

FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUTH SILVA RAMOS



**ESTUDO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM INJETOR JATO-Y PARA A
MISTURA DE COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO E BIOCMBUSTÍVEIS**

Guaratinguetá

2017

LUTH SILVA RAMOS

**ESTUDO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM INJETOR JATO-Y PARA A
MISTURA DE COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO E BIOCMBUSTÍVEIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior.

Guaratinguetá

2017

Ramos, Luth Silva
R175e Estudo para o desenvolvimento de um injetor jato-y para a mistura de combustíveis de aviação e biocombustíveis / Luth Silva Ramos. – Guaratinguetá, 2017.
111f : il.
Bibliografia: f. 100-106.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

1. Injetores. 2. Misturas binárias. 3. Farnesano. I. Título

CDU 621.694.2(043)

LUTH SILVA RAMOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
Orientador / UNESP-FEG



Prof. Dr. IVONETE ÁVILA
UNESP-FEG



Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRÍGUEZ
UNIFEI

Janeiro de 2017

DADOS CURRICULARES

LUTH SILVA RAMOS

NASCIMENTO: 16/04/1989 – Salvador/ Bahia/ Brasil.

FILIAÇÃO: Marcos Moacyr Ramos.
Lilian Barros Silva.

2007/2007: Curso Profissionalizante de Informática Avançada, no Centro de Capacitação Tecnológica do Estado do Maranhão.

2008/2008: Curso de extensão de Propulsão Elétrica Espacial Avançada, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/ SP.

2008/2013: Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica e Espaço, na Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos/ SP.

2014/2016: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

“A toda minha família, com todo carinho.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter me concedido a oportunidade de contemplar e entender uma pequena parte de sua infinita obra.

A minha família especialmente aos meus avos que tanto lutaram para que eu pudesse chegar até aqui, em particular minha avó Ivone Barros Silva (em memória), a minha mãe Lílian Barros Silva e tia Ivonete Barros Silva por acreditar em mim, ajudando sempre quando tiveram oportunidade. Em suma a todos meus familiares, irmã, primos e primas, tios e tias pela motivação e incentivo nesta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior pela dedicação e generosidade e também por toda paciência e incentivo que deu durante todo o curso de mestrado.

Aos professores Dr. Christian J. R. Coronado, Dr. Antônio J. F. Bombard e ao professor Marcos Aurélio de Souza por conceder o laboratório da UNIFEI e todo auxílio para realização dos testes experimentais.

Ao técnico Carlos A. dos Santos, Sebastião C. dos Santos, Odilon de S. Barros e a dona Marlene pelo acolhimento e todo auxílio prestado e que possivelmente, sem essa ajuda não conseguiria concluir esse trabalho.

Aos amigos que me apoiaram em especial ao Leandro S. Yoshimatsu, Josué C. dos Santos, Mateus D. Ribeiro, Jorge L. Carneiro Jr., Andrés M. e a todos os colegas e amigos da pós-graduação do DEN/FEG, da UNIFEI e do LCP/INPE que conheci durante este trabalho.

A todos que de alguma forma torcem por mim.

“O presente que o homem faz alarga-lhe o caminho e leva-o perante os grandes”

Provérbios de Salomão.

RAMOS, L. S. **Estudo para o desenvolvimento de um injetor jato-Y para misturas de combustíveis de aviação e biocombustíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

A escassez de combustíveis de origem fóssil tem preocupado setores energéticos e industriais. Outra preocupação eminente são as taxas de emissões de poluentes na atmosfera, causado pelo processo de combustão. Estes processos são responsáveis por grande parte de toda energia primária produzida no mundo. Sendo assim, os biocombustíveis tem sido uma alternativa que atende ambas as preocupações.

Neste cenário, a atomização também assume uma importante função dentro da combustão de líquidos. O atomizador tem por objetivo desintegrar o combustível líquido em pequenas gotículas, misturando-se com o oxidante na proporção correta e nas condições adequadas, para produzir um processo de combustão eficiente e estável, reduzindo significativamente as formações de fuligens.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo teórico de um atomizador do tipo jato-Y, para atomizar misturas de combustíveis com diferentes proporções de QAV-1 + farnesano, QAV-1 + etanol e farnesano + etanol, analisando experimentalmente as propriedades físico-químicas das misturas de combustíveis e teoricamente as características e a qualidade do *spray* gerado, fazendo uso da equação de Wigg para calcular o MMD (diâmetro médio de gotas).

Através das propriedades físico-químicas das misturas de combustíveis é possível analisar possíveis alternativas de combustíveis que podem apresentar características “*drop-in*” e substitua parcialmente ou definitivamente o QAV-1 (querosene de aviação) atualmente consumido.

Qualitativamente o *spray* gerado possui o MMD entre 30 e 40 μm , podendo variar de acordo com a temperatura de trabalho. Sendo assim o atomizador torna-se favorável para um processo de combustão eficiente.

PALAVRAS-CHAVES: Atomização de combustíveis, QAV-1, farnesano, etanol, misturas binárias de líquidos, injetor jato-Y.

RAMOS, L. S. **Study for the development of a jet-Y nozzle to mixtures of aviation fuels and biofuels.** Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – College of Engineering Campus Guaratinguetá, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

The scarcity of fossil fuels has worried the energetic and industrial sectors. Concern also exists about emissions and their impact on the environment, which are a byproduct of the petroleum combustion processes. These processes account for much of the primary energy produced in the world. However, biofuels have been an alternative that meets both concerns.

In this scenario, the atomization also assumes an important function in the combustion of liquids. The atomizer has the goal to disintegrate the liquid fuel in small droplets to have the mixture of fuel/oxidant in the suitable ratio, to produce an efficient and stable combustion process, significantly reducing the formation of soot.

The objective of this work is to perform a theoretical study of one nozzle of the type Y-jet, to atomize a binary mix of fuels with different ratios of jet-A1 + farnesane, jet-A1 + ethanol and farnesane + ethanol, experimentally analyzing the physicochemical properties of the mixtures of fuels and theoretically the characteristics and quality of the formed spray, using the Wigg's equation to calculate the MMD (Mass Median Diameter).

Through the physicochemical properties of the mixtures of fuels, it's possible to analyze possible alternatives of fuel that may have "drop-in" characteristics and partially or definitively to replace the currently consumed jet-A1 fuel.

Qualitatively the formed spray has the MMD between 30 e 40 μm , however can be varied according with the temperature of work. Furthermore, the nozzle is favorable to an efficient combustion process.

KEYWORDS: Fuels atomization, JET A1, farnesane, ethanol, binary mixture of liquids, jet-Y nozzle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação gráfica do preço mensal de petróleo bruto em dólares por barril.....	20
Figura 2. Formação didática do efeito estufa.....	21
Figura 3. Representação esquemática do processo de evaporação da gota, devido o aumento da temperatura.....	27
Figura 4. Modelo de atomização para formação do spray, esquema da zona primária (a) e da zona secundária (b).....	28
Figura 5. Ilustração esquemática dos regimes de atomização do rompimento de gotas segundo Batarseh (2008).....	29
Figura 6. Representação esquemática da formação do spray por um injetor.....	31
Figura 7. Padrões universais do spray gerado a partir do processo de atomização.....	32
Figura 8. Efeitos da pressão em um atomizador centrífugo.....	33
Figura 9. Atomizador por rajada de ar com pré-filme.....	34
Figura 10. Mecanismo de atomização em injetores do tipo Y.....	37
Figura 11. Simulação instantânea da atomização de um injetor jato-T com velocidade do gás igual a 100m/s.....	38
Figura 12. Mecanismos de pulverização em atomizadores jato-Y: (A) Foto; (B) Esquema.....	39
Figura 13. Definição do ângulo de cone.....	40
Figura 14. Ângulo de cone do spray gerado pelo atomizador jato-Y.....	41
Figura 15. Emissão Global de CO ₂	42
Figura 16. Perspectiva de emissão de CO ₂ pela indústria de aviação.....	33
Figura 17. Ciclo do carbono para (a) combustível fóssil e (b) biocombustível usado na aviação.....	34
Figura 18. Base da plataforma do bioquerosene.....	45
Figura 19. Metas para o consumo do bioquerosene no Brasil, segundo o IATA.....	45
Figura 20. Composição química do QAV-1.....	48

Figura 21. Esquema simplificado da formação do farnesano	50
Figura 22. Mecanismo de formação global da fuligem.	61
Figura 23. Fermentação da frutose para produção de etanol.....	53
Figura 24. Aeronave agrícola Ipanema fabricada pela Embraer	55
Figura 25. Foto da instrumentação utilizada no experimento com as misturas de combustíveis.....	59
Figura 26. Foto do líquido misturado com 50% de QAV-1 e 50% de etanol anidro em base mássica.	61
Figura 27. Foto do recipiente de 1 litro de farnesano adquirido pela Amyris Brasil, para realização dos experimentos.....	63
Figura 28. Foto do líquido misturado com 50% de QAV-1 e 50% de farnesano em base mássica.	64
Figura 29. Fotos (a) mistura com 50% de etanol e 50% de farnesano; (b) mistura com 60% de etanol e 40% de farnesano.	66
Figura 30. Foto das três amostras de misturas de combustíveis.....	66
Figura 31. Foto do tensiômetro da marca Lauda TD3 do laboratório de físico-química da UNIFEI.....	68
Figura 32. Método do anel – DuNoüy para medir a tensão superficial de líquidos.	68
Figura 33. Foto do viscosímetro usado no laboratório da NUSEC na UNIFEI	72
Figura 34. Dimensões de projeto de um injetor tipo Y.....	75
Figura 35. Esquema conceitual do VMD, a partir da desintegração da gota.	79
Figura 36. Projeto do atomizador jato-Y.....	84
Figura 37. Variação da tensão superficial com relação à temperatura.	86
Figura 38. Fotos da separação de fase na mistura de BioQAV + etanol em baixa temperatura (10°C)	87
Figura 39. Curva da variação da viscosidade cinemática em função da fração mássica da mistura, segundo a equação de Refutas.....	88
Figura 40. Curva da variação da viscosidade cinemática em função da temperatura. . .	89

Figura 41. Variação da massa específica em função da fração molar da mistura, a temperatura de 20°C	90
Figura 42. Curva da variação da massa específica das misturas, em função da temperatura.....	91
Figura 43. Curva da variação do MMD em função da velocidade relativa entre o líquido e o ar, a temperatura de 20°C..	93
Figura 44. Curva da variação do MMD em função da razão de atomização, a temperatura de 20°C..	94
Figura 45. Curva do SMD calculados pelas equações 38 e 39 para diferentes vazões de combustível.	95
Figura 46. Curva da variação do MMD em função da temperatura.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valências saturadas dos elementos.....	26
Tabela 2. Transição do número de Weber em diferentes regimes.....	30
Tabela 3. Fatores que afetam o desempenho da atomização.....	36
Tabela 4. Resumo dos testes em voo com boa performance usando diferentes tipos de biocombustíveis.....	46
Tabela 5. Propriedades físico-químicas do álcool etílico hidratado.....	54
Tabela 6. Propriedades físico-químicas do QAV-1 na aviação civil.....	60
Tabela 7. Propriedades físico-químicas do farnesano.....	62
Tabela 8. Propriedades físico-químicas do álcool etílico anidro.....	65
Tabela 9. Recomendações para projeto das dimensões do atomizador tipo jato-Y	76
Tabela 10. Definição da geometria interna do injetor jato-Y	83
Tabela 11. Medidas experimentais das propriedades físicas das misturas de combustíveis variando com a temperatura.....	85
Tabela 12. Comparação entre os resultados obtidos teroricamente e por experimento da viscosidade cinemática a temperatura de 20°C.....	89
Tabela 13. Comparação entre os resultados obtidos teoricamente e por experimento da massa específica a temperatura de 20°C.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
AIAB	Associação das Industriais Aeroespaciais do Brasil
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ATAG	Air Transport Action Group
BioQAV	Farnesano
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
FAA	Federal Aviation Administration
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IATA	International Air Transport Association
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
INPM	Teor alcoólico em massa
JP	Querosene de Aviação de uso Militar
MMD	Mass Median Diameter
NFTA	National Fire Protection Association
NR	Normas Regulamentadoras
PIS	Programa de Integração Social e Formação do Patrimônio do Servidor
QAV	Querosene de Aviação
SMD	Sauter Mean Diameter
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
USAF	United States Air Force
VMD	Volume Median Diameter

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Velocidade do som	m/s
A	Área	m ² /s
C_D	Coefficiente de descarga	
D_{32}	Diâmetro médio de Sauter	µm
D_{50}	Diâmetro médio de massa	µm
d	Diâmetro	(m)ou(mm)
E_a	Energia de ativação	
F	Força	N
f	Razão de mistura	
f_s	Razão de mistura estequiométrica	
G	Número de valência	
k	Razão dos calores específicos	
M	Número de Mach	
\dot{m}	Vazão mássica	kg/s
P	Pressão	kPa
R	Constante universal do gás	J/kgK
R_m	Raio	Mm
r_{atm}	Razão de atomização	
T	Temperatura	K
t	Tempo	s
U	Velocidade	m/s
V	Volume	m ³
v_i	Velocidade de injeção	m/s
VBN	Número da viscosidade da mistura	
X	Fração molar	
Y	Fração mássica	
We	Número de Weber	
Z	Fator de corração	
ϕ	Razão de equivalência	
ρ	Densidade	kg/m ³
ν	Viscosidade Cinemática	cSt

μ	Viscosidade dinâmica	Pa.s
σ	Tensão superficial	N/m
φ	Ângulo de cone	°
θ	Ângulo	°
Δ	Variação	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivos do trabalho.....	22
1.2.1. Objetivo geral	22
1.2.2. Objetivos específicos	22
1.3. Metodologia do trabalho.....	23
1.4. Estrutura do trabalho.....	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1. Fundamentos da combustão.....	25
2.2. Atomização de líquidos	28
2.3. Injetor.....	31
2.3.1. Atomizador do tipo jato Y	36
2.3.2. Ângulo de cone (φ)	40
2.4. Combustíveis aeronáuticos	41
2.5. Querosene de aviação (QAV-1)	47
2.6. Farnesano (BioQAV).....	49
2.7. O etanol.....	53
2.7.1. Álcool etílico hidratado (AEHC).....	54
2.7.2. Álcool etílico anidro (AEAC)	56
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1. Parâmetros das misturas de líquidos.....	57
3.2. Procedimento experimental.....	58
3.2.1. Mistura de QAV-1 + etanol.....	60
3.2.2. Mistura de QAV-1 + BioQAV	62
3.2.3. Mistura de BioQAV + etanol	64
3.3. Tensão superficial.....	67

3.4. Viscosidade	69
3.5. Massa específica	72
3.6. Considerações para o projeto do atomizador jato Y	73
3.7. Procedimento dos cálculos envolvidos no projeto do injetor jato Y	76
3.8. Modelação teórica do diâmetro mediano de massa para o atomizador tipo Y	78
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PROJETO	83
4.1. Projeto do injetor jato Y	83
4.2. Resultados dos parâmetros físicos das misturas de combustíveis	84
4.2.1 Análise da tensão superficial das misturas de combustíveis	85
4.2.2. Análise da viscosidade das misturas de combustíveis	88
4.2.3. Análise da massa específica das misturas de combustíveis	90
4.3. Análise dos resultados referentes ao diâmetro mediano de massa	92
5. CONCLUSÕES	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	100
APÊNDICE A:	107
APÊNDICE B:	112

1. INTRODUÇÃO

Em diversos processos da atividade humana é necessária a transformação da massa, de um determinado líquido, por exemplo, em pequenas gotas e a este processo é dado o nome de atomização. O processo de atomização é fundamental em muitos processos químicos, farmacêuticos, domésticos, na agricultura e no setor industrial de modo geral. Um exemplo disto pode ser observado no processo de combustão de líquido e/ou gás em motores diesel, motores a ignição por centelha, turbinas, motores foguete e fornalhas industriais.

No ciclo básico de uma turbina a gás, por exemplo, o ar atmosférico é aspirado, comprimido no compressor e encaminhado a alta pressão para uma câmara de combustão. O ar é misturado com o combustível pulverizado que logo passa pela ignição através de uma fonte de calor. A partir disto, se inicia o processo de combustão onde o gás obtido a alta pressão e temperatura é enviado a uma turbina, onde é expandido até o exaustor, gerando potência no eixo da turbina. Os projetos de turbinas a gás dedicado ao setor aeronáutico são realizados de modo diferente das turbinas estacionárias para geração de potências, onde o objetivo é maximizar a potencia a ser extraída no eixo do equipamento.

A combustão de líquidos de modo especial dependente unicamente de um processo de atomização eficiente para aumentar a área superficial específica do combustível e atingir altas taxas de mistura e evaporação. Na maioria dos sistemas de combustão, a redução do diâmetro médio da gota leva a altas taxas volumétricas de liberação de calor, à facilidade de acendimento, a uma faixa maior de queima e a uma menor produção de poluentes.

Segundo Lefebvre (1989), este processo de atomização é aquele em que um jato, folha ou filme líquido é desintegrado pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a uma corrente de ar ou gás a alta velocidade ou como resultado da aplicação de energia mecânica externa através de dispositivos rotativos ou vibratórios. Estes dispositivos mecânicos que influenciam o fluido de operação podem ser definidos como atomizadores ou injetores. O escoamento que flui no interior deste atomizador governa a turbulência do líquido ejetado.

O desenvolvimento do jato ou lâmina de líquido na saída do injetor e o crescimento de pequenas perturbações que conduzem à desintegração em ligamentos e depois em pequenas gotas. Estes fenômenos são de importância fundamental para a

determinação da forma e da penetração do *spray* resultante, assim como o valor da velocidade do jato e a distribuição do tamanho das gotas formadas. Todas estas características são bastante afetadas pela geometria interna do atomizador, pelas propriedades do meio gasoso e pelas propriedades físicas do líquido. Por exemplo, uma maior viscosidade do líquido inibe o crescimento de instabilidades hidrodinâmicas e atrasa o início da desintegração do jato líquido saindo do injetor. Na maioria dos casos, a turbulência no líquido, a cavitação no bocal e a interação aerodinâmica com o meio gasoso, que aumenta com a densidade do meio, contribuem para a atomização (LEFEBVRE, 1989).

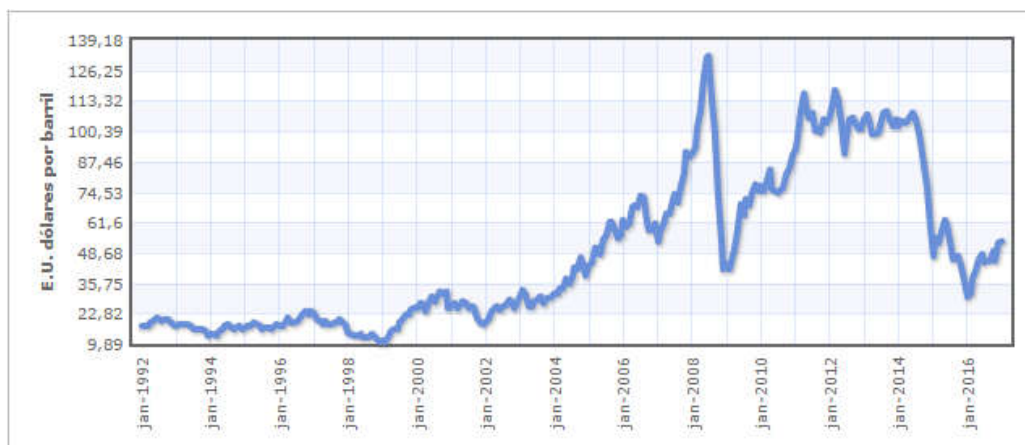
Sendo assim, a escolha do atomizador depende de inúmeros fatores mecânico, termodinâmicos e principalmente das propriedades físico-químicas do fluido que será empregado no projeto. Estes fatores são geralmente determinados antes do início do teste com o injetor, através de estudos teóricos e experiências precedentes bem sucedidas.

1.1. Justificativa

O desenvolvimento dos países exige o crescimento da produção de energia e combustíveis para a movimentação das indústrias e do transporte, sendo os combustíveis fósseis a matéria prima principal para a obtenção desta energia. Mundialmente, é conhecido e aceito o fato de que os combustíveis fósseis são uma fonte de energia não renovável e, portanto, irão se esgotar.

Neste contexto, cada vez mais o preço da gasolina, querosene, diesel e derivados de petróleo tendem a aumentar e, a cada ano, o consumo aumenta e as reservas diminuem. Além do problema físico, há o problema político, onde a cada ameaça de guerra ou crise internacional, o preço do barril de petróleo dispara, em agosto de 2008, por exemplo, superou a barreira do US\$ 130,00 (THEGARID *et al.*, 2014). A Figura 1 apresenta a variação do preço do barril de petróleo desde 1992 até os dias atuais, sendo assim confirmado que, o preço do barril de petróleo tende a ser volátil.

Figura 1. Representação gráfica do preço mensal de petróleo bruto em dólares por barril.



Fonte: Índex Mundi (2017).

Além destes aspectos, agravam-se também os problemas ambientais, causado por esse consumo acelerado de combustíveis fósseis, contribuindo para o fenômeno do aquecimento global (SUAREZ *et al.*, 2009).

A atmosfera é constituída por diversos gases, sendo 99% destes gases são compostos por N_2 e O_2 . Contudo o dióxido de carbono, metano e o óxido nitroso são os contribuintes gasosos da atmosfera que mais tem sido estudado nas últimas décadas. Entretanto, a atenção prioritária tem sido dada ao CO_2 , uma vez que o volume de suas emissões para atmosfera corresponde em aproximadamente 55% do total das emissões de gases de efeito estufa e seu tempo de permanência na atmosfera estende-se por pelo menos 10 décadas (MCT, 1999).

O CO_2 tem propriedades que permitem que ondas eletromagnéticas solares sejam atenuadas pela atmosfera e aqueçam a superfície terrestre.

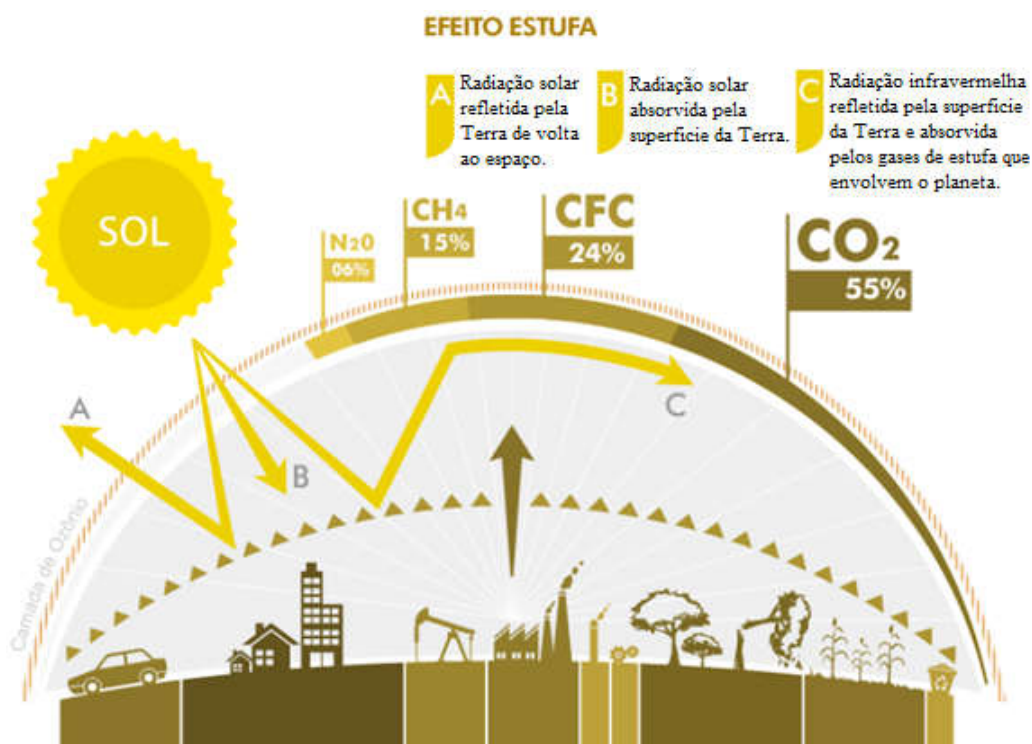
Segundo Amorin (2012) a descrição física do fenômeno de efeito estufa é citada como:

“O comprimento de onda da radiação solar é muito curto e ultrapassa a atmosfera terrestre sem interação com os gases presentes nesta camada. Ao atingir a superfície terrestre a radiação solar é refletida e volta para a atmosfera com um comprimento de onda mais longa (radiação infravermelha) que interage parcialmente com os gases do efeito estufa presente nesta camada. Parte desta irradiação é absorvida pela atmosfera aumentando a temperatura do ar. Contudo, esta mesma camada dificulta a saída da radiação infravermelha emitida pela terra, isso impede que ocorra

uma perda demasiada de calor irradiado para o espaço, especialmente à noite, mantendo, assim, a terra aquecida.”

O crescimento de atividades antrópicas proporciona o aumento do efeito estufa contribuindo para o aumento do aquecimento do planeta, como ilustra a Figura 1.

Figura 2. Formação didática do efeito estufa.



Fonte: Amorin (2012).

Sendo assim, as fontes renováveis de energia assumem um importante papel no mundo contemporâneo devido à possibilidade de escassez das reservas de petróleo, à flutuação dos preços dos combustíveis fósseis e à poluição ambiental gerada pelo emprego destes combustíveis (THEGARID *et al.*, 2014). As buscas de novas fontes de energia renovável asseguram o desenvolvimento sustentável da sociedade mundial, assim como a necessidade de um substituto energético capaz de manter o modo de produção atual, o que leva ao desenvolvimento de novas tecnologias. Uma destas tecnologias utiliza a biomassa para produzir combustíveis e materiais de fontes renováveis de carbono, os quais foram chamados de biocombustíveis.

O uso dos biocombustíveis geralmente apresenta inúmeros benefícios, incluindo sustentabilidade, redução dos gases efeito estufa, desenvolvimento regional, social e agrícola (DEMIRBAS, 2006). Isto tem proporcionado estudos que são dirigidos para promover soluções de engenharia que se adaptam no cenário global.

O injetor do tipo jato-Y encontra bastante espaço em aplicações industriais, tornando um estudo significativo para indústria. Por esta razão, a proposta deste trabalho tem como objetivo fazer um estudo teórico a fim de desenvolver um injetor que possua capacidade de atomizar líquidos viscosos, como o caso das misturas do querosene de aviação com biocombustíveis avaliando suas características do *spray* gerado pelo atomizador, visando aplicações em turbinas a gás, queimadores e em câmaras de combustão industriais.

