

JEAN ANDRADE BARBOSA

**Determinação experimental dos limites de inflamabilidade do farnesano,
querosene de aviação e misturas em pressões reduzidas**

Jean Andrade Barbosa

**Determinação experimental dos limites de inflamabilidade do farnesano,
querosene de aviação e misturas em pressões reduzidas**

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. Celso Eduardo Tuna.
Co-Orientador: Prof. Dr. Christian Jeremi Rodriguez Coronado.

B238d Barbosa, Jean Andrade
 Determinação experimental dos limites de inflamabilidade do farnesano, querosene de aviação e misturas em pressões reduzidas / Jean Andrade Barbosa. – Guaratinguetá, 2019.
 141 f : il.
 Bibliografia: f. 121-128

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
 Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
 Coorientador: Prof. Dr. Chistian Jeremi Rodriguez Coronado

 1. Combustão - Medição. 2. Farneseno álcool. 3. Querosene. 4. Aeronáutica comercial. I. Título.

CDU 662.611(043)

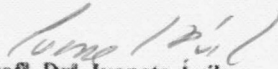
Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

JEAN ANDRADE BARBOSA

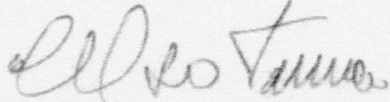
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

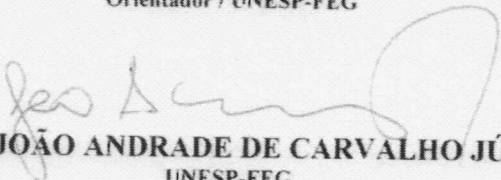
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
UNESP-FEG


Prof. Dr. ANDRÉS ARMANDO MENDIBURU ZEVALLOS
UFRGS

Fevereiro de 2019

DADOS CURRICULARES

JEAN ANDRADE BARBOSA

NASCIMENTO: 29/11/1990 – São José dos Campos / SP

FILIAÇÃO: Jony de Paiva Barbosa
Sônia Christina Barcellos de Andrade Barbosa

2008/2013: Curso de Graduação em Engenharia de Petróleo
Universidade Federal Fluminense

2017/2019: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, especialmente ao meu pai Jony e minha mãe Sônia que permanentemente estão ao meu lado me motivam para sempre seguir em frente me incentivando a ousar, questionar e acima de tudo ser curioso.

ao meu orientador, Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna pela amizade, paciência, disponibilidade e por ter me acolhido na UNESP.

ao meu co-orientador, Prof. Dr. Christian Jeremi Rodriguez Coronado pela sua amizade, dedicação, infinita disponibilidade, por todos os ensinamentos e principalmente também por ter me dado a oportunidade de fazer o que eu gosto.

aos professores Dr. José Luz e Dr. João Andrade por terem lecionado excelentes aulas que me propuserem a ter uma visão ampla sobre seus temas de especialidade.

ao técnico Marcos Silva do Laboratório de Máquinas Térmicas que sempre me ajudava na realização dos testes experimentais.

a minha namorada Natália Fernandes pela paciência e encorajamento.

a todos meus colegas que conheci, tanto na UNIFEI quanto na UNESP, durante toda a realização do curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

RESUMO

Com a criação de combustíveis alternativos para a redução de emissões de CO₂ no setor aeronáutico, torna-se necessária a determinação de suas propriedades de segurança e, entre elas destacam-se os limites de inflamabilidade. O combustível alternativo aeronáutico, que é utilizado neste trabalho, é o farnesano, fabricado a partir da cana de açúcar, por um processo que transforma açúcar em hidrocarboneto, pela empresa Amyris, localizada em São Paulo, Brasil. O objetivo dessa dissertação é determinar experimentalmente os limites de inflamabilidade, inferior (LII) e superior (LSI) do farnesano, QAV e misturas de 10% (F10) e 50 % (F50) em massa de farnesano com o QAV a pressões reduzidas em ar. Utiliza-se uma bancada experimental, que segue a norma americana ASTM E681, para a determinação dos limites de inflamabilidade, em que se utiliza o critério visual de propagação de chama e um recipiente de vidro borosilicatado de 20,716 L. Primeiramente são determinados os limites de inflamabilidade dos combustíveis para a pressão de 101,3 kPa em temperaturas entre 140 e 220°C, comparando-se os resultados com os valores teóricos disponíveis na literatura para a validação do procedimento experimental. Em segundo lugar, são determinados os limites de inflamabilidade das amostras a pressões reduzidas como 80, 60, 40 e 20 kPa em temperaturas entre 140 e 200°C. Foram realizados, no total 636 testes para determinação dos limites de inflamabilidade, sendo a duração média, para cada teste de 20 minutos. Por último, são apresentadas as equações de predição dos limites de inflamabilidade e é realizada uma análise de erro.

