mistura.

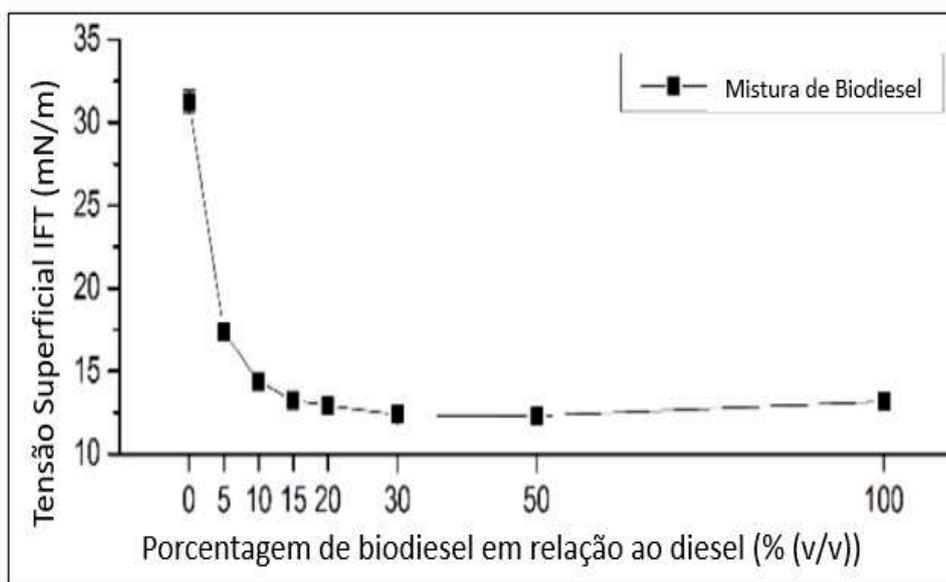


Figura 11 - IFT no Diesel. Fonte: (AROUNI, et al. 2018).

Como mostrado na Figura 11, a tensão superficial entre água e diesel cai até a proporção B20, após isso, se mantém constante (AROUNI, 2018).

De acordo com Prado, a alteração do valor do IFT pode ser atribuída a ação dos ésteres de ácidos graxos que são compostos de uma longa cadeia apolar com extremidade polar presentes no biodiesel, que poderia explicar uma maior emulsificação da água no diesel com a adição de biodiesel, já que com esta característica as moléculas do biodiesel podem ter reações tanto com as moléculas da água, quanto com as do diesel puro (PRADO, 2013).

Quanto menor o IFT, menores são as gotículas de água formadas e mais estável é a emulsão, assim dificultando sua separação do combustível. Na Figura 12 é possível notar a queda de eficiência de filtragem de acordo com a queda do IFT (YANG 2007).

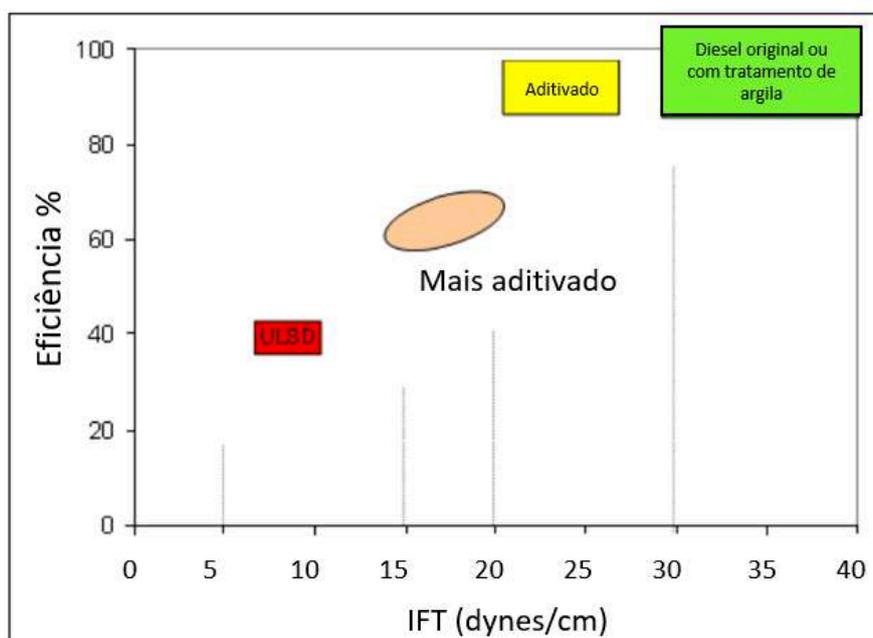


Figura 12 - Eficiência de filtragem em relação a queda de IFT. Fonte: (YANG Et al 2007).

Uma ideia comum é que se consegue aumentar a eficiência de separação de água, mesmo emulsificada, aumentando a repelência a água do meio filtrante, porém isso é correto até um certo limite, que está relacionado ao IFT entre água e diesel. Na Figura 13(a) é mostrado uma gotícula de água retirada de uma emulsão em um filtro que a eficiência foi de 84,2 %, contra uma que foi retirada de um filtro com 99,3 %, mostrada na Figura 13(b), porém com diesel tratado para chegar a um IFT de 35 mN/m. Em emulsões com o IFT mais baixo, a gotícula de água consegue se deformar e passar através dos capilares do meio filtrante, como mostrado na Figura 13(a), já quando este IFT é mais

alto a gotícula de água não consegue passar pelo capilar do meio filtrante, conforme Figura 13(b) (YANG,2007).

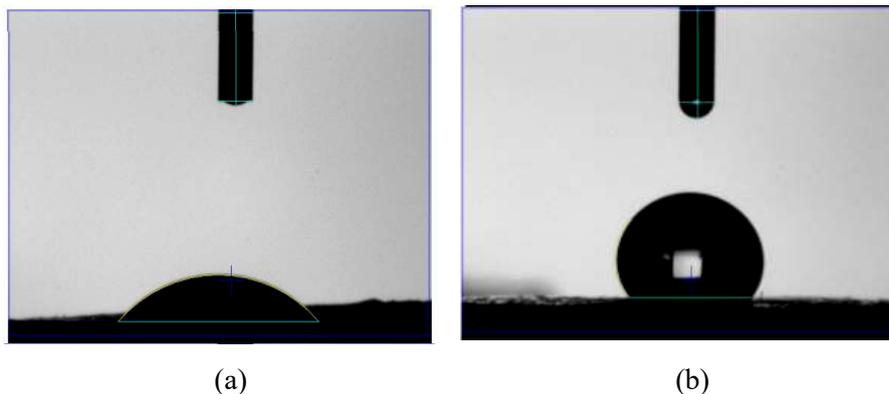


Figura 13 - Ângulo de contato da água no meio filtrante. (a) baixo IFT. (b) alto IFT). Fonte: (YANG, Et al. 2007).

Um estudo realizado por Yoshino, mostra que uma concentração entre 0 % a 20 % de biodiesel, a separação de água do combustível tende a se tornar mais difícil conforme a concentração de água aumenta, e acima de 20 % de biodiesel esta separabilidade se mantém constante até mesmo com um combustível feito somente de biodiesel, conforme pode ser observado na Figura 14, que mostra o tempo de separabilidade da água do diesel em relação a quantidade de biodiesel adicionada ao combustível (YOSHINO, 2015).

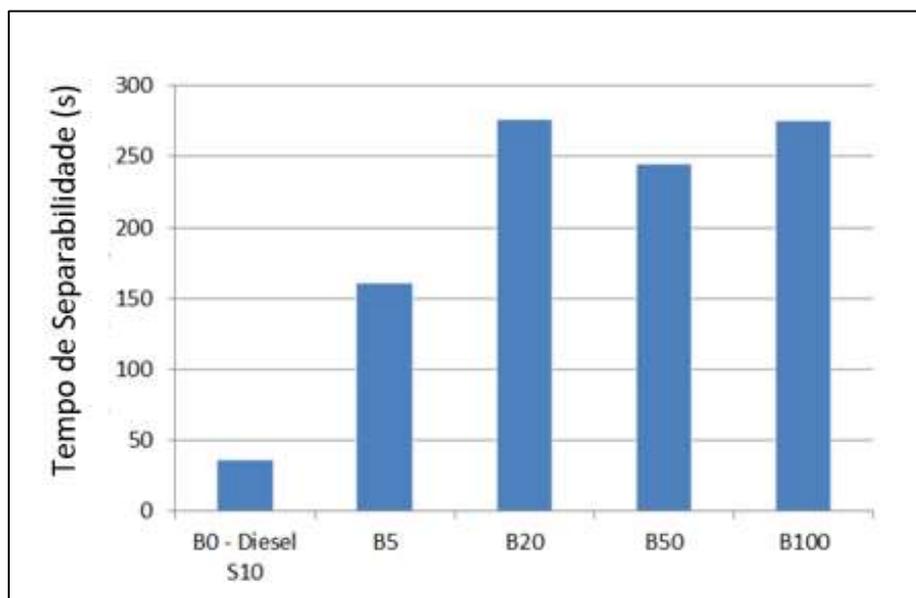


Figura 14 - Separabilidade de Água do Diesel. Fonte: (YOSHINO, et al. 2015).

Outro fator importante que diminui a eficiência na separação de água do diesel é o tamanho da gotícula de água, denominada  $Dv50$ , sendo que quanto menor o seu valor, mais difícil é a separação. Na Tabela 3 é mostrado os valores de  $Dv50$  em pressão atmosférica e a uma pressão de 4bar para diversas concentrações de biodiesel: 5, 10, 20, 30, 50 e 100 % da mistura do combustível.

**Tabela 3.** Gotículas de água dispersas em biodiesel em pressão atmosférica e a 4 bar. Fonte: (AROUNI, 2018).

Combustível Testado	Pressão Atmosférica	Pressão de 4bar
REF	$69,9 \pm 0,23$	$66,27 \pm 0,6$
B5	$49,81 \pm 0,1$	-
B10	$44,07 \pm 0,08$	$41,21 \pm 0,09$
B20	$40,13 \pm 0,06$	$38,03 \pm 0,07$
B30	$35,38 \pm 0,05$	$33,79 \pm 0,05$
B50	$34,4 \pm 0,07$	$31,78 \pm 0,05$
B100	$32,81 \pm 0,06$	$31,54 \pm 0,05$

Na Figura 15, é ilustrada a queda da tensão superficial entre água e diesel de acordo com a diminuição do tamanho de gotícula de água presente no combustível.

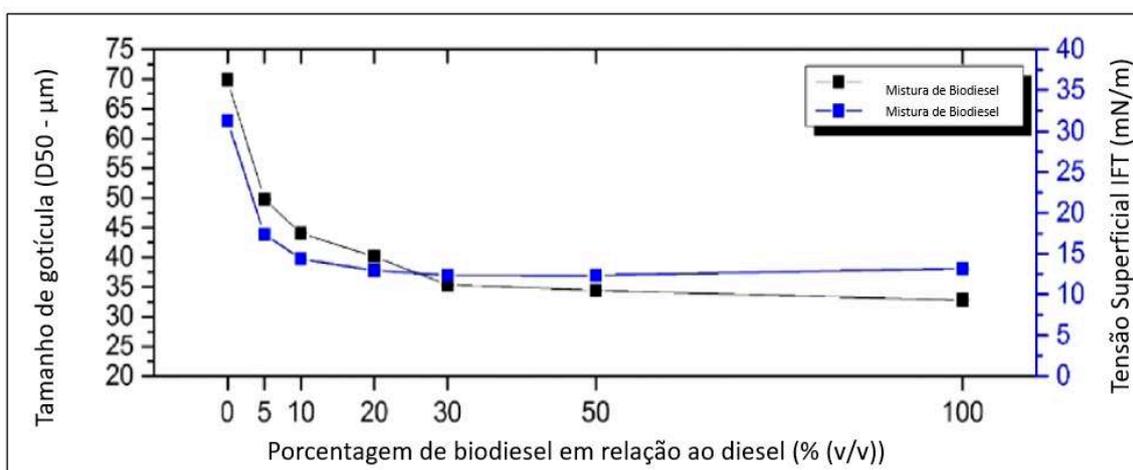


Figura 15 - Tamanho da gotícula de água no diesel. Fonte: (AROUNI, et al. 2018).

A água dispersa no diesel geralmente tem tamanhos inferiores a  $100\mu\text{m}$  e é comumente separada utilizando um filtro coalescente (PATEL, 2014). Em tamanhos

superiores a  $10\mu\text{m}$  de acordo com vários estudos feitos por AGARWAL (AGARWAL, 2013), é possível que seja feita a sua separação do diesel utilizando um filtro coalescente.

Quando a água e o diesel têm baixa tensão superficial, a sua separação se torna mais difícil, tornando os meios filtrantes hidrofóbicos não recomendados, pois o meio filtrante se torna sensível a velocidade do fluido, não conseguindo fazer a separação (PATEL, 2014). A filtração por coalescência é muito efetiva para a separação de água em emulsões que contém gotículas de água com diâmetros menores do que  $50\mu\text{m}$  e os fatores de controle para que esta filtração seja efetiva são: o tamanho das fibras do meio filtrante e a sua molhabilidade ou umectação (SHIN, 2004).

## 2.4 Importância da filtragem do combustível e separação de água

Nos motores diesel deve ser assegurado que o sistema de injeção de combustível esteja livre de sujidades e contaminantes, pois se comparados a sistemas do ciclo Otto, são muito mais sensíveis, além do próprio diesel possuir maior sujidade em relação a gasolina e o álcool. A necessidade de se ter um filtro de muito boa qualidade se intensificaram com o surgimento dos sistemas de alimentação *Common Rail* (BOSCH, 2005). De acordo com usuários de biodiesel, os maiores problemas ocorridos com sua utilização são: 40% contaminação com água, 25% devido a glicerina, 20% devido ao crescimento microbiano, 10% por misturas incorretas e 5% outros (YANG et al, 2008).