1.2. Objetivos do trabalho

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é projetar um atomizador do tipo jato-Y que possua capacidade de atomizar líquidos viscosos, como as misturas de querosene de aviação + farnesano, querosene de aviação + etanol e farnesano + etanol, avaliando teoricamente suas características e a qualidade do *spray* gerado a partir da equação de Wigg para diferentes proporções de misturas.

1.2.2. Objetivos específicos

Adicionalmente, os seguintes objetivos específicos serão buscados:

- ✓ Propor alternativas de misturas de combustíveis que possam substituir parcialmente ou definitivamente o querosene de aviação de origem fóssil;
- ✓ Fazer a caracterização das misturas;
- ✓ Estudar como as propriedades físico-químicas das misturas de combustíveis influenciam o processo de atomização;
- ✓ Projetar um atomizador jato-Y;
- ✓ Estudar as características físico-mecânicas do *spray* gerado para aplicações práticas.

1.3. Metodologia do trabalho

Este trabalho apresenta uma análise teórica avaliando o uso das misturas de combustíveis com biocombustíveis, propondo alternativas sustentáveis que substitua parcialmente ou definitivamente o querosene de aviação (QAV-1) derivado do petróleo.

Inicialmente será feito uma revisão bibliográfica abordando os conceitos dos combustíveis escolhidos para estudo, entre eles o QAV-1, o farnesano e o etanol, extraindo dados preliminares sobre as características químicas e energéticas dos combustíveis.

Em seguida foram feitas a caracterização das três misturas de combustíveis (QAV-1 + farnesano (BioQAV), QAV-1 + etanol e BioQAV + etanol), a fim de analisar suas propriedades físico-químicas que influem no processo de atomização. Os dados obtidos nesta análise foram extraídos de experimentos realizados nos laboratórios de química da UNIFEI.

É feito um cálculo simples baseado na teoria unidimensional do escoamento monofásico para determina a geometria de um injetor do tipo Y e modelar uma representação gráfica em 3D no software Autodesk Inventor.

Também é feita uma análise teórica do funcionamento do injetor tipo Y em condições de regime sônico, calculando o diâmetro médio de gotas do *spray* produzido por este injetor, para cada mistura de combustível.

1.4. Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 apresenta uma introdução sobre atomização de líquidos e também aborda na justificativa a importância da escolha dos combustíveis no processo da combustão, assim como as considerações econômicas e ambientais que afetam na escolha destes. Ainda neste capítulo serão apresentados os objetivos e a metodologia para realizar o trabalho.

O Capítulo 2 apresenta fundamentos teóricos do trabalho consistindo numa revisão bibliográfica sobre os combustíveis escolhidos e a influência dos injetores no processo de atomização, assim como parâmetro de desempenho, tipos, uso, ângulo de cone e suas relevâncias na combustão de líquidos. Neste capítulo também apresenta o conceito do injetor jato-Y explicando os fenômenos do escoamento dos fluidos no interior do atomizador e será abordada uma breve introdução conceitual da combustão de líquidos.

O Capítulo 3 apresenta os cálculos fundamentais para misturas de líquidos, assim como os aparatos e procedimentos experimentais que foram utilizadas para obtenção de dados, a fim de identificar as propriedades físico-químicas das misturas propostas no trabalho. Neste capítulo também apresenta as considerações preliminares para o projeto do injetor jato-Y e também a modelação teórica para formação do *spray*.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais da massa específica, viscosidade e tensão superficial das misturas líquidas, assim como os cálculos do projeto do atomizador jato-Y e a definição de sua geometria. Também será apresentada neste capítulo uma discussão sobre a equação de Wigg e suas implicações, assim como a influências da velocidade relativa, da razão de atomização, da vazão mássica e o efeito da temperatura na formação do diâmetro médio de gota.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho baseada nos resultados obtidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fundamentos da combustão

Segundo Carvalho e McQuay (2007), a combustão é caracterizada por uma reação exotérmica muito rápida entre combustível e oxidante formando produtos saturados, esse processo acompanha a liberação de luz e calor, como descreve a equação 1.



Este princípio atende a lei de Lavoisier que menciona “Em uma reação química a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos” referente ao balanço de massas em uma reação química.

Normalmente, os átomos de carbono e hidrogênio são tipicamente considerados elementos de combustível e os átomos de oxigênio, cloro e flúor são elementos de oxidantes (CARVALHO E McQUAY, 2007). No entanto pode haver dúvidas quanto à função desempenhadas de algumas substâncias nas reações, não identificando claramente se é combustível ou oxidante.

Sendo assim, pode-se fazer o cálculo da soma das valências saturadas dos elementos da molécula, a fim de determinar se a substância química atua como combustível ou oxidante, como define a equação 2:

$$G = \sum_{j=1}^n i_j G_j \quad (2);$$

Sendo, i_j o número de átomos do elemento j na molécula e G_j é a valência saturada do elemento j .

A valência saturada de um elemento corresponde ao número de elétrons utilizados para completar seu último orbital ao formar uma molécula. A Tabela 1 a seguir apresenta os valores das valências saturadas dos elementos.

Tabela 1. Valências saturadas dos elementos.

Elementos	Valências Saturadas	Características
C, Si	-4	Propriedades de combustíveis
B, Al	-3	
Be, Mg	-2	
H, Li, Na, K	-1	
N, P	0	Normalmente inertes
He, Ne, Ar	0	Sempre inertes
F, Cl, Br, I	+1	Propriedades de oxidantes
O, S	+2	

Fonte: Hirschfelder *et al.* (1954) (adaptado).

A partir deste conceito, também pode-se definir combustível como uma substância cuja molécula apresenta valência saturada negativa e oxidante como uma substância cuja molécula apresenta valência saturada positiva. Em suma, um combustível perde elétrons ao se ligar com o oxidante enquanto este, ganha elétrons.

Quando a valência é igual a zero, a substância pode ser definida como produto de combustão saturada, elemento inerte ou monopropelente.

A partir da definição apresentada, o número de valência obtido para as substâncias químicas escolhidas neste trabalho, entre elas o QAV-1, o farnesano e o etanol são respectivamente -53, -88 e -8 que os define como combustível.

O ar atmosférico é o oxidante proposto para análise neste trabalho, cuja valência é de +4 e sua fração molar corresponde a 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio respectivamente (CARVALHO E McQUAY, 2007).

Segundo Carvalho e McQuay (2007), a quantidade mínima teórica de oxidante necessária para haver a combustão é chamada de quantidade estequiométrica. Há três parâmetros de misturas para obter a representação da quantidade de oxidante usado na combustão de um dado combustível, entre esses parâmetros está a razão de mistura (f), razão de mistura estequiométrica (f_s) e a razão de equivalência (ϕ), definidas pela equações 3, 4 e 5:

$$f = \frac{\text{massa de combustível}}{\text{massa de oxidante}}$$

(3);

$$f_s = \frac{\text{massa de combustível estequiométrica}}{\text{massa de oxidante estequiométrica}} \quad (4);$$

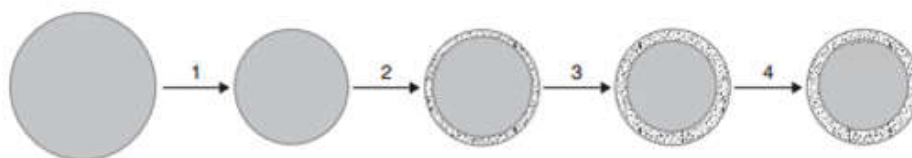
$$\phi = \frac{f}{f_s} \quad (5).$$

Portanto, para um valor $\phi < 1$, a combustão é pobre, ou seja, representa um processo de combustão com mais oxidante do que combustível no caso estequiométrico. De outra maneira, um valor $\phi > 1$ indica combustão rica (excesso de combustível). Quando $\phi = 1$ a combustão é estequiométrica.

Estes parâmetros são essenciais para o estudo da combustão de gases e líquidos. Especialmente na combustão de líquidos onde através de dispositivos mecânicos tem a função de desintegrar o fluido, formando micro gotas que tem por finalidade diminuir as perdas no processo de combustão.

Na combustão de líquido a superfície da gota se vaporiza reduzindo o tamanho da gota e estabelecendo uma nuvem de micro-partículas líquidas como mostra a Figura 3. As gotas se vaporizam e o vapor total produzido é transportado para o exterior do spray, onde é misturado com o oxidante para queimar de uma maneira similar a uma chama de difusão gasosa.

Figura 3. Representação esquemática do processo de evaporação da gota, devido o aumento da temperatura (adaptado).



Fonte: Ashgviz (2011).

O processo de vaporização de uma gotícula é proporcional a área superficial da gota, em suma, quanto menor a gota mais rápida será o processo de vaporização, reduzindo significativamente o número de fuligens formado durante a combustão do líquido.

2.2. Atomização de líquidos

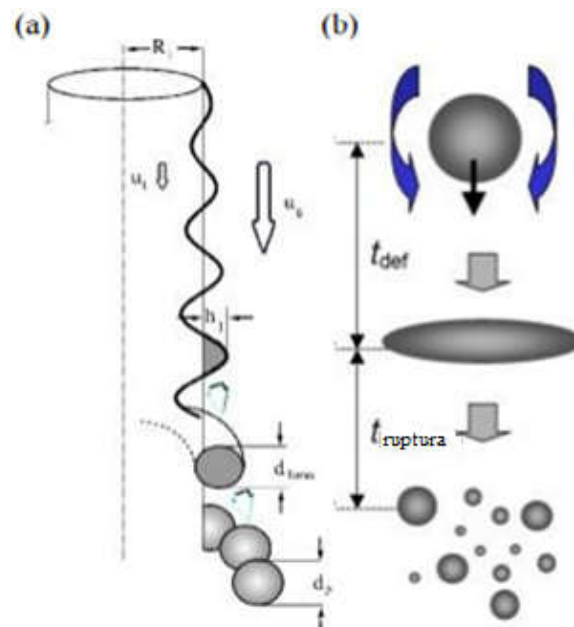
A atomização é um processo de transformação de líquidos em sprays ou nuvens de gotas em uma atmosfera gasosa. Esse dispositivo mecânico é responsável por gerar perturbações no fluido, ou seja, origina um escoamento turbulento necessário para formação de gotas.

Basicamente existem duas configurações principais que levam a formação do *spray*: Jato líquido e filme líquido.

Os jatos líquidos, quando em contato com um meio gasoso, sofrem oscilações ao longo dos seus comprimentos devido a interações na fronteira entre as duas fases (líquida e gasosa). A desintegração de um jato líquido pode ser causada por ondas ou oscilações axissimétricas, assimétricas ou por forças aerodinâmicas que dependem essencialmente da velocidade do jato (BAYVEL E ORZECOWSKI, 1993).

O processo de desintegração do jato líquido para formação de gotas ainda pode ser dividido em duas zonas: Zona primária e zona secundária, assim como mostra a Figura 4.

Figura 4. Modelo de atomização para formação do spray, esquema da zona primária (a) e da zona secundária (b).

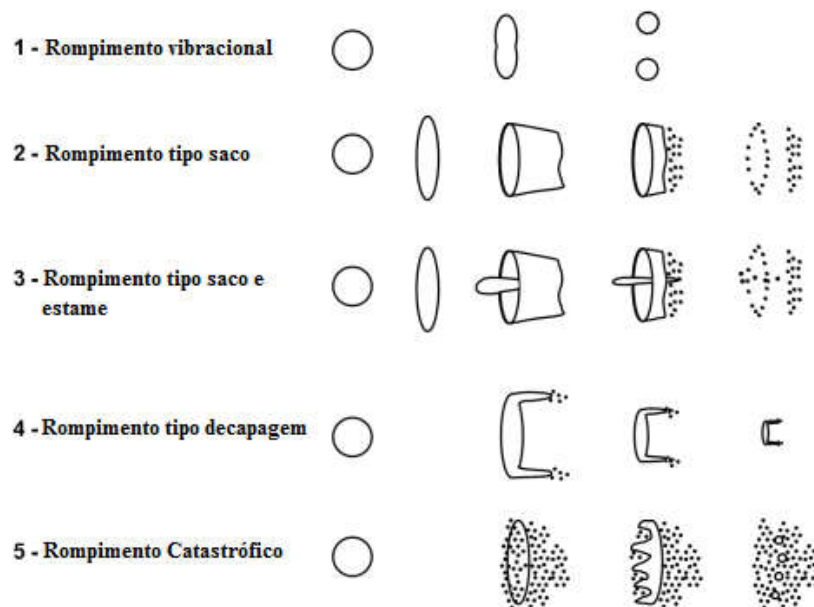


Fonte: Fung (2013).

Na região primária observa-se o rompimento do jato de líquido para formações das gotas primárias com diâmetro relativamente grande, na região secundária nota-se o rompimento das gotas primárias para formação de pequenas gotículas com diâmetro de gota relativamente reduzido.

Em suma, a zona primária determina a condição inicial da formação do spray que estão sujeitas a desintegração secundária. A desintegração secundária também pode ser categorizada em vários regimes. Segundo Batarseh (2008), cinco diferentes regimes de desintegração secundária apresentados são baseados de acordo com o número de Weber, como ilustra a Figura 5.

Figura 5. Ilustração esquemática dos regimes de atomização do rompimento de gotas segundo Batarseh (2008).



Fonte: Batarseh (2008) (adaptado).

Segundo Ribeiro (2015), a velocidade relativa entre a interface do líquido e gás induz forças aerodinâmicas que criam oscilações na superfície da gota. O crescimento da amplitude destas oscilações resulta na quebra dessas gotículas. O número de Weber do gás pode ser definido pela equação 6:

$$We_g = \frac{\rho_g U^2 d}{\sigma}$$

(6);

onde, ρ_g é a massa específica do gás, U é a velocidade relativa do jato, d é o diâmetro de saída do injetor e σ é a tensão superficial do fluido de trabalho.

O número de Weber do gás é um parâmetro relevante para o mecanismo de rompimento de gotas. Esse número é a relação entre a força aerodinâmica exercida no jato líquido, que tende a quebrar as gotículas em menores proporções e a tensão superficial do fluido de trabalho. À medida que as gotas ficam menores, a tensão superficial necessária para quebrá-las torna-se maior, portanto a velocidade relativa também deve aumentar para desintegração da gota.

Através de pesquisas experimentais diferentes regimes de rompimento de gotas podem ser divididos de acordo com o número de Weber. A Tabela 2 apresenta a variação do número de Weber para diferentes regimes de rompimento de gotas.

Tabela 2. Transição do número de Weber em diferentes regimes.

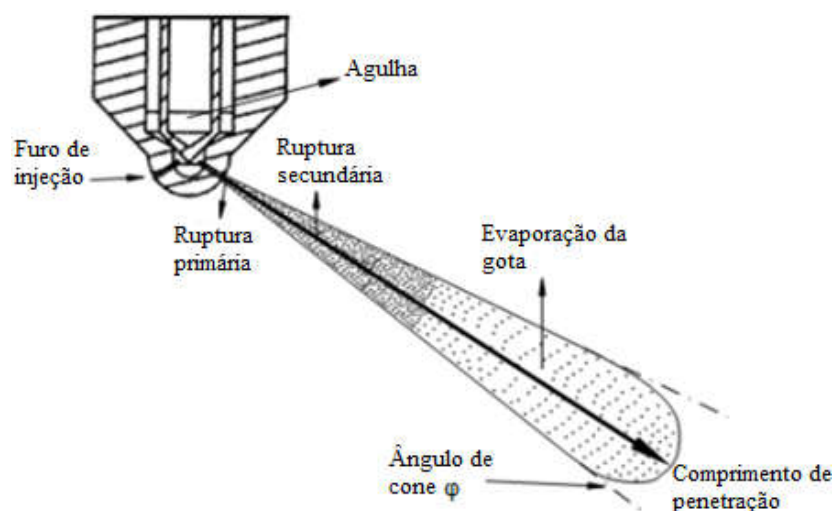
Regimes	Número de Weber
Rompimento vibracional	$We < 12$
Rompimento tipo saco	$12 < We < 50$
Rompimento tipo saco e estame	$50 < We < 100$
Rompimento tipo decapagem	$100 < We < 350$
Rompimento catastrófico	$350 < We$

Fonte: Batarseh (2008) (adaptado).

Através da Tabela 2 é possível analisar as relevâncias da ruptura das gotas formadas na zona secundária.

Em suma, o dispositivo mecânico responsável pela transformação do líquido é conhecido como atomizador ou injetor. A partir deste conceito observa-se as características da formação do spray e as etapas da desintegração do jato líquido até a evaporação da gota no processo de combustão. Sendo assim, quanto menor o tamanho de gota mais fácil e rápido será a evaporação do líquido, isso contribui para redução de fuligens na combustão de líquidos. A Figura 6 esquematiza a formação do jato de spray formado a partir de um atomizador.

Figura 6. Representação esquemática da formação do spray por um injetor.



Fonte: Ribeiro (2015).

2.3. Injetor

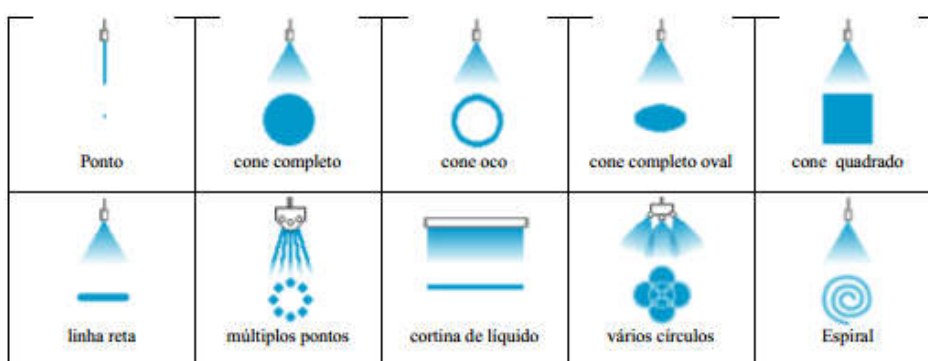
Um *spray* pode ser produzido de vários modos. Essencialmente, tudo o que se necessita é uma alta velocidade relativa entre o líquido a ser atomizado e o meio gasoso. Alguns atomizadores atingem esse objetivo pela descarga de um jato do líquido em alta velocidade em um meio gasoso que se move lentamente. Exemplos notáveis são os atomizadores por pressão e os atomizadores rotativos, que ejetam o líquido em alta velocidade da periferia de um disco rotativo ou copo. Outros atomizadores expõem o filme líquido de baixa velocidade a uma corrente gasosa de alta velocidade. Estes podem ser atomizadores com dois fluidos (*twin-fluid*), assistidos por ar (*air-assist*) ou por rajada de ar (*air blast*) (LEFEBVRE, 1989).

A influência do tipo de atomizador está marcada pela geometria e pelo princípio físico para desintegração do líquido. Os injetores de orifício pleno produzem cones de atomização que têm o maior tamanho de gota seguido por *sprays* planos (*flat spray*) e injetores de jato cônico oco (*hollow cone*). Esta tendência se aplica igualmente a injetores hidráulicos (*hydraulic atomizing nozzles*) e injetores assistidos por ar (injetores de fluido duplo e assistidos por ar), no entanto, os injetores assistidos por ar fornecem *sprays* com gotas muito finas que são menores em tamanho que as tradicionais obtidas em injetores hidráulicos (QUISPE GONZÁLES, 2013).

O ângulo do cone do *spray* depende da geometria do injetor, pois este produz efeitos inversos, já que ao se aumentar a medida do ângulo do cone se reduz o tamanho das gotas e vice-versa, assim como ilustra a Figura 6.

Entre diversos fatores a geometria interna do injetor também influencia na padronização da atomização. O padrão de atomização caracteriza-se à seção transversal do impacto do fluido de trabalho sobre uma superfície. A Figura 7 apresenta os padrões universais de sprays produzidos em processos de atomização.

Figura 7. Padrões universais do spray gerado a partir do processo de atomização.



Fonte: Apaza Vasquez (2011).

Entre uma gama variedades de injetores, o mesmo é determinado de acordo com o objetivo do projeto ou até mesmo a função que irá desempenhar ao longo do tempo. Na indústria, por exemplo, existem muitos tipos de atomizadores disponíveis e seu uso depende da área de aplicação. Os dispositivos de injeção do combustível são agrupados principalmente segundo o princípio de atomização ou mesmo conforme sua função específica.

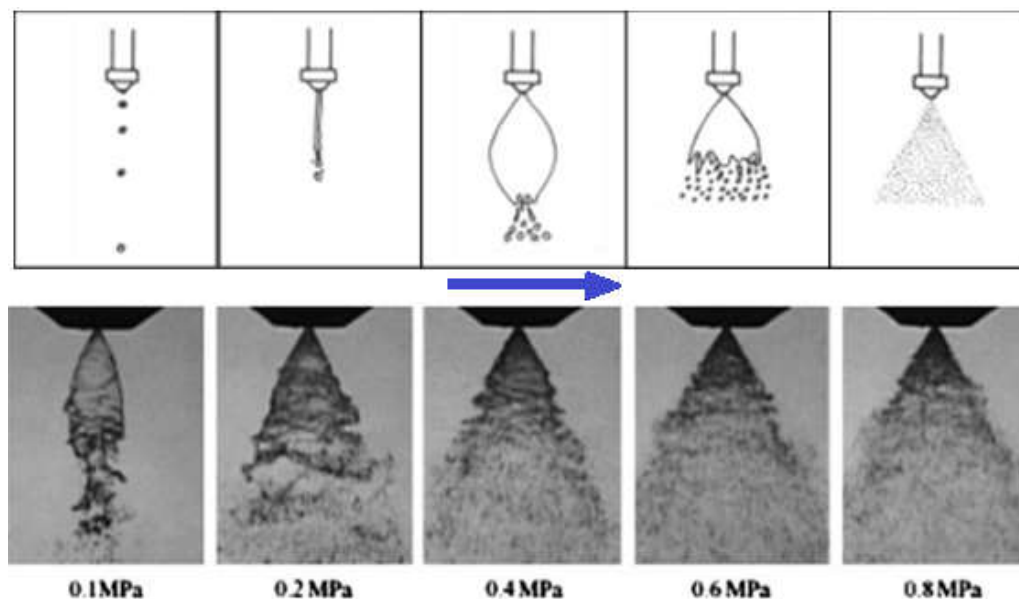
Segundo Apaza Vasquez (2011), os atomizadores mecânicos ainda podem ser classificados quanto ao tipo. Entre eles destacam-se a injeção por pressão, injeção assistidos por ar e injeção por rajada de ar.

Entre os injetados por pressão estão:

- ✓ Injetor centrífugo é um atomizador mecânico cujo fluido escoar em canais tangenciais para uma pré-câmara, tendo por finalidade a geração de vórtice. O líquido girando dentro da pré-câmara cria um núcleo de ar que ao sair pelo orifício do injetor forma um filme líquido cônico e oco que se desintegra e provoca a formação do spray fino.

O efeito da pressão nos injetores centrífugos ocorre em virtude da velocidade de rotação do fluido influenciada diretamente pela pressão. Em suma quanto maior a pressão melhor será a pulverização do líquido e maior será o ângulo de cone, como ilustra a Figura 8.

Figura 8. Efeitos da pressão em um atomizador centrífugo (adaptado).



Fonte: Ashgriz (2011).

A variação da pressão influencia nas diferentes características do spray formado. Este conceito é válido para a maioria dos injetores.

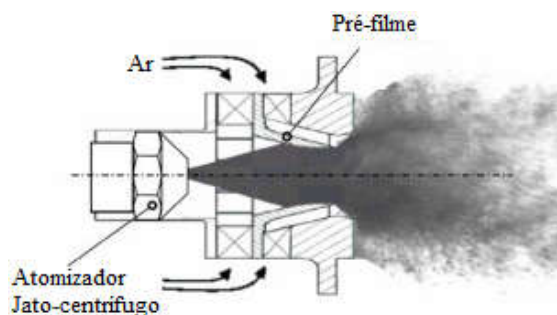
- ✓ Injetor jato centrífugo é caracterizado por ser a combinação de dois tipos de injetores. Esse injetor tem a mesma característica de um injetor centrífugo e também possui a presença de um jato axial que produz na saída do orifício de descarga um padrão de *spray* na forma de um cone sólido ao invés de um cone oco como nos injetores centrífugos, como observado na Figura 7 (BAYVEL E ORZECOWSKI, 1993).
- ✓ Injetores rotativos são bastante comuns no setor agrícola, usado principalmente na irrigação das plantações. Esses injetores fazem uso de um dispositivo mecânico que gira em grande velocidade, através de motores elétricos. O líquido escoava radialmente para periferia do dispositivo (pode ter forma de disco, ou

outras formas) causando o espalhamento do filme líquido que se fragmenta em pequenas gotas.

Entre a injeção assistida por ar ou por rajada de ar estão:

- ✓ Injetor de duplo fluido envolve a atomização do líquido feita por um fluido auxiliar. Esse fluido auxiliar (normalmente sendo o gás) possui alta velocidade, no qual é acelerado através de canais colocados em rota de colisão com o fluxo do líquido. Em geral, esses atomizadores são bastante usados em queimadores industriais devido a disponibilidade do ar comprimido como fluido auxiliar.
- ✓ Injetor por rajada de ar (*air blast atomizer*) é semelhante ao injetor de duplo fluido assistido por ar, porém o injetor *air blast* emprega uma grande quantidade de gás a velocidades bem mais baixas (< 100 m/s), quando comparado com o injetor assistido por ar. A Figura 9 ilustra um injetor *air blast* com pré-filme, onde a fase líquida é inicialmente inserida por um atomizador jato-centrífugo. A fase gasosa em seguida interage com as partículas líquidas dentro do atomizador formando um spray ainda mais fino.

Figura 9. Atomizador por rajada de ar com pré-filme.



Fonte: Batarseh (2008).

Há muitos outros tipos de atomizadores com funções específicas, entre eles estão injetores eletrostático, injetores sônicos, ultra-sônicos, ventilador (windmill), efervescente, vibração capilar, todos atendem funções específicas de acordo com a sua finalidade.