PALAVRAS-CHAVE: Limites de inflamabilidade. ASTM E681. Farnesano. querosene de aviação. combustão.

ABSTRACT

The creation of alternative fuels to reduce CO₂ emissions from the aeronautical sector needs determination of their safety properties, among which are flammability limits. farnesane is the alternative aviation fuel used in here, which has been produced from sugar cane through a conversion process known as direct sugar to hydrocarbon (DSHC) created by a company called Amyris, which is located in São Paulo, Brazil. Thereby, it is aimed to experimentally determine the flammability limits, lower (LFL) and upper (UFL) of farnesane, Jet fuel and mixtures of 10% (F10) and 50% (F50) in mass of farnesane at reduced pressures with air. For such a purpose, an experimental bench was built in accordance with American standard ASTM E681 to determine the lower flammability limits, in which flame propagation was analyzed visually through a 20.716 L borosilicate glass flask. The Flammability Limits of the fuels were initially determined at a pressure of 101.3 kPa and temperatures ranging between 140 and 220 ° C, whose results were compared with theoretical values found in literature in order to validate the experimental procedure. Afterwards, the Flammability Limits of samples were determined at reduced pressures, i.e. 80, 60, 40 and 20 kPa, and temperatures ranging between 140 and 200 ° C. 636 tests were performed altogether, the average time of each test was 20 minutes. Finally, prediction equations of flammability limits, were presented as a function of temperature.

KEYWORDS: Flammability limits. ASTM E681. Farnesane. Jet Fuel. Combustion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeção do aumento de demanda de transporte aéreo	16
Figura 2: Emissões de CO ₂ no Brasil	20
Figura 3: Composição química do QAV-1	23
Figura 4: Comparação entre o ciclo de carbono de (a) combustível fóssil (b) biocombustível	24
Figura 5: Processo de produção de biodiesel - transesterificação	27
Figura 6: Esquema da produção do etanol.....	29
Figura 7: Matéria prima e posição quanto ao custo e esforço de conversão	32
Figura 8: Rotas de produção de bioquerosene de aviação.....	35
Figura 9: Esquema de produção <i>HEFA</i>	35
Figura 10: Esquema de produção por <i>ATJ</i>	36
Figura 11: Diagrama de fluxo do <i>BTL</i>	37
Figura 12: Fluxograma de produção <i>DSCH</i>	39
Figura 13: Mecanismo de formação do farnesano.....	40
Figura 14: Efeito da pressão reduzida em 298K.....	43
Figura 15: Efeito da pressão inicial no limites superior de inflamabilidade no metano	44
Figura 16: Forma geral das temperaturas dos limites de inflamabilidade.....	45
Figura 17: Limites de inflamabilidade do metano diluído com nitrogênio em baixas temperaturas e a pressão atmosférica	46
Figura 18: Energia de ignição mínima de alguma substâncias.....	47
Figura 19: Diagrama dos limites de inflamabilidade em função do oxigênio.....	49
Figura 20: Limites de inflamabilidade de várias misturas metano/ar/gás inerte	50
Figura 21: Dispositivos padrões de determinação experimental dos limites de inflamabilidade A) ASTM 681-01, B) DIN 52649, C) EN 1839 (T), D) EN 1839 (B)	57
Figura 22: Esquema do equipamento segundo a norma DIN 52649. Critério visual.....	57
Figura 23: Esquema do equipamento segundo a norma ASTM E918. Critério de pressão.	58
Figura 24: Testes padrões de inflamabilidade	59
Figura 25: Esquema do equipamento do método Bureau of Mines	60
Figura 26: Critério visual de propagação de chama – ASTM E681.....	61
Figura 27: Energia de ignição de mistura JET A – Vapor (200kg/m ³).....	65
Figura 28: Energia de ignição de mistura JET A – Vapor (3 kg/m ³)	66
Figura 29: Mínima energia de ignição para os combustíveis JET A e JET B.....	66