A função de um filtro separador de água é remover a água livre e emulsificada no diesel antes de chegarem no sistema de combustível, mantendo uma vazão constante e uma baixa perda de carga no sistema (AROUNI, 2019). A separação de água do combustível para os motores diesel é um requisito crítico para os motores modernos, devido aos problemas que a água pode ocasionar, por conta disso são geralmente instalados nos chassis dos caminhões e ônibus entre o tanque a bomba de transferência de combustível, um pré-filtro com esta função (YOSHINO, 2015). Geralmente os motores a diesel são equipados com um filtro que tem a função de separar a água do diesel, juntando gotículas muito pequenas de água em gotas maiores que podem ser removidas do combustível, porém de acordo com Knothe, esses filtros podem ser ineficientes na utilização do biodiesel (KNOTHE, 2018).

Os filtros mais comuns para esta aplicação são feitos com celulose tratada com resinas de silicone em sua superfície para repelir a água, que colidem no meio filtrante e caem no fundo do filtro por gravidade (PATEL 2014). Por isso os filtros devem ser

compatíveis com o biodiesel e por conta do aumento de substâncias orgânicas podem ter uma vida reduzida, por isso é aconselhável a utilização de meios filtrantes multicamadas, sendo feito o uso de microfibras sintéticas (BOSCH, 2005). É muito importante separar a água livre do diesel de forma eficiente, mesmo com a má qualidade do diesel ou biodiesel. Testes laboratoriais comprovam que com a adição de biodiesel a eficiência de um filtro pode cair de 95% para 50%, nas mesmas condições (PETITEAUX 2009).

Uma função vital do filtro é a separação de água emulsionada e livre para que sejam evitados problemas ocasionados pela corrosão de componentes uma separação de água maior do que 93% é indispensável para conjuntos que fazem uso do sistema de injeção *Common Rail*, além das próprias bombas de transferência de combustível. Quando aplicado em sistemas com requisitos que exigem uma alta taxa de eficiência de filtragem e se separação de água do diesel, é mais vantajoso a utilização de mais de um filtro, sendo o separador de água o primário, instalado geralmente na sucção do sistema. Esses pré-filtros são geralmente utilizados em países com qualidade de combustível ruim (BOSCH, 2005).

De acordo com Brunetti é fundamental que não haja contaminantes no combustível, pois podem entupir os filtros e provocar desgastes no sistema de injeção. Além de contaminantes sólidos, a água proveniente da respiração natural dos tanques de combustível dos postos e dos veículos também pode causar vários danos ao veículo, como: a corrosão do sistema de injeção e o aumento de emissões, pois com a entrada de água no tanque, também entram microrganismos, por exemplo: fungos e bactérias que se alimentam de diesel e podem aumentar ainda mais a sua proliferação caso haja biodiesel no combustível, gerando uma biomassa (borra) (BRUNETTI, 2012).

De acordo com Stanfel, “apesar das mudanças na tensão superficial do combustível, a água continua sendo um contaminante do combustível que preocupa pela corrosão dos componentes metálicos e a propagação do crescimento de seres microbiológicos” (STANFEL, 2012).

Em alguns casos, quando a quantidade de água é muito grande, o diesel fica turvo, com o tamanho das gotículas de água entre 5 e 10  $\mu\text{m}$  é muito difícil sua decantação e separação, que pode ser vista pela lei de sedimentação de Stokes, apresentada na Equação 1. Como a massas específicas do diesel e água são próximas, a viscosidade do diesel é considerável e o raio das gotículas de água ao quadrado for muito pequeno, então a velocidade de decantação das partículas de água será muito demorada (BRUNETTI, 2012).

$$v_s = \frac{2(P_p - P_f)}{9\mu} gR^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$v_s$ : velocidade de sedimentação

$P_p$ : massa específica do diesel

$P_f$ : massa específica da água

$\mu$ : viscosidade dinâmica ou absoluta

$g$ : aceleração da gravidade

$R$ : raio das partículas de água

De acordo com Brunetti, “a água se dissolve normalmente nos hidrocarbonetos em pequenas quantidades, apesar de aparentemente não ser solúvel. No processo de produção do diesel parte do vapor d’água utilizado fica dissolvido no diesel, mas a maioria é retirada no sistema de secagem, restando teores abaixo dos 100 ppm de água” (BRUNETTI, 2012).

Na Figura 16(a), é ilustrado um meio filtrante de celulose em contato com o diesel B20, em estágio inicial, na Figura 16(b) após 1500 horas e na Figura 16(c) após 2500 horas, onde é possível verificar que o combustível forma uma película em torno do meio filtrante, o que pode ocasionar a diminuição da eficiência da separação de água.



(a)

(b)

(c)

Figura 16 - Biodiesel em contato com o meio filtrante. (a) Papel filtrante inicial. (b) Após contato de 1500 horas com diesel B20. (c) Após contato de 2500 horas com diesel B20 (KOMARIAH, et al. 2018).

De acordo com Petiteaux, experimentos confirmam a alta estabilidade da emulsificação das gotículas de água e uma perda na eficiência de separação de água do diesel, em testes realizados com B30, o resultado dos testes foi menor a 20% de eficiência

após poucos quilômetros rodados. Além das dificuldades para a separação de água do combustível com o acréscimo do biodiesel, outro ponto importante é que esta análise deve ser feita durante a vida do filtro, mantendo a performance (PETITEAUX, 2009).

Na Figura 17 é mostrado o resultado de separação de água de filtros utilizados em testes de rodagem com diesel de petróleo seguindo a norma EN590 e também com diesel B30, ou seja, com 30% de biodiesel em sua composição. Os resultados mostram que os filtros que estavam nos veículos que rodaram com o combustível B30 tiveram uma eficiência de separação de água após o uso bem mais baixa em relação aos que rodaram com o diesel EN590, também é mostrado no gráfico a vida útil do filtro, apresentada como saturação, ou seja mesmo em filtros que estão em começo de vida, com saturação em 7%, mas que rodaram com diesel B30 tiveram uma baixa eficiência em relação aos filtros que rodaram com o diesel normatizado (PETITEAUX, 2009).

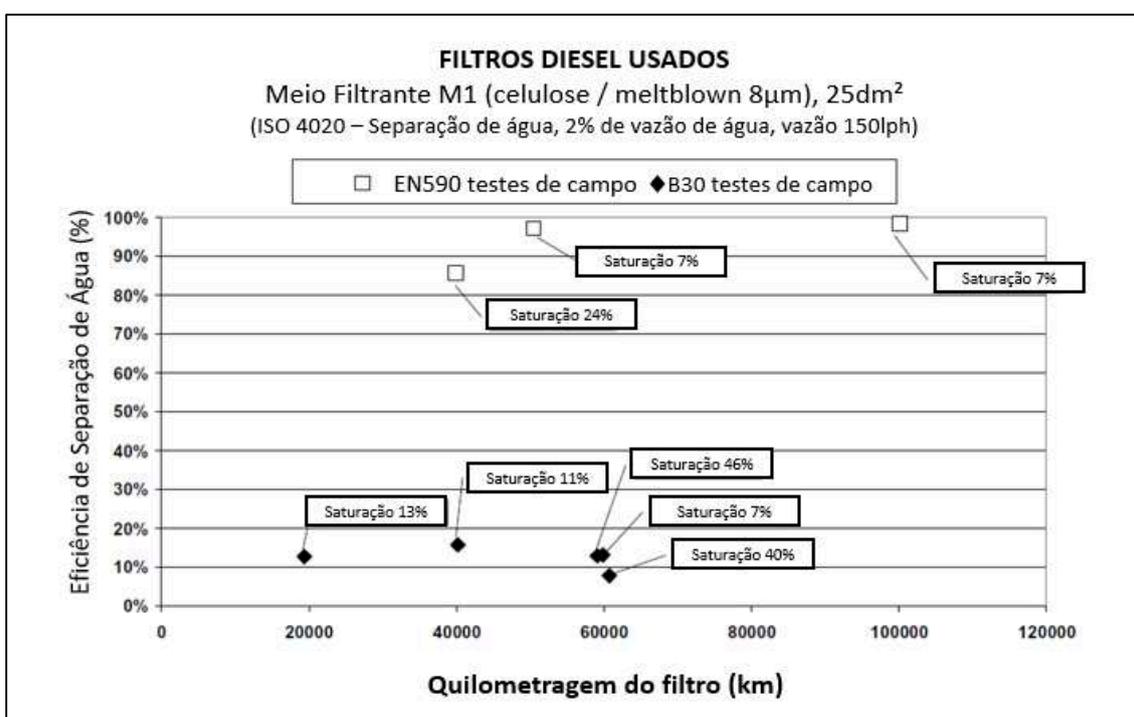


Figura 17 - Separação de Água pela quilometragem de filtros usados. Fonte: (PETITEAUX, 2009).

A análise dos meios filtrantes utilizados nos testes mostrados na Figura 17 mostra que existe uma correlação deste fenômeno da diminuição da separação de água do filtro com uma modificação na característica hidrofóbica do meio filtrante por conta de uma oxidação do biodiesel, que deposita particulados na superfície das fibras do meio filtrante. Os filtros utilizados tinham duas camadas de celulose mais uma mídia de *meltblown* e mesmo assim, perderam razoavelmente sua eficiência devido as macro moléculas de

metil-ésteres que ficaram depositadas na superfície das fibras de meltblown, fazendo-as perder suas propriedades hidrofóbicas, conforme mostrado pela Figura 18 através de uma microscopia eletrônica (PETITEAUX 2009).

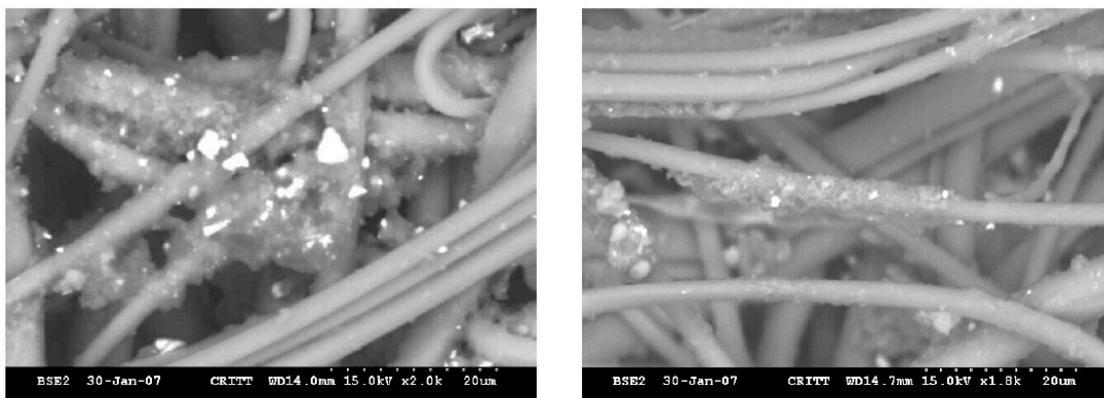


Figura 18 - Biodiesel em contato com o meio filtrante. Fonte: (PETITEAUX, 2009).

Um grande número de parâmetros é decisivo para a performance da separação de água, por exemplo: tamanho da gotícula de água, concentração da emulsão, diferença de densidade e tensão superficial entre diesel e água, presença de um surfactante, condições de operação (velocidade superficial, temperatura, vazão) propriedades do filtro, como: meio filtrante, tamanho dos poros, diâmetro das fibras, porosidade, espessura, permeabilidade e a geometria do filtro (AGARWAL, 2013).

Quando os contaminantes são trazidos pelo diesel para a superfície do meio filtrante, ela o cobre, fazendo com que perca as propriedades hidrofóbicas, reduzindo cada vez mais conforme o diesel é filtrado (YOSHINO et al, 2015).

Na Tabela 4 é mostrada a classificação de particulados de acordo com a norma ISO4406, que determina a quantidade de partículas por ml que um fluido pode ter de acordo com cada classificação, na Tabela 5 são descritas essa classificação dos tamanhos de partículas e a concentração de água aceita de acordo com algumas organizações de grande relevância para sistema diesel.

**Tabela 4.** Classificação ISO4406:2021. Fonte: (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2021).

Escala de partículas	Número de partículas por ml	
	Mais de	Até e inclusive
> 28	2.500.000	-
28	1.300.000	2.500.000
27	640.000	1.300.000
26	320.000	640.000
25	160.000	320.000
24	80.000	160.000
23	40.000	80.000
22	20.000	40.000
21	10.000	20.000
20	5.000	10.000
19	2.500	5.000
18	1.300	2.500
17	640	1.300
16	320	640.
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2,5	5
8	1,3	2,5
7	0,64	1,3
6	0,32	0,64
5	0,16	0,32
4	0,08	0,16
3	0,04	0,08
2	0,02	0,04
1	0,01	0,02
0	0	0,01

Tabela 5 - Quantidade de partículas e concentração de água. Fonte: (JOCANOVIC et al, 2017).

Organização	Partículas de acordo com a ISO 4406	Água
Bosch	11/8/6 no injetor	<200 ppm
CAT	18/16/13 na armazenagem 18/16/13 em armazenagem	200ppm
Cummins	15/13/10 no tanque do veículo 12/9/6 no injetor	<200 ppm
Convenção Mundial	18/16/13	Sem água livre, dissolvida < 200 ppm

## 2.5 Meio Filtrante

O meio filtrante é o coração do filtro e existem diversos tipos de materiais que podem ser utilizados, como: celulose, tecidos, não tecidos, fibras sintéticas. (PURCHAS, 2002) O meio filtrante é o material empregado no elemento filtrante responsável pela retenção de partículas que contaminam um sistema (OLIVEIRA, 2013). O meio filtrante é qualquer material que, em condições de operação de filtragem é permeável a um ou mais componentes de uma mistura, solução ou suspensão e é impermeável para os demais componentes (SUTHERLAND, 2008).