Em diversos processos de combustão industrial, utilizam-se combustíveis líquidos, os quais devem ser atomizados em gotas finas para garantir um bom desempenho da combustão. Entre as principais características que um injetor deve oferecer estão (QUISPE GONZALES, 2013; PEREZ, 2007; LACAVA, 2000):

- ✓ Boa atomização em uma ampla faixa de vazão.
- ✓ Capacidade de atomizar diferentes tipos de líquidos combustíveis com diferentes propriedades, especificamente numa ampla faixa de viscosidades.
- ✓ Baixas pressões de funcionamento, o que evita o encarecimento dos equipamentos e linhas de suprimento.
- ✓ Amplos ângulos do cone de atomização em baixas vazões mássicas, para obter maior dispersão.
- ✓ Ampla faixa de operação, a qual se define como a razão entre a máxima vazão de combustível e a mínima vazão, mantendo a pressão de suprimento constante.
- ✓ Capacidade de trabalhar em espaços fechados com pouca turbulência.
- ✓ Capacidade de evitar o entupimento e acúmulo de carvão e outros resíduos.

Na grande maioria dos processos industriais são utilizados atomizadores assistidos por ar, onde o ar comprimido fornece a energia necessária para atomização do líquido. Esta tecnologia, apesar de ser relativamente cara, permite a produção de gotas finas, de modo a satisfazer as necessidades de qualquer aplicação industrial (QUISPE GONZALES, 2013; LACAVA, 2000).

Além da influência da geometria do injetor, outros parâmetros de funcionamento afetam a formação do spray, entre esses parâmetros estão às propriedades físicas do fluido de trabalho como a densidade, viscosidade, vazão, temperatura e tensão superficial, que será discutido com mais assiduidade nos próximos capítulos deste trabalho. A Tabela 3 apresenta um resumo dos fatores que influenciam no processo de atomização.

Tabela 3. Fatores que afetam o desempenho da atomização.

Característica do injetor	Incremento da pressão	Incremento da massa específica	Incremento da viscosidade	Incremento da temperatura	Incremento da tensão superficial
Qualidade da distribuição	Melhora	Desprezível	Deteriora-se	Melhora	Desprezível
Tamanho de gota	Diminui	Desprezível	Aumenta	Diminui	Aumenta
Ângulo de cone	Aumenta e logo diminui	Desprezível	Diminui	Aumenta	Diminui
Vazão do líquido	Aumenta	Diminui	Cone cheio/oco: Aumenta Cone plano: Diminui	A depender do injetor usado e do fluido atomizado	Sem efeito
Velocidade das gotas	Aumenta	Diminui	Diminui	Aumenta	Desprezível
Desgaste do injetor	Aumenta	Desprezível	Diminui	A depender do injetor usado e do fluido atomizado	Sem efeito

Fonte: Quispe Gonzáles (2013).

2.3.1. Atomizador do tipo jato-Y

No injetor do tipo jato-Y, o líquido e o fluido de atomização (em geral, o ar) são supridos através de seus respectivos bocais, e misturam-se na junção em forma de “Y”, que seria o ponto de mistura, para formar uma mistura bifásica até a descarga. A Figura 10 apresenta um esquema de um injetor tipo Y para óleo combustível e mostra os diversos processos que ocorrem na quebra do líquido em partículas microscópicas.

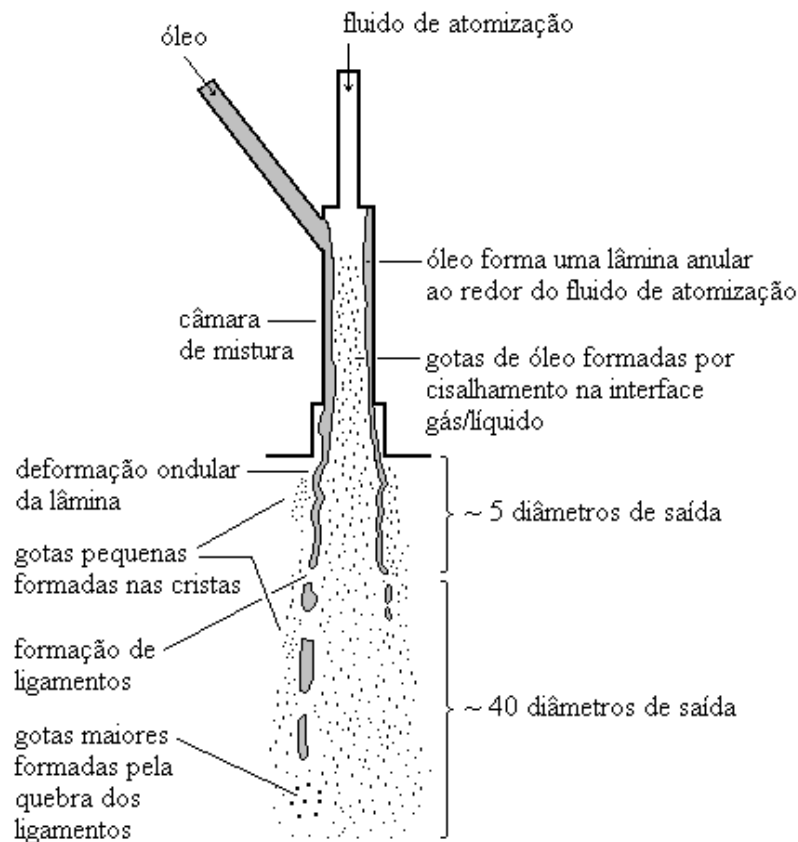
Neste tipo de injetor, o ar ingressa na direção longitudinal em relação à medida que o combustível ingressa pela lateral sob um determinado ângulo. O ar inserido em alta velocidade se expande bruscamente e cria uma zona de baixa pressão (zona de recirculação), arrastando pequenas quantidades de gotas de combustível para a câmara de mistura (SONG E LEE, 1994).

A própria expansão do escoamento de ar recupera uma parte das gotas e as devolve ao núcleo do escoamento. Idealmente, o encontro do combustível e do ar (ponto

da câmara de mistura) é gerado inicialmente em uma zona de transição, por onde parte do líquido em forma de película se ajusta na parede da câmara, e a outra fração permanece dispersa no núcleo do escoamento. Esta última fração do líquido se desintegra em pequenas gotas devido à força de cisalhamento que aparece na interface gás/ líquido (PEREZ, 2007).

O escoamento é caracterizado por fenômenos de transferência de quantidade de movimento do ar para o líquido e transferência de massa na interface bifásica. Desta forma as gotas arrastadas pelo núcleo do escoamento coalescem e passam a engrossar a película líquida, de maneira que da superfície desta película é retirada uma quantidade de líquido em forma de gotas e levadas para fora do injetor, por ação das forças de cisalhamento. Na saída do injetor, a película líquida é fortemente instável, quebrando-se inicialmente em ligamentos por ação das forças de pressão e das forças aerodinâmicas. À jusante, os ligamentos se rompem, gerando gotas de variados tamanhos, relativamente maiores que as arrastadas pelo núcleo, gerando o *spray*.

Figura 10. Mecanismo de atomização em injetores do tipo Y.



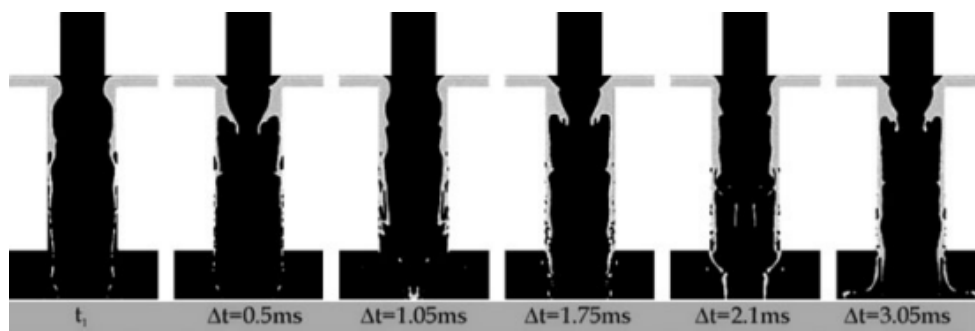
Fonte: Mullinger e Chigier (1974).

Segundo Song e Lee (1994), os injetores do tipo Y precisam de uma pequena quantidade de gás de atomização para produzir um spray fino, razão pela qual eles são amplamente utilizados em queimadores industriais, sobretudo para atomizar combustíveis líquidos de grande viscosidade.

Os injetores jato Y são classificados como atomizadores de dois fluidos (assistido por ar), nos quais o líquido e o gás de atomização se colidem no ponto de mistura determinado, cujo ângulo θ formado, localiza-se entre o canal de gás e o canal do líquido, como se observa na Figura 34.

O injetor jato T possui conceito semelhante aos injetores jato Y, entretanto o jato T possui um ângulo θ de 90° , cujos canais do líquido são perpendiculares ao canal do fluxo de gás. A Figura 11 ilustra a formação do spray em atomizadores do tipo jato-T.

Figura 11. Simulação instantânea da atomização de um injetor jato-T com velocidade do gás igual a 100m/s.



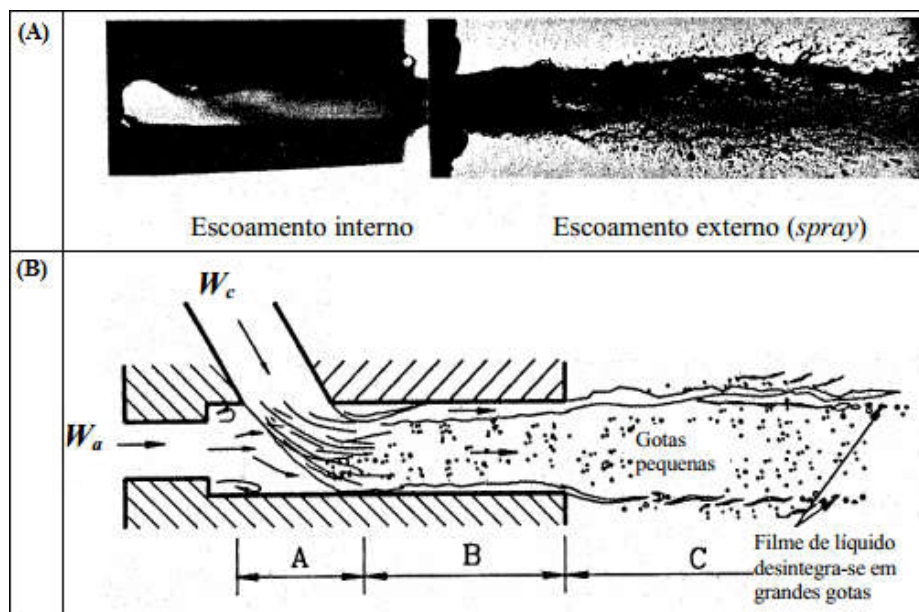
Fonte: Ashgviz (2011).

A Figura 11 ilustra a colisão dos fluidos causando a abertura do núcleo. O líquido é empurrado para a saída do bocal, pela pressão do gás. No tempo arbitrário (t_1), o escoamento do líquido é redirecionado pela pressão do gás e uma película fina do líquido é formada na parede do bocal. A medida que a pressão aumenta, uma parte do líquido é removida (Δt de 0,5ms a 1,05ms). Este ciclo deixa o processo de atomização oscilando. A frequência desta oscilação depende das taxas de fluxo de líquido/ gás.

Segundo Ashgviz (2011), na medida que diminui o ângulo θ , tornando a direção do líquido mais alinhada com o escoamento de gás, reduz oscilações ocorridas no processo de atomização, removendo ainda as abas líquidas de entrada. Isto também torna extinto o efeito de pulsação que ocorria durante o processo de atomização.

Sendo assim, torna-se vantajoso injetores com formato Y, no qual possuem ângulos θ menores e compatíveis com as melhores condições para formação do spray, como ilustra a Figura 12.

Figura 12. Mecanismos de pulverização em atomizadores jato-Y: (A) Foto; (B) Esquema (adaptado).



Fonte: Song e Lee (1994).

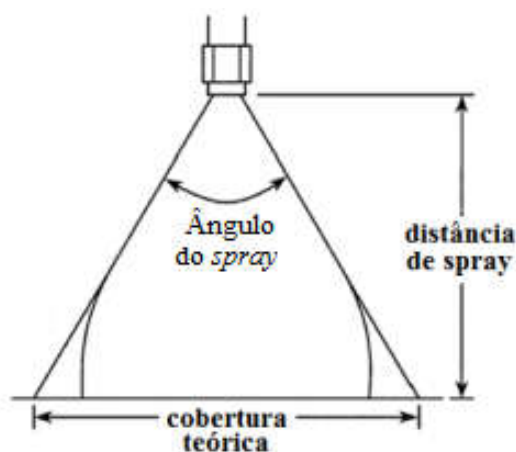
A região A, apresentada na Figura 12, corresponde a colisão direta entre o jato líquido e o gás proporcionando a formação da ruptura primária da gota. A região B, corresponde ao arraste da gota, ou seja, nessa região há formação de um filme líquido anular e a formação de gotas por cisalhamento do fluxo de ar nas extremidades do filme líquido, isso proporciona a coalescência entre algumas gotas. A região C, corresponde a desintegração do filme líquido em grandes gotas, formado a partir do bocal de saída do injetor.

Neste trabalho o injetor jato Y foi escolhido por sua simplicidade, por ser fácil de usar e ter vasta aplicabilidade na indústria. Suas características mecânicas e formação do spray serão determinadas e analisadas nesta pesquisa.

2.3.2. Ângulo de cone (φ)

As propriedades físico-químicas e os parâmetros de pressão de injeção líquido/gás e a velocidade de injeção do líquido/gás da mistura de combustíveis, contribuem para formação do *spray* gerado, além das características mecânicas e geométricas do atomizador. Segundo Apaza Vásquez (2011), o cone do *spray* possui fronteiras curvas devido aos efeitos da interação do ar atmosférico com o *spray*. Sendo assim o ângulo de cone é definido como o ângulo formado por duas retas, traçadas a partir do orifício de descarga, para destacar o contorno do *spray* formado, em alguma distância especificada a partir da saída do atomizador, assim como ilustra a Figura 13.

Figura 13. Definição do ângulo de cone (adaptado).



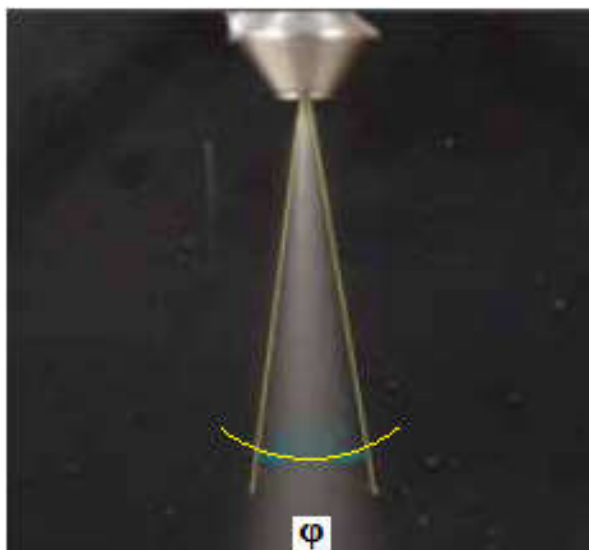
Fonte: Apaza Vásquez (2011).

Quíspe Gonzáles (2013) desenvolveu uma pesquisa teórico-experimental com protótipos do atomizador do tipo Y que teve por objetivo atomizar a mistura de glicerina + etanol. Em sua pesquisa cita:

“Para o caso do injetor tipo Y, observa-se que o *spray* gerado forma um cone estreito, tendo uma grande penetração. O ângulo de cone medido foi encontrado entre 14° a 16° , enquanto que a penetração observada foi de acima de 340 mm, sendo que o diâmetro de saída da câmara de mistura é de 1,2 mm.”

O experimento envolvendo este atomizador tipo Y é ilustrado pela Figura 14.

Figura 14. Ângulo de cone do spray gerado pelo atomizador jato-Y.



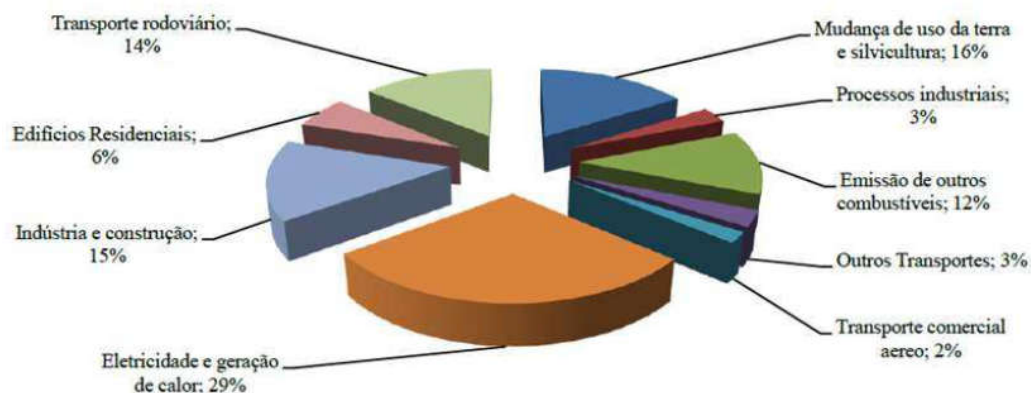
Fonte: Quíspe Gonzáles (2013).

Sendo assim, diferentemente dos atomizadores centrífugos os injetores jato-Y possuem um estreito ângulo de cone, porém tem a vantagem de possuírem uma grande capacidade de penetração devido o auxílio do gás de atomização.

O ângulo de cone é uma variável que é encontrada por experimento. Por esta razão este trabalho não apresentará esta variável.

2.4. Combustíveis aeronáuticos

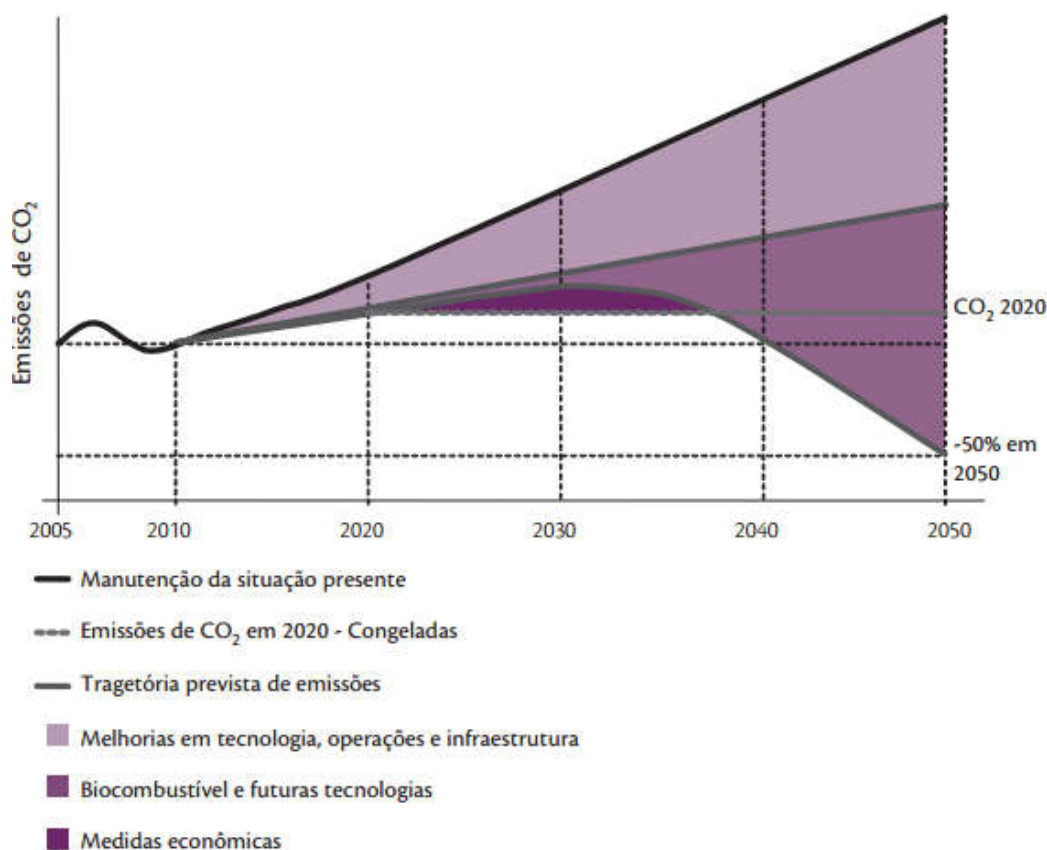
De acordo com os dados fornecidos pela *International Air Transport Association* – IATA, o setor energético e o de transporte juntos contribuem com quase 50% das emissões de CO₂ na atmosfera, como é ilustrado pela Figura 15. Em particular só o setor de transporte aéreo é responsável por aproximadamente 2% das emissões de CO₂, estimando que este valor possa chegar em 3% até 2050, uma vez que a busca pelo transporte aéreo cresce 5% ao ano (FRIGO *et al.*, 2014).

Figura 15. Emissão Global de CO₂.

Fonte: Araujo (2014).

Notavelmente, os processos de combustão exercida pelas atividades citadas (ARAÚJO, 2014), junto com crescentes catástrofes naturais pressionam líderes mundiais a tomarem medidas para minimizar os danos ambientais e manter um equilíbrio sustentável no planeta. A indústria aeronáutica tem enfrentado esse problema, investindo no desenvolvimento de aeronaves eficientes, causando menor impacto sobre o meio ambiente, mas não é eficiente (GUPTA *et al*, 2010). O desafio é reduzir pela metade a emissão de CO₂ em 2050 em relação aos valores de 2005, conforme ilustrado na Figura 16. Dessa forma não haverá o aumento da taxa de emissão de dióxido de carbono até 2020, mantendo os níveis de emissão de CO₂ estável conforme estabeleceu a Associação de Transporte Aéreo Internacional (AIAB, 2011).

Figura 16. Perspectiva de emissão de CO₂ pela indústria de aviação (adaptado).



Fonte: Santos (2015).

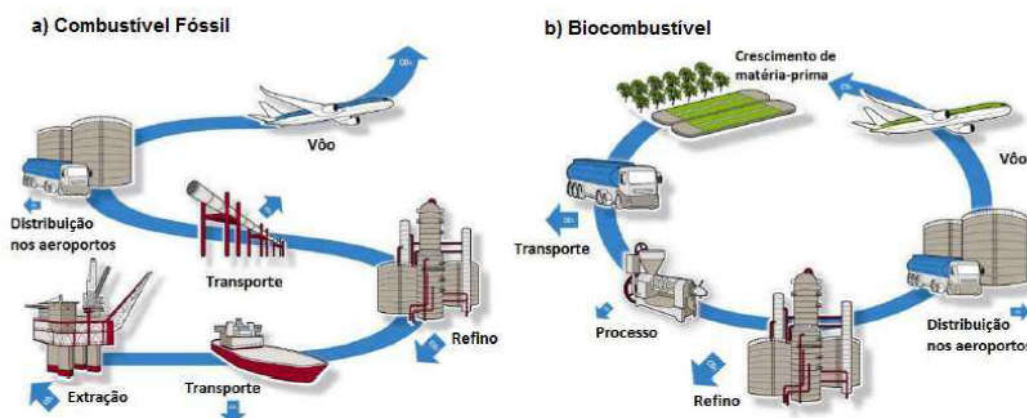
Analisando a perspectiva do IATA ilustrada pela Figura 3 podem-se destacar alguns pontos, entre eles a redução da taxa de emissão de CO₂ só ocorrerá a partir de 2010 com o emprego de novas tecnologias já desenvolvidas para as aeronaves, como a substituição de aeronaves antigas por aeronaves modernas que apresentem melhoras em seu desempenho e por melhorias no tráfego aéreo. O outro ponto destacado na Figura 3 é a utilização de biocombustíveis, que poderá resultar no congelamento da emissão de CO₂, ou seja, não haverá crescimento na taxa de emissão de CO₂ estabilizando a taxa de emissão, como o caso do emprego do bioquerosene que pode apresentar as mesmas características do querosene fóssil, podendo ainda ser misturado com outros combustíveis. Isto permitirá reduzir a emissões de impurezas na atmosfera e reduz também a quantidade de fuligens expelidas no processo de combustão.

Nota-se também que as perspectivas para 2050 podem chegar a -50%, que corresponde a uma queda de emissão de CO₂ na atmosfera em relação ao ano de 2010,

porém para atingir essa meta as despesas serão superiores a lucratividade industrial, neste sentido torna-se viável economicamente estabilizar a emissão de CO₂ até 2050 com melhorias tecnológicas, infra-estrutura e substituição do combustível de origem fóssil por biocombustíveis.

De acordo com Reynol (2007), há inúmeras vantagens na utilização do bioquerosene na aviação, apesar de seu processo de combustão também produzir CO₂, o bioquerosene acaba reduzindo o impacto ambiental em seu ciclo produtivo, isso é porque a matéria-prima do bioquerosene é de origem vegetal que ajudam a absorver o CO₂ e, portanto, compensam o carbono emitido na atmosfera durante a combustão. Este ciclo é ilustrado pela Figura 17.

Figura 17. Ciclo do carbono para (a) combustível fóssil e (b) biocombustível usado na aviação.

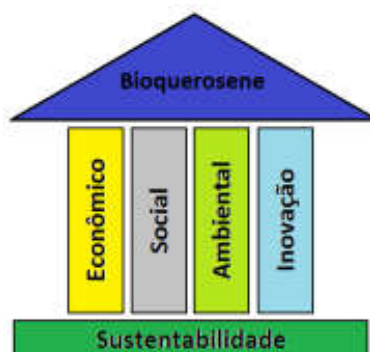


Fonte: ATAG (2011).

Além disso, os biocombustíveis puros não possuem impurezas (tais como enxofre), o que permite ainda uma maior redução na formação de fuligens no processo de combustão e emissões de dióxido de enxofre e partículas indesejadas pela atmosfera (ATAG, 2011).

É também importante destacar que o bioquerosene está alicerçado dentro dos fundamentos do desenvolvimento sustentável e deve atender a no mínimo três pilares da sustentabilidade, entre eles está o pilar social, ambiental e de inovação, como ilustra a Figura 18.

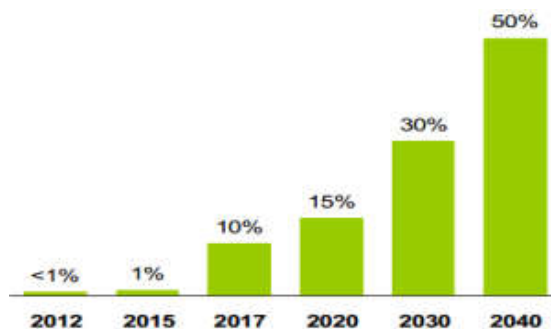
Figura 18. Base da plataforma do bioquerosene.