Figura 30: Esquema da Bancada Experimental: A – Sistema de fornecimento de gás, B – Sistema de controle, C – Câmara de Inflamabilidade, D - Sistema de aquisição de dados e monitoramento.....	69
Figura 31: Câmara de inflamabilidade	70
Figura 32: Recipiente de teste esférico (câmara de inflamabilidade).....	70
Figura 33: Sistema de controle	71
Figura 34: Sistema de fornecimento de gases	72
Figura 35: <i>Field Logger</i>	73
Figura 36: Farnesano	77
Figura 37: Gráfico da pressão de vapor do farnesano por temperatura (até 10 kPa)	78
Figura 38: Gráfico da pressão de vapor do Farnesano por temperatura (até 110 kPa).....	79
Figura 39: Gráfico da pressão de vapor do QAV-1 por temperatura	80
Figura 40: Pressão de vapor do QAV e farnesano.....	81
Figura 41: Volume mínimo de farnesano em diferentes volumes de teste (1atm).....	83
Figura 42: Volume máximo de farnesano em diferentes volumes de teste (1atm)	83
Figura 43: Volume mínimo do farnesano vs temperatura (1 atm – 20,716 L).....	84
Figura 44: Volume máximo do Farnesano vs temperatura (1 atm – 20,176 L)	84
Figura 45: Volume mínimo de QAV em diferentes volumes de teste (1atm).....	85
Figura 46: Volume máximo de QAV em diferentes volumes de teste (1atm)	86
Figura 47: Volume mínimo de QAV vs temperatura (1 atm – 20,716 L).....	86
Figura 48: Volume máximo de QAV vs temperatura (1 atm – 20,716 L)	87
Figura 49: Volume mínimo de F50 vs temperatura (1 atm – 20,716 L).....	88
Figura 50: Volume máximo de F50 vs temperatura (1 atm – 20,716 L).....	88
Figura 51: Volume mínimo de F10 vs temperatura (1atm- 20,716 L)	89
Figura 52: Volume máximo de F10 vs temperatura (1 atm – 20,716 L).....	89
Figura 53: Limite inferior de inflamabilidade do farnesano – 101,3 kPa.....	92
Figura 54: Limite inferior de inflamabilidade do QAV – 101,3 kPa	92
Figura 55: Limite inferior de inflamabilidade de F50 – 101,3 kPa.....	93
Figura 56: Limite inferior de inflamabilidade de F10 – 101,3 kPa.....	93
Figura 57: Limite inferior de inflamabilidade - 80 kPa.....	96
Figura 58: Limite inferior de inflamabilidade – 60 kPa	97
Figura 59: Limite inferior de inflamabilidade - 40 kPa.....	98
Figura 60: Limite inferior de inflamabilidade – 20 kPa	99
Figura 61: Limite superior de inflamabilidade de Farnesano – 101,3 kPa.....	102