Existem dois tipos de meio filtrante de celulose do tipo barreira, os que possuem uma resina bloqueadora de água em sua superfície com ação hidrofóbica, e os que possuem apenas celulose em sua composição e possuem ação hidrofílica, de absorver água. Na Figura 19 é ilustrada a diferença dos meios filtrantes.



Figura 19 - Tipos de Meio filtrante de um filtro tipo barreira. Fonte: (Autor).

### 2.5.1 Celulose

As fibras de celulose são originárias da madeira e o papel filtrante é fabricado a partir de uma pasta de celulose, que tem suas fibras depositadas aleatoriamente para formar a folha de papel e para posterior prensagem e secagem para atingir o teor de umidade necessário (SUTHERLAND, 2008), para que possa ser utilizada para diversos fins, como a filtração. (PURCHAS, 2002).

O meio filtrante feito da celulose não possui regularidade em sua construção, com isso, sua eficiência pode variar de um ponto a outro no mesmo elemento filtrante, pois possui uma estrutura com porosidade irregular (OLIVEIRA, 2013). Sua popularidade é proveniente de sua alta aplicação e fácil fabricação. O processo de fabricação do papel compreende a dispersão de fibras para formar uma suspensão em água, que é de vital importância para o processo, pois é necessário garantir que as fibras de celulose estejam separadas uma das outras e sua estrutura parcialmente desintegrada e fibrilada, em seguida, filtrá-la por meio de uma malha metálica para produzir uma manta fina, que pode ser comprimida e seca. Embora qualquer material fibroso possa ser potencialmente processado desta forma, a folha resultante só terá resistência suficiente para ser usada se as fibras se ligarem, seja por causa das propriedades intrínsecas ou por impregnação da folha com um adesivo ou resina adequada (PURCHAS, 2002). Na Figura 20 é mostrado o processo de obtenção do meio filtrante, tendo como matéria-prima a celulose, envolvendo as fases da dispersão das fibras em água, posteriormente estas fibras são desidratadas e passam por um processo de secagem até o bobinamento.

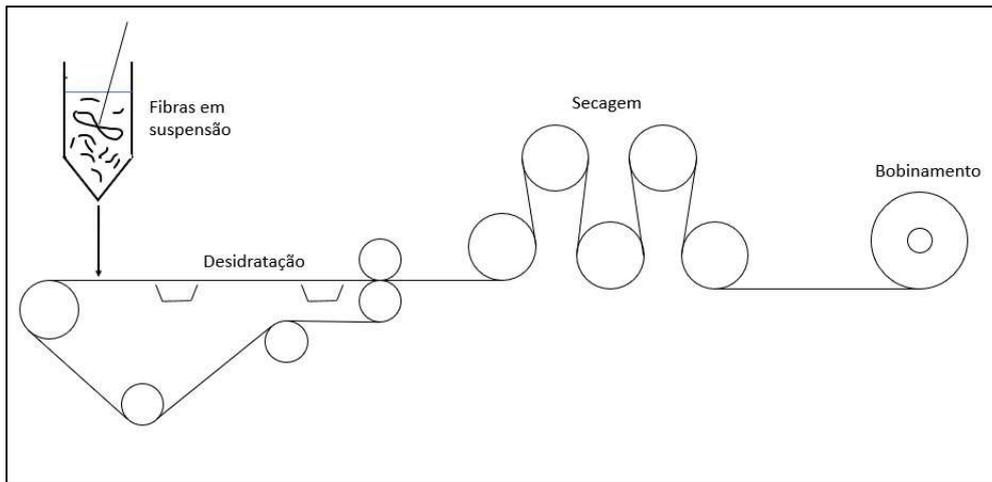


Figura 20 - Fabricação do meio filtrante de Celulose. Fonte: (PURCHAS, 2002).

Com a variação do tratamento das fibras e a natureza da matéria-prima, a estrutura do papel feito com as fibras da celulose pode ser controlada, gerando uma gama de produtos com diferentes permeabilidades, porosidades e resistência. A resistência do papel pode ser aumentada com a impregnação do papel com resinas, especialmente quando o meio filtrante será utilizado com diesel, pois a absorção de água pode reduzir a sua resistência. Papéis de diferentes camadas podem combinar uma grande quantidade de materiais e reagentes químicos, para que possam alcançar uma determinada função, produzidos por laminação utilizando uma variedade de aglutinantes e adesivos (PURCHAS E SUTHERLAND, 2002). Na Figura 21, é mostrado um papel filtrante plissado à base de celulose, porém com uma camada de não tecido, fabricada por processo de *meltblown*.

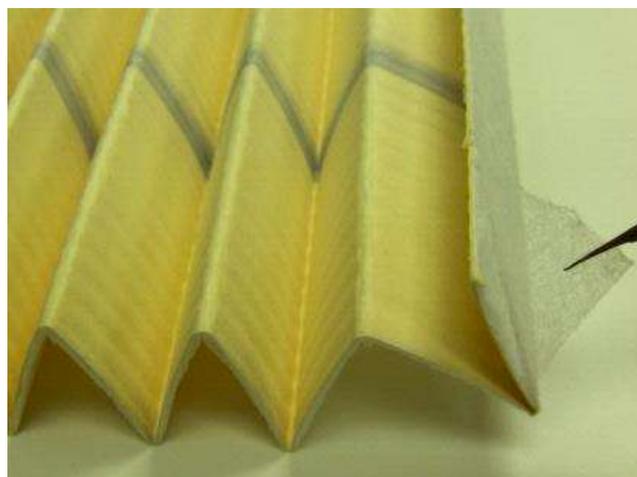


Figura 21. Papel filtrante com não tecido. Fonte: (Autor).

Na Figura 22 é ilustrado por meio de imagem computadorizada as fibras de celulose e dois tipos de fibras sintéticas (cor rosa e cor verde) em um meio filtrante com várias camadas. Na camada superior é composta majoritariamente de um tipo de fibra sintética em forma de não tecido depositada no meio filtrante de celulose através do processo de meltblown, e na camada inferior a celulose está misturada com outro tipo de fibra sintética que foi adicionada em seu processo de fabricação.

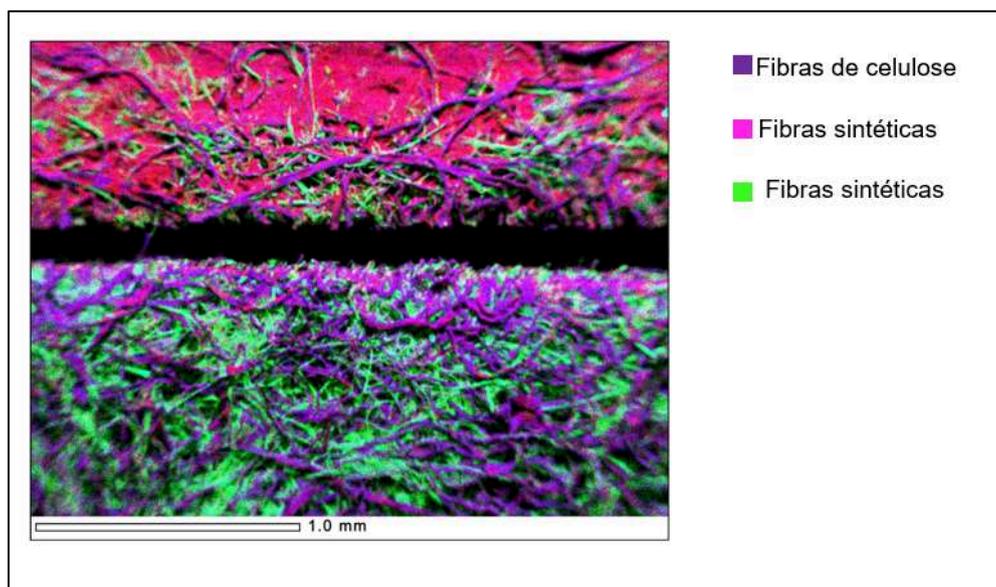
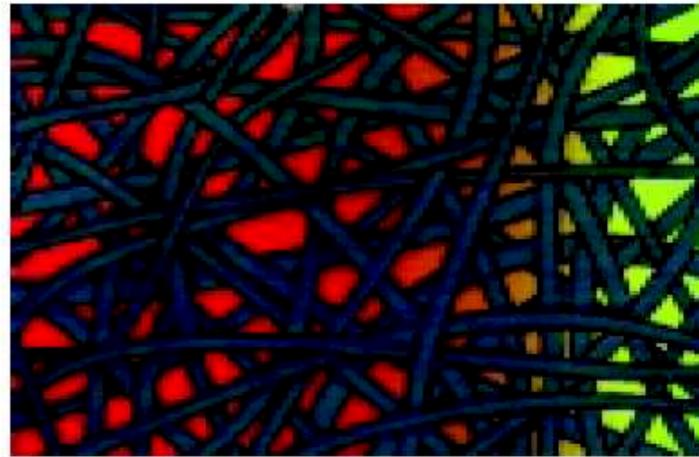


Figura 22 - Disposição das fibras de um meio filtrante multicamadas. Fonte: (Autor).

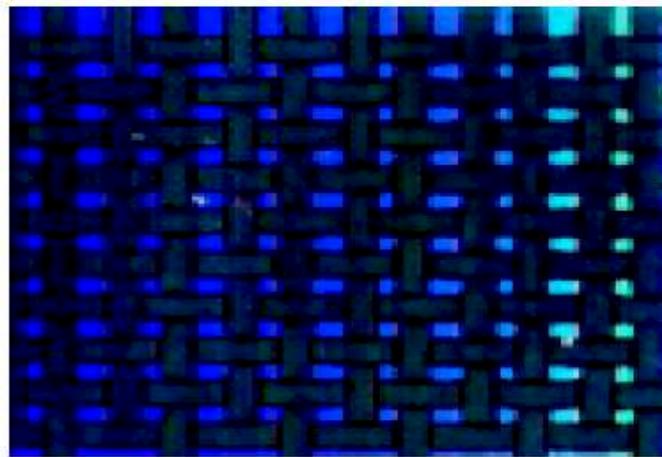
### 2.5.2 Não tecidos

A definição de um não tecido, segundo a NBR-13370, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) é “uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direccionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes”.

De acordo com Maroni para uma melhor compreensão do que é um não tecido é fundamental saber o que é um tecido, que segundo a ABNT/TB-392 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991) “é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro conjunto de fios de trama, formando ângulo de (ou próximo a) 90°.” Na Figura 23 é ilustrado como é a malha de um não tecido e na Figura 24 o de um tecido (MARONI,1999).



**Figura 23.** Malha de Nãotecido. Fonte: (MARONI, 1999).



**Figura 24.** Malha de Tecido. Fonte: (MARONI, 1999).

Existem muitas formas de fabricação de um nãotecido, classificados pelos seu processo de fabricação e transformação, matéria-prima, propriedades das fibras, consolidação, gramatura. No que se diz respeito a formação da manta tem-se três tipos: Via Seca, Via Úmida e a Via Fundida (MARONI, 1999).

De acordo com Maroni no método de Via Fundida são incluídos os nãotecidos de fiação contínua que são fabricados por extrusão e por via sopro, conhecido como *meltblown*, ilustrado na Figura 25. Para a fabricação deste tipo de não tecido um polímero termoplástico é fundido através de uma fieira com furos pequenos que são solidificados por um fluxo de ar quente que é soprado em alta velocidade em uma tela que forma a manta (MARONI, 1999).

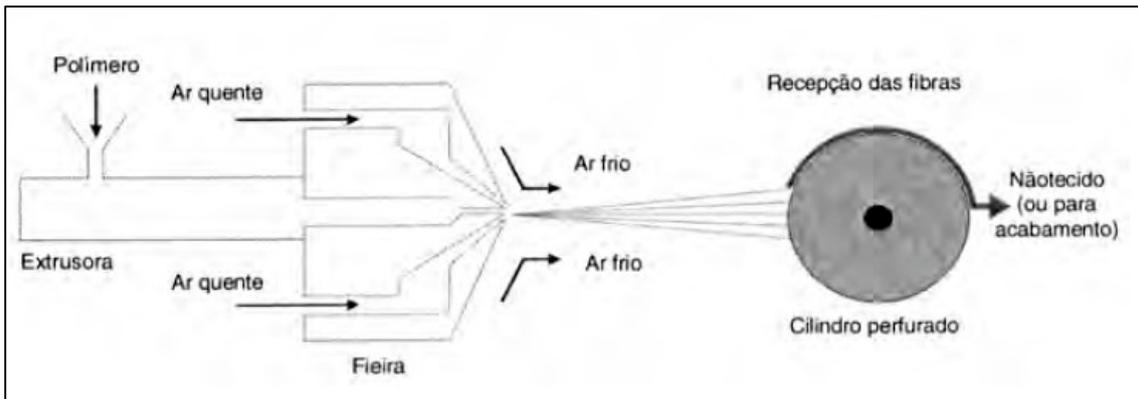


Figura 25 - Processo de fabricação *Meltblown*. Fonte: (MARONI, 1999).

### 2.5.3 Meio filtrantes coalescentes

O funcionamento de um meio filtrante coalescente consiste em ter várias camadas com objetivos diferentes dentro do filtro. A primeira camada é responsável pela filtração de particulados, a camada seguinte é projetada para que seja realizada a coalescência, que significa: unir, aglutinar, no caso as moléculas de água, que por conta do biodiesel estão com seu tamanho reduzido, além de estarem emulsificadas no combustível. Por fim, a terceira camada é responsável pela separação desta água, agora em tamanho de partícula maior em relação ao restante do diesel, conforme ilustrado na Figura 26.