Fonte: Santos (2015).

Segundo a Souza (2015) estima-se que haverá um crescimento na produção de bioquerosene para os próximos anos, como ilustra a Figura 19. Este fenômeno pode ocorrer devido ao estímulo da produção agrícola, relacionados diretamente com as políticas ambientais e econômicas. Possivelmente, com o avanço das técnicas para extração e produção do combustível, os custos comerciais do bioquerosene poderão ser reduzidos.

Figura 19. Metas para o consumo do bioquerosene no Brasil, segundo o IATA.



Fonte: Souza (2015).

O bioquerosene de aviação é definido pela lei nº 12.490/2011 e pela resolução ANP nº 20 de 2013, como combustível derivado de biomassa renovável destinado ao consumo de turbinas de aeronaves, produzido pelos processos que atendam ao regulamento técnico ANP nº 01/2013. Esta resolução também menciona que o bioquerosene poderá ser adicionado ao querosene de aviação (QAV-1) até o limite

máximo de 50% em volume para o consumo em turbinas de aeronaves (SANTOS, 2015).

Atualmente, a mistura destes combustíveis já é uma realidade na indústria aeronáutica, inclusive algumas empresas tem se especializado em trabalhar com o desenvolvimento de combustíveis derivados de biomassas, que apresente similaridade com o querosene de aviação. A Tabela 4 apresenta um resumo das realizações dos testes em voo, que obtiveram um bom desempenho com diferentes tipos de biocombustíveis, feitos há 8 anos atrás.

Tabela 4. Resumo dos testes em voo com boa performance usando diferentes tipos de biocombustíveis.

Empresa	Aeronave	Fornecedor	Data	Combustível alternativo	Mistura (%)
Virgin Atlantic	Boeing 747-400	Boeing; GE Aviation	23/02/08	Babaçu	20% em 1 dos 4 motores
Air New Zealand	Boeing 747-400	Boeing; Rolls-Royce	30/12/08	Jatropha	50% em 1 dos 4 motores
Continental Airlines	Boeing 737-800	Boeing; GE; CFM; Honeywell UOP	07/01/09	Algas e Jatropha	50% em 1 dos 2 motores
JAL	Boeing 747-300	Boeing; Pratt & Whitney; Honeywell UOP	30/01/09	Mistura de Camelina, Algas e Jatropha	50% em 1 dos 4 motores
KLM	Boeing 747-400	GE; Honeywell UOP	23/11/09	Camelina	50% em 1 dos 4 motores
TAM	Airbus A-320	Airbus; CFM	23/11/10	Jatropha	50% em 1 dos 2 motores
Azul	Embraer E-195	GE; Amyris	19/06/12	Farnesano – 40% p-Metano - 40% p-Cimeno – 20%	50% em 1 dos 2 motores
NRC	Dassault Falcon 20	ARA; Chevron; Agrisoma;	29/10/12	Brassica Carinata	100% em ambos motores

Fonte: Santos (2013).

Os testes de voo demonstram que a mistura do querosene de origem fóssil com o bioquerosene tem propriedade similares e compatíveis com o QAV-1, caracterizando o bioquerosene como um biocombustível “*drop in*”, ou seja, biocombustíveis totalmente

compatíveis com as tecnologias atuais, sem a necessidade de alterações nos motores, aeronaves e infra-estrutura de distribuição já existente, podendo inclusive ser misturados em proporções adequadas com o QAV-1 de origem fóssil. Uma de suas vantagens é que não compromete a segurança no sistema de aviação (LLAMAS *et al.*, 2012).

Entre as matérias-primas orgânicas utilizadas amplamente no Brasil e no exterior para a produção do bioquerosene destinados ao uso em motores aeronáuticos, destacam-se a cana-de-açúcar, o pinhão manso, o babaçu, a camelina, o licure e as algas (FRIGO *et al.*, 2014).

Analisando a Tabela 4 observa-se também que à composição química e propriedades do bioquerosene ainda podem variar um pouco, dependendo da matéria-prima ou até mesmo pelo processo de produção a serem utilizadas.

Segundo Santos (2013), a composição química do bioquerosene é composta pela mistura de 40% de farnesano, 40% de p-metano e 20% de p-cimeno, com características e desempenho compatíveis com o combustível QAV-1, usado hoje pela aviação comercial. Quando misturados (bioquerosene + QAV-1) visa obter as características de combustão desejadas.

2.5. Querosene de aviação (QAV-1)

Segundo Borges *et al* (2011), desde o século XX até os dias de hoje, a matéria-prima mais utilizada na aviação (principalmente em motores a reação ou motores a jato como também são conhecidos) ainda corresponde à fração de produtos destilados do petróleo bruto. O desenvolvimento destes combustíveis para aviação tornou-se mais intenso com o grande envolvimento da USAF (Força Aérea dos Estados Unidos), já no período final da 2ª guerra mundial, para produzir combustíveis de uso militar, tecnicamente classificados pela história como JPs (combustíveis de jato). Essas classes de combustíveis militares “JPs” são classificadas de acordo com a propriedade do fluido, assim como o ponto de congelamento.

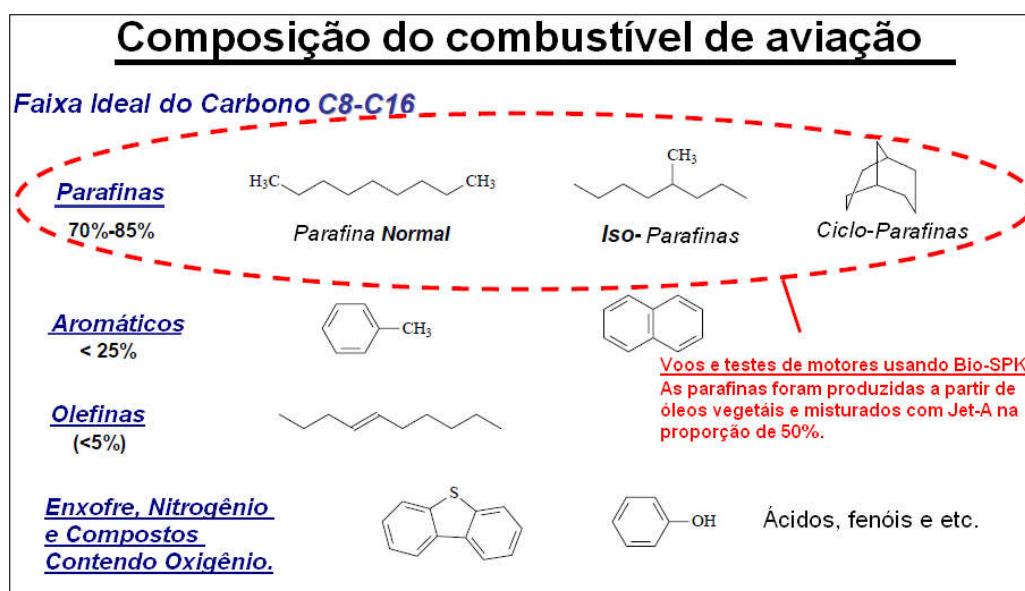
O querosene de aviação comercial, também é conhecido internacionalmente como *Jet-A1* é semelhante ao querosene JP-8 usado pela USAF. Segundo especificações contidas na ficha de informação de segurança (FISPQ) o querosene de aviação é nomeado por QAV-1 no Brasil, cujo código de identificação interno é BR0030 (PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. – FISPQ BR0030).

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) a formação do preço do QAV corresponde aos preços da refinaria que representam 73% do preço do combustível, dos impostos (PIS, COFINS e ICMS) que representam 26% e o 1% restante é a taxa do aeroporto. Essa formulação dos preços e os tributos incidentes sobre o combustível encarecem o insumo e prejudica as companhias aéreas, pois o QAV representa cerca de 40% dos custos de uma empresa aérea e qualquer diferença no preço final do combustível tem impacto na operação (SANTOS, 2015).

Vale ressaltar que em 2015 o preço do QAV-1 chegou a US\$ 5,1 o galão. A especificação referente ao QAV-1 no Brasil é determinada pela ANP através da Resolução 37 de 2009 (SANTOS, 2015).

O QAV-1 é um composto de 70% a 72% de hidrocarbonetos parafínicos, 20% de hidrocarbonetos aromáticos, 5% de hidrocarbonetos olefínicos e aproximadamente 3% de enxofre, nitrogênio e compostos oxigenados. Em sua composição o número de carbono varia de 8 a 16 moléculas mais pesadas que a gasolina e mais leve que o diesel, vale ressaltar que a maioria das vezes a composição química do QAV-1 é formada por iso-parafinas, como ilustra a Figura 20.

Figura 20. Composição química do QAV-1.



Fonte: AIAA (2009).

O QAV-1 é caracterizado por ser um líquido claro e puro, ou seja, não possui água nem matéria de suspensão, também é insolúvel em água e solúvel em solventes

orgânicos, possuindo um odor característico. O QAV-1 também é volátil e altamente inflamável classificado na categoria 3, corrosivo a pele e aos olhos, tóxico e extremamente perigoso ao ser inalado (PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. – FISPQ BR0030).

Em suma, o combustível aeronáutico deve ter características específicas de alta viscosidade energética, ou seja, peso e volume reduzidos por unidade de energia, poder calorífico e massa específica elevada, permitindo potências elevadas, volatilidade adequada, baixo ponto de congelamento, ser quimicamente estável e apresentar baixa corrosividade. Para que possa atender a essas especificações, geralmente são aditivados em quantidade e composição sujeitas à aprovação e controle (ARAUJO, 2014).

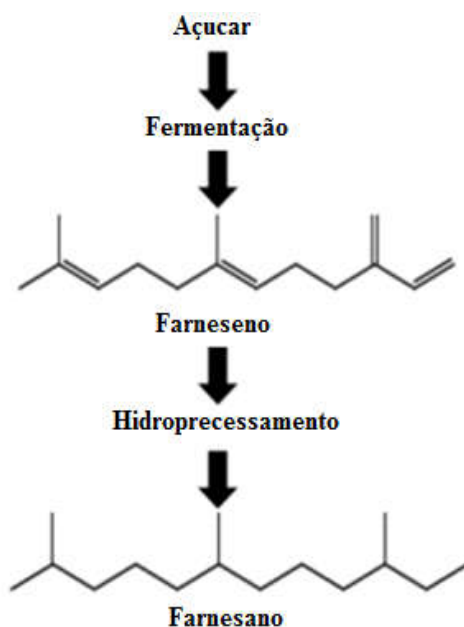
2.6. Farnesano (BioQAV)

O farnesano é um hidrocarboneto saturado de cadeia não ramificada, cuja fórmula molecular é $C_{15}H_{32}$. O farnesano é classificado como um biocombustível produzido a partir de açúcares fermentáveis, existentes no xarope da cana-de-açúcar (CONCONI, 2016).

Em geral as tecnologias usadas para produção do biocombustível começam com a fermentação da biomassa, transformando o açúcar em ácidos, alcoóis, triglicerídeos e olefinas.

O farnesano é produzido pela empresa Amyris Brasil Ltda., cuja planta piloto localiza-se na cidade de Campinas. A empresa Amyris utiliza o processo bioquímico, usando o bagaço da cana-de-açúcar para produção do farnesano. A levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) é geneticamente modificada para transformar a matéria-prima constituída do xarope de cana em hidrocarbonetos (SANTOS, 2015). O processo desta fermentação do açúcar forma o farneseno ($C_{15}H_{24}$). O farneseno gerado, passa ainda pelo processo de hidrogenação para o acabamento final do processo de produção, tendo por objetivo tornar este biocombustível estável. O produto final dá origem ao farnesano (BioQAV), um isoprenoide com 15 átomos de carbono ($C_{15}H_{32}$), como ilustra a Figura 21 (COCONI, 2016).

Figura 21. Esquema simplificado da formação do farnesano.



Fonte: Santos (2013).

Segundo Santos (2013), a levedura usada na produção do farnesano foi descoberta quando um pesquisador de uma empresa privada estavam desenvolvendo uma droga anti-malária.

O farnesano possui classificação 1, quanto aos requisitos de saúde e inflamabilidade segundo o NFPA, também tem por característica ser volátil, ser completamente insolúvel em água e ter baixa toxicidade, porém deve-se evitar contato com o meio ambiente, tendo sempre que possível, operar dentro de sistemas fechados (AMYRIS BRASIL Ltda. - FISPQ FARNESANO QAV).

O fator econômico é tido em discussão, uma vez que o farnesano é tido como um combustível experimental na indústria aeronáutica e pouco procurado pelo setor. Segundo Conconi (2016), as características químicas do farnesano também apresentam um comportamento semelhante ao óleo diesel fóssil. Apesar disto, o desenvolvimento deste biocombustível é recente, sendo apresentado no mercado em 2009 e desde então, poucos estudos foram feitos e publicados sobre o seu comportamento em motores a diesel. De acordo com Conconi (2016), apenas sete trabalhos científicos sobre o farnesano foram encontrados entre o período de 2000 a 2015.

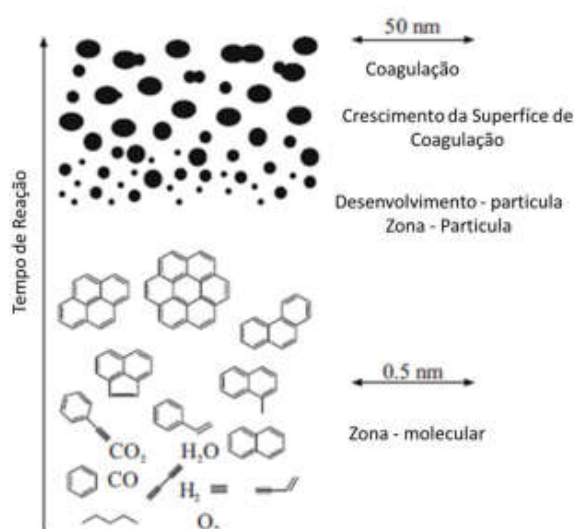
Além destes fatores as técnicas obtidas atualmente para a extração do farnesano das matérias-primas refletem no aumento do preço deste biocombustível. Hoje em dia, o preço do biocombustível pode variar entre US\$ 35 até 50 o litro, dependendo do fornecedor ou de regiões onde os produtos são comercializados (observar no apêndice A). Contudo, os principais fatores que justificam o interesse na produção deste biocombustível incluem o potencial na produtividade e a possibilidade de cultivo em terras marginais, bem como a composição em termos de óleos graxos (SANTOS, 2013; SANTOS, 2015; SOUZA, 2015; CONCONI, 2016).

Entretanto, o foco tem sido o desenvolvimento de biocombustíveis “*drop in*”, no qual o farnesano faz parte, como especificado pela Tabela 4. Isto significa que o farnesano também pode ser misturado com outros ésteres, a fim de obter as propriedades físico-químicas desejadas, próximas do QAV-1.

Vale destacar que o farnesano é um combustível livre de impurezas, tais como enxofre e em seu processo de combustão reduz significativamente os materiais particulados presentes na exaustão dos gases de combustão.

Entre os poluentes emitidos pelo processo de combustão, os materiais particulados são os mais prejudiciais ao meio ambiente. Aqueles menores que 100 nm são conhecidos como fuligem. A fuligem além de ser prejudicial ao meio ambiente, afeta negativamente a eficiência de qualquer processo de combustão (SANTOS, 2013). A Figura 22 ilustra o mecanismo de formação global da fuligem.

Figura 22. Mecanismo de formação global da fuligem.



Fonte: Conconi (2016).

A Figura 22 mostra que a fração de carbono na partícula aumenta continuamente enquanto a fração de hidrogênio diminui, ocorrendo uma condensação com a formação dos núcleos de fuligem, com dimensões entre 1-2 nm. Na seqüência as partículas se colidem formando partículas maiores com diâmetros entre 20-30 nm. Por fim, com o aumento do tamanho das partículas, a fuligem não será mais reestruturada quando colide com outra partícula, em vez disto começam a se aglomerar formando estruturas contendo de 30 a 1800 partículas primárias de fuligem (MERKER, 2006).

Entretanto, o farnesano quando adicionado ao QAV-1 inibe a formação dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) para cada mistura, considerando os principais precursores da formação da fuligem (SANTOS, 2013).

Conconi (2016) fez um estudo que determinou a energia de ativação do processo de combustão para os combustíveis farnesano, biodeisel, diesel e das suas misturas binária e terciária fazendo uso de técnicas de análise térmica. Em seu trabalho cita:

“Entre os combustíveis estudados, o farnesano possui a melhor característica de combustão, porém apresentou à menor energia de ativação média e também menor valor de massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial. Por outro lado, o biodiesel que apresentou a pior característica de combustão, porém apresentou uma maior energia de ativação média e também um maior valor de massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial.”

Isto significa que o farnesano apresenta melhores características de combustão que o biodiesel e conseqüentemente será o melhor biocombustível a substituir o diesel de origem fóssil (observar o apêndice A). Desta forma pode-se pressupor que o BioQAV também apresenta características para substituição do QAV-1, pois segundo Millo *et al.* (2014) o farnesano possui um elevado poder calorífico inferior (PCI) e um alto número de cetano, significando que terá melhores propriedades de combustão. Além disto, a ausência de compostos aromáticos e de enxofre contribui para diminuição da formação de fumaça e da emissão de materiais particulados no processo de combustão.

As propriedades físico-químicas e energéticas do farnesano serão apresentadas no próximo capítulo deste trabalho.

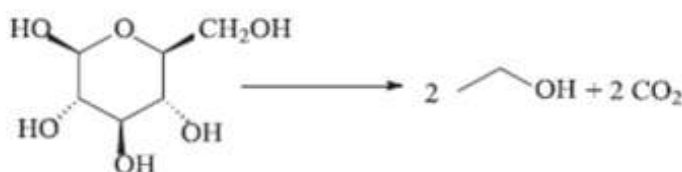
2.7. O etanol

O etanol tem ganhado espaço em diversos setores, entre eles no setor alimentício, farmacêutico, medicinal, doméstico, industrial e também no setor de transporte, incluindo o setor aeronáutico e aeroespacial. O uso de etanol hidratado como combustível aeronáutico é uma realidade comum no interior do Brasil, que confirma a adequação e o desempenho desse combustível em motores alternativos.

Em 2011, a produção de etanol no Brasil chegou à ordem de 21 bilhões de litros passando a ser o maior produtor mundial do produto. Porém, o país no mesmo ano perdeu seu posto para os Estados Unidos, que produziu cerca de 50 bilhões de litros deste biocombustível (SOUZA, 2015).

Semelhantemente a produção do farneseno, o etanol é produto da fermentação de açúcares simples, usando leveduras do gênero *Saccaromyces*. O xarope da cana contém cerca de 15 a 20% de sacarose, que por hidrólise é convertida em glicose e frutose, que ao serem fermentadas formam o etanol e CO₂ como ilustra a Figura 23.

Figura 23. Fermentação da frutose para produção de etanol.



Fonte: Souza (2015).

O etanol ou álcool etílico (C₂H₆O) é um composto orgânico cuja matéria-prima origina-se da cana-de-açúcar, milho, uva, cevada entre outros. É um líquido incolor, volátil, inflamável, solúvel em água, com cheiro e sabor característicos. É o mais comum dos alcoóis e a presença do oxigênio, elemento eletronegativo, em sua estrutura molecular, atrai elétrons de ligação, tornando-o um solvente fortemente polar, citado por Reis (2010).

O etanol representa um dos combustíveis da classe de propelentes líquidos à temperatura e pressão ambiente. A formação da mistura azeotrópica determina a divisão de dois tipos comerciais de alcoóis: o anidro e o hidratado.

2.7.1. Álcool etílico hidratado (AEHC)

O etanol hidratado (AEHC), cuja composição química representada pela fórmula $C_2H_5OH + 19H_2O$, tem uma concentração aproximada de 96% em volume. De acordo com a aplicação, o álcool hidratado pode ser de três tipos: álcool neutro, industrial e de baixa qualidade. Suas propriedades físico-químicas podem ser analisadas pela Tabela 5.

Tabela 5. Propriedades físico-químicas do álcool etílico hidratado.

Propriedades	Unidade	AEHC
Viscosidade cinemática a 27°C	m ² /s	1,78
Massa específica a 20°C	kg/m ³	810
Tensão superficial a 27°C	N/m	0,0223
Temperatura de ebulição a 1 atm	°C	78,4
Calor latente de vaporização na temperatura de ebulição	kJ/kg	855
Poder calorífico inferior a 1 atm e 25°C	kJ/kg	24915

Fonte: Perez (2007).

Contudo, o etanol hidratado não apresenta miscibilidade com outros combustíveis, devido sua composição química conter água, convergindo o biocombustível para o uso em setores específicos da indústria e transporte. O álcool etílico hidratado possui um teor de aproximadamente 5% de água e um teor de 95% de álcool, proporção maior de água quando comparado com o álcool anidro. Isso permite o etanol hidratado ser pouco volátil e pouco inflamável.

Desde 2005, depois de dois anos de desenvolvimento, a Embraer (através de sua subsidiária Indústria Aeronáutica Neiva) produz o Ipanema, um avião agrícola especificamente preparado e regularmente homologado para utilizar etanol hidratado, como ilustra a Figura 24. Além disso, a empresa fornece kits para conversão de aviões agrícolas a gasolina para etanol (AVIAÇÃO EM REVISTA, 2008).

Figura 24. Aeronave agrícola Ipanema fabricada pela Embraer.



Fonte: Aviação em revista (2008).

Atualmente a Embraer está desenvolvendo sistemas de combustíveis flex para motores aeronáuticos juntamente com a empresa Magnetti Marelli, visando atender aviões agrícolas de pequeno porte com motor a pistão, cuja frota atual no Brasil é de cerca de 12 mil aeronaves. Nessas aeronaves, o uso do etanol hidratado permite expressiva economia operacional, pois reduz em mais de 40% o custo por quilômetro voador e incrementa em 5% a potência útil do motor, motivando o surgimento de empresas especializadas em converter e homologar aviões de pequeno porte para o uso desse biocombustível (CGEE, 2010).

Nos Estados Unidos, desde 1980 são conduzidas experiências com etanol em aviões: em 1989, a *Federal Aviation Administration* (FAA) certificou pela primeira vez, um motor aeronáutico para etanol, como o Lycoming IO-540 (injetado) e, nos anos seguintes, certificou outro motor, o Lycoming IO-235 (carburado) e dois modelos de aviões agrícolas, o Cessna 152 e o Piper Pawnee, para o uso de etanol anidro com 5% de gasolina (CGEE, 2010).

Existem estudos desenvolvidos e/ou em desenvolvimento que aplicam esses combustíveis alternativos em uma possível rota tecnológica sustentável. Nos últimos anos, transformou-se também em um dos principais estímulos aos investimentos na produção de energia a partir da cana-de-açúcar por parte das usinas de açúcar e álcool.

2.7.2. Álcool etílico anidro (AEAC)

O álcool etílico anidro ou absoluto, cuja composição química representada pela fórmula C_2H_5OH , é praticamente isento de água, em geral, sua concentração mínima e de álcool é de 99% em volume (98,4% em massa). O etanol anidro é um líquido inflamável de categoria 2 e apresenta um pH que varia entre 6 e 8. A vantagem do etanol anidro em relação ao etanol hidratado é a miscibilidade em água, éster etílico (QAV-1, BioQAV, Biodiesel, entre outros) e clorofórmio, além de ser solúvel em benzeno (PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. – FISPQ BR0028).

O álcool etílico anidro possui uma vasta aplicabilidade no comércio. Uma de suas aplicações ocorre nas industriais como reativo ou solvente, também na fabricação de aerossóis (inseticidas, repelentes de insetos, desodorantes de ambientes fungicidas) que tem extrema importância no agronegócio. Entretanto sua principal aplicação é no setor de transporte, onde funciona como combustível na forma de aditivo a gasolina e a outros combustíveis.

As gasolinas usadas no Brasil contem 22% em volume de álcool anidro (VANZELLA, 2015). Esta característica reduz o preço do combustível que chega ao consumidor, além de manter a qualidade no processo de combustão. Além desta característica, suas propriedades físico-químicas agradam a muitos investidores comerciais fortalecendo ainda mais o crescimento da produção deste biocombustível.

O álcool etílico anidro possui maior poder calorífico que o hidratado. Para álcool hidratado com teor alcoólico de 93° INPM, seu poder calorífico é 93% do poder calorífico do anidro. Entretanto, devido ao fato da fabricação do álcool anidro demandar maior número de etapas e a adição de produtos para melhorar sua concentração, seu custo de produção é superior. Entre o ano 1999 e 2003 o preço do álcool anidro foi aproximadamente 14% maior do que o custo do hidratado. Além disso, requer maior investimento na implantação de destilarias (PEREZ, 2007).

As propriedades físico-químicas do etanol anidro serão apresentadas no próximo capítulo deste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Parâmetros das misturas de líquidos

Entre os combustíveis escolhidos para este estudo estão o querosene de aviação (QAV-1), o farnesano (BioQAV) e o etanol (álcool etílico anidro).

Neste estudo serão analisados três misturas de combustíveis, entre elas estão as misturas do QAV-1 + farnesano, QAV-1 + etanol e a mistura do farnesano + etanol.

Fatores econômicos, ambientais e sociais proporcionam rotas alternativas, que favoreça todas as condições vigentes do mercado e da indústria. O QAV-1 tem grande utilidade no setor de transporte aéreo.

Coronado *et al.* (2012) sugeriu possíveis rotas de mercado, entre elas, a mistura do QAV-1 com o etanol, tendo por finalidade a redução do preço do combustível, considerando a produção elevada do etanol fornecida no Brasil e internacionalmente. O etanol anidro é um biocombustível e sua composição química e propriedades já apresentam bons resultados quando misturados com outros combustíveis, como o exemplo da mistura da gasolina com etanol, mistura de diesel com etanol e até mesmo a mistura do glicerol com etanol, usado pela indústria (QUISPE GONZÁLES, 2013).

Contudo, neste trabalho também será realizada a análise da mistura do farnesano com etanol, em virtude das pesquisas feitas com estes biocombustíveis e analisando os aspectos de miscibilidade da mistura.

Sendo assim, para o estudo de um atomizador jato Y é necessário fazer uma análise experimental das propriedades físicas e químicas das misturas propostas para análise, tais como massa específica, viscosidade, volatilidade, solubilidade e miscibilidade da mistura.

As misturas são classificadas em homogênea e heterogênea. Um dos objetivos do trabalho é realizar a homogeneização dessas misturas de combustíveis.

As propriedades de uma mistura de combustíveis podem ser definidas a partir da fração molar ou até mesmo fração mássica. Seja uma mistura com n mols ao todo e constituída de n_1 mols da espécie 1, n_2 mols da espécie 2 e assim sucessivamente. A fração molar (X) da espécie i na mistura é definida pela equação 7 como sendo:

$$X_i = \frac{n_i}{n}$$

(7);

seguindo a definição, pode-se definir também a fração mássica (Y) da espécie i na mistura dada pela equação 8:

$$Y_i = \frac{m_i}{m} \quad (8);$$

onde, m_i é a massa da espécie i na mistura, sendo $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ e m é a massa da mistura, considerando todas as espécies que ocupam o mesmo volume a mesma temperatura. Segundo o modelo de Dalton, defini-se então a massa molar da mistura, apresentada pela equação 9:

$$M = \frac{m}{n} ; m = nM \quad (9);$$

sendo, $m = n_1M_1 + n_2M_2 + \dots + n_NM_N$ corresponde a massa total da mistura e $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_N$ é o número de mol total da mistura. Substituindo obtém a equação 10:

$$M = \frac{n_1M_1 + n_2M_2 + \dots + n_NM_N}{n} = X_1M_1 + X_2M_2 + \dots + X_NM_N \quad (10);$$

Sendo assim, o somatório da fração molar e o somatório da fração mássica são unitários, como demonstra equação 11:

$$\sum_{i=0}^N X_i = 1 ; \sum_{i=0}^N Y_i = 1 \quad (11).$$

3.2. Procedimento experimental

Os principais parâmetros para determinar o diâmetro médio de gota, formado a partir da pulverização do jato líquido através do atomizador mecânico, são a massa específica, viscosidade e tensão superficial das três misturas em análise.

Essas variáveis físicas foram determinadas por experimentos realizados no laboratório de físico-química e no laboratório da Nusec localizados na UNIFEI. Primeiramente, os combustíveis adquiridos foram fornecidos pela UNIFEI com a

exceção de 1 litro de farnesano (BioQAV) que foi vendida a UNESP pela empresa Amyris (observar no apêndice A).

As misturas foram formadas e medidas com o uso da instrumentação química dos laboratórios da UNIFEI. Sendo assim, levaram-se em consideração as porcentagens das massas de cada combustível. Para esse procedimento, foi usado uma balança de precisão, 4 provetas graduadas de 100 ml, 4 erlenmeyers de 150 ml, 6 pipetas, 3 beckers e 4 seringas, afim de reduzir qualquer risco de contaminação na composição química da mistura e obter maior precisão nas medidas, como mostra a Figura 25.

Figura 25. Foto da instrumentação utilizada no experimento com as misturas de combustíveis.



Fonte: Autoria própria (10/10/2016).

Em seguida se tara a balança como mostra a Figura 25. Os três combustíveis devem apresentar a mesma massa (mistura com porcentagem em torno de 50% em massa de cada combustível), para assim formar as três misturas. Logo após o procedimento, cada combustível com sua massa determinada é armazenado nos erlenmeyers com seus respectivos pares de combustíveis (QAV-1 + etanol, QAV-1 + BioQAV e BioQAV + etanol).

O experimento foi realizado em dois dias. Considerando que se trata de fluidos voláteis, após o termino do procedimento experimental no primeiro dia, lacrou-se os erlenmeyer, a fim de conservar a massa das misturas em temperatura ambiente, ou seja, em torno de 23°C.

3.2.1. Mistura de QAV-1 + etanol

As características físico-químicas do QAV-1 envolvem aspectos de composição e caracterização química (aromáticos, teor de enxofre, índice de acidez), propriedades do fluido (viscosidade cinemática, massa específica, pressão de vapor e ponto de congelamento) e propriedades térmicas (conteúdo energético do combustível em relação a sua massa específica, ponto de fulgor, estabilidade térmica como a formação de goma, limite superior e inferior de inflamabilidade).

A Tabela 6 apresenta as especificações de qualidade deste combustível.

Tabela 6. Propriedades físico-químicas do QAV-1 na aviação civil (adaptado).

Especificação	Unidade	QAV-1
Aromáticos máx.	% vol.	25
Enxofre máx.	% p/p	0,3
Acidez	mg KOH/g	0,15
Viscosidade cinemática a 20°C *	cSt	1,81
Viscosidade dinâmica a 20°C *	mPa.s	1,46
Massa específica a 20°C *	kg/m ³	808
Tensão superficial a 20°C *	mN/m	~24,45
Ponto de congelamento	°C	-47
Calor de combustão	MJ/kg	42,8
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/kg	42,8
Temperatura de auto-ignição	°C	238
LI	%	0,7
LS	%	5
Existência de gomas máx.	mg/100 ml	7

*Dados obtidos por experimentos.

Fonte: Borges (2011).

Nesta pesquisa foi adquirida uma amostra de QAV-1 fornecida pela Embraer S.A. e disponibilizada na UNIFEI para realização dos experimentos que envolvam a mistura deste combustível com um biocombustível, estudando suas propriedades e fazendo a análise da formação do spray gerado.

Misturas com etanol anidro já são realidades na indústria de transporte, setores como a indústria automotiva faz uso da mistura do etanol com a gasolina e até com diesel. Esse mercado tem se intensificado e atraído setores, como a aeronáutica, a investirem em pesquisas para possíveis combinações com o querosene (QAV-1). Essa mistura tem proporcionado uma possível rota na linha de combustíveis alternativos.

Esta rota reduziria a quantidade de QAV-1 consumida e resultaria diretamente na redução das emissões de impurezas na atmosfera, além de reduzir também o preço do combustível levando em consideração o crescimento do consumo e da produção internacional do álcool, derivado de biomassas. Entretanto, poucos testes e ensaios em voos foram realizados, colocando essa mistura na classificação experimental.

A princípio, utilizou-se no experimento um álcool anidro com 99,8% de pureza. Nesse procedimento é necessário que a composição química do álcool anidro apresente uma quantidade nula ou quase nula de água, caso apresente haverá separação de fase na mistura. A massa medida do QAV-1 (m_Q) corresponde a 12,032 gramas e a massa de etanol (m_e) corresponde a 11,897 gramas respectivamente. Obedecendo aos critérios de arredondamento, a massa de cada combustível corresponde a $12 \pm 0,1$ gramas, representando o percentual de 50% de QAV-1 e 50% de etanol, totalizando 24g de mistura.

Em temperatura ambiente a mistura é homogênea, apresentando um aspecto incolor, característica típica de uma mistura miscível como mostra a Figura 26.

Figura 26. Foto do líquido misturado com 50% de QAV-1 e 50% de etanol anidro em base mássica.



Fonte: Autoria própria (07/10/2016).

Atualmente há pesquisas em desenvolvimento para o estudo do limite de inflamabilidade desta mistura (CORONADO *et al.*, 2012).

3.2.2. Mistura de QAV-1 + BioQAV

O farnesano puro apresenta características físico-químicas próximas do QAV-1, como pode ser observado pela Tabela 7, tornando assim propício para função destinada e uso comercial tanto na indústria como no setor de transporte, sendo ainda uma opção sustentável para substituir ou até ser misturado com combustíveis de origem fóssil.

Tabela 7. Propriedades físico-químicas do farnesano (adaptado).

Propriedades	Unidade	BioQAV
Acidez	KOH/g	0,004
Antioxidantes	mg/L	21,6
Peso molecular	g/mol	212,4
Viscosidade cinemática a 20°C *	cSt	3,6
Viscosidade dinâmica a 20°C *	mPa.s	2,76
Massa específica a 20°C *	kg/m ³	762
Tensão superficial a 20°C *	mN/m	24,77
Ponto de congelamento	°C	<-78
Calor de combustão	MJ/kg	44
PCS	MJ/kg	46,9
PCI	MJ/kg	43,7
Pressão de vapor	Pa	89,3
Ponto de fulgor	°C	110
Temperatura de auto-ignição	°C	197
LI	%	0,48
LS	%	7
Existência de gomas máx.	mg/100 ml	<1

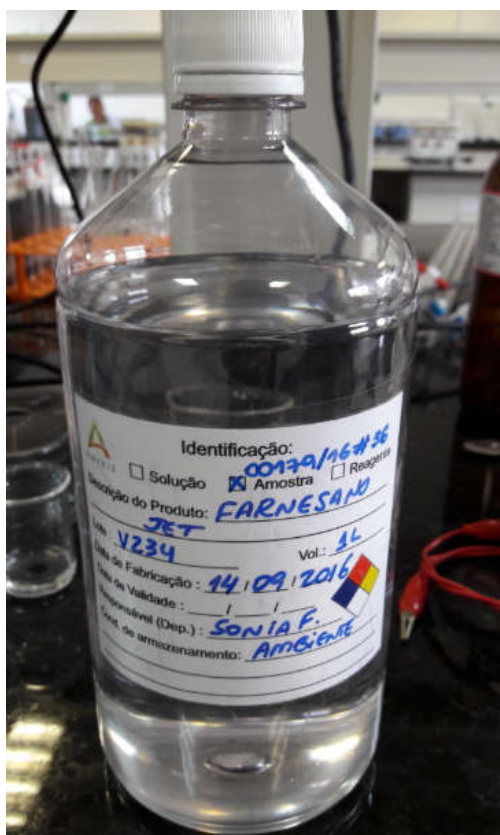
*Dados obtidos por experimentos.

Fonte: Amyris (2016).

O farnesano destilado é um hidrocarboneto, líquido transparente, utilizado como base para produção de combustível livre de enxofre. Após a fermentação do xarope de

cana, o produto passa pelo processo de destilação, hidrogenação e destilação novamente (AMYRIS BRASIL Ltda. - FISPQ FARNESANO QAV). Neste estudo o farnesano obtido para análise foi adquirido pela empresa Amyris S.A. ilustrado pela Figura 27.

Figura 27. Foto do recipiente de 1 litro de farnesano adquirido pela Amyris Brasil, para realização dos experimentos.



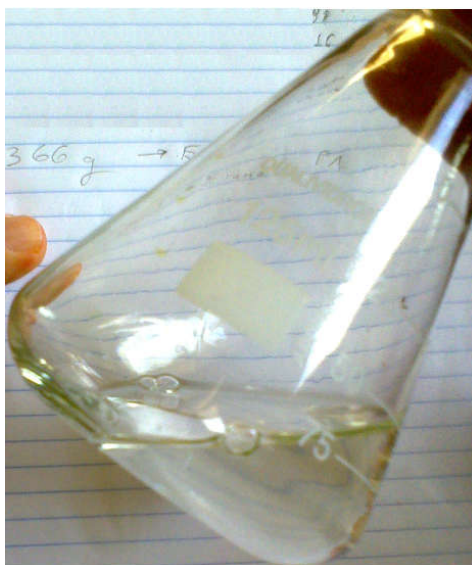
Fonte: Autoria própria (07/10/2016).

O farnesano ($C_{15}H_{32}$) assemelha-se muito, quando comparado com o farneseno ($C_{15}H_{24}$) que também é um combustível que pode substituir o biodiesel pelas suas características físico-químicas (observar o apêndice A).

Sendo assim, mediu-se novamente a massa do QAV-1 (m_Q) que corresponde aproximadamente a 11,8 gramas e a massa do farnesano (m_{BQ}) corresponde a 11,7 gramas aproximadamente. Em suma, a massa da mistura corresponde ao valor aproximado de 23,5 gramas correspondendo ao percentual de 50% de QAV-1 e 50% de farnesano.

Na temperatura ambiente a mistura é homogênea, apresentando um aspecto incolor da solução, característica típica da miscibilidade da mistura, como mostra a Figura 28.

Figura 28. Foto do líquido misturado com 50% de QAV-1 e 50% de farnesano em base mássica.



Fonte: A autoria própria (07/10/2016).

A mistura de QAV-1 + farnesano possui vantagem semelhante à mistura de QAV-1 + etanol no aspecto ambiental, porém diverge no aspecto operacional, sendo atualmente usado nas grandes empresas, atendendo a norma da ABNT-NBR 14725 (SANTOS, 2013).

3.2.3. Mistura de BioQAV + etanol

As vantagens e desvantagens das misturas analisadas convergem para o estudo da mistura do farnesano com o etanol, que possibilitaria a extinção de partículas como enxofre, emitido na atmosfera, além de reduzir o preço do biocombustível em curto prazo.

As especificações das propriedades físico-químicas do combustível álcool etílico anidro são apresentadas pela Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físico-químicas do álcool etílico anidro (adaptado).

Propriedades	Unidade	AEAC
Peso molecular	kg/kmol	46,07
Massa específica a 20°C	kg/m ³	790
Viscosidade cinemática a 20°C	cSt	1,19
Tensão superficial a 20°C	mN/m	22,3
Temperatura de ebulição a 1 atm	°C	78,3
Calor específico molar do vapor a temperatura de ebulição	kJ/kmol.K	81,5
Poder calorífico inferior a 1 atm e 25°C	kJ/kg	26790
Entalpia de formação a 1 atm e 25°C	kJ/kmol	-277,7
Função de Gibbs de formação	kJ/kmol	174,9
LI	%	3,3
LS	%	19

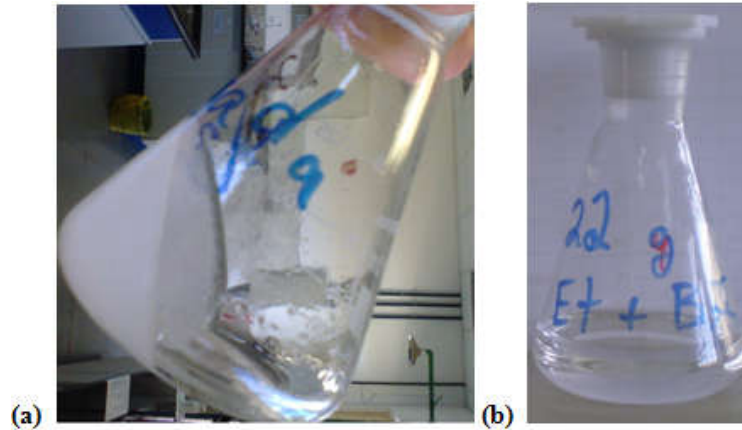
Fonte: Perez (2007).

Para este trabalho foi obtido o etanol anidro fornecido pelo laboratório de físico-química da UNIFEI, cuja concentração é de 99,8% em volume (observar o apêndice A). Resumidamente, quando maior a pureza do álcool, maior miscibilidade terá ao ser misturado com outro combustível, característica desejável para esta pesquisa.

Primeiramente, mediu-se a massa do farnesano (m_{BQ}) que corresponde a 11,5 gramas e a massa do etanol (m_e), que corresponde a 11,7 gramas, apresentando o percentual de 50% de etanol e 50% de farnesano. Essa mistura apresentou características heterogêneas, devido à separação de fase, a temperatura ambiente. Em seguida adicionou-se mais farnesano, passando a ter 13,5 gramas de massa, também foi adicionado mais etanol que passou a ter massa de 20,5 gramas, até a mistura se tornar homogênea. Em suma, o percentual de massa da mistura corresponde 40% de farnesano e 60% de etanol. Em seguida a amostra foi guardada no laboratório de físico-química da UNIFEI, para realização do procedimento experimental feito no dia seguinte, em temperatura ambiente, ou seja, em torno de 23°C.

Entretanto, no dia seguinte a mistura apresentou aspecto de separação de fase (característica de uma mistura heterogênea) e ao ser agitada a mistura normalizou (característica de mistura uma homogênea), como ilustra a Figura 29.

Figura 29. Fotos (a) mistura com 50% de etanol e 50% de farnesano; (b) mistura com 60% de etanol e 40% de farnesano.



Fonte: Autoria própria (07/10/2016).

A separação de fase da mistura poderia ter ocorrido devido à presença água ou até mesmo pela variação da temperatura no ambiente. A descrição deste fenômeno ocorre quando há cristalização das moléculas líquidas do álcool e do éster, apresentando uma coloração turva e posteriormente a formação de bolhas do líquido não diluído, como mostra a Figura 29 (a) e a Figura 38. Quando a solução apresenta um aspecto límpido, a mistura torna-se homogênea, como mostra a Figura 29 (b).

Todas as amostras, contendo as três misturas de combustíveis foram marcadas e lacradas para execução do procedimento experimental, assim como apresenta a Figura 30.

Figura 30. Foto das três amostras de misturas de combustíveis.



Fonte: Autoria própria (10/10/2016).

Sendo assim, analisa-se que um álcool que possua um grau de pureza elevado é o mais adequado para misturar com os ésteres e/ou com querosene de origem fóssil, pois proporcionaria boas condições de solubilidade e apresentaria propriedades, em sua mistura, semelhantes ao do QAV-1.

As propriedades físicas das misturas propostas, como a tensão superficial, a viscosidade e a densidade serão determinadas no próximo capítulo.

3.3. Tensão superficial

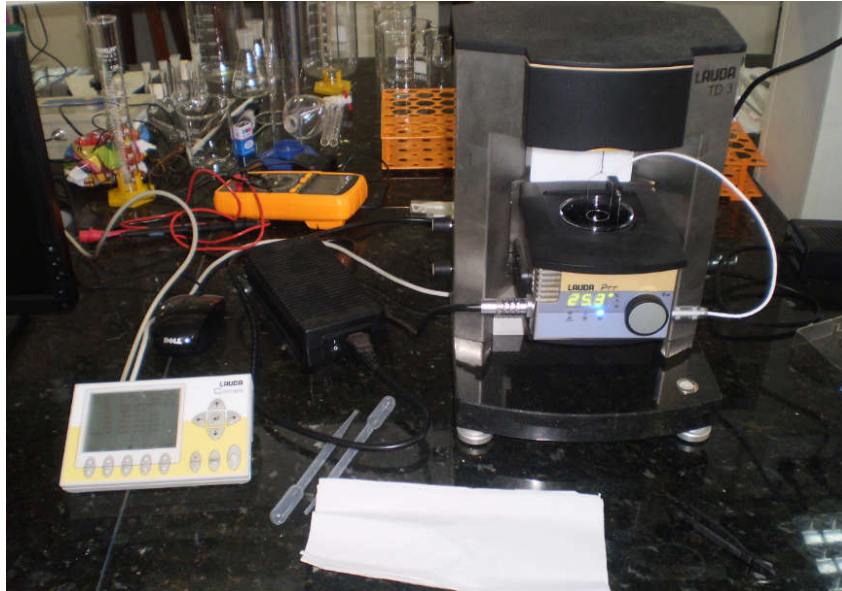
A tensão superficial da mistura de líquidos é muito importante para o projeto do injetor, pois afeta diretamente os diâmetros das gotas, a pressão de operação necessária para injeção o fluido e o ângulo de cone do spray. O método para calcular a tensão superficial da mistura entre dois líquidos podem ser divididos em duas categorias: Aquelas baseadas na relação empírica e aquelas que são derivadas das equações termodinâmicas.

Segundo Chunxi *et al.* (2001), o desenvolvimento numérico baseia-se nas definições termodinâmicas da tensão superficial da mistura entre os dois líquidos e na expressão da energia livre de Gibbs do sistema.

Na parte experimental são usados geralmente dois tipos de técnicas para determinar a tensão superficial do fluido, entre elas estão: O método do anel - DuNoüy e o método da placa - Wilhelmy. O método da placa é usado tanto no modo estático quanto no modo de desprendimento, enquanto método do anel é usado unicamente no modo de desprendimento. Na medição estática, a placa é mantida em contato com os fluidos durante todo o ciclo de medição da tensão interfacial. Ao contrário da técnica do anel, não é necessário fazer correções para os valores obtidos com a técnica da placa e nem é necessário conhecer as massas específicas dos líquidos, além de fornecer dados mais precisos.

Neste trabalho, as tensões superficiais das misturas foram encontradas através de experimentos, onde se fez uso do tensiômetro da marca Lauda TD3, como ilustra a Figura 31. Apesar da limitação, o método DuNoüy (método do anel) é o mais usado por sua simplicidade. Este é um dos motivos pela qual esta técnica foi escolhida para determina às tensões superficiais das misturas.

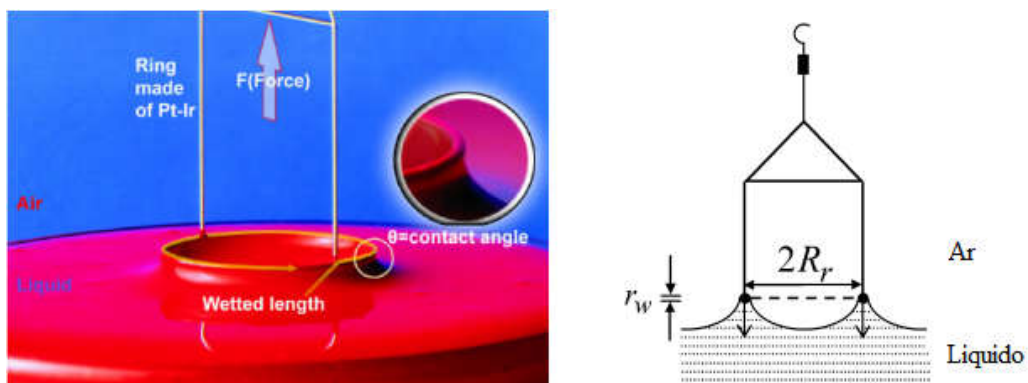
Figura 31. Foto do tensiômetro da marca Lauda TD3 do laboratório de físico-química da UNIFEL.



Fonte: Autoria própria (07/10/2016).

A mistura de combustível analisada é armazenada em um Becker instalado no próprio instrumento. O anel da balança é feito de platina e irídio com geometria específica é pendurado no gancho da balança e imerso na solução líquida, para então ser depois puxado automaticamente pelo instrumento, como ilustra a Figura 32.

Figura 32. Método do anel – DuNoüy para medir a tensão superficial de líquidos.



Fonte: Ghosh (2014).

A micro-balança registra a força aplicada no anel quando puxado através da interfase ar/ líquido. A força de desprendimento é igual à tensão superficial multiplicada pela área do anel, essa definição é representada pela equação 12 (GHOSH, 2014):

$$F=4\pi R_r \sigma \quad (12);$$

onde, R_r é o raio do anel. A força medida pela balança inclui o peso do anel.

Normalmente o resultado obtido pela equação 12 contém erros (GHOSH, 2014). O fator de correção Z define a tensão superficial. Esse fator é apresentado pela equação 13:

$$\sigma = \left(\frac{F}{4\pi R_r} \right) Z \quad (13);$$

Esse fator aparece devido ao peso do filme líquido formado no desprendimento do anel, influenciando no processo calculado. Deste modo, o fator de correção depende diretamente da massa específica do líquido, do raio do anel (R_r) e do raio do arame (R_a).

Sendo assim, o fator de correção segundo Ghosh (2014), pode ser definida pela equação 14:

$$Z = 0,725 + \left[\frac{0,00363 \cdot \sigma_{exp}}{\pi^2 R_r^2 \Delta \rho} + 0,04534 - 1,679 \cdot \left(\frac{R_a}{R_r} \right) \right]^{0,5} \quad (14);$$

onde, σ_{exp} corresponde a tensão superficial experimental expressada em mN/m, R_a e R_r são expressadas em cm, e ρ é expressado em kg/dm³.

Vale ressaltar que foram feitos testes experimentais, com as três misturas de combustíveis em diferentes temperaturas.

3.4. Viscosidade

A viscosidade é a resistência de um fluido a uma força cisalhante. Segundo Apaza Vasquez (2011), se a viscosidade de um fluido for suficientemente grande, o atomizador pode produzir ligamentos dentro da formação do spray. A maior parte dos

fluidos obedece à relação linear denominada Lei da Viscosidade de Newton apresentada pela equação 15:

$$\sigma_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (15);$$

onde, σ_{xy} é a tensão de cisalhamento que atua no plano normal ao eixo y e apontando na direção positiva de x . O gradiente de velocidade é representado por $\frac{du}{dy}$ e μ corresponde a viscosidade dinâmica, cuja unidade no SI é em Pa.s.

A viscosidade cinemática (ν), cuja unidade no SI é o m^2/s , é definida pela equação 16:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (16);$$

Segundo Gambill (1959) é possível determinar a viscosidade da mistura de líquidos, a partir de sua concentração química ou até mesmo da fração molar (X) respectiva de cada espécie. Essa definição é descrita pela equação 17:

$$\nu_{\text{mix}}^{1/3} = (X_a \nu_a)^{1/3} + (X_b \nu_b)^{1/3} \quad (17);$$

onde, a e b representam elementos de espécie diferentes.

Chintala (2014) conceitua que:

“Quando dois fluidos de diferentes densidades escoam num cilindro, o fluido de maior densidade difunde com o de fluido de menor densidade. Depois de um tempo, a interface tem quase a mesma densidade que o líquido de maior densidade, resultando na redução das taxas de contaminação.”

Essa definição descreve o processo interno de atomização da mistura entre combustíveis que escoam dentro do injetor.

A equação de Refutas também é usada para determinar a viscosidade da mistura de líquidos, onde se faz uso da viscosidade cinemática em (cSt) e da fração mássica dos fluidos a temperatura ambiente. Em uma primeira abordagem é determinado o número

da viscosidade de cada componente (VBN), em seguida calcula-se o número da viscosidade da mistura (VBN_{mix}), representados pela equação 18 e 19:

$$VBN=14,534 \ln[\ln(v+0,8)]+10,975 \quad (18);$$

$$VBN_{mix}=(Y_a*VBN_a)+(Y_b*VBN_b) \quad (19);$$

onde, $VBNa$ representa o número da viscosidade da mistura do componente a , $VBNb$ representa o número da viscosidade da mistura do componente b e Y_a e Y_b são as frações mássicas das substâncias a e b respectivamente.

Sendo assim, pode-se definir o conceito da viscosidade cinemática da mistura de líquidos (v_{mix}) que escoam num tubo, através da equação 20:

$$v_{mix} = \exp \left(\exp \left(\frac{VBN_{mix}-10,975}{14,534} \right) \right) - 0,8 \quad (20);$$

Entretanto, a viscosidade é uma grandeza física influenciada diretamente pela variação da temperatura. Giap (2010) considera que o efeito da temperatura absoluta (T) sobre a viscosidade dinâmica (μ) é modelado pela equação de Arrhenius, definido por:

$$\mu = \mu_{\infty} \cdot \exp \left(\frac{E_a}{R \cdot T} \right) \quad (21);$$

onde, E_a corresponde à energia de ativação do fluido viscoso, R é a constante universal dos gases ideais e μ_{∞} é a viscosidade dinâmica quando a temperatura tender ao infinito.