Figura 62: Limite superior de inflamabilidade de QAV – 101,3 kPa	102
Figura 63: Limite superior de inflamabilidade do F50 – 101,3 kPa.....	103
Figura 64: Limite superior de inflamabilidade do F10 – 101,3 kPa.....	103
Figura 65: Limite superior de inflamabilidade – 80 kPa.....	105
Figura 66: Limite superior de inflamabilidade – 60 kPa.....	106
Figura 67: Limite superior de inflamabilidade – 40 kPa.....	107
Figura 68: Limite superior de inflamabilidade – 20 kPa.....	108
Figura 69: Limites de Inflamabilidade – 101,3 kPa	117
Figura 70: Limites de Inflamabilidade – 80 kPa	118
Figura 71: Limites de Inflamabilidade – 60 kPa	119
Figura 72: Limites de Inflamabilidade – 40 kPa	120
Figura 73: Limites de Inflamabilidade – 20 kPa	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedade Fisico-Químicas do QAV-1	23
Tabela 2: Comparação entre biodiesel e diesel segundo a norma americana.....	26
Tabela 3: Propriedades físico-químicas do etanol hidratado.....	29
Tabela 4: Propriedades dos <i>SPK</i> e <i>SIP</i>	31
Tabela 5: Energia mínima de ignição para algumas substâncias.....	47
Tabela 6: Limites de inflamabilidade no ar e O ₂	49
Tabela 7: Limites de inflamabilidade de alguns compostos.....	52
Tabela 8: Contribuição de grupos funcionais.....	54
Tabela 9: Métodos de predição de limites de inflamabilidade	55
Tabela 10: Comparação entre os testes de inflamabilidade.....	56
Tabela 11: Propriedades físico-químicas do Farnesano	78
Tabela 12: Propriedades físico-químicas do QAV-1.....	79
Tabela 13: Registro Manual de Dados – Teste 130.....	90
Tabela 14: LII – 101,3 kPa	94
Tabela 15: LII - 80 kPa.....	95
Tabela 16: LII – 60 kPa	100
Tabela 17: LII – 40 kPa	100
Tabela 18: LII – 20 kPa	101
Tabela 19: LSI - 101,3 kPa.....	104
.Tabela 20: LSI - 80 kPa.....	104
Tabela 21: LSI - 60 kPa.....	109
Tabela 22: LSI - 40 kPa.....	109
Tabela 23: LSI - 20 kPa.....	110
Tabela 24: Coeficientes para o LII à pressão atmosférica.....	112
Tabela 25: EMA - LII à pressão atmosférica padrão.....	112
Tabela 26: Coeficientes para o LII à pressões reduzidas.....	113
Tabela 27: EMA - LII à pressões reduzidas	113
Tabela 28: Coeficientes para o LSI à pressão atmosférica.....	114
Tabela 29: EMA - LSI à pressão atmosférica padrão.....	115
Tabela 30: Coeficientes para o LSI à pressões reduzidas.....	115
Tabela 31: EMA - LSI à pressões reduzidas	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	- Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	- Agência Nacional do Petróleo
<i>ASTM</i>	- American Society for Testing and Materials
<i>ATAG</i>	- Air Transport Action Group
<i>ATJ</i>	- Alcohol to Jet Fuel
Bio-QAV	- Bioquerosene de aviação
BTL	- Biomass to Liquid
CGEE	- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNPE	- Conselho Nacional de Política Energética
<i>DSCH</i>	- Direct Sugar to Hydrocarbon
F10	- mistura com 10% em massa de Farnesano
F50	- mistura com 50% em massa de Farnesano
<i>HEFA</i>	- Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids
<i>IATA</i>	- International Air Transport Association
<i>IEA</i>	- International Energy Agency
LII	- Limite Inferior de Inflamabilidade
LSI	- Limite Superior de Inflamabilidade
PBB	- Plataforma Brasileira de Bioquerosene
QAV	- Querosene de Aviação
<i>SPK</i>	- Syntetized Kerosene Parafine
<i>SIP</i>	- Syntetized Iso-parafines
TAI	- Temperatura de Auto Ignição
UBRABIO	- União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ - massa específica (kg/m³)

ΔH – Variação de entalpia (kJ/mol)

a - número de mols de ar em reação estequiométrica (mol)

C - Concentração molar (%)

EAR – erro absoluto relativo (%)

EMA – erro médio absoluto (%)

LII – Limite Inferior de Inflamabilidade (% vol.)

LSI – Limite Superior de Inflamabilidade (% vol.)

m – massa no recipiente de teste (g)

MM – Massa molecular do composto (g/mol)

n – número de mols (mol)

P – Pressão (kPa)

P_{vap} - Pressão de vapor (kPa)

R – Constante universal dos gases

T – Temperatura (K)

V – Volume do frasco de teste (L)

vol - volume de combustível no recipiente de teste (mL)

y – número de mols mínimo no recipiente de teste (mol)

Subscrito e Sobrescrito

vap – vapor

est – estequiométrico

min – mínimo

máx – máximo

reag - reagentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.2	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS.....	19
2.1	COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS	19
2.2	COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DE AVIAÇÃO	21
2.1.1	Gasolina de aviação	21
2.1.2	Querosene de aviação.....	22
2.1.3	Diesel.....	22
2.3	BIOCOMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO.....	23
2.4	BIODIESEL	24
2.4.1	Pirólise	25
2.4.2	Microemulsões	26
2.4.3	Transesterificação	26
2.5	ETANOL	28
2.6	BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO (BIO-QAV).....	29
2.6.1	Matéria-prima	31
2.6.1.1	Pinhão manso	32
2.6.1.2	Camelina.....	32
2.6.1.3	Algas.....	33
2.6.2	Rotas de obtenção de Bio-QAV	33
2.6.2.1	Hidroprocessamento de éster a ácidos graxos (HEFA).....	34
2.6.2.2	Álcool para Bioquerosene (ATJ).....	36
2.6.2.3	Biomassa para líquido (BTL)	36
2.6.2.4	Açúcar para Hidrocarbonetos (DSHC).....	38
2.7	FARNESANO	39
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: LIMITES DE INFLAMABILIDADE	42
3.1	LIMITES DE INFLAMABILIDADE.....	42
3.2	FATORES QUE INFLUENCIAM OS LIMITES DE INFLAMABILIDADE	42
3.2.1	Pressão	43
3.2.2	Temperatura	44
3.2.3	Energia de ignição	46

3.2.4	Turbulência	48
3.2.5	Diluentes da mistura combustível-oxidante	48
3.3	MISTURA DE GASES COMBUSTÍVEIS	50
3.4	MODELOS TEÓRICOS DE PREDIÇÃO DE LIMITE DE INFLAMABILIDADE	51
3.4.1	Método por entalpia de combustão	51
3.4.2	Método por Pressão de vapor	51
3.4.3	Método Algébrico	53
3.4.4	Método por temperatura de chama adiabática	53
3.4.5	Método por contribuição de grupo molecular	54
3.4.6	Correlações empíricas	54
3.5	MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE INFLAMABILIDADE.....	55
3.5.1	Método do Tubo Bureau of Mines	59
3.5.2	ASTM E681	60
3.5.3	DIN 52649	61
3.5.4	EN 1839 (T)	61
3.5.5	ASTM E918	61
3.6	IMPORTÂNCIA DO LIMITE DE INFLAMABILIDADE NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA	62
3.7	INFLAMABILIDADE NA AVIAÇÃO.....	63
3.7.1	Ponto de fulgor	64
3.7.2	Intervalo de destilação	64
3.7.3	Pressão de vapor	64
3.7.4	Ignição	64
3.8	INFLAMABILIDADE EM COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS	66
4	BANCADA EXPERIMENTAL E MÉTODO DE ANÁLISE	68
4.1	BANCADA EXPERIMENTAL	68
4.2	CÂMARA DE INFLAMABILIDADE	70
4.3	SISTEMA DE CONTROLE	71
4.4	SISTEMA DE FORNECIMENTO DE GÁS.....	71
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MONITORAMENTO	72
4.6	DISPOSITIVOS DE MEDIÇÕES DE VARIÁVEIS	73
4.7	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	74
4.8	CÁLCULO DA PRESSÃO DE VAPOR.....	75