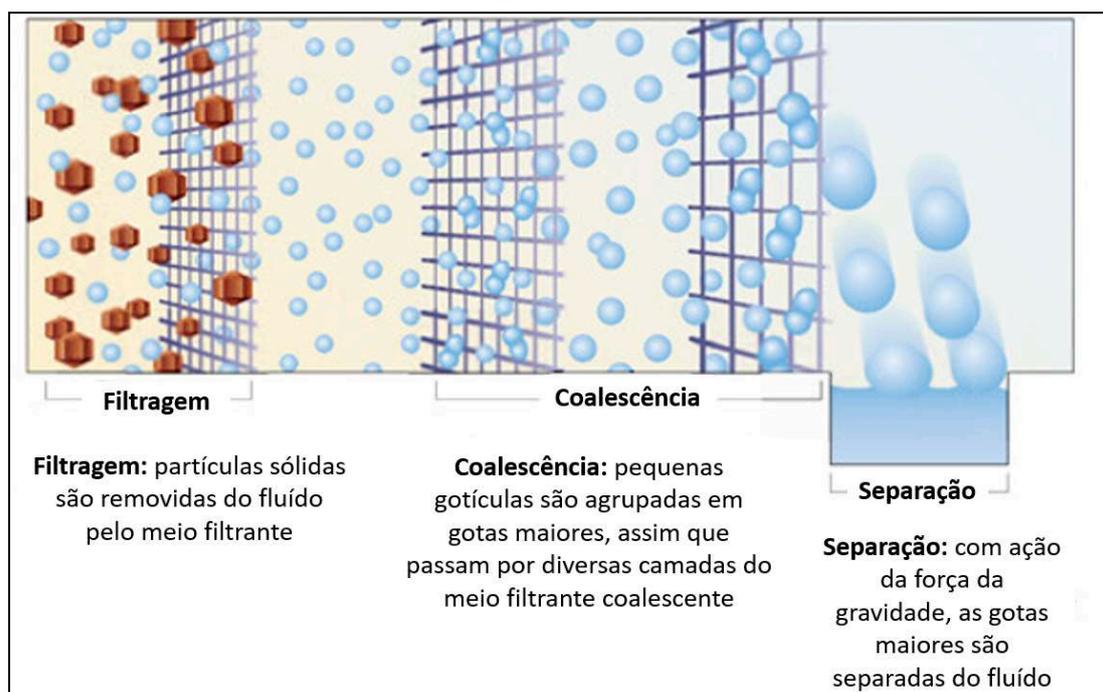
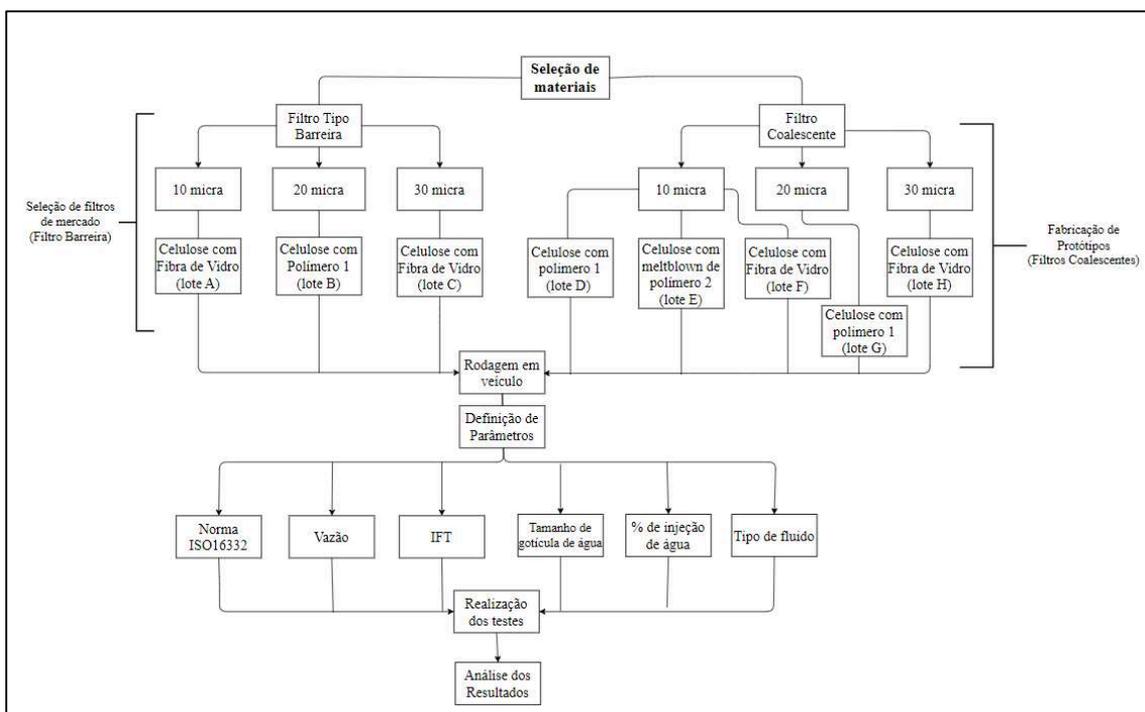


Figura 26 - Meio Filtrante Multicamadas. Fonte: (Champion Process, Inc, 2020).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental da dissertação envolveu uma série de atividades, descritas no fluxograma da Figura 27, na qual é mostrada a seleção de materiais, na qual os filtros tipo barreira foram selecionados materiais já disponíveis em mercado, enquanto para os filtros coalescentes foram fabricados protótipos. Com estes filtros foram realizados testes de rodagem. Foram definidos dos parâmetros dos testes que foram realizados com estes filtros, além da análise dos resultados.



**Figura 27** - Fluxograma das atividades experimentais realizadas na dissertação. Fonte: (Autor).

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Filtros

Foram utilizados filtros separadores de água, do modelo ilustrado na Figura 28, que contém cabeçote e corpo fabricados no polímero poliamida, bomba de escorva (parte metálica na parte superior, em aço inox) e copo de termoplástico transparente (parte inferior) para facilitar a visualização da água separada e dreno. No interior do filtro foram utilizadas diversas configurações do meio filtrante, descritos no fluxograma da Figura 27 e na Tabela 6, todos com a mesma área filtrante.



Figura 28 - Filtro Separador de Água Emax. Fonte: (PARKER, 2016).

Tabela 6 - Tipos de Filtros testados. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Característica do Meio Filtrante	Presença de camada de resina	Porosidade	Lote
Barreira	Celulose com fibra de vidro	Sim (hidrofóbica)	10 $\mu$ m	A
Barreira	Celulose impregnado com Polímero 1	Sim (hidrofóbica)	20 $\mu$ m	B
Barreira	Celulose com fibra de vidro	Sim (hidrofóbica)	30 $\mu$ m	C
Coalescente	Celulose impregnado com Polímero 1	Sim (hidrofóbica)	10 $\mu$ m	D
Coalescente	Celulose com <i>meltblown</i> (não tecido Polímero 2)	Não	10 $\mu$ m	E
Coalescente	Celulose com fibra de vidro	Sim (hidrofóbica)	10 $\mu$ m	F
Coalescente	Celulose impregnado com Polímero 1	Sim (hidrofóbica)	20 $\mu$ m	G
Coalescente	Celulose com fibra de vidro	Sim (hidrofóbica)	30 $\mu$ m	H

### 3.1.1.1 Filtro Barreira

A forma dos filtros de barreira utilizados nos testes está mostrada na Figura 29, o qual possui somente uma camada de filtração, formada de um papel filtrante com base de celulose, com presença de fibras de vidro ou fibras sintéticas em sua composição e

variação na sua porosidade de 5 a 30 micra, além de uma resina polimérica com comportamento hidrofóbico, ou seja, repele a água.

Para os filtros tipo barreira utilizados nos testes, foram selecionados filtros já desenvolvidos e comuns no mercado.



Figura 29 - Filtro tipo Barreira. Fonte: (Autor).

### 3.1.1.2 Filtro Coalescente

Também conhecido como filtro multi-estágio, além do papel filtrante de celulose (Estágio 1), também possui mais dois estágios que auxiliam na separação da água do diesel, sendo um estágio para a coalescência da água (Estágio 2) e outro que faz definitivamente a sua separação (Estágio 3), após a água se encontrar em gotículas maiores, conforme mostrado na Figura 30.

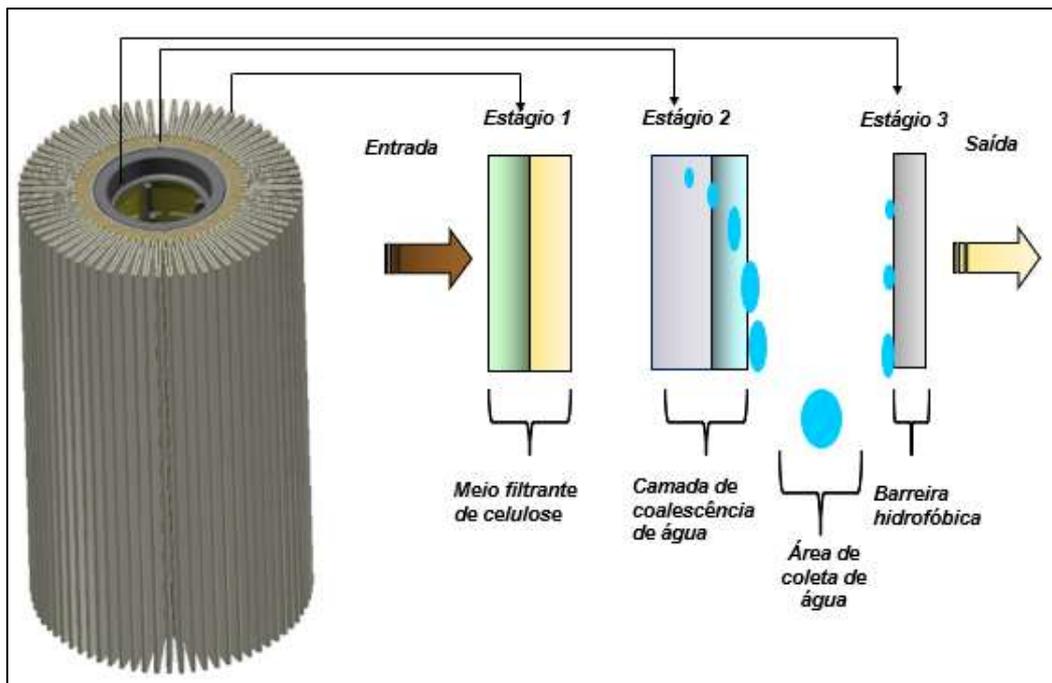


Figura 30 - Filtro Coalescente. Fonte: (Autor).

No segundo estágio do filtro coalescente foi utilizado um tubo feito de poliamida, com meio filtrante de não tecido, baseados em um polímero 3, fabricados pelo método *meltblown*, mostrado na Figura 31.



Figura 31 - Tubo com meio filtrante coalescente (Autor).

No terceiro estágio, foi utilizado um segundo tubo plástico composto de uma tela de poliamida, com o objetivo de separar a água do diesel, na forma de um tecido, conforme ilustrado na Figura 32.

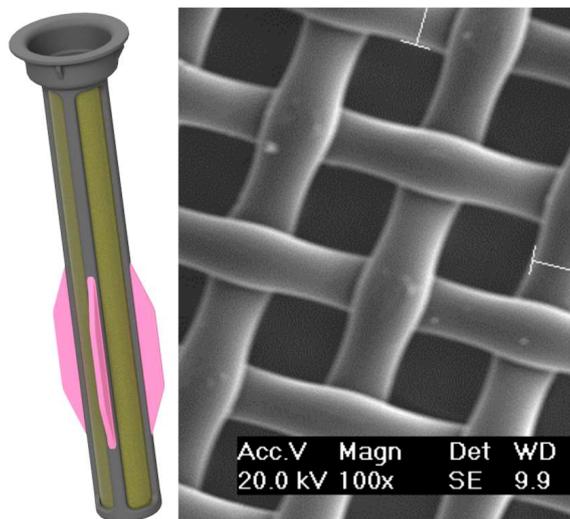


Figura 32 - Tubo com meio filtrante bloqueador de água. Fonte: (Autor).

Para os testes, foram produzidos protótipos utilizando peças usinadas em alumínio como tampas tubos e os meios filtrantes montados em laboratório, conforme Figura 33.



Figura 33 - Protótipos para teste. Fonte: (Autor).

Para a fabricação dos protótipos foi seguido os passos mostrados no fluxograma ilustrado na Figura 35, os primeiros passos foram a usinagem das tampas e a dobra do meio filtrante em plissadas, conforme Figura 34, o segundo passo foi a montagem do meio filtrante em volta do tubo metálico, o terceiro passo foi a colagem do meio filtrante e tubos nas tampas formando um elemento filtrante. Por fim a montagem deste elemento filtro dentro da carcaça de um filtro, conforme mostrado na Figura 28.



Figura 34 - Meio filtrante plissado. Fonte: (Autor).