Este trabalho fará uso de dados experimentais obtidos pelo viscosímetro rotacional Stabinger, modelo SVM 3000, fabricado pela Anton Paar. Este instrumento consiste num aparelho eletrônico digital, que tem a capacidade de medir três variáveis, entre eles estão: A viscosidade dinâmica (mPa.s), a viscosidade cinemática (mm²/s) e a massa específica (g/cm³). A Figura 33 apresenta o viscosímetro usado no experimento.

Figura 33. Foto do viscosímetro usado no laboratório da NUSEC na UNIFEI.



Fonte: Autoria própria (11/10/2016).

As misturas formadas foram transferidas para o becker, a fim de facilitar a extração do líquido pela seringa. No experimento utilizaram-se três seringas (uma para cada mistura para se evitar contaminação e erros de medida), para extrair a mistura de combustíveis do becker e injetar no viscosímetro.

3.5. Massa específica

Segundo Apaza Vásques (2011), o principal efeito da massa específica na atomização de um líquido está na vazão do atomizador. Em suma, quanto menor a massa específica do fluido usado num injetor, maior será a velocidade do fluido na saída do injetor.

Simplesmente, a massa específica é definida como a relação entre a massa de uma substância e o volume por ele ocupado, como demonstra a equação 22:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (22);$$

onde, ρ é a massa específica cuja unidade no SI é kg/m^3 .

Segundo Gambill (1959), a massa específica das misturas entre dois ou mais líquidos corresponde a uma equação binária, ou seja, em termos de massas específicas parciais, onde adota-se o modelo de Amagat, expressado pela equação 23:

$$\rho_m = \sum_N X_N \rho_N \quad (23);$$

O modelo numérico permite calcular a massa específica das misturas de diferentes espécies com porcentagens variadas de cada substância química.

O procedimento experimental usado para medir a massa específica das misturas de combustíveis, em diferentes temperaturas foi o mesmo utilizado para medir a viscosidade, como ilustra a Figura 33.

3.6. Considerações para o projeto do atomizador jato Y

Dentro dos injetores conhecidos, os injetores de tipo Y são classificados como injetores de jato de ar de mistura interna. Segundo Pacífico (2000) e Mullinger e Chigier (1974), os atomizadores jato-Y são utilizados devido a:

- ✓ Sua configuração é relativamente simples e são adaptáveis para a construção com materiais resistentes a erosão e corrosão térmica;
- ✓ O ângulo de cone do atomizador (*spray angle*) não varia com a mudança da vazão de combustível ou gás de atomização, diferentemente de outros injetores;
- ✓ Qualidade na formação de um *spray* fino, com baixo consumo do fluido auxiliar (gás de atomização);
- ✓ Capacidade de trabalho com combustíveis altamente viscosos, assim como também com fluidos de baixa viscosidade;
- ✓ Capacidade de se evitar entupimento ou acúmulos de partículas, nas linhas de alimentação dos fluidos;
- ✓ Requerer baixas pressões para o funcionamento.

Como definido, estes injetores inicialmente desintegram o combustível líquido dentro de uma câmara de mistura, gerando gotas e uma fina camada aderente à parede da câmara e em seguida, a continuidade dessa desintegração do filme líquido fora do injetor. O combustível já desintegrado em finas gotas se dispersa dentro da câmara de combustão onde ocorre a queima destas micro-gotas.

Muitos pesquisadores têm estudado este tipo de injetor, entre eles Song e Lee (1994, 1996), Pacífico (2000), Lefebre (1989), Mullinger e Chigier (1974), Quispe Gonzáles (2013), entre outros. A maioria destes pesquisadores admite que as

propriedades do gás de atomização na saída do bocal têm que ser críticas. Em outras condições, o escoamento do gás de atomização em regime subsônico pode gerar uma atomização com moderada qualidade, onde o diâmetro médio das gotas do *spray* atinge medidas menores a 80 μm .

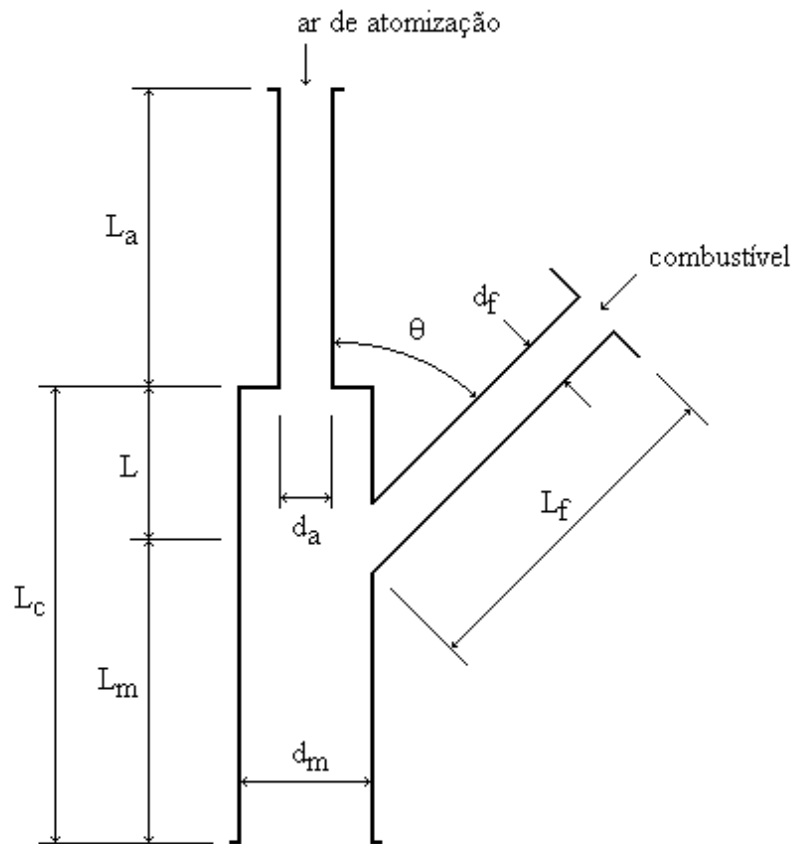
Para o injetor tipo jato-Y, considera-se que o gás de atomização ingressa com uma alta velocidade, à medida que o combustível líquido é injetado a uma dada pressão. As considerações adotadas para o cálculo dos parâmetros geométricos do injetor são as seguintes (LACAVA, 2000; MULLINGER E CHIGIER, 1974):

- ✓ O escoamento do combustível é considerado como unidimensional e incompressível em regime permanente;
- ✓ O escoamento do gás de atomização é considerado unidimensional e isentrópico, com a razão entre os calores específicos (k), constante;
- ✓ O gás de atomização é considerado gás ideal;
- ✓ São conhecidas as propriedades físico-químicas do combustível e do gás de atomização, como a massa específica, viscosidade e tensão superficial;
- ✓ Na saída do orifício de injeção, o ar atinge condições sônicas ($\text{Mach} = 1$).

Sendo assim, apesar do escoamento dentro do injetor jato-Y ser bifásico (gás/líquido), pode-se ser tratado também como um escoamento monofásico, onde o principal fluido a ser considerado seja o gás de atomização. Utilizando a teoria de escoamento compressível isentrópico para o cálculo do escoamento de gás, obtêm-se bons resultados quando comparados com os testes experimentais, principalmente na região de expansão do gás dentro do injetor (SONG E LEE, 1994).

A Figura 34 apresenta as dimensões a serem calculadas em um injetor tipo jato-Y para uma dada vazão de combustível requerida.

Figura 34. Dimensões de projeto de um injetor tipo Y.



Fonte: Mullinger e Chigier, 1974.

A facilidade de usinagem também é um ponto importante a ser observado na escolha do injetor, uma vez que este parâmetro também irá influenciar no custo do desenvolvimento do atomizador.

Os parâmetros geométricos do atomizador são obtidos baseados na investigação experimental realizada por Mullinger e Chigier (1974). Entre outras coisas, eles determinaram as condições geométricas necessárias para uma pulverização adequada nos injetores tipo jato-Y. Essas recomendações estão organizadas na Tabela 9.

Tabela 9. Recomendações para projeto das dimensões do atomizador tipo jato-Y.

PARÂMETROS	RECOMENDAÇÕES
Diâmetro de saída do ar (d_a) igual ao diâmetro de saída do combustível (d_c).	$d_a = d_c$
Diâmetro da câmara de mistura (d_m).	$d_m = (1,4 \leftrightarrow 1,8).d_a$
Comprimento de pré-mistura (L).	$L = 0,75d_a$
Comprimento de mistura (L_m).	$L_m = (4 \leftrightarrow 5).d_m$
Comprimento total da câmara (L_c).	$L_c = L_m + L$
Comprimento do canal de alimentação do ar (L_a).	$L_a > 2.d_a$
Comprimento do canal de alimentação do combustível (L_f).	$L_f > 2.d_f$
Inclinação do canal de alimentação do combustível (θ)	$\Theta = 52^\circ$

d_a : calculado

Fonte: Mullinger e Chigier, 1974.

Mullinger e Chigier(1974) também recomendaram que a relação entre a vazão mássica do fluido auxiliar de atomização ($\dot{m}_{ar/at}$) e do líquido (\dot{m}_c), denominada de razão de atomização (r_{atm}), seja no mínimo 1/10 da vazão do fluido a ser atomizado, como apresenta a equação 24.

$$r_{atm} = \frac{\dot{m}_{ar/at}}{\dot{m}_c} \geq 0,1 \quad (24);$$

Quispes Gonzáles (2013) recomenda que a razão de atomização esteja entre os valores 0,05 a 0,15, considerando a viscosidade do líquido. A partir dessas recomendações podem-se definir o equacionamento para os cálculos envolvidos no projeto do atomizador jato-Y. De modo geral, basicamente o projeto se resume em encontrar o diâmetro do canal (d_a) para passagem do gás de atomização e, com esse valor, adequar os demais parâmetros geométricos estabelecidos segundo a Tabela 9.

3.7. Procedimento dos cálculos envolvidos no projeto do injetor jato-Y

Para desenvolver o projeto de um injetor jato-Y, admitiu-se uma vazão de 5 g/s para as misturas de QAV-1 + etanol, BioQAV + etanol e QAV-1 + QAV. O cálculo apresentado seguirá o procedimento desenvolvido por Lacava (2000), baseado nas recomendações de Mullinger e Chigier (1974), para o projeto de injetores de diesel e de

água, considerando que as propriedades do diesel assemelham-se com as propriedades físicas do QAV-1.

Em uma primeira abordagem, a vazão mássica das misturas será mantida constante.

Lacava (2000) assumiu as seguintes recomendações para os escoamentos de líquido e gás no interior do atomizador:

1. A passagem do ar comprimido pelo orifício de injeção foi considerado um escoamento reversível, adiabático e unidimensional, em regime permanente para gás perfeito, podendo assim, fazer uso das equações para este tipo de escoamento. Foi adotado ainda, o regime sônico ($Mach = 1$) na passagem do escoamento de ar pelo orifício de injeção e a pressão e temperatura de estagnação adotados foram 303,975 kPa e 300 K, respectivamente.
2. O equacionamento do escoamento de líquido foi considerado como unidimensional incompressível em regime permanente e coeficiente de descarga igual a 0,75 (também recomendado por Mullinger e Chigier, 1974).

Portanto, para um escoamento isentrópico, a temperatura crítica (T) pode ser calculada a partir da temperatura de estagnação (T_0):

$$T = \frac{T_0}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \quad (25);$$

Também para escoamento isentrópico, tem-se a pressão crítica do ar na saída de injeção:

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (26);$$

sendo, p_0 a pressão de estagnação do ar.

Com esses dados, pode-se calcular a massa específica crítica do gás de atomização:

$$\rho = \frac{p}{R.T} \quad (27);$$

Sendo assim, a velocidade do ar na entrada da câmara de mistura será:

$$M = \frac{v_{ar/atm}}{a} \quad (28);$$

$$a = \sqrt{kRT} \quad (29);$$

sendo, M o número de Mach (assumido como =1), $(v_{ar/atm})$ a velocidade do ar no duto, (a) a velocidade do som, R a constante de gás ideal ($= 287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$), k a relação entre calores específicos a pressão e a volume constante (para o ar, $k = 1,4$).

Segundo Quispe Gonzáles (2013), quando as condições do fluxo de gás são críticas, a vazão mássica será máxima, podendo ser determinada pela equação 30:

$$\dot{m}_{MAX} = \dot{m}^* = \frac{A p_0}{\sqrt{R T_0}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (30);$$

Segundo Lacava (2000), o diâmetro da entrada de ar, para $\dot{m}_{ar/at} = 0,1 \dot{m}_c$ pode ser calculado por:

$$0,1\dot{m}_c = \rho \cdot v_{ar/atm} \cdot \frac{\pi d_a^2}{4} \quad (31);$$

ou seja,

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1 \cdot \dot{m}_c}{\pi \cdot \rho \cdot v_{ar/atm}}} \quad (32);$$

onde, d_a é o diâmetro de saída do ar.

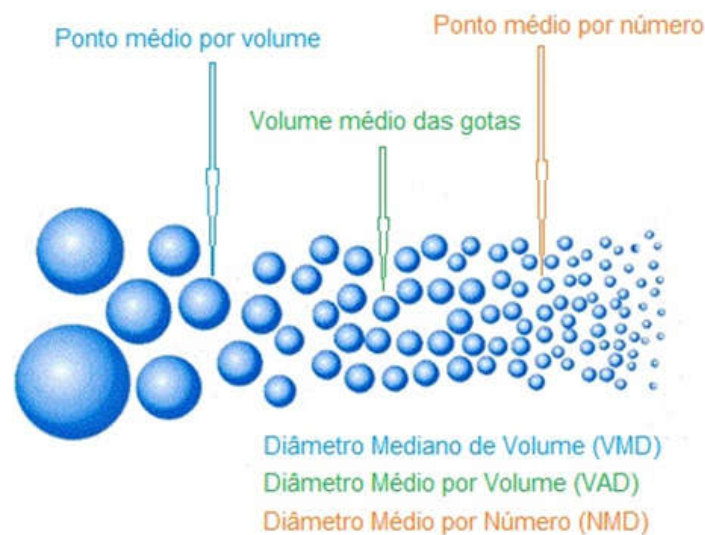
A partir da equação 32 se define toda a geometria do atomizador tipo jato-Y, porém para identificar teoricamente a características do *spray* gerado, assim como o diâmetro médio de gota (MMD), se fez uso da equação de Wigg.

3.8. Modelação teórica do diâmetro mediano de massa para o atomizador tipo Y

As partículas de um *spray* possuem tamanhos diferentes, dentro de um intervalo de tempo. Há diferentes maneiras de descrever o tamanho característico das partículas em um *spray*.

Diâmetro mediano de volume, VMD (do inglês “*Volume Median Diameter*”) e diâmetro mediano de massa, MMD (do inglês “*Mass Median Diameter*”), são meios de expressar o tamanho de gota em termos do volume (ou massa) do líquido nebulizado. O VMD é o diâmetro da gota para o qual 50 % do volume total do líquido nebulizado é composto de gotas menores que o próprio VMD. A definição de MMD é similar à do VMD, mas em termos de massa. Para um *spray* composto de gotas do mesmo líquido, com massa específica uniforme, o VMD é igual ao MMD. Assim, o VMD (MMD) é o tamanho de gota que divide o *spray* em dois volumes (ou em duas massas) iguais. Metade do volume (da massa) consiste de gotas menores que o VMD (MMD) e a outra metade consistem de gotas maiores que o VMD (MMD) (LACAVA, 2000). A Figura 35 ilustra o conceito apresentado.

Figura 35. Esquema conceitual do VMD, a partir da desintegração da gota (adaptado).



Fonte: Ribeiro (2015).

Os três fatores mais importantes, além da propriedade física do líquido (massa específica, viscosidade e tensão superficial), que afetam o tamanho de gota em um *spray* são a vazão de líquido, a geometria interna do injetor e a pressão de atomização. Em geral, altas vazões e baixas pressões produzem gotas grandes, e vice-versa.

Sendo assim, a pressão manométrica de injeção do combustível (p_{ic}), pode ser calculada pela equação 33:

$$p_{ic} = \left(\frac{\dot{m}_c}{C_d \cdot \frac{\pi}{4} d_a^2} \right)^2 \frac{1}{2 \cdot \rho_c}, \quad (33);$$

onde, C_d é o coeficiente de descarga e ρ_c é a massa específica do combustível.

O coeficiente de descarga C_d é a razão da vazão mássica real de combustível (atravessa pelo injetor) e à vazão mássica teórica, sendo definido como:

$$C_D = \frac{\dot{m}_{L \text{ REAL}}}{\dot{m}_{L \text{ TEOR}}} \quad (34);$$

Para o caso da vazão mássica real do combustível ser conhecida, aplica-se a equação de continuidade, para obter a velocidade do escoamento de combustível:

$$\dot{m}_L = \rho_L A_L V_L \quad (35);$$

Para determinar a massa teórica de combustível é necessário conhecer a velocidade do combustível na saída da linha de injeção, isso pode ser obtido aplicando a equação de energia para o escoamento incompressível entre a entrada e saída do canal, obtendo a equação 36:

$$v_{ic} = C_d \left(\frac{2 \cdot p_{ic}}{\rho_c} \right)^{1/2} \quad (36);$$

onde, ρ_c é a massa específica do combustível (valor médio), (v_{ic}) é a velocidade de injeção do combustível líquido. Logo, a equação (37) pode-se reescrever como:

$$C_d = \frac{4 \dot{m}_c}{\pi d_c^2 \cdot \sqrt{2 \rho_c \Delta p}} \quad (37);$$

onde, Δp é a variação da pressão de injeção do combustível, com a pressão na câmara de mistura interna do atomizador.

Contudo, para este trabalho foi assumido um coeficiente de descarga de 0,75, por recomendação dos trabalhos de Mullinger e Chigier (1975) e de Lacava (2000).

O diâmetro mediano de massa D_{50} (MMD) expressa o tamanho das gotas em relação à massa do líquido atomizado. O MMD é um valor que representa 50% da massa total do líquido atomizado que são constituídas de gotas maiores em relação ao MMD e os outros 50% da massa total são atomizados em gotas menores em relação ao MMD (QUISPE GONZÁLES, 2013).

O diâmetro mediano de massa (medido em μm) para atomizadores do tipo jato-Y é definido pela equação de Wigg (MULLINGER E CHIGIER, 1974):

$$\text{MMD} = \frac{200 \cdot \mu_1^{0,5} \dot{m}_c^{0,1} \left(1 + \frac{1}{r_{\text{atm}}}\right)^{0,5} R_m^{0,1} \sigma^{0,2}}{\rho_{\text{ar}}^{0,3} \Delta u} \quad (38);$$

onde, μ_1 é a viscosidade cinemática do combustível (*centistokes*), \dot{m}_c é a vazão mássica do combustível (g.s^{-1}), R_m é o raio da câmara de mistura (cm), σ é a tensão superficial do combustível (dynas.cm^{-1}), ρ_{ar} é a massa específica do fluido de atomização (g.cm^{-3}) no ponto de mistura, Δu é a velocidade relativa entre o líquido e o ar (m.s^{-1}) e r_{atm} a razão dada pela equação (24).

Outros pesquisadores possuem outras interpretações, a partir da equação de Wigg. Lefebvre (1989) descreve a mesma equação de Wigg, no SI, é dada pela seguinte relação:

$$\text{MMD} = \frac{20 \cdot \mu_1^{0,5} \dot{m}_c^{0,1} \left(1 + \frac{1}{r_{\text{atm}}}\right)^{0,5} R_m^{0,1} \sigma^{0,2}}{\rho_{\text{ar}}^{0,3} \Delta u} \quad (39);$$

Enquanto que Chigier (1976) refere-se à equação de Wigg, na qual está dimensionada em outras unidades e que pode ser usada para velocidades maiores que 100 m/s, sendo igual a:

$$d_m = \frac{0,004 \cdot \mu_1^{0,5} \dot{m}_c^{0,1} \left(1 + \frac{1}{r_{\text{atm}}}\right)^{0,5} R_m^{0,1} \sigma^{0,2}}{\rho_{\text{ar}}^{0,3} \Delta u} \quad (40);$$

onde, d_m é o diâmetro médio de gota.

Apesar de todos os conceitos originarem da equação de Wigg, os resultados podem apresentar variações nos valores encontrados. Para este trabalho levou-se em consideração a metodologia de Lacava (2000), no qual se fez uso da equação de Wigg representada pela equação 38.

O diâmetro médio de Sauter, SMD (do inglês “*Sauter Mean Diameter*”), também chamado de D_{32} , é o diâmetro de uma gota do *spray* que possui a mesma razão volume/área superficial do *spray* global (LEFEBVRE, 1989). Esta definição é descrita pela equação 41:

$$\text{SMD} = D_{32} = \frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i D_i^2}, \quad (41);$$

onde, n_i é o número de partículas com diâmetro D_i . O D_{32} é uma maneira de expressar quão fino é o *spray*.

Segundo Quispe Gonzáles (2013), o diâmetro médio de Sauter (D_{32}) expressa o grau de atomização em relação à superfície das gotas produzidas pelo *spray*. Simmons (1977) conceitua que para formação dos *sprays* encontrados na prática, a razão MMD/SMD é igual a 1,20, com um erro de 5%, como apresenta a equação 42.

$$\frac{D_{50}}{D_{32}} \approx 1,2 \quad (42);$$

onde, D_{50} é o MMD.

Essa equação é usada na parte experimental para determinar o diâmetro médio de gota do fluido de trabalho (LACAVA, 2000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PROJETO

4.1. Projeto do injetor jato Y

Com os parâmetros do projeto estabelecidos e as propriedades físicas do gás de atomização (ar comprimido) definidas é possível calcular a geometria interna do atomizador do tipo jato-Y, seguindo as recomendações formuladas na Tabela 9. Os resultados são apresentados a seguir pela Tabela 10.

Tabela 10. Definição da geometria interna do injetor jato-Y

PARÂMETROS	VALORES (mm)
Diâmetro de saída do ar (d_a) igual ao diâmetro de saída do combustível (d_c).	0,948
Diâmetro da câmara de mistura (d_m).	1,327
Comprimento de pré-mistura (L).	1,421
Comprimento de mistura (L_m).	6,633
Comprimento total da câmara (L_c).	8,055
Comprimento do canal de alimentação do ar (L_a).	2,369
Comprimento do canal de alimentação do combustível (L_f).	3,790
Inclinação do canal de alimentação do combustível (θ)	52°

Fonte: Autoria própria.

A partir dos valores encontrados, projetou-se um modelo do atomizador em 3D, pelo software de modelagem mecânica Autodesk Inventor 2015, como demonstra a Figura 36.

Para o projeto do injetor jato-Y foi considerado o gás de atomização como o ar comprimido, para atomizar as três misturas de combustíveis.

Apesar da simplicidade em sua geometria, há dificuldades no processo de usinagem do atomizador jato-Y, que está associado geralmente ao processo de furação do conduto de saída do gás de atomização, requerendo uma broca com o menor diâmetro possível. Os aspectos de usinagem e material a ser usado, assim como as vistas e dimensões características do projeto do injetor jato-Y podem ser observadas no apêndice B.

Figura 36. Projeto do atomizador jato-Y



Fonte: Autoria própria (02/11/2016).

4.2. Resultados dos parâmetros físicos das misturas de combustíveis analisadas

Os parâmetros e propriedades físicas das misturas de combustíveis influenciam diretamente na característica e formação do *spray*, ou seja, determina o diâmetro médio da gota.

Através do experimento foram analisadas as amostras das três misturas binárias de combustíveis (QAV-1 + farnesano, QAV-1 + etanol e farnesano + etanol), para obtenção dos resultados. Os resultados das propriedades físicas (massa específica, viscosidade e tensão superficial) das misturas de combustíveis são apresentados pela Tabela 11.

Tabela 11. Medidas experimentais das propriedades físicas das misturas de combustíveis variando com a temperatura.

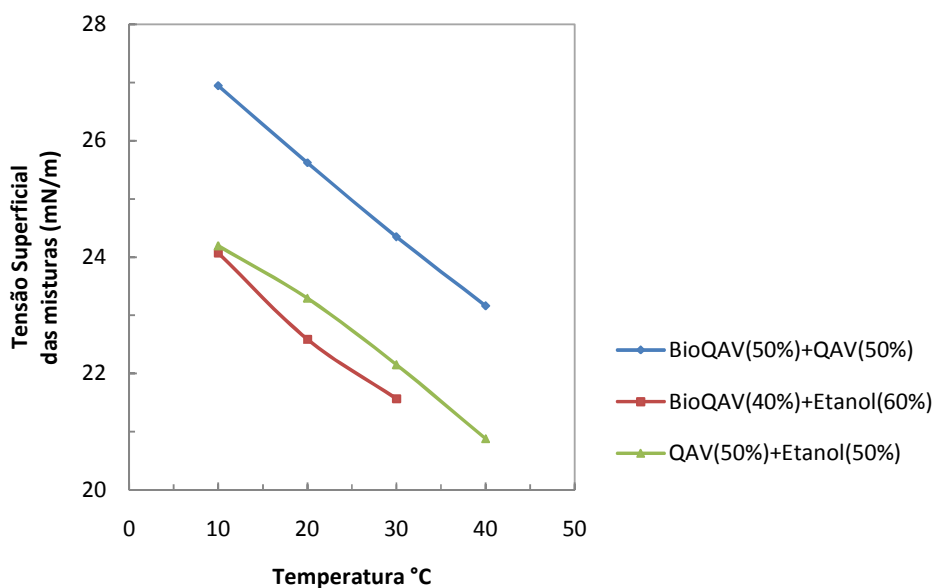
Misturas	Temperaturas (°C)	Viscosidade		Massa específica (g/cm ³)	Tensão Superficial (mN/m)
		Dinâmica (mPa.s)	Cinemática (mm ² /s)		
BioQAV (50%) + QAV-1 (50%)	10	2,4737	3,1143	0,7943	26,94
	20	1,9729	2,5040	0,7870	25,62
	30	1,6193	2,0745	0,7806	24,35
	35	1,4766	1,9000	0,7777	-
	40	-	-	-	23,16
BioQAV (40%) + etanol (60%)	10	2,0096	2,5430	0,7903	24,07
	20	1,5330	1,9593	0,7824	22,59
	30	1,3087	1,6905	0,7741	21,57
	35	1,1937	1,5500	0,7700	-
QAV-1 (50%) + etanol (50%)	10	1,6071	1,9949	0,8056	24,19
	20	1,2995	1,6300	0,7972	23,29
	30	1,0859	1,3760	0,7890	22,15
	35	0,9980	1,2714	0,7858	-
	40	-	-	-	20,88

Fonte: Autoria própria.

4.2.1. Análise da tensão superficial das misturas de combustíveis

A partir da Tabela 11 foram obtidos os resultados para análise da tensão superficial das misturas de combustíveis que varia com a temperatura. Estes resultados foram registrados e programados no Microsoft Excel, como ilustra a Figura 37.

Figura 37. Variação da tensão superficial com relação à temperatura.



Fonte: Autoria própria.

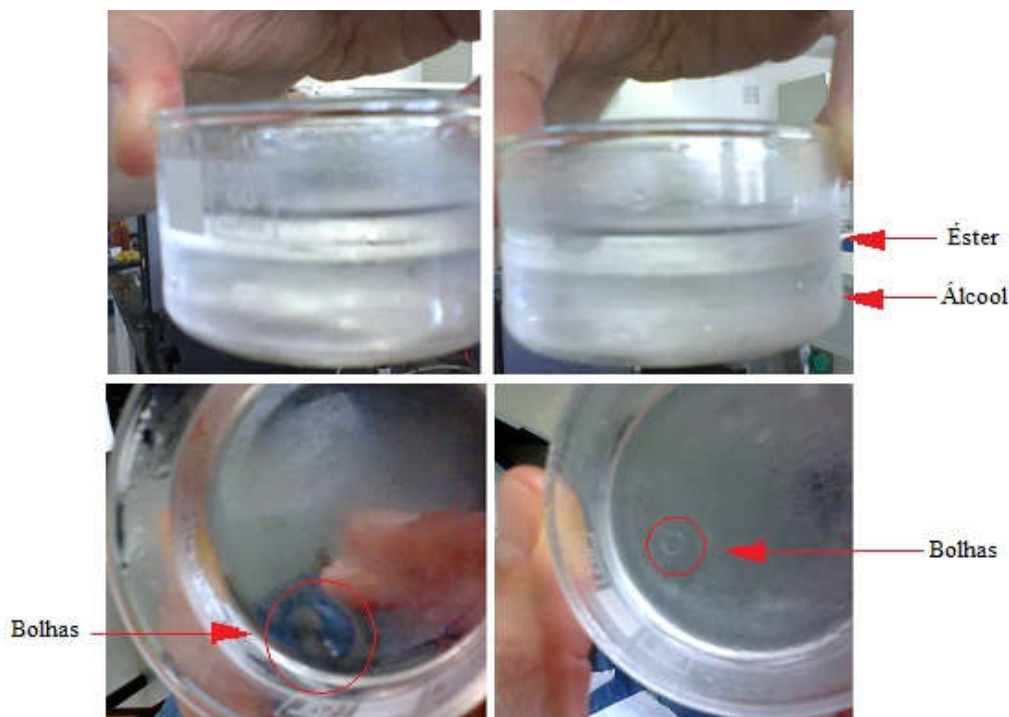
Nota-se que a tensão superficial das misturas diminui com o aumento da temperatura e também a diferença entre os valores é refletido também nas discrepâncias das tensões superficiais de cada combustível em particular. Por exemplo, o farnesano possui maior tensão superficial, enquanto o etanol possui a menor tensão superficial quando comparado com os três combustíveis avaliados individualmente.

Observa-se também que em baixa temperatura (10°C) as misturas de BioQAV + etanol e QAV-1 + etanol apresentam valores próximos de tensão superficial. Isto é um reflexo do erro de medida do tensiômetro, que corresponde a aproximadamente 16,3% na mistura de BioQAV + etanol, levando em consideração que o percentual de álcool é maior que do BioQAV na mistura. Isto contribui com o risco de haver separação de fase na mistura em baixa temperatura, como apresenta a Figura 38.

O teste realizado com a mistura do BioQAV + etanol a 40°C foi cancelado, devido a falha na leitura do tensiômetro causado pela separação de fase da mistura, como apresenta a Figura 38.

Apesar das indicações dos erros de medidas apontados no experimento, os valores podem ser corrigidos pelo fator de correção (Z), que leva em consideração a massa específica de cada combustível envolvido nas três misturas binárias.

Figura 38. Fotos da separação de fase na mistura de BioQAV + etanol em baixa temperatura (10°C).



Fonte: Autoria própria (10/10/2016).

Esta separação de fase da mistura proporciona erros de leitura no tensiômetro, além de comprometer o processo de atomização do fluido. A formação de bolhas durante o escoamento do combustível proporciona a redução da vida útil dos medidores e das bombas de alimentação do combustível, devido à pobre capacidade de lubrificação do combustível.

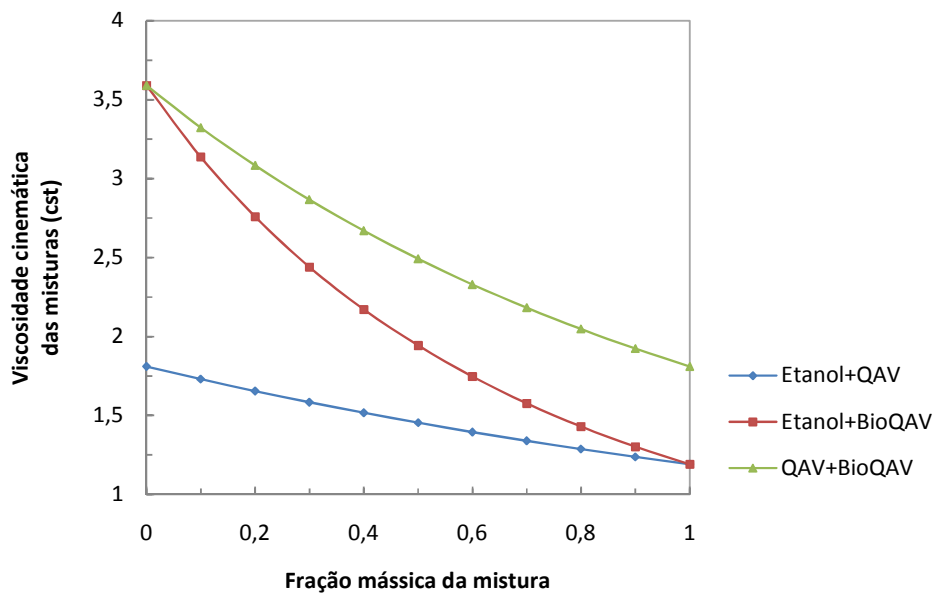
A princípio apenas a mistura do BioQAV + etanol apresentou maiores problemas de miscibilidade com a variação da temperatura. A mistura de QAV-1 + etanol, por outro lado apresentou uma coloração turva à temperatura de 10°C, caracterizando também o início do processo de separação de fase. Por essa razão foi sugerido à substituição do álcool anidro por outros tipos de álcool (metanol, propanol e/ou etanol anidro com 99,9% de pureza), a fim de se obter resultados estimados, que contribuam para o uso destas misturas de combustíveis.

4.2.2. Análise da viscosidade das misturas de combustíveis

Partindo do princípio teórico, a obtenção da viscosidade cinemática pode ser estabelecida pela equação de Refutas, definidas pelas equações 18, 19 e 20. A equação de Refutas tende a proporcionar valores mais próximos dos reais, quando comparado com a equação de Gambill (1959).

Os dados teóricos preliminares foram programados e calculados pelo Microsoft Excel, como apresentado pela Figura 39.

Figura 39. Curva da variação da viscosidade cinemática em função da fração mássica da mistura, segundo a equação de Refutas.

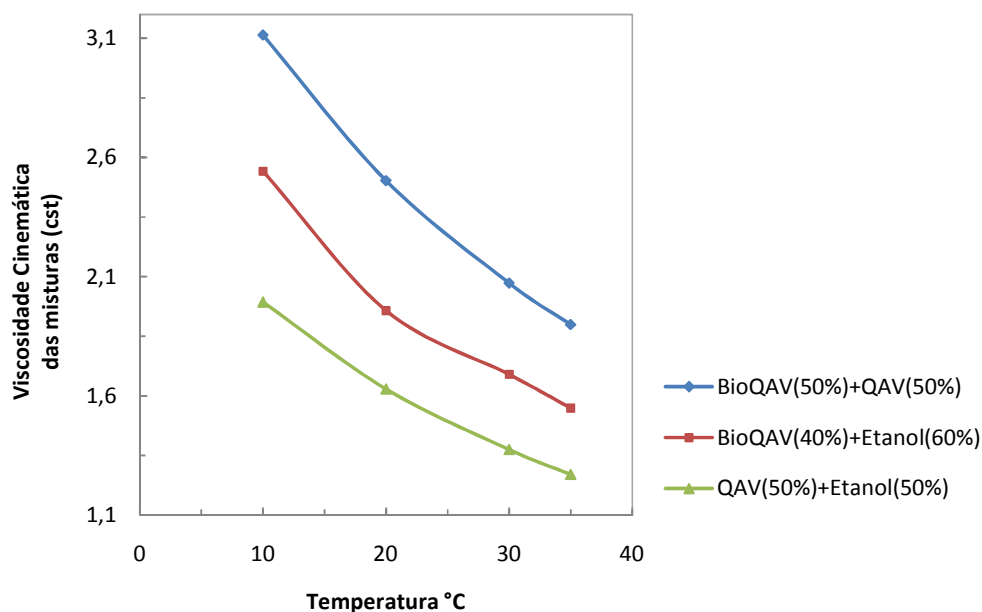


Fonte: Autoria própria.

Através da equação de Refutas, é possível calcular a viscosidade cinemática das misturas entre dois ou mais combustíveis a temperatura ambiente (em torno de 20°C), podendo variar a fração mássica, em outras palavras, torna-se possível identificar a viscosidade cinemática da mistura para diferentes porcentagens de cada combustível.

Entretanto, segundo a equação de Arrhenius definida pela equação 21, a viscosidade é uma propriedade física que pode variar com a temperatura. Estes dados foram adquiridos por experimentos, sendo registrados e programados no Microsoft Excel, conforme apresenta a Figura 40.

Figura 40. Curva da variação da viscosidade cinemática em função da temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Como previsto, a viscosidade cinemática diminui com o aumento da temperatura. Analisando a Tabela 12, nota-se que na temperatura ambiente (20°C), os resultados obtidos pelo modelo teórico se aproximam dos resultados reais (obtidos por experimentos), contribuindo para coerência dos cálculos e confiabilidade nos valores encontrados.

Tabela 12: Comparação entre os resultados obtidos teoricamente e por experimento da viscosidade cinemática a temperatura de 20°C.

Viscosidade cinemática	Unidades	Misturas		
		BioQAV (50%) + QAV-1 (50%)	BioQAV (40%) + etanol (60%)	QAV-1 (50%) + etanol (50%)
Teórica (Refutas)	(cSt)	2,4913	1,7462	1,4535
Experimental	(cSt)	2,5040	1,9593	1,6300

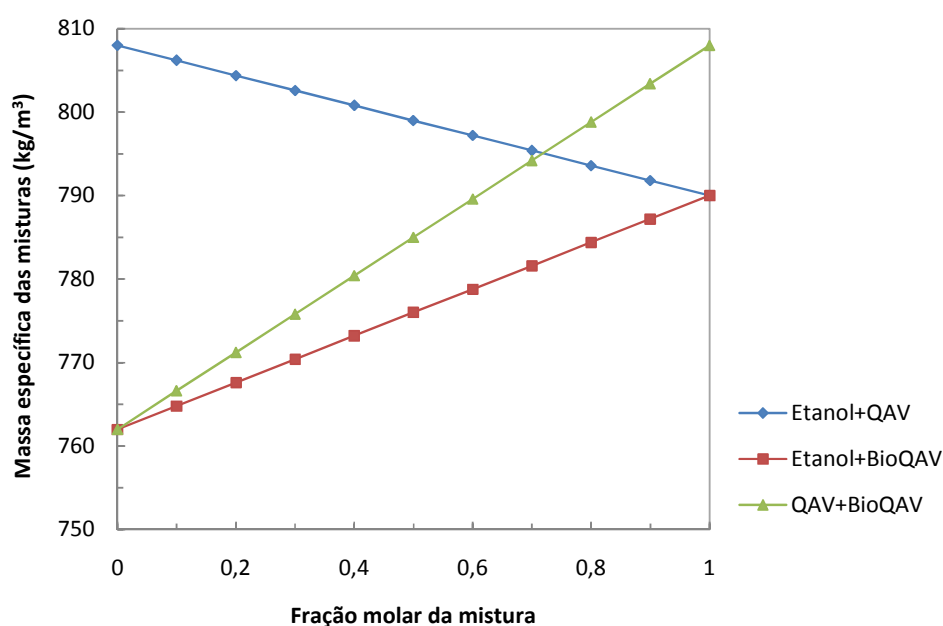
Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 também apresenta um resultado cuja curva de decaimento é uma exponencial decrescente, demonstrando similaridade à modelação numérica definida pela equação de Arrhenius. Entretanto, a curva demonstrada é pouco perceptível, devido aos testes com as misturas serem realizadas em uma estreita faixa de temperatura.

4.2.3. Análise da massa específica das misturas de combustíveis

Teoricamente a massa específica pode ser calculada a partir do modelo numérico de Agamat, definida pela equação 23, onde se calcula a massa específica das misturas entre dois ou mais líquidos a partir da fração molar de cada combustível. O resultado foi calculado em uma planilha do Microsoft Excel, como apresenta a Figura 41.

Figura 41. Variação da massa específica em função da fração molar da mistura, a temperatura de 20°C.

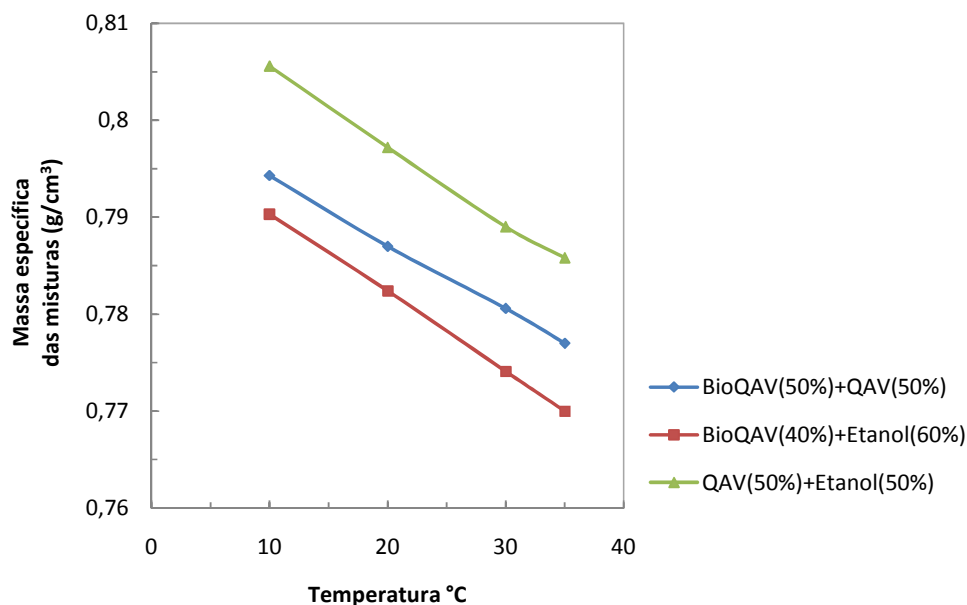


Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados preliminares das propriedades físico-químicas de cada combustível, torna-se possível obter a massa específica das misturas binárias em diferentes percentuais de cada combustível, como apresenta a Figura 41.

A parte experimental envolveu a variação da massa específica em função da temperatura, sendo apresentada pela Figura 42.

Figura 42. Curva da variação da massa específica das misturas, em função da temperatura.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 42 é representado por uma função linear decrescente, ou seja, quando se aumenta a temperatura diminui a massa específica e/ou vice-versa. Entretanto, ao analisar a Tabela 13 pode-se perceber que os resultados obtidos pelo modelo de Amagat também se aproximam dos valores reais obtidos no experimento, a temperatura ambiente (em torno de 20°C).

Tabela 13. Comparação entre os resultados obtidos teoricamente e por experimento da massa específica a temperatura de 20°C.

Massa específica	Unidades	Misturas		
		BioQAV (50%) + QAV-1 (50%)	BioQAV (40%) + etanol (60%)	QAV-1 (50%) + etanol (50%)
Teórica (Amagat)	(kg/m ³)	785,0	778,8	799,0
Experimental	(kg/m ³)	787,0	782,4	797,2

Fonte: Autoria própria.

As medidas da massa específica e da viscosidade apresentaram pequenas porcentagens de erros, em relação às medidas de tensões superficiais, isso pode corresponder à quantidade (composição) e/ou a forma de armazenamento dessas misturas nos recipientes (seringa ou becker).

Em todos os aspectos das propriedades físicas das misturas de combustíveis, a mistura de 50% de QAV-1 com 50% de BioQAV, apresentou as melhores características para um combustível de classificação “*drop-in*”, ou seja, as propriedades físicas desta mistura é semelhante as propriedades físicas do QAV-1. De fato, isso proporciona boa performance no processo de combustão, justificando a homologação desta mistura para o uso comercial.

Entretanto, as outras duas misturas apresentaram muitos problemas em baixas temperaturas (10°C), especialmente a mistura de 40% de BioQAV (farnesano) com 60% de etanol anidro.

Coincidentemente, esses problemas ocorreram apenas com as misturas que apresentaram álcool. Isto pode ter ocorrido por ter realizado o experimento com um álcool que não apresentou alto teor de pureza, ou ainda, não ter operado nas proporções químicas adequadas para este experimento.

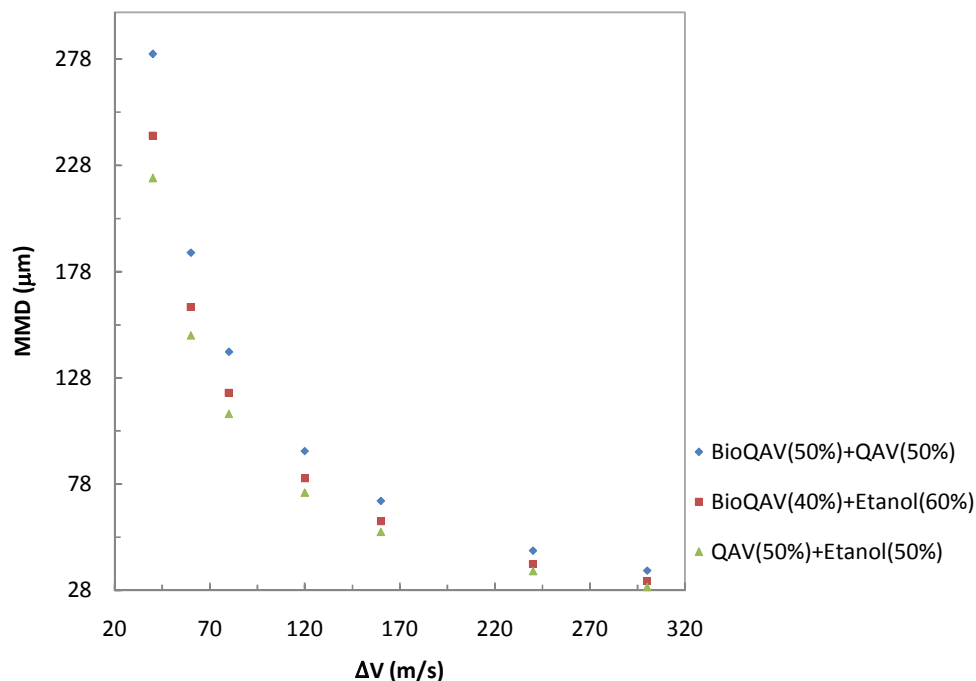
Contudo é aceita a hipótese que essas misturas de combustíveis podem apresentar ganhos na performance de combustão e até mesmo, em requisitos econômicos e sustentáveis.

4.3. Análise dos resultados referentes ao diâmetro mediano de massa

Para o cálculo do diâmetro médio de massa (MMD) é necessário saber as propriedades físicas (massa específica, viscosidade e tensão superficial) do fluido de trabalho, que neste caso são três misturas binárias de combustíveis. Os valores obtidos, para efeitos de cálculos foram determinados a partir da temperatura ambiente (em torno de 20°C), assim como foram apresentados na Tabela 11.

Partindo da análise da equação 38, pode-se perceber que a velocidade relativa (ΔU) entre o líquido e o ar é uma das mais importantes propriedades para a determinação do diâmetro médio das gotas, pois quanto maior velocidade relativa menor será o diâmetro das gotas, como demonstra a Figura 43.

Figura 43. Curva da variação do MMD em função da velocidade relativa entre o líquido e o ar, a temperatura de 20°C.



Fonte: Autoria própria.

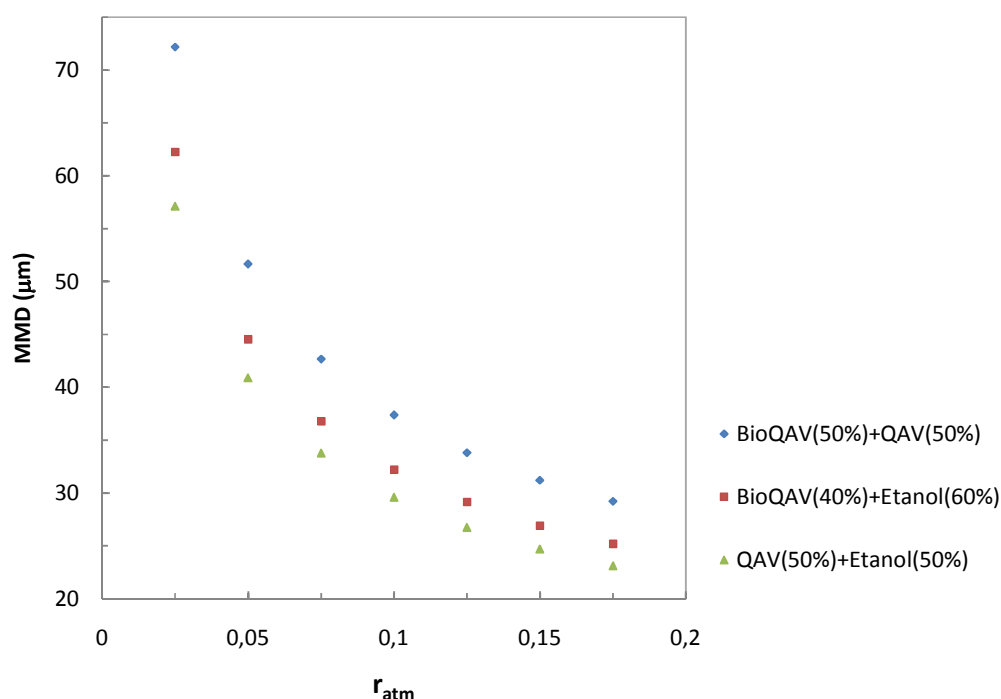
Observa-se na Figura 43 que quanto mais o valor da velocidade relativa se aproxima da velocidade do som, menor será o diâmetro médio de gota, podendo chegar a um valor em torno de 30 micrometros (μm), dependendo da mistura.

Contudo, a velocidade relativa do escoamento entre o líquido/ar é diretamente afetada pelo coeficiente de descarga (C_D), pela pressão manométrica de injeção do combustível (P_{ic}) e pela pressão de injeção do gás (ar comprimido) (P), a definição destas variáveis são representadas pelas equações 33, 36 e 37, respectivamente. Sendo assim, estes fatores também contribuem na formação do diâmetro médio da gota.

Ao analisar a Tabela 11, nota-se também que a uma temperatura de 20°C as propriedades físicas das misturas binárias de combustíveis que mais contribui pela variação entre o tamanho de gotas é a viscosidade dos combustíveis. Isto porque de acordo com os resultados definidos na Tabela 11, a mistura de QAV-1 + etanol é a menos viscosa, por este motivo apresenta menor tamanho médio de gota e a mistura de farnesano + QAV-1 é mais viscosa, sendo assim apresentará maior diâmetro médio de gota.

A razão de atomização entre o ar e o combustível é outro parâmetro importante para formação do MMD, pois leva em consideração a vazão mássica do combustível e do gás de atomização (ar comprimido). O resultado pode ser demonstrado pela Figura 44.

Figura 44. Curva da variação do MMD em função da razão de atomização, a temperatura de 20°C.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 também mostra que no aumento da razão de atomização diminui o MMD. Porém, a variação entre o MMD é pequena quando comparado com a Figura 43. Entretanto, a vazão mássica de combustível também está relacionada com o conceito do coeficiente de descarga (C_D), como define a equação 34.

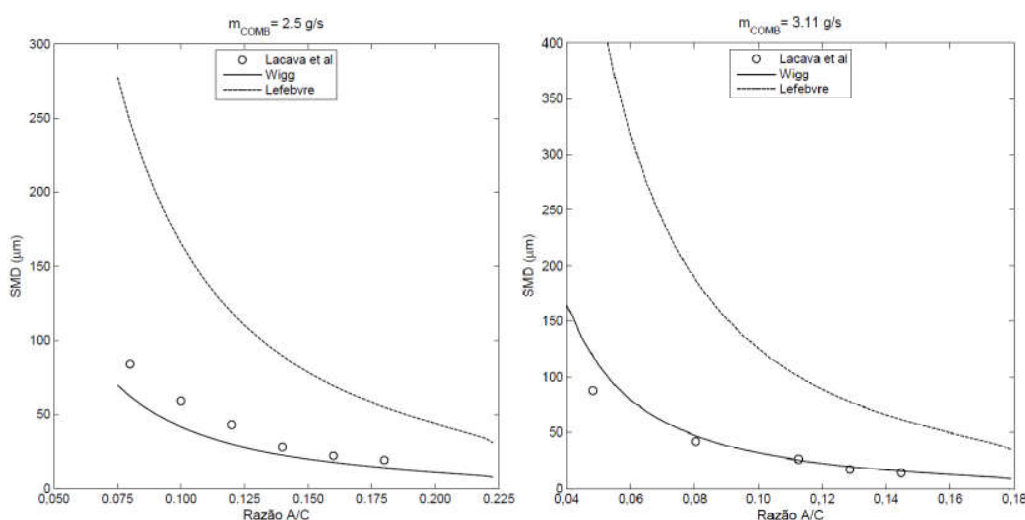
Deve-se também notar que, através da equação empírica de Wigg (equação 38) o expoente da tensão superficial é 0,2, enquanto o da viscosidade é 0,5, que indica que possíveis erros na determinação da tensão superficial serão menos críticos que erros na determinação da viscosidade. Esse fato ocorre devido aos menores diâmetros de gota exigirem altas velocidades relativas, então às forças de cisalhamento predominaram sobre as forças de tensão superficial o que explica a diferença entre os expoentes.

Enquanto isso, as medidas geométricas do atomizador têm uma leve influência no diâmetro médio das gotas, dado que a espessura da película líquida que se forma nas paredes da câmara de mistura se vê levemente influenciada pela variação da geometria do injetor, que tem expoente de apenas 0,1.

Sendo assim, percebe-se que a vazão mássica dos combustíveis também é um fator relevante, que contribui na formação do *spray*.

Quispe Gonzáles (2013) demonstra os diâmetros médios de gotas quando comparado com os dados experimentais obtidos por Lacava *et al* (1998), referente as vazões mássicas do óleo diesel sendo: $\dot{m}_c = 2,5$ g/s e $\dot{m}_c = 3,11$ g/s, respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados pela Figura 45.

Figura 45. Curva do SMD calculados pelas equações 38 e 39 para diferentes vazões de combustível.



Fonte: Quispe Gonzáles (2013); Lacava (1998).

Os resultados obtidos pela equação 40 não são apresentados por serem muito pequenos.

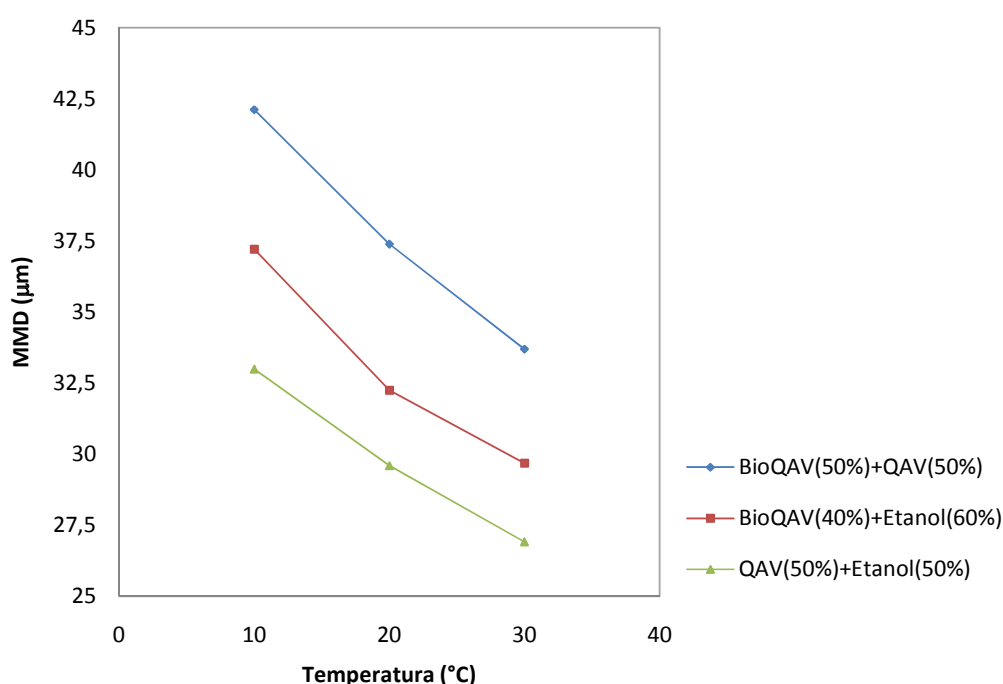
Nota-se também na Figura 45 que, apesar de ser um resultado obtido a partir do diesel (possui propriedades físicas distintas das misturas binárias estudadas neste trabalho), o diâmetro médio de gota variou entre 34 a 48 μm , ou seja, teve um resultado próximo do que foi obtido pela Figura 43 e 44.

Ainda segundo Quispe Gonzáles (2013), a equação de Lefebvre (equação 39) deve ser corrigida no valor do coeficiente de 20 para 5,023774. A equação de Chigier

também deverá ser corrigida, na medida em que se definem as unidades, que estão expressas a tensão superficial, massa específica do ar e a velocidade relativa.

E suma, é seguro mencionar que as características do processo de atomização são dependentes das propriedades físicas do líquido. Analisando as misturas binárias de combustíveis atomizadas por um injetor tipo jato-Y, o diâmetro médio de gota varia entre 28 a 38 μm , dependendo também da temperatura de trabalho que o combustível é exposto, assim como mostra a Figura 46.

Figura 46. Curva da variação do MMD em função da temperatura.



Fonte: A autoria própria.

Como observado na Figura 46, a temperatura possui influência no MMD devido à influência notável sobre as propriedades físicas das misturas de combustíveis. Nota-se também que a mistura de QAV-1 + etanol possui melhores características de atomização quando comparado com as outras duas misturas de BioQAV + QAV-1 e de BioQAV + etanol, proporcionando a essa mistura melhores desempenhos no processo da combustão do líquido.

Entretanto, este fator não reflete no desempenho energético gerado pelas misturas binárias de combustíveis no processo de combustão.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento teórico do projeto de um atomizador do tipo jato-Y para atomizar as misturas de querosene de aviação + farnesano, querosene de aviação + etanol e farnesano + etanol. Para o objetivo proposto é considerado que os resultados foram plenamente satisfatórios.

Analisando os três combustíveis submetidos neste trabalho, pode-se concluir que esses combustíveis possuem amplas aplicações no comércio, e desempenham funções importantes no setor de transporte, especialmente na indústria aeronáutica e aeroespacial, contribuindo assim com o aumento de estudos e pesquisas direcionados a estes combustíveis.

Conclui-se também que as três misturas binárias formadas por estes combustíveis, principalmente a mistura do QAV-1 + farnesano e do QAV-1 + etanol apresentam características desejáveis “*drop-in*”, ou seja, com as propriedades físico-químicas e energéticas próximas do QAV-1 de origem fóssil. Além disto, essas misturas são rotas sustentáveis, que contribuem na redução do consumo de QAV-1. Tanto o QAV-1 como o farnesano não são solúveis em água, porém apresentam características de miscibilidade quando são misturados juntos ou até mesmo com outros combustíveis de baixos custos (ésteres, alcoóis, entre outros), vindo a ser desta maneira economicamente viável ao mercado global. O farnesano misturado com p-metano e p-cimeno, já apresenta características desejáveis para substituição total do QAV-1, comercialmente essa mistura é conhecida como bioquerosene.

Apesar disto, a mistura do farnesano + etanol apresentou problemas de miscibilidade, principalmente quando exposto a baixas temperaturas, gerando dubiedade quanto aos resultados obtidos desta mistura para o processo de atomização. Entretanto, foi sugerida para pesquisas futuras a mistura do farnesano com outro álcool (metanol, propanol, entre outros) ou até mesmo outro éster, para que venha apresentar uma mistura homogênea estável em baixas temperaturas. Sugeriu-se também trabalhar com a análise de variadas proporções das misturas de combustíveis.

Este trabalho não teve como um dos seus objetivos, fazer análise das características energéticas de combustão das três misturas binárias, tais como seu poder calorífico inferior (PCI), limite de inflamabilidade, entre outros. Entretanto, foi notado que o farnesano apresenta maior capacidade energética (maior PCI), em relação ao QAV-1, enquanto o etanol possui o menor PCI, quando comparado com os outros

combustíveis em estudo. Isto significa que a proporção de etanol na mistura deve ser bem menor que 50%, pois sua capacidade energética é inferior. Esta condição é ideal para que a característica do processo de combustão feito com a mistura não seja afetada.

Os resultados quanto ao diâmetro médio de gota obtido pela equação de Wigg, para um atomizador do tipo jato-Y variou entre 28 a 38 μm , dependendo da mistura de combustível usada, sendo que os resultados de Lacava (1998) e Quíspe Gonzáles (2013) utilizando o óleo diesel apresentam o diâmetro médio de gota que varia entre 34 a 48 μm , ou seja, isto indica uma aproximação entre os resultados obtidos neste trabalho. Contudo, pôde-se afirmar que o injetor do tipo jato-Y possui uma ampla capacidade para atomizar diversos combustíveis incluindo as misturas binárias estudadas neste trabalho.

As comparações efetuadas entre os resultados obtidos para o diâmetro médio das gotas, fornecidos pelas equações de Wigg, Lefebvre e Chigier mostram que existem diferenças substanciais. Apesar disto, notou-se que há coerência dos resultados entre os valores obtidos neste trabalho com os resultados de Lacava (1998) e Quíspe Gonzáles (2013), demonstrado assim que, a equação de Wigg é o melhor método para se determinar as características formadas pelo *spray* (assim como o diâmetro médio de massa - MMD). Concluiu-se também que o diâmetro médio de gota é influenciado pela vazão mássica do combustível, ou seja, quanto menor a vazão menor será o tamanho da gota, assim como também os outros parâmetros como tais como: Velocidade relativa do gás/combustível, pressão de injeção do combustível, pressão do gás, temperatura e as propriedades físicas das misturas de combustíveis.

Através dos parâmetros da equação de Wigg notou-se também que a viscosidade é a propriedade física mais importante, devido às forças de cisalhamento predominarem sobre as forças de tensão superficial, afetando diretamente a velocidade relativa do gás/combustível.

A vazão do gás de atomização na saída do bocal deve assumir condições críticas, para o desenvolvimento teórico do projeto, contribuindo assim para redução do diâmetro médio de gota. De acordo com os resultados experimentais feito por Quíspe Gonzáles (2013) e Lacava (1998), o escoamento do gás/líquido assumiu condições sônicas a partir do ponto de mistura na região interna do atomizador, porém ao deixar o bocal de saída do atomizador, assume-se condições subsônicas devido o arrasto da gota influencia pela atmosfera.

Partindo destes princípios recomendam-se a trabalhos futuros:

1. A construção do atomizador para realização de testes experimentais.
2. Pesquisas com os testes de inflamabilidade dessas misturas binárias, observando as características nos processos de combustão de líquidos.
3. Pesquisas para medição e análise da influência da pressão no ponto de mistura do atomizador jato-Y, assim como a realização de testes de CFD para análise do escoamento da mistura bifásica ocorrida no interior do atomizador.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics – 2009-7002. **Sustainable Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene (Bio-SPK) Jet Fuel Flights and Engine Tests Program Results**. Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), september, 2009.

AIAB - ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS AEROESPACIAIS DO BRASIL. **Inserção do Brasil nos biocombustíveis aeronáuticos**. Contribuições Institucionais. 16: 59-64, 2011.

AMORIN, E. B.; **Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa**. 2012. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

AMYRIS BRASIL Ltda. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ FARNESANO QAV**, Biocombustível farnesano, 2016.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível. Resolução ANP nº 20, de 24.06.2013. **Regulamenta as especificações dos querosenes de aviação alternativos e suas misturas com o querosene de aviação (QAV-1)**. Diário Oficial da União, Brasília DF, 25 de junho de 2013.

APAZA VASQUEZ, R., **Desenvolvimento de um injetor centrífugo dual para biocombustíveis líquidos**, Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, SP, 2011.

ARAÚJO, P. H. M.; **Obtenção de Bioquerosene de Aviação “Drop in” por Pirólise Rápida e Desoxigenação Catalítica a Partir do Licure (Syagrus Coronata)**. Dissertação de mestrado, Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba, 2014.

ASHGVIZ, N.; **Handbook of Atomization and Sprays Theory and Applications**. USA, Springer; pp. 200-870. 2011.

ATAG–Air Transport Action Group, **Beginner’s guide to aviation biofuels**. Edition 2, 2011.

AVIAÇÃO EM RESVISTA; **Guia de Aviação Agrícola**; ISSN 0104-4958, 11º edição, 2008.

BATARSEH, F. Z.; **Spray generated by airblast atomizer: atomization, propagation and aerodynamic instability**. Dissertation of Master Degree. Technische Universität Darmstadt. Alemanha, 2008.

BAYVEL, L.; ORZECOWSKI, Z. **Liquid atomization**. [S.I.]: Taylor and Francis, 1993.

BORGES, L. E. P.; GONÇALVES, F. R.; FRAGA, M. A.; **Combustíveis de aviação: Perspectivas e Futuro**. C&T, p. 15-23, Rio de Janeiro, 2011.

CARVALHO, J. A., MCQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Editora da UFSC, 176p, 2007.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS; **Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios**. Séries de documentos técnicos, novembro, 2010.

CHIARAMONTI, D.; PRUSSI, M.; BUFFI, M.; TACCONI, D. **Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels**. Applied Energy. Available online, 2014.

CHIGIER, N. A.; **The Atomization and Burning of Liquid Fuel Sprays**, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 2, pp. 97 – 114, 1976.

CHINTALA, S. **A computational study of interfacial mixing in pipelines, logistics and diverse models to predict the interface length.** Dissertation of the Master of Science degree, Oklahoma State University, USA, 2014.

CHUNXI, L.; WENCHUAN, W.; ZIHAO, W., **A surface tension model for liquid mixtures based on the Wilson equation.** Fluid Phase Equilibrium, 175(1-2): 185-196, 2001.

CONCONI, C. C.; **Avaliação físico-química e o potencial de desempenho do farnesano, biodiesel de soja, diesel fóssil e suas misturas por meio da energia de ativação e da correlação com as emissões em motores diesel.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo-SP, 2016.

CORONADO, C. J. R.; CARVALHO Jr., J. A.; CORTEZ, E. V.; CARVALHO, F. S.; SANTOS, J. C. and A. Z. MENDIBURU, A. Z.; **"Flammability limits: A review with emphasis on ethanol for aeronautical applications and description of the experimental procedure."** Journal of Hazardous Materials 241–242(0): 32-54; 2012.

DEMIRBAS, M. F. **Current Technologies for biomass conversion into chemicals and fuels.** Energy Sour Part A. 28:118-8, 2006.

FRIGO, E. P.; BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; FRIGO, K. D. A.; CUNHA, F. S.; LINS, M. A. **Bioquerosene: Panorama da produção e utilização no Brasil.** Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 3, p. 97-106, 2014.

FUNG, M. C.; **Experimental and numerical study of spray characteristics of nasal spray device.** Thesis for Degree of Doctor of Philosophy. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering Science, Engineering and Technology Portfólio RMIT University. Australia, 2013.

GAMBILL, W. R.,; **How to estimate mixtures viscosities,** Chemical Engineering, Vol. 66, pp. 151–152, 1959.

GIAP, S. G. E. **The hidden property of Arrhenius-type relationship: viscosity as a function of temperature.** Journal of Physical Science, v.21, n.1, p.29-39, 2010.

GHOSH, P. **Surface Tension.** Technical book. Department of chemical engineering. NPTEL. Índia, 2014.

GUPTA, K. K.; REHMAN, A.; SARVIYA, R. M. **Bio-fuels for the gás turbine: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14: 2946-55, 2010.

HIRSCHFELDER, J. O.; CURTISS, C. C. F.; BIRD, R. B. **Molecular Theory of Gases and Liquids,** Ed. Wiley, 4° Ed., 1994.

INDEX MUNDI, **Petróleo Bruto Preço Mensal em dólares por barril,** disponível em: <http://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=petr%C3%B3leo-bruto&meses=300>, acesso em: 28.Jan.2017.

LACAVAL, P. T.; CARVALHO Jr, J. A.; MCQUAY, M. Q.; “**Metodología para el diseño de atomizadores tipo Y**”, Información tecnológica, vol. 9, n.6, Santiago de Chile, 1998.

LACAVAL, P. T., **Investigação experimental do enriquecimento do ar na incineração de resíduos aquosos.**Tese de Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000.

LEFEBVRE, A. H., **Atomization and Sprays,** Hemisphere, New York, 1989.

LLAMAS, A.; AL-AL, A.M.; HERNANDEZ, M.; LAPUERTA, M.; CANOIRA, L.; **Biokerosene from babassu and camelina oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene.** Energy & Fuels. 26: 5968-76, 2012.

MCT, **Efeito Estufa e a Convenção sobre Mudança do Clima,** Cartilha. Brasília: 1999.

MERKER, P. G.; SITESCH, G.; OTTO, F. **Simulating Combustion for engine development**. Ed. Springer, 2006.

MILLO, F. et al. **Influence on the performance and emissions of an automotive Euro 5 diesel fueled with F30 from farnesane**. Fuel, v. 138, n. 0, p. 134-142, 2014.

MULLINGER, P; CHIIGIER, N.A., “**The Design and Performance of Internal “Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers”**”, Journal of the Institute of Fuel, vol. 47, n. 393, pp. 251-261, 1974.

PACÍFICO, A. L.; **Análise teórico-experimental do escoamento bifásico no interior de bocais nebulizadores do tipo “Y-JET”**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica); Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

PEREZ, E.P.; **Substituição do diesel usado nos queimadores industriais por álcool combustível**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ BR0028**, Álcool Etílico Anidro Combustível, 2014.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ BR0030**, QAV-1, 2014.

QUISPE GONZÁLES, C. A. **Investigação de injetores tipo Y e efervescentes para a atomização da mistura de glicerina e etanol**. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

REIS, C. R. **Uma abordagem sobre o polietileno de baixa e de alta densidade feito a partir do etanol**. Trabalho (Conclusão de Curso de Produção com ênfase em Plástico) - Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2010.

REYNOL, F.; **Modelo do biodiesel poderia ser aplicado ao querosene vegetal.** Inovação Uniemp. Vol. 3: 21-23, 2007.

RIBEIRO, M. D. **Engine LES with Fuel-Spray Modeling.** 2015. 117 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SANTOS, F. D. T.; **Laser Induced Incandescence Soot Characterization in Farnesane-Kerosine Wick-Fed Diffusion Flames.** 2013, 106f. Thesis of Doctor in Science Area of Aerodynamics, Propulsion and Energy – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

SANTOS, F. I. V.; **BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO: panorama e perspectivas do biocombustível.** 2015. f 47. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão do Agronegócio.) – Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.

SIMMONS, H.C., **The correlation of drop-size distributions in fuel nozzle sprays - Part I: The drop-size/volume-fraction distribution.** Journal of Engineering for Power, 99(3): 309-314, 1977.

SONG, S. H.; LEE, S. Y.; **An Examination of Spraying Performance of Y-Jet Twin Fluid Atomizers: Effect of Mixing Port Length,** In: International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 1994, Rouen, France, S.E.D. pp. 616 – 623, 1994.

SOUZA, T. G. S.; **Estudo em micro escala da conversão térmica e catalítica da borra do óleo de algodão para obtenção de bioquerosene.** Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Sergipe, 2015.

SUAREZ, P.A.Z.; SANTOS, A.L.F.; RODRIGUES, J.P.; ALVES, M.B. **Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: Desafios tecnológicos para viabilizá-los.** Química Nova. 32:768-75, 2009.

THEGARID, N.; FOGASSYA, G.; SCHUURMANA, Y.; MIROTADOSA, C.; STEFANIDISB, S.; ILIOPOULOU, E. F.; KALOGIANNISB, K.; LAPPAS, A. A.; **Second-generation biofuels by co-processing catalytic pyrolysis oil in FCC unit, Applied Catalysis B: Environmental.** 145: 161-6, 2014.

VANZELLA, E. **Estudo de propriedades físico-químicas do etanol hidratado com adição de biodiesel para uso em motores de combustão interna ciclo Otto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Março de 2015.

APÉNDICE A:

BioQAV e do combustível conhecido como diesel de cana. A Figura A3 apresenta a amostra do diesel de cana.

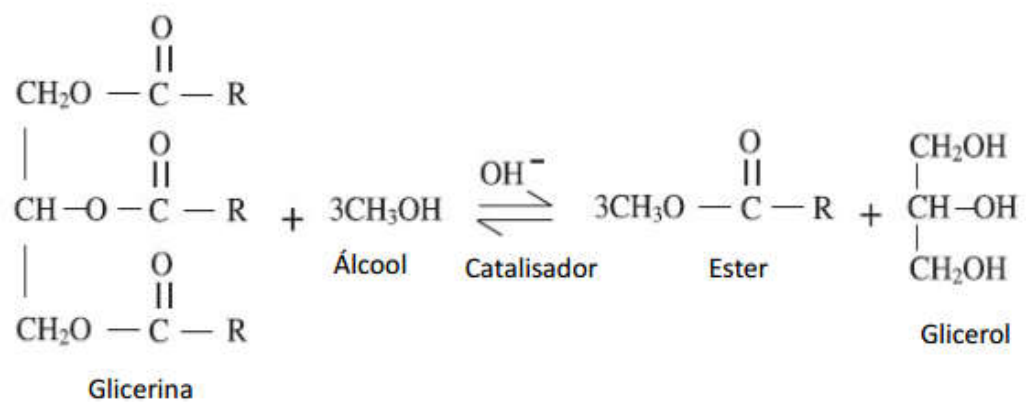
Figura A3. Foto da amostra do diesel de cana usado para substituição do diesel fóssil e até mesmo o biodiesel (tirada no dia 07/10/2016).



Porém há diferença desta substância conhecida como diesel de cana e com o biodiesel, tanto na composição química como em sua produção.

O biodiesel de soja é um combustível composto de alquil ésteres de ácido carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal, que atenda a especificação contida no regulamento técnico nº 4/2012, que faz parte da resolução ANP 14/11, sendo um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto. O biodiesel de soja pode ser produzido por craqueamento ou transesterificação, sendo que a rota mais usada é a de transesterificação, que consiste em uma reação química entre um triglicerídeo com um álcool, conforme apresenta a Figura A4. Este processo resulta na formação de um éster metílico e um glicerol (CONCONI, 2016).

Figura A4. Reação de transesterificação.



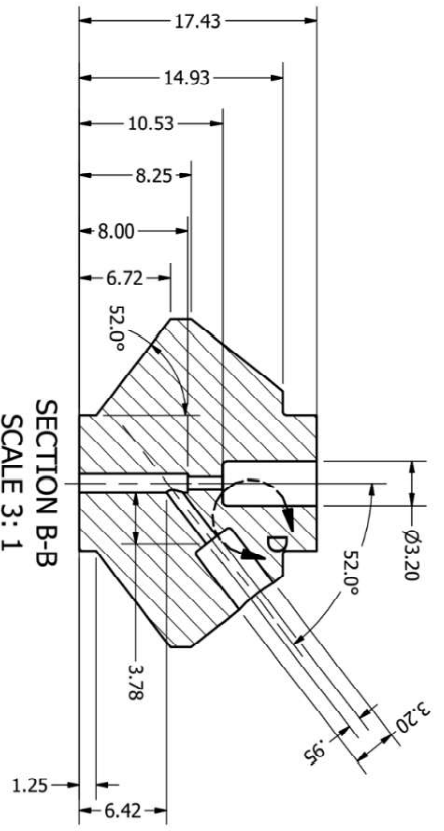
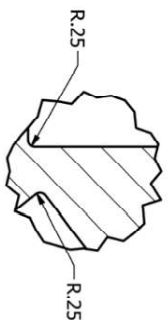
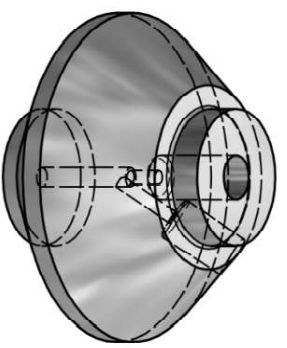
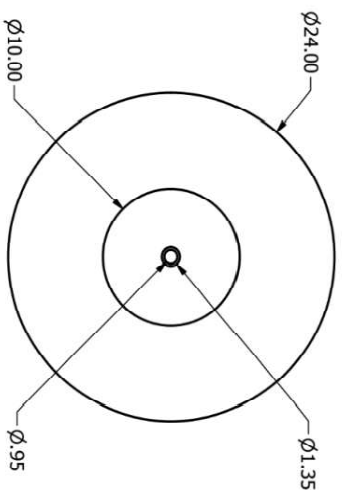
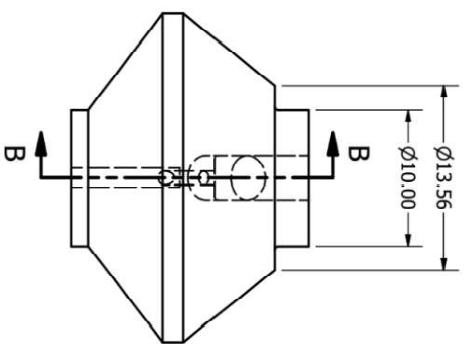
Fonte: Conconi (2016).

O biodiesel foi caracterizado conforme a resolução ANP 7 de 19 de março de 2008, e os dados estão apresentados na Tabela A1.

Tabela A1. Caracterização físico-química do biodiesel.

Características	Unidade	Especificação	Resultado	Método
Aspecto		Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas	Visual
Massa específica a 20°C	kg/m ³	850 a 900	882,0	ASTM D 4052
Viscosidade a 40°C	mm ² /s	3 a 6	4,42	ASTM D445
Teor de água, KF	mg/kg	500 max.	200	ASTM D6304
Ponto de fulgor, PM	°C	100 min.	151	ASTM D93
Teor de éster	%massa	96,5 min.	96,7	EM 14103
Enxofre total	mg/kg	50 max.	10	ASTM D5453
Teor de sódio + potássio	mg/kg	5 max.	2	NBR 15553
Teor de cálcio + magnésio	mg/kg	5 max.	2	NBR 15553
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C		1 max.	1	ASTM D 130
Teor de fósforo	g/L		0	ASTM D3231
Número de cetano			59	ASTM D 613
Ponto de entupimento de filtro a frio, CFPP	°C	19 max.	-5	ASTM D 6371
Índice de acidez	mg KOH/g	0,5 max.	0,1	ASTM D664
Glicerina livre	%massa	0,02 max.	0,01	ASTM D 6584
Glicerina total	%massa	0,25 max.	0,12	ASTM D 6584
Monoglicerídeos	%massa	Anotar	0,01	ASTM D 6584
Diglicerídeos	%massa	Anotar	0,02	ASTM D 6584
Triglicerídeos	%massa	Anotar	0,01	ASTM D 6584
Metanol + Etanol	%massa	0,2 max.	0,1	EN 14110
Índice de Iodo	g/100g	Anotar	137	EN 14111
Estabilidade à oxidação a 110°C	h	6 (mínimo)	7	EN 14112

APÊNDICE B:



DRAWN		Luthi Silva Ramos		11/28/2016		UNESP/ FEG - DEN	
CHECKED							
QA						TITLE	
MFG						Jet-Y	
APPROVED						SCALE	
						SIZE	
						B	
						DWG NO	
						Jet_Y-1_2	
						REV	
						SHEET 1 OF 1	