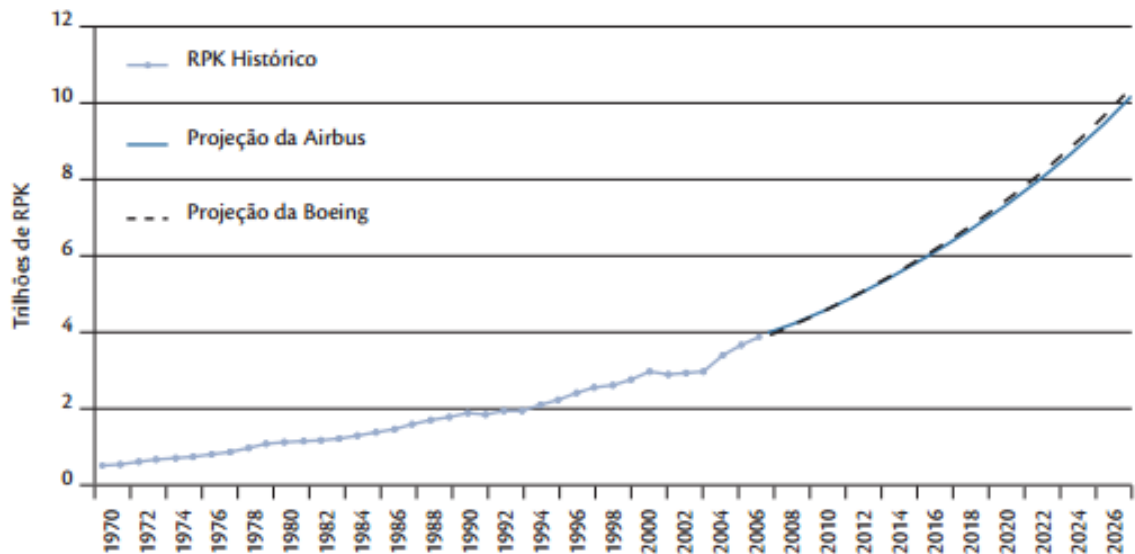
4.8.1	Farnesano	76
4.8.2	QAV	79
4.8.3	Misturas - F50 e F10	80
4.9	VOLUMES MÍNIMO E MÁXIMO DE COMBUSTÍVEL.....	81
4.9.1	Farnesano	81
4.9.2	QAV	85
4.9.3	Mistura - F50 e F10	87
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	90
5.1	REGISTRO DE DADOS	90
5.2	CORREÇÃO DE VOLUME PARA PORCENTAGEM A PARTIR DO RESULTADO EXPERIMENTAL	90
5.3	LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDADE.....	91
5.3.1	Pressão atmosférica	91
5.3.2	Pressões reduzidas	94
5.4	LIMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDADE.....	101
5.4.1	Pressão Atmosférica	101
5.4.2	Pressões Reduzidas	104
6	ANÁLISE E DISCUSSÕES	111
6.1	LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDADE.....	111
6.1.1	Pressão atmosférica	111
6.1.2	Pressões reduzidas	113
6.2	LIMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDADE.....	114
6.2.1	Pressão Atmosférica	114
6.2.2	Pressões reduzidas	115
6.3	RESULTADOS FINAIS DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE.....	116
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	122
7.1	TRABALHOS FUTUROS.....	123
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A – Dados de volume inserido em cada teste	133

1 INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da demanda global de energia juntamente com a diminuição de produção de combustíveis fósseis são os fatores que levam pesquisas a encontrar substitutos. Os combustíveis substitutos já vem sendo utilizados em diversos setores em vários países (SYAZA *et al.*, 2016).

Segundo o Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE, 2016), no setor aeronáutico, em 2006, o consumo de combustíveis nas aeronaves representou 11% da demanda energética do setor de transporte, contribuindo com 2% de emissões de gases estufas. A demanda global de querosene de aviação está ao redor de 5,5 milhões de barris por dia representando 6,3% da produção das refinarias. A demanda por combustíveis aeronáuticos tende a crescer juntamente com o aumento da demanda de transporte aéreo, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Projeção do aumento de demanda de transporte aéreo



Fonte: CGEE (2010).

No Brasil, a produção de querosene para aviação em 2015 foi de 4.154.451 m³ e, no ano de 2016, foi de 6.079.114 m³, totalizando um aumento de 46,3%, o que revela um aumento considerável de produção (ANUÁRIO ANP, 2015).

O uso de biocombustível na aviação já desperta interesse além do Brasil. Segundo a Agência Internacional de Energia, os biocombustíveis podem chegar a representar 30% do consumo energético no transporte aéreo (IEA, 2010).

Na atualidade, em escala global, os biocombustíveis com potencial para substituir o querosene de aviação são essencialmente obtidos a partir de óleos vegetais, de diversificada origem, tratados em processos termoquímicos (craqueamento catalítico) ou transesterificados de forma convencional e ajustados para as especificações aeronáuticas e, em cenários ainda incertos, advêm de produtos de processos fermentativos avançados. A produção, no Brasil, de biocombustível voltado ao uso em turbinas aeronáuticas é feito a partir de pinhão manso, babaçu, falso linho ou camelina e algas (CGEE, 2010). A Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) incentiva o uso de biocombustíveis em aeronaves e já possui relatos de voos utilizando mistura de querosene de aviação misturado com biocombustíveis.

O uso de combustíveis líquidos ou gasosos é comum em procedimentos industriais, o que torna necessário o conhecimento, se na condição de operação, há ou não possibilidade de explosões ou acidentes. Os limites de inflamabilidade são uma propriedade fundamental para predição de possíveis explosões e para projetar sistemas de proteção.

Desde que o querosene foi introduzido como combustível para o transporte civil aéreo em 1905, os projetistas aeronáuticos dão uma consideração especial para o espaço vazio dentro dos tanques de combustível das aeronaves. Esses tanques podem conter misturas de diversos gases combustíveis e ar, que, na presença ou não de uma fonte de ignição, podem ser ignitados.

A condição de ignição e propagação de chama dentro de um tanque de combustível de uma aeronave depende de parâmetros que incluem, por exemplo, o tipo de combustível, temperatura, pressão do tanque e concentração de oxigênio. Ao estudar os limites de inflamabilidade para aplicações aeronáuticas, é necessário levar em consideração: mudança de altitude, mudança de temperatura, ventilação do tanque e mistura de combustíveis durante a operação de abastecimento.

Considerando que os novos combustíveis alternativos possuem poucos estudos sobre suas propriedades físico-químicas, o estudo sobre seus limites de inflamabilidade se torna completamente justificado para manter a segurança e criar procedimentos para sua utilização.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação se propõe a determinar, em bancada experimental, os limites de inflamabilidade do farnesano, combustível alternativo de aviação, que é obtido a partir da fermentação de açúcares, utilizando-se microorganismos geneticamente modificados,

querosene de aviação (QAV) e misturas de 10 e 50 % (F10 e F50) em massa do farnesano em QAV.

Os objetivos específicos são:

1. Realizar revisão bibliográfica de biocombustíveis de aviação.
2. Realizar testes experimentais para o farnesano, QAV e misturas de 10 e 50 % em massa do farnesano, para a determinação do volume mínimo e máximo de biocombustível fornecido no frasco, no qual a mistura de ar-combustível tem propagação da chama. Este processo será realizado para cada pressão de trabalho com variação da temperatura.
3. Gerar gráficos que representem os limites de inflamabilidade dos combustíveis para as diferentes pressões em função da concentração e da temperatura. Para isso, é preciso transformar os valores encontrados experimentalmente para cada biocombustível com volumes mínimos e máximos necessários para se ter presença da propagação de chama no frasco de combustão, em valores que sejam representativos para qualquer volume em que esteja contida uma mistura de ar com biocombustível.
4. Correlação de equações que predizem os limites de inflamabilidade do farnesano, QAV, F10 e F50 para diferentes pressões e temperaturas.

1.2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A dissertação está estruturada, além de sua parte introdutória, em mais 6 capítulos, que serão descritos a seguir:

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica dos biocombustíveis aeronáuticos, focando nas rotas de obtenção, matérias-primas e o farnesano.

No Capítulo 3, é feita uma revisão bibliográfica dos limites de inflamabilidade, com ênfase nos fatores que os influenciam.

No Capítulo 4, são apresentados a bancada experimental na qual foram realizados os experimentos, o procedimento experimental e a metodologia utilizada.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados experimentais obtidos.

No Capítulo 6, realizam-se análise e discussão dos resultados, apresentando as equações de predição dos limites de inflamabilidade do farnesano, QAV, F50 e F10 para diferentes temperaturas e pressões.

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e feitas as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão relativa aos combustíveis aeronáuticos: tipos de combustíveis, propriedades físico-químicas e rotas de produção de biocombustíveis deste setor. Primeiramente, faz-se uma contextualização dos combustíveis aeronáuticos. A seguir, apresenta-se uma breve descrição dos combustíveis fósseis de aviação e suas características. Em seguida, são abordados os biocombustíveis de aviação, mostrando as matérias-primas e rotas tecnológicas de processamento. Por último, detalha-se o farnesano, que é um combustível alternativo para aviação e é o escopo deste trabalho.

2.1 COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS