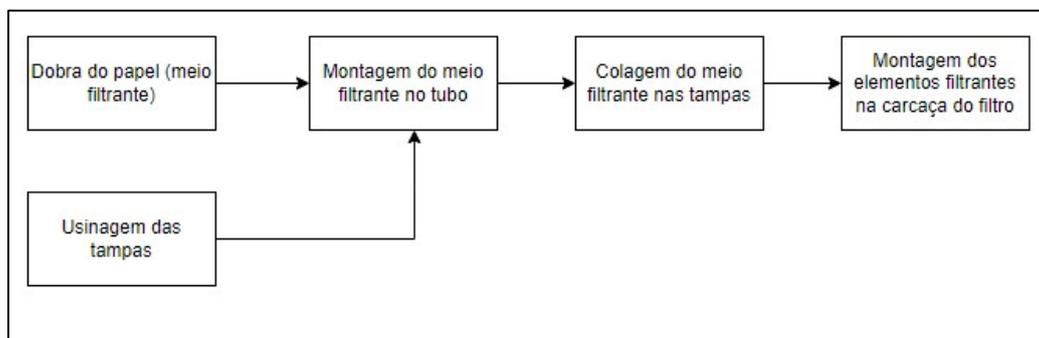


Figura 35 - Fluxograma para montagem dos protótipos. Fonte: (Autor).

### 3.1.2 Equipamentos

#### 3.1.2.1 Bancada de Testes

Para a realização dos testes de separação de água seguindo a norma ISO 16332:2018 é necessária uma bancada preparada para seu atendimento, composta por um tanque de armazenamento para o diesel e outro para água, além de bombas para o fluxo de diesel e para a injeção de água, trocador de calor, ponto coletor do fluido com válvulas

manuais para abertura e fechamento, medidores de fluxo, dispositivo de emulsificação de água, sistema de drenagem, válvulas de controle por solenoide, dispositivo de medição de água e um filtro absoluto, tendo os ajustes necessários de acordo com as especificações para cada filtro, como vazão e injeção de água, tudo isso integrado em um sistema. A Figura 36 mostra a bancada utilizada para os testes, onde consta todos os itens descritos acima, fabricada pelo Instituto de Filtração, Tecnologia e Separação (IFTS) da França.



Figura 36 - Bancada de testes de separação de água. Fonte: (Autor).

### 3.1.2.2 Titulador Volumétrico Karl Fischer

O titulador volumétrico utiliza a técnica Karl Fischer, empregado para a verificação da quantidade de água presente em uma amostra. No equipamento foi utilizada uma solução a base de metanol, o hidranal. A técnica volumétrica de Karl Fischer foi utilizada para determinar a quantidade de água presente na mistura diesel/biodiesel. Os reagentes utilizados para a realização desta titulação foram o óleo solvente de hidranal e o titrantep de hidranal.

No teste de separação de água, são coletadas amostras antes e depois da passagem pelo filtro e no equipamento é feita a análise da quantidade de água em ppm presentes na amostra. O equipamento utilizado, da marca Metrohm e modelo KF Titrino Plus 899, é mostrado na Figura 37.



Figura 37 - Titulador Karl Fischer. Fonte: (Autor).

### 3.1.2.3 Tensiômetro

Para a medição da tensão interfacial entre a água e o diesel, foi utilizado nos testes foi o tensiômetro, mostrado na Figura 38, da marca Lauda e modelo TC1.



Figura 38 – Tensiômetro. Fonte: (Autor).

### 3.1.2.4 Gerador de gotículas de água

Para a geração das gotículas de água de acordo com a norma ISO 16332:2018 foi utilizado um dispositivo automático, que trabalha de acordo com a diferença de pressão no teste e os valores medidos destas gotículas. A Figura 39 mostra o gerador de gotículas utilizado no presente trabalho, da marca IFTS.



Figura 39 - Gerador de gotículas de água. Fonte: (Autor).

### 3.1.2.5 Analisador de distribuição de tamanho de partícula por difração a laser

Para fazer a análise do tamanho da gotícula de água gerada na bancada, é necessário a utilização de um analisador de partículas por difração a laser, com medição em tempo real do tamanho das partículas e visualização para o operador de teste sobre quaisquer alterações necessárias no gerador de gotículas de água. O analisador de distribuição de tamanho de partículas é mostrado na Figura 40, da marca Malvern e modelo Insitec .

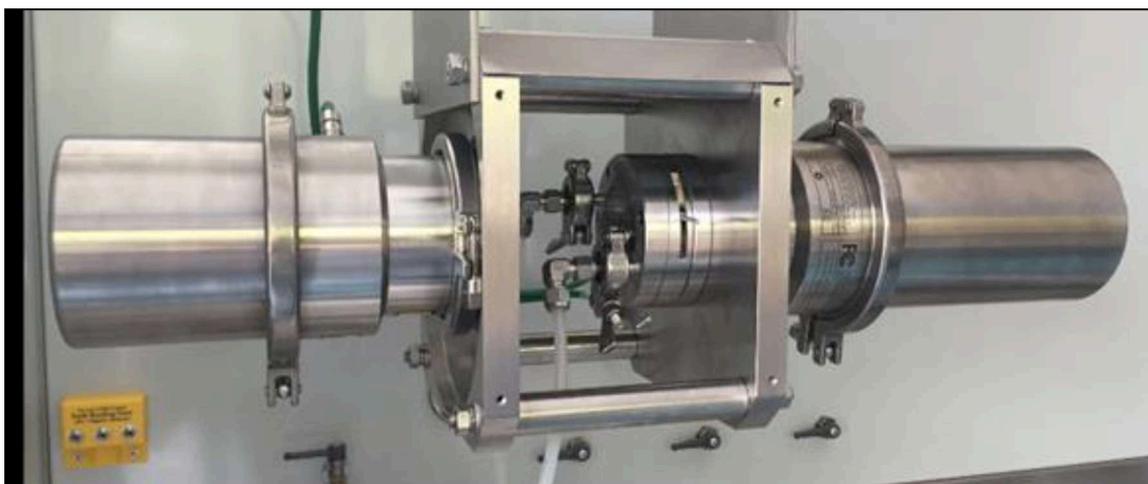


Figura 40 - Analisador de tamanho de partículas. Fonte: (Autor).

### 3.1.3 Veículos

Para os testes foram utilizados caminhões e ônibus de duas montadoras, fabricados no Brasil.

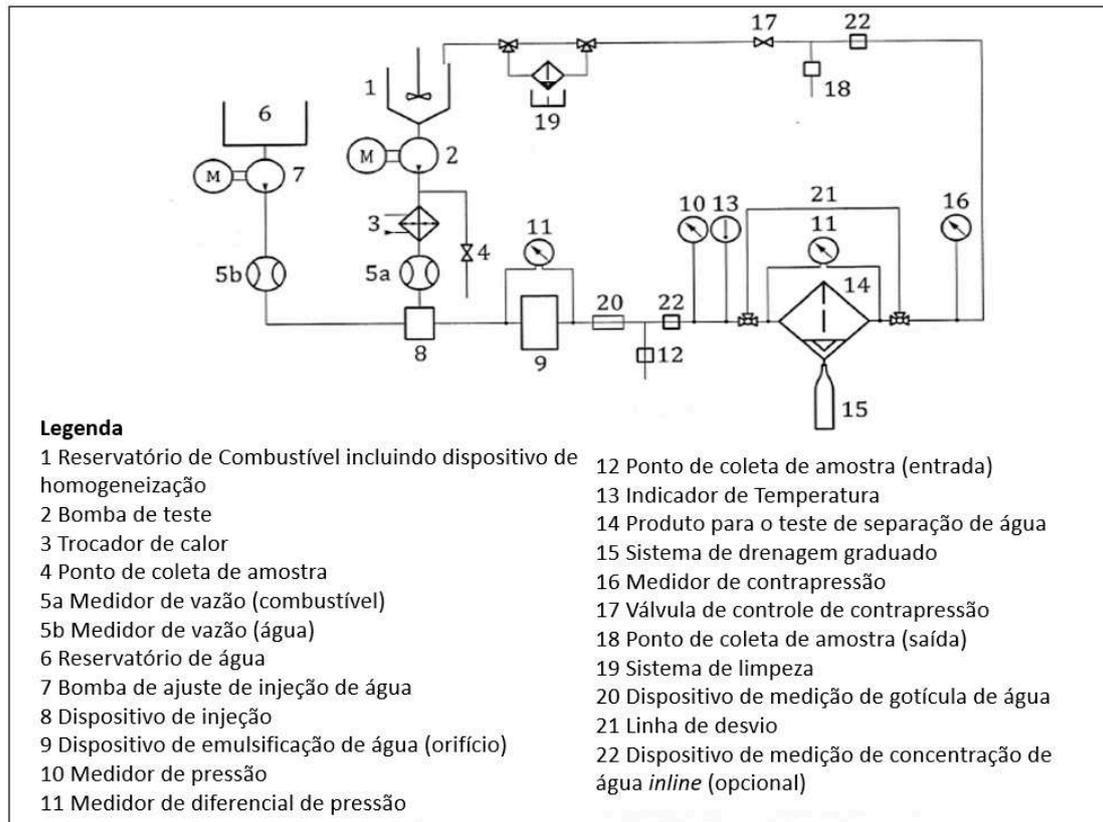
### 3.1.4 Combustível

O combustível para abastecimento destes veículos foi o diesel B15, assim como o fluido utilizados nos testes em bancada, ou seja, contém 15% de biodiesel em sua formulação.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Norma do teste

Para estes testes foram utilizados os parâmetros descritos na norma ISO 16332:2018, como o combustível e a água utilizados. Para a verificação da quantidade de água no fluido durante o teste, foi utilizado um titulador do tipo Karl Fischer, para a determinação da tensão interfacial entre água e diesel foi utilizado um tensiômetro, já o tamanho de gotícula gerado pelo gerador de gotículas de água da IFTS foi verificado com ajuda do analisador de distribuição de tamanhos de partículas por difração a laser. A temperatura do fluido no teste se manteve entre 21 a 25°C e a duração do teste em 90 minutos. Na Figura 41 é ilustrado o diagrama desta bancada de testes com todos os seus componentes. Para o teste o diesel deve ser abastecido no reservatório 1, a bomba 2 irá bombear este diesel para o trocador de calor 3, no ponto 4 é retirada a amostra para o início do teste, no ponto 5a existe um medidor de vazão para o controle do bombeamento do diesel. A água é abastecida no reservatório 6 e bombeada pela bomba 7 e tem seu fluxo controlado pelo medidor de vazão 5b, no ponto 8 a água é injetada no diesel passando pelo dispositivo de emulsificação 9, que é controlado por um medidor de pressão diferencial, após a emulsificação é feita a medição da gotícula de água emulsificada no diesel com o medidor a laser 20, no ponto 12 é feita a coleta do diesel para análise da entrada do combustível no filtro, número 14, através de titulação realizada no Karl Fischer. No ponto 10 e 13 existem um medidor de pressão e temperatura respectivamente. A água separada pelo filtro 14, é drenada para o tanque 15. No ponto 16 existe outro medidor de pressão e a coleta do combustível após a passagem pelo filtro a ser testado é coletada no porto 18 e posteriormente analisada também pelo método Karl Fischer da mesma maneira que a amostra coletada no ponto 12. No ponto 19 é feita a limpeza deste combustível através de um filtro absoluto.



**Figura 41** - Diagrama da bancada de teste de separação de água. Fonte: (International Standard, 2018).

### 3.2.2 Parâmetros de teste

Os parâmetros utilizados no teste estão descritos abaixo:

- Fluido: Diesel B15
- Vazão: 8lpm (litros por minuto) com 2% de injeção de água
- IFT: 12mN/m
- Tamanho da gotícula de água: 60 $\mu$ m

Na bancada de testes uma quantidade de água é injetada no sistema, de acordo com a norma, simulando o processo de absorção de água pelo diesel. Na Figura 42 é mostrado o diesel retirado nos pontos de coleta da bancada de teste, antes de passar no filtro, que se mostra bem turvo em decorrência da água adicionada e emulsificada pela bancada de teste e depois de passar pelo filtro, já com o combustível de forma límpida, tendo a água que estava emulsificada sido separada pelo filtro testado.



Figura 42 - Diesel antes e depois da passagem pelo filtro na bancada de testes. Fonte: (Autor).

### 3.2.3 Testes em bancada

Os testes realizados em bancada (descrita no item 3.1.2.1) foram realizados seguindo a norma ISO 16332:2018, com os parâmetros descritos no item 3.2.2, para a mediação da separação de água. A perda de carga do filtro é medida com um manômetro diferencial de pressão que faz parte da bancada de testes. Os valores de aceitação de perda de carga dependem do fabricante do veículo, devido à perda de carga máxima que a bomba de combustível suporta.

### 3.2.4 Testes em bancada após rodagem em veículos

Os testes em bancada também foram realizados nos filtros após serem utilizados nos veículos seguindo os mesmos parâmetros descritos no item 3.2.2, após rodagem feita com diferentes quilometragens e saturação do filtro, para verificar a redução de eficiência de separação de água com os filtros durante a sua vida útil. A perda de carga do filtro é medida com um manômetro diferencial de pressão que faz parte da bancada de testes para saber o nível de saturação que o filtro se encontra.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Elemento filtrante de papel de celulose com uma camada e porosidade de 10 micra (Lote A)

A Tabela 7 e o gráfico apresentado na Figura 43 demonstram os resultados dos testes com elemento filtrante de papel de celulose com fibra de vidro (Lote A) com uma camada e porosidade de 10 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. A quilometragem utilizada foi um pouco acima de 15.000 km, ou seja, meia vida do filtro.

Pode-se observar que a perda de carga varia de 240mbar a 400mbar, mesmo para quilometragens próximas. Esse valor de perda de carga é esperado para a quilometragem atingida, e a grande variação observada nos valores de perda de carga, isto é, de 240mbar a 400mbar, se deve à composição química do óleo diesel, ligado principalmente à heterogeneidade do biodiesel adicionado, uma vez que é obtido de diferentes matérias-primas, por exemplo, óleo de fritura, gordura animal (bovina, suína, aves), soja, milho, algodão, entre outros (KNOTHE, 2018). A separação de água observada foi de 21%, 65% e 28%, ou seja, todos abaixo do requisito das montadoras, que é igual a 75%. Assim, um filtro constituído somente de papel de celulose e 10 micra não atende aos requisitos das montadoras.

Tabela 7 - Eficiência de separação de água – Lote A. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Barreira	A	-	0 km	100mbar	97%
Barreira	A	Caminhão	17.757km	240mbar	21%
Barreira	A	Caminhão	17.141km	400mbar	65%
Barreira	A	Caminhão	15.491km	270mbar	28%

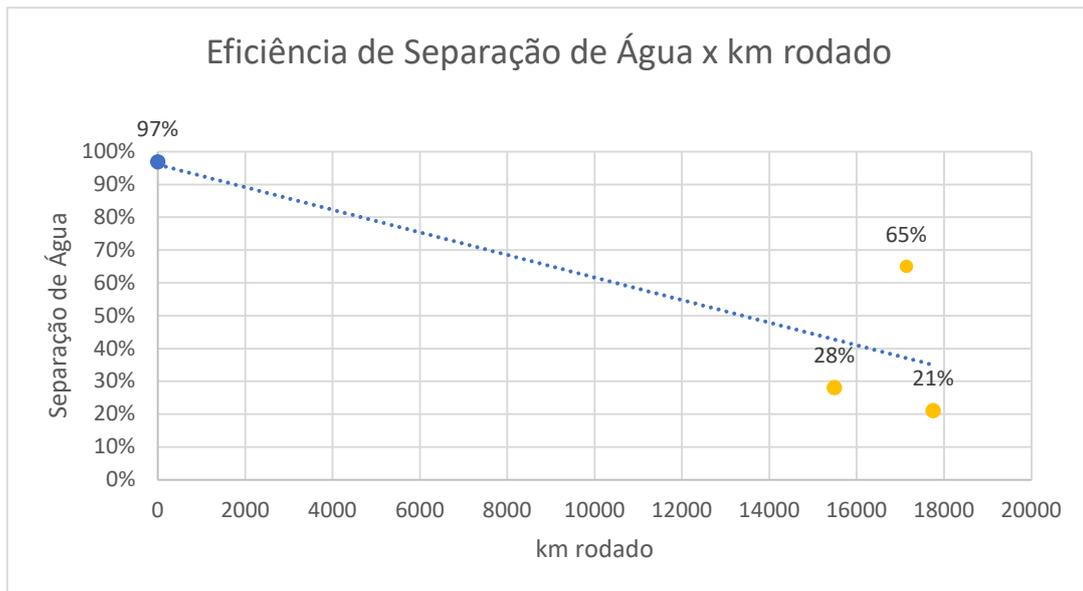


Figura 43 - Eficiência de Separação de Água x km rodado lote A. Fonte: (Autor).

#### 4.2 Elemento filtrante de papel de celulose com uma camada e porosidade de 20 micra (Lote B)

A Tabela 8 e o gráfico apresentado na Figura 44 demonstram os resultados dos testes com elemento filtrante de papel de celulose impregnado com polímero (Lote B) com uma camada e porosidade de 20 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. A quilometragem utilizada em um veículo foi um pouco acima de 10.000 km, ou seja, próximo a meia vida do filtro e outros próximos a 30.000km, ou seja, no fim de vida do filtro.

Pode-se observar que a perda de carga para o filtro que estava instalado no caminhão que rodou 12.231 quilômetros foi igual a 365mbar, representando algo próximo a meia vida do filtro. Enquanto isso, nos veículos que rodaram próximo aos 30mil quilômetros a perda de carga foi de 659 mbar e 542 mbar, ou seja, a perda de carga máxima que a bomba de combustível pode suportar. A separação de água em todos os casos foi abaixo de 44%, ou seja, todos abaixo do requisito das montadoras, que é igual a 75%. Assim, um filtro constituído somente de uma camada de celulose impregnada com polímero e 20micra não atende aos requisitos das montadoras, em meio ou final de vida. O requisito é atendido apenas com o filtro sem uso.

**Tabela 8.** Eficiência de separação de água – Lote B. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Barreira	B	-	0km	100mbar	97%
Barreira	B	Caminhão	29.783km	659mbar	14%
Barreira	B	Caminhão	12.231km	365mbar	44%
Barreira	B	Caminhão	29.573km	542mbar	26%

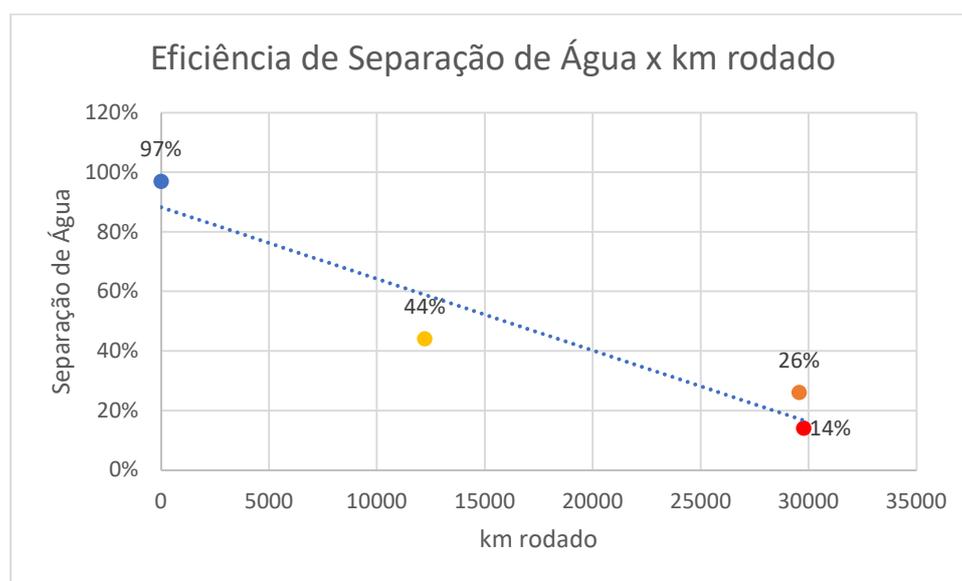


Figura 44 - Eficiência de Separação de Água x km rodado lote B. Fonte: (Autor).

### 4.3 Testes com elemento filtrante de papel de celulose com uma camada e porosidade de 30 micra (Lote C)

A Tabela 9 e o gráfico apresentado na Figura 45 demonstram os resultados dos testes com elemento filtrante de papel de celulose com fibra de vidro (Lote C) com uma camada e porosidade de 30 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. A quilometragem utilizada em um veículo foi um pouco acima de 10.000 km, ou seja, próximo a meia vida do filtro.

Pode-se observar que a perda de carga para os filtros que estavam instalados nos caminhões estavam entre 260 e 330mbar, representando algo próximo a meia vida do filtro. A separação de água em todos os casos foi abaixo de 32%, ou seja, todos abaixo do requisito das montadoras, que é igual a 75%. Assim, um filtro constituído somente de uma camada de celulose com fibra de vidro e 30micra não atende aos requisitos das montadoras, em meio ou final de vida. O requisito é atendido apenas com o filtro sem uso.

Tabela 9 - Eficiência de separação de água - Lote C. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Barreira	C	-	0km	100mbar	94%
Barreira	C	Caminhão	6.714km	261mbar	32%
Barreira	C	Caminhão	12.507km	270mbar	19%
Barreira	C	Caminhão	9.249km	327mbar	14%

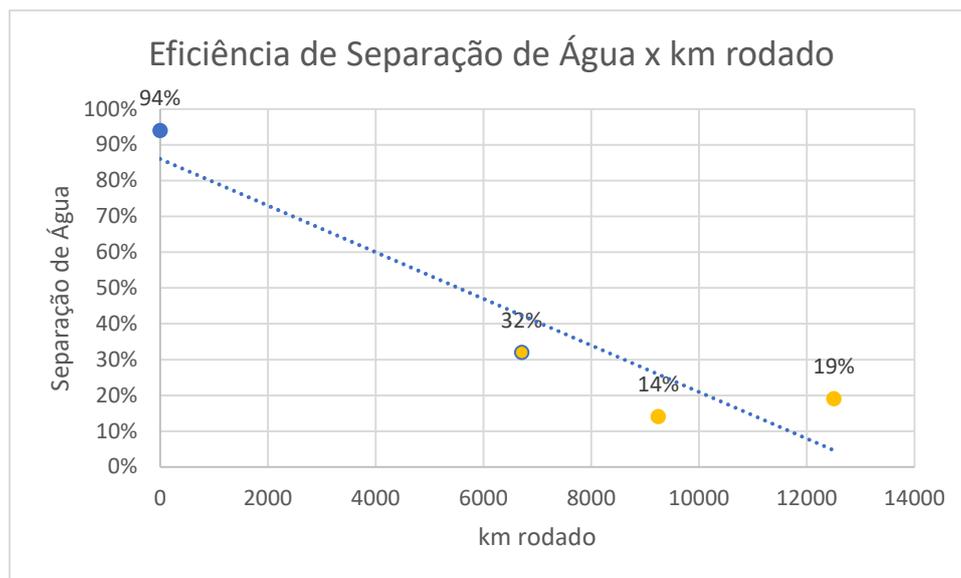


Figura 45 - Eficiência de Separação de Água x km rodado lote C. Fonte: (Autor).

Os lotes A, B e C, constituídos de apenas uma camada (Filtro Simples Estágio), não atendem aos requisitos das montadoras. Na Figura 46 é ilustrado lado a lado um meio filtrante limpo (esquerda) e outro em fim de vida (direita), um comportamento observado nos lotes A, B e C. O filtro em fim de vida apresenta uma cor escura, devido a sujidade impregnada na sua superfície, o que acaba por aumentar a perda de carga e reduzir a separação de água.

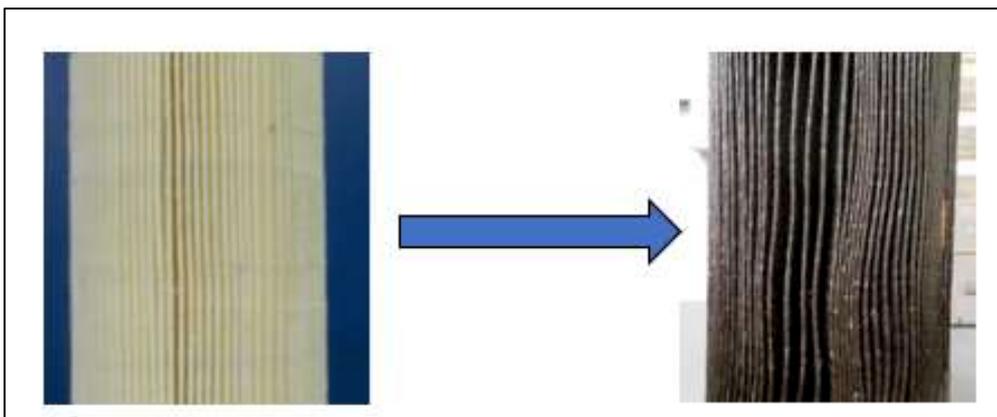


Figura 46 - Filtro Barreira limpo (esquerda) e em fim de vida (direita). Fonte: (Autor).

A partir dos resultados apresentados para as configurações dos itens 4.1, 4.2 e 4.3, os filtros tipo barreira de mercado que utilizam meio filtrantes, feitos de celulose com uma única etapa de filtração e com adição de resinas hidrofóbicas, não é possível fazer uma separação adequada da água do diesel durante todo o uso do filtro, de início ao fim de vida, considerando a utilização de diesel B15. O filtros apresentados atendem os requisitos das montadoras quando estão limpos, ou seja, no início de seu funcionamento. Com o decorrer do tempo, conforme o papel vai se contaminando, a eficiência cai drasticamente e em fim de vida, quase não se observa nenhuma separação de água.

O biodiesel atua diretamente em fatores que dificultam a separação de água, como diminuição da tensão interfacial entre água e diesel, assim como o tamanho de gotícula de água, sendo capaz de separar água somente quando está limpo. Após o início de funcionamento do veículo e a filtração do combustível, são perdidas as características que o fazem funcionar.

#### **4.4 Elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de 10 $\mu$ m (Lote D)**

A Tabela 10 e o gráfico apresentado na Figura 47 demonstram os resultados dos testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 (lote D) com porosidade de 10 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. As quilometragens utilizadas foram de 15 a 23mil quilômetros, ou seja, meia vida do filtro, com exceção de uma amostra que atingiu uma perda de carga de 840mbar com aproximadamente 9mil quilômetros e a rodagem foi interrompida.

Pode-se observar que a perda de carga teve uma variação de 210mbar a 840mbar, mesmo para quilometragens próximas. Essa grande variação nos valores de perda de carga se deve a composição química do óleo diesel, ligado principalmente à heterogeneidade do biodiesel adicionado, uma vez que é obtido de diferentes matérias-primas, por exemplo, óleo de fritura, gordura animal (bovina, suína, aves), soja, milho, algodão, entre outros (KNOTHE, 2018). Com diferentes níveis de perda de carga, o que significa, que os testes foram realizados em filtro em meia vida, assim como em fim de vida, a separação de água foi superior a 78% em todos os casos, ou seja, acima dos requisitos das montadoras, que é igual a 75%. Assim, um filtro constituído de um elemento filtrante multicamadas com papel de celulose impregnado com polímero consegue atender os requisitos das montadoras com relação a separação de água.

Tabela 10 - Eficiência de separação de água - Lote D. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Coalescente	D	-	0km	100mbar	99%
Coalescente	D	Caminhão	23.559km	550mbar	96%
Coalescente	D	Caminhão	16.483km	330mbar	88%
Coalescente	D	Ônibus	15.000km	320mbar	99%
Coalescente	D	Caminhão	18.095km	210mbar	98%
Coalescente	D	Caminhão	9.559km	840mbar	81%
Coalescente	D	Caminhão	19.641km	600mbar	78%

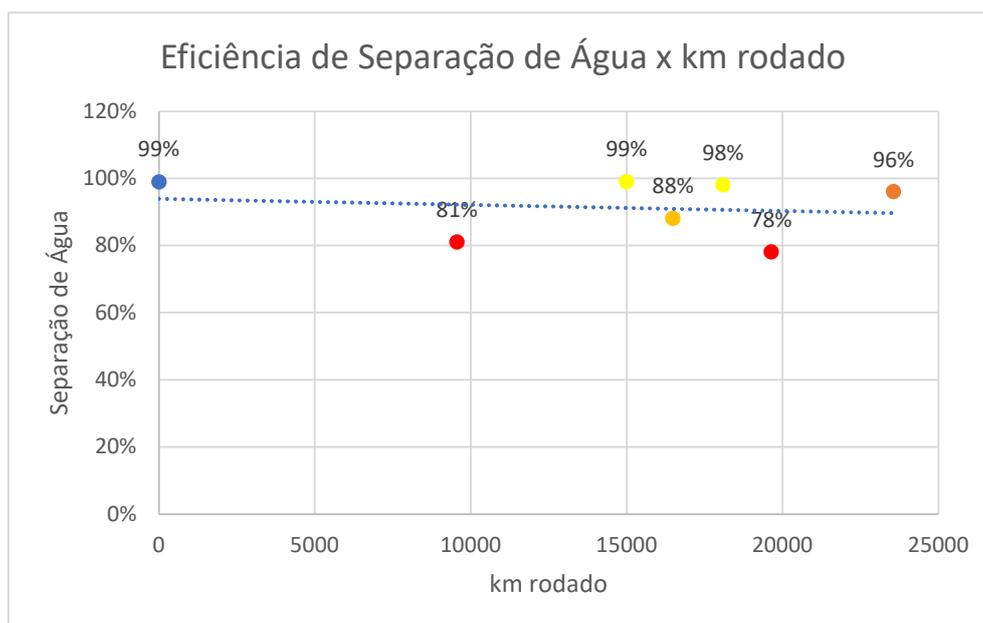


Figura 47 - Eficiência de Separação de Água x km rodado lote D. Fonte: (Autor).

A Figura 48 ilustra o filtro com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose com porosidade de 10 micra, aberto após rodagem em um caminhão que rodou 9.559km, onde pode-se observar que o meio filtrante está totalmente impregnado por sujidades e mesmo assim obteve resultado de separação da água acima do requisito exigido pela montadora na separação de água, conforme mostrado na Tabela 10.



Figura 48 - Aspecto visual do meio filtrante após teste de rodagem de 9.559 km (Lote C). Fonte: (Autor).

Na Figura 49 é ilustrado o tubo com meio filtrante coalescente antes e depois da rodagem em veículo, é possível perceber que quando o primeiro estágio é composto de um papel de celulose de 10 micra, o tubo (Estágio 2) permanece limpo até o fim de vida do filtro (indicado pela seta em vermelho).



Figura 49 - Filtro Coalescente limpo (esquerda) e em fim de vida (direita). Fonte: (Autor).

#### 4.5 Elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose laminado com camada de não-tecido (polímero 2 via *melblown*) com porosidade de 10 $\mu$ m (Lote E)

A Tabela 11 apresenta os resultados dos testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com não-tecido por processo de *melblown* (Lote E) com porosidade de 10 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. Foi realizado o teste somente em bancada com o filtro limpo, no qual se verificou uma perda de carga inicial de 100mbar, porém a separação de água de 68%, ficando abaixo dos 75% requeridos pelas montadoras. Com este resultado inicial, nenhum filtro foi montado em nenhum veículo para teste de campo, pois a tendência é de a separação de água diminuir com o aumento da perda de carga do filtro.

Tabela 11 - Eficiência de separação de água - Lote E. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Coalescente	H	-	0km	100mbar	68%

#### 4.6 Elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de 10 $\mu$ m (Lote F)

A Tabela 12 e o gráfico apresentado na Figura 50 demonstram os resultados dos testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose com fibra de vidro (Lote F) com porosidade de 10 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. As quilometragens utilizadas foram de 19 a 44mil quilômetros, porém mesmo com a variação de quilometragem, os filtros estão em fim de vida do filtro, devido aos valores apresentados de perda de carga (600 mbar). Isto se deve a composição química do óleo diesel, ligado principalmente à heterogeneidade do biodiesel adicionado, uma vez que é obtido de diferentes matérias-primas, por exemplo, óleo de fritura, gordura animal (bovina, suína, aves), soja, milho, colza, girassol, algodão (KNOTHE, 2018). Assim, um filtro constituído de um elemento filtrante multicamadas com papel de celulose com fibra de vidro não atende aos requisitos das montadoras.

Tabela 12 - Eficiência de separação de água - Lote F. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Coalescente	F	-	-	100mbar	98%
Coalescente	F	Caminhão	19.641km	600mbar	78%
Coalescente	F	Caminhão	44.378km	600mbar	67%

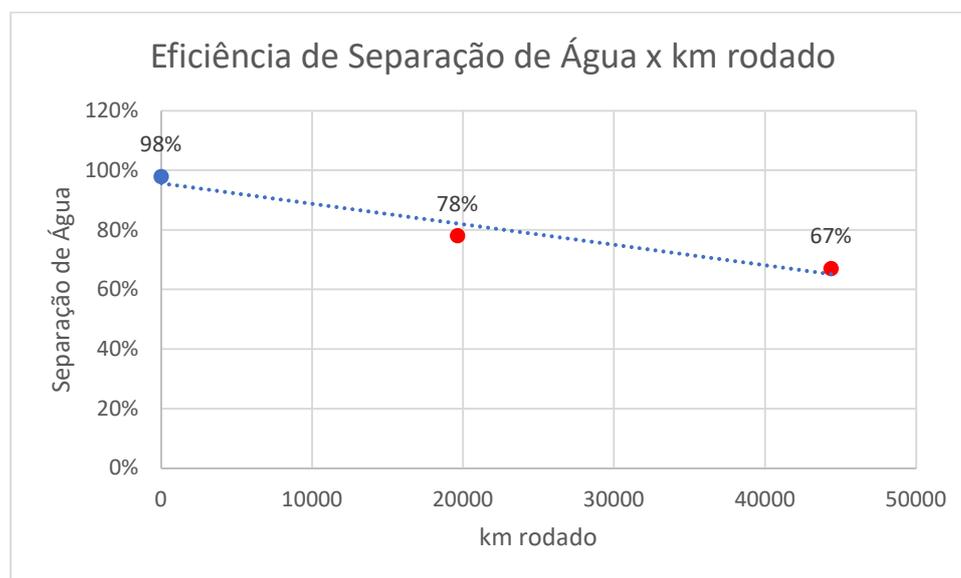


Figura 50 - Eficiência de Separação de Água x km rodado lote F. Fonte: (Autor).

#### 4.7 Elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 com porosidade de 20µm (Lote G)

A Tabela 13 apresenta os resultados dos testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero (Lote G) com porosidade de 20 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. Foi realizado o teste somente em bancada com o filtro limpo, no qual se verificou uma perda de carga inicial de 100mbar, porém a separação de água de 38%, ficando abaixo dos 75% requeridos pelas montadoras. A partir desse resultado inicial, nenhum filtro foi montado em nenhum veículo para teste de campo, uma vez que a tendência é de a separação de água diminuir com o aumento da perda de carga do filtro.

Tabela 13 - Eficiência de separação de água – Lote G. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Coalescente	E	-	0km	100mbar	38%

#### 4.8 Elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com fibra de vidro com porosidade de 30 $\mu$ m (Lote H)

A Tabela 14 e o gráfico apresentado na Figura 51 demonstram os resultados dos testes com elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose com fibra de vidro (Lote H) com porosidade de 30 micra, tipo de veículo, quilometragem, perda de carga e % de separação de água. Os caminhões rodaram até que os filtros atingissem 600mbar de perda de carga, que resultou em uma quilometragem entre 30 e 64mil quilômetros. A estratégia com o ônibus foi de rodar até próximo a 15 mil quilômetros e verificar a perda de carga e a variação da separação de água com o filtro em meia vida.

Em todas amostras, seja em meio ou fim de vida do filtro, a separação de água foi inferior à 33%, ou seja, abaixo dos requisitos das montadoras, que é igual a 75%. Assim, um filtro constituído de um elemento filtrante multicamadas com papel de celulose de 30 micra com fibra de vidro não consegue atender os requisitos das montadoras com relação a separação de água após a rotação em veículos, apenas quando está limpo, quando obteve um resultado de 87%.

Tabela 14 - Eficiência de separação de água - Lote H. Fonte: (Autor).

Tipo de Filtro	Id. Meio Filtrante	Veículo	Quilometragem	Perda de carga	Separação de Água
Coalescente	G	-	0km	100mbar	87%
Coalescente	G	Caminhão	54.867km	600mbar	12%
Coalescente	G	Caminhão	31.217km	600mbar	15%
Coalescente	G	Caminhão	64.360km	600mbar	18%
Coalescente	G	Ônibus	14.572km	298mbar	33%

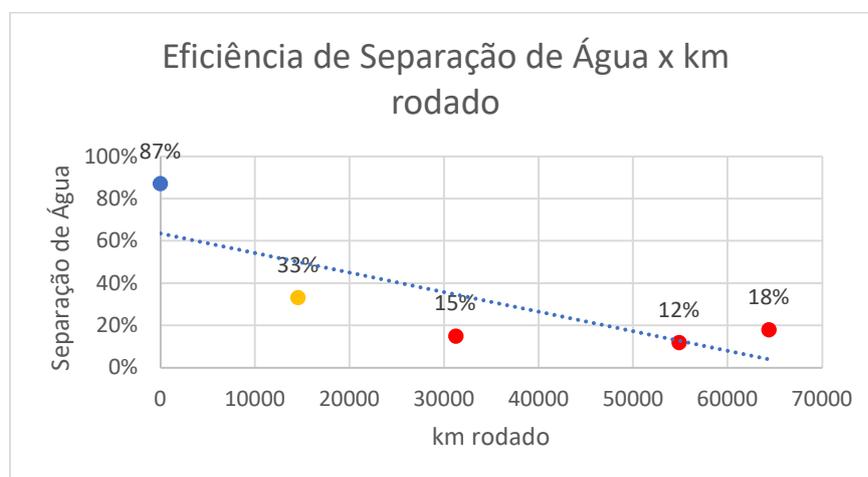


Figura 51 - Eficiência de Separação de Água x km rodado lote G. Fonte: (Autor).

#### 4.9 Comparativo de Eficiência de Separação de Água de Todos os Lotes

No gráfico apresentado na Figura 52, são demonstrados os valores de eficiência de separação de água de todos os testes, onde é possível observar de maneira mais fácil que os filtros 0km em sua maioria tiveram um resultado satisfatório quando comparados a especificação de ser maior de 75%, com relação aos filtros que foram utilizados nos testes de rodagem, é possível observar que todos os filtros do lote D tiveram eficiência de separação de água acima do especificado e os do tipo F, tiveram apenas uma amostra abaixo do especificado, porém com uma quilometragem maior do que as do lote D.

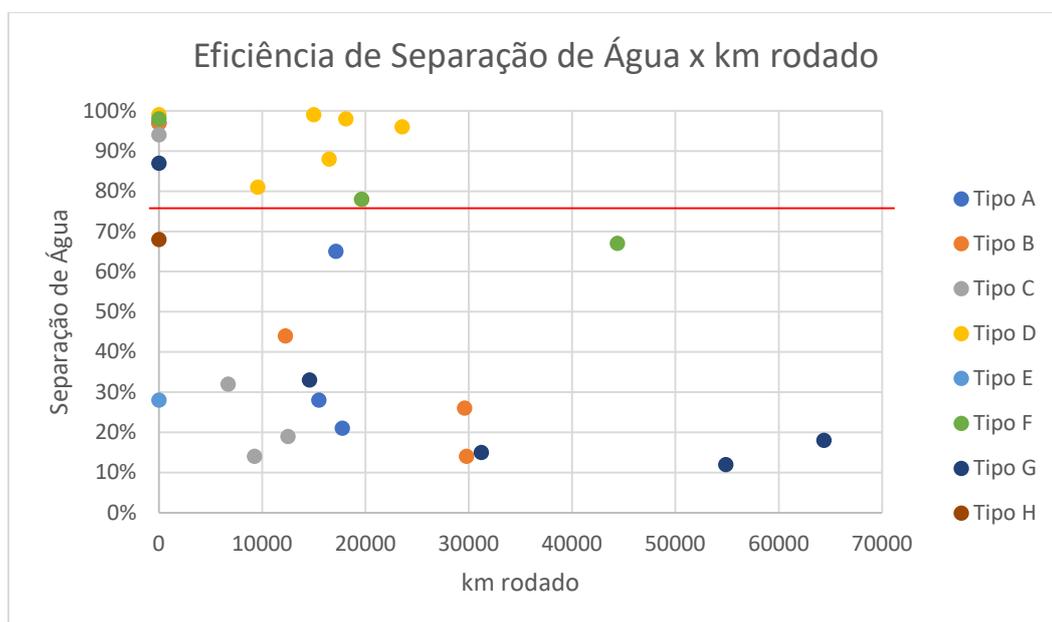


Figura 52 - Comparativo de Eficiência de Separação de Água x km rodado de todos os lotes. Fonte: (Autor).

Em relação aos lotes do elemento filtrante de papel de celulose com fibra de vidro, uma camada e porosidade de 10 micra (Lote A), o resultado encontrado não atendeu ao requisito após a rodagem, obtendo valores de separação de água inferiores a 75%, mínimo exigido pelas montadoras. Com o filtro sem uso (novo), o valor de separação de água igual a 75% foi obtido.

O elemento filtrante de papel de celulose impregnado com polímero 1 (Lote B), com uma camada e porosidade de 20 micra, também com apenas uma camada de filtragem, não obteve valores superiores de separação de água de 75%. Com o filtro sem uso (novo), o valor de separação de água igual a 75% foi obtido.

O elemento filtrante de papel de celulose com fibra de vidro (Lote C) com uma camada e porosidade de 30 micra, apresentou o mesmo comportamento dos lotes A e B,

ficando também abaixo dos valores exigidos para o filtro após iniciar seu uso. Em relação aos lotes do elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 e porosidade de  $10\mu\text{m}$  (Lote D), atendeu as expectativas das montadoras se mantendo com uma separação de água superior a 75% durante a vida do produto, sendo este o melhor produto para a aplicação.

O elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose laminado com camada de não tecido (polímero 2 via *meltblown*) e porosidade de  $10\mu\text{m}$  (Lote E), não obteve bom resultado no teste antes da rodagem, tendo uma eficiência de separação de água de 68% e foi descartado, não sendo enviado para a rodagem em veículos. O elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com fibra de vidro e porosidade de  $10\mu\text{m}$  (Lote F), não conseguiu atender ao requisito após a rodagem no caminhão. Apesar de ter um resultado superior aos filtros de uma camada, não obteve o resultado mínimo aceitável.

O elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com polímero 1 e porosidade de  $20\mu\text{m}$  (Lote G), também não obteve sucesso no teste de separação de água antes do teste de rodagem, obtendo 38% de eficiência. Assim, não foi enviado para o teste de rodagem. O elemento filtrante multi-estágio com papel de celulose impregnado com fibra de vidro e porosidade de  $30\mu\text{m}$  (Lote H), apesar de ser o filtro que obteve os melhores resultados em relação a quilometragem rodada nos veículos, não conseguiu atingir ao valor estabelecido para a separação de água antes do seu fim de vida útil, sendo também descartado.

## 5. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que os filtros tipo barreira comumente encontrados no mercado tem boa separação de água quando novos, entretanto, com a sua utilização é diminuída a sua eficiência na separação de água do combustível, não sendo o produto mais adequado para o uso com diesel B15, que é a mistura do diesel de petróleo misturado com 15% de biodiesel, que será adotado a partir de 2026 no Brasil.

Não são todos os filtros com meio filtrante coalescente que conseguem separar água do diesel B15, somente com o meio filtrante adequado é possível atingir este objetivo. No estudo foi mostrado que a primeira camada de filtração é muito importante, além de proteger as demais etapas da separação de água dos contaminantes do combustível, sendo responsável por bloquear as sujidades e também atuar na separação de água, auxiliando as demais etapas de filtração, para que o combustível chegue aos bicos injetores dos motores livres de impurezas e também da contaminação de água.

Os filtros que utilizam meio filtrante coalescente multi-estágio, dependem do meio filtrante do primeiro estágio para fazer a remoção de partículas e iniciar a coalescência da água. Os meios filtrantes com maiores poros, com 20 e 30 micra não se mostraram eficientes, pois a sujeira que passou por eles prejudicou os processos subsequentes de separação de água, restando apenas os meios filtrantes de 10 micra com diferentes processamentos. O meio filtrante que obteve o melhor resultado foi o de 10 micra impregnado com o polímero 1 (Lote D).

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETROLEO E GÁS. Resolução ANP n°798 de 1.8.2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETROLEO E GÁS. Resolução ANP n°920 de 04.04.2023.
- ARBAB, Alvira Ayoub; KHATRI, Awais. **Advanced Textile Testins Techniques**, CRC Press, 2017.
- AGARWAL, Swarna; ARNIM, Volkmar von; STEGMAIER, Thomas; PLANCK, Heinrich; AGARWAL Abhimanyu. **Effect of fibrous coalescer geometry and operating conditions on emulsion separation**. I&EC research, vol. 52, pp13164-13170, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6751:23. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels**. Estados Unidos da América, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12546 TB 392 - Materiais têxteis - Ligamentos fundamentais de tecidos planos**. Brasil, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13370 Nãotecido - Terminologia**. Brasil, 2017.
- AROUNI, Hamidreaza; FAROQ, Umer; GOSWAMI, Parikshit; KAPUR, Nikil; RUSSEL, Stephen J. **Coalescence of surface modified PBT meltblown nonwovens in the separation of water from diesel fuel containing surfactants**, Elsevier, Leeds – Reino Unido, 2019.
- AROUNI, Hamidreaza; FAROQ, Umer; GOSWAMI, Parikshit; KAPUR, Nikil; RUSSEL, Stephen J. **Limitations of Monoolein in Simulating Water-in-Fuel Characteristics of EN590 Diesel Containing Biodiesel in Water Separation Testing**. SAE International. Volume 11, pp 229-237, 2018.
- AVESH, Khan; PETHANI, Kevin; KHERAIYA, Krunal. **A Review on Performance and Emission Analysis of Emulsified Diesel**. IJSRD, vol. 3, pp 932-935, 2015.
- BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo. Blücher, 2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Gabinete do Ministro. **Portaria n° 262, de 17 de junho de 2016**. Brasília, 2016.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Gabinete do Ministro. **Portaria n° 80, de 02 de março de 2017**. Brasília, 2017.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria Geral. **Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016.** Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/113263.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/113263.htm)>. Acesso em: 13 dez. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética. **Resolução nº16 de 29 de outubro de 2018.** Brasília, 2018.

BRUNETTI, Franco; **Motores de Combustão Interna: volume 1.** São Paulo. Blücher, 2012.

BRUNETTI, Franco; **Motores de Combustão Interna: volume 2.** São Paulo. Blücher, 2012.

DATTA, Sai K., et al. Effects of water diesel emulsion on diesel engine. IJMPERD, Vol. 8, pp675-680, 2018.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 14214:2019. Liquid Petroleum Products – Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Use in Diesel Engines and Heating Applications – Requirements and Teste Methods.** Alemanha, 2019.

DIESEL, Rudolf; GULDNER, Hugo. **Internal Combustion Engine.** Depositante: Rudolf Diesel. Nº736.944. Depósito: 1 nov. 1899. Concessão: 25 ago. 1903.

DRAGSTED, Jom. **Método e Sistema para Redução de Consumo de Combustível em um motor Diesel.** Depositante: A.P. Moller-Maersk A/S. Procurador: Siemens Dannemann. N. PI0419216-8 A. Depósito: 22 dez. 2004. Concessão 18 dez. 2007.

EUROPEAN STANDARD NORME. EN 590:2009. **Automotive Fuels – Diesel – Requirements and Test Methods.** Bélgica, 2009.

FREGOLENTE, Patrícia Bogalhos Lucente; FREGOLENTE, Leonardo Vasconcelos; MACIEL, Maria Regina Wolf; **Water Content in Biodiesel, Diesel and Biodiesel-Diesel Blends.** Journal of Chemical & Engineering, Vol. 57, pp1817-1821, 2012.

HUTTEN, Irvin. **Handbook of Non-Woven Filter Media.** Elsevier Science & Technology Books, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4406:2021. Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the Level of Contamination by Solid Particles.** Suíça, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16332:2018. Diesel Engines – Fuel Filters – Method for evaluating fuel/water separation efficiency.** Suíça, 2018.

JOCANOVIC, Mitar T., KARANOVIC, Velibor V.; KNEZEVIC, Darko M.; OROSNJAK, Marko D. **Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems.** Military Technical Courier. Vol. 65, pp 968-993, 2017.

KNOTHE, Gerald et al; **Manual do Biodiesel.** São Paulo. Blucher, 2018.

KOMARIAH, L. N; HADIAH, F; APRIANJAYA, F; NEVRIADI, F. **Biodiesel effects on fuel filter; assessment of clogging characteristics.** The 6th International Conference of the Indonesian Chemical Society, 2018.

KRASINSKI, Andrzej; SOLTAN, Lukasz; GOLACKA, Joanna Kacprzynska. **Effect of fiber surface modifications on the coalescence performance of polybutylene terephthalate filter media Applied for water removal from diesel fuel.** Separation and Purification Technology. Vol. 236, 2019.

KULKARNI, Prashant S.; PATEL, Shagufta U.; CHASE, George G. **Layered hydrophilic/hydrophobic fiber media for water-in-oil coalescence.** Separation and Purification Technology. Vol. 85, pp 157-164, 2012.

LOBO, Ivon Pinheiro; FERREIRA, Sergio Luis Costa. **Biodiesel: Parâmetros de Qualidade e Métodos Analíticos.** Química Nova, Vol. 32, pp1596-1608, 2009.

LOBO, Marcos Thadeu. **Testando a demulsibilidade do óleo lubrificante.** Portal Lubes. 2019 Acessado em: 07 abr. 2021. Disponível em: <https://portallubes.com.br/2019/05/testando-a-demulsibilidade/>.

LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José. **Biocombustíveis: volumes 1 e 2,** Rio de Janeiro. Interciência, 2012.

MAIA, Ricardo R S; **Biodiesel no Brasil.** Análise de de Custo-Benefício. Curitiba. Appris, 2015.

MARONI, Laerte Guião et al, **Classificação, Identificação e Aplicações de Nãotecidos,** ABINT, 1999. Disponível em: [http://www.abint.org.br/pdf/Manual\\_ntecidos.pdf](http://www.abint.org.br/pdf/Manual_ntecidos.pdf), acesso em: 08/04/2020.

MURTA, Aurelio Lamare Soares. **O USO DO BIODIESEL PARA REDUZIR AS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> CAUSADAS PELA FROTA DE ÔNIBUS URBANOS DO RIO DE JANEIRO**. Revista Brasileira De Transporte. Vol. 2, pp 84–127, Rio de Janeiro, 2022.

NADALETI, William C; **Blendas de Biodiesel. Síntese, Otimização e Estabilidade Termo-Oxidativa**. All Print, 2015.

NOVO, Benigno N.; MACEDO JÚNIOR, Adriano M; **Biodiesel, o Combustível do Futuro**, Amazon, 2019.

NORMA BRASILEIRA. **NBR-13370: Nãotecido – Terminologia**, 2017.

OLIVEIRA, Marcos Gomes de. **Manual da Filtração Industrial**, São Paulo SP. Artliber, 2013.

PARKER BRAZIL TEAM. **Parker inicia produção do filtro e-max em São José dos Campos**, 2016. Disponível em: <http://blog.parker.com/br/parker-inicia-producao-do-filtro-e-max-em-sao-jose-dos-campos-sp>. Acesso em: 19 set. 2021.

PARKER HANNIFIN. **Tecnologia Hidráulica Industrial**. 2001.

PATEL, Sarfaraz U.; CHASE, George G. **Separation of water droplets from water-in-diesel dispersion using superhydrophobic polypropylene fibrous membranes**. Separation and Purification Technology, Vol. 126, pp62-68, 2014.

PEREIRA, Gislaíne de Souza. **Introdução a Tecnologia Textil**, Araranguá SC. CEFET/SC. 2009.

PETITEAUX, Mathieu; MONSALLIER Guy. **Impacts of biodiesel blends on fuel filters functions, laboratory and field test results**. SAE International, 2009.

PRADO, Marcus V. B do; MORITA, Dione Mari. **Influência do biodiesel de origem vegetal na tensão superficial e interfacial do diesel**. III Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo, 2013.

PURCHAS, Derek; SUTHERLAND, Ken. **Handbook of Filter Media**. Elsevier Science, 2002.

RANGEL, W M; **Tecnologias de fabricação dos nãotecidos**; 2º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul.

REWALD, F. G. **Tecnologia dos nãotecidos: matérias-primas, processos e aplicações finais**, São Paulo: LCTE, 2006.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J1488:2010: Emulsified Water/Fuel Separation and Test Procedure**. Estados Unidos, 2010.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J1839:2010: Coarse Droplet Water/Fuel Separation Test Procedure**. Estados Unidos, 2010.

SAIF, Yoseif Salih. **Water-diesel emulsion: A Review**. IJAET. Vol 10, pp 429-436, junho, 2017.

SHIN, C.; CHASE, G. G. **Water-in-oil Coalescence in Micro-Nanofiber Composite Filters**. *American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 50, pp 343-350, 2004.

SENAI. **Motor de Combustão Interna – Ciclo Diesel**, Editora SENAI, 2016.

SUTHERLAND, Ken. **Filters and Filtration Handbook**. Butterwoth-Heinemann. Estados Unidos, 2008.

STANFEL, Christine M.; PANGESTU, Farina D. **Separation Media and Methods Especially Useful for Separating Water-Hydrocarbon Emulsions Having Low Interfacial Tensions**, Depositante: Ahlstrom Corporation. 0261358 A1. Depósito: 12 abr. 2012. Concessão: 18 out. 2012.

YANG, Chuanfang; LARSEN, Stephen; WAGNER, Steve. **Understanding emulsified water filtration from diesel fuels**. Southwest Research Institute, 8<sup>th</sup> International Filtration Conference, San Antonio, 2007.

YANG, Chuanfang; LEE, Senne; LARSEN, Steve; MADSEN, Mike. **ULSD/Biodiesel blend and its effect on fuel/water separation**. American Filtration & Separation Society Annual Conference, Valley Forge, 2008.

YOSHINO, F. et al.; **Water Separation Challenge for Brazilian Diesel Engine**. SAE International, 2013.

YOSHINO, Fernando; MOREIRA, Fabio; DOMINGUES, Tadeu. **Double Stage Pre-filter Diesel Water Separator**. XXII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 2015.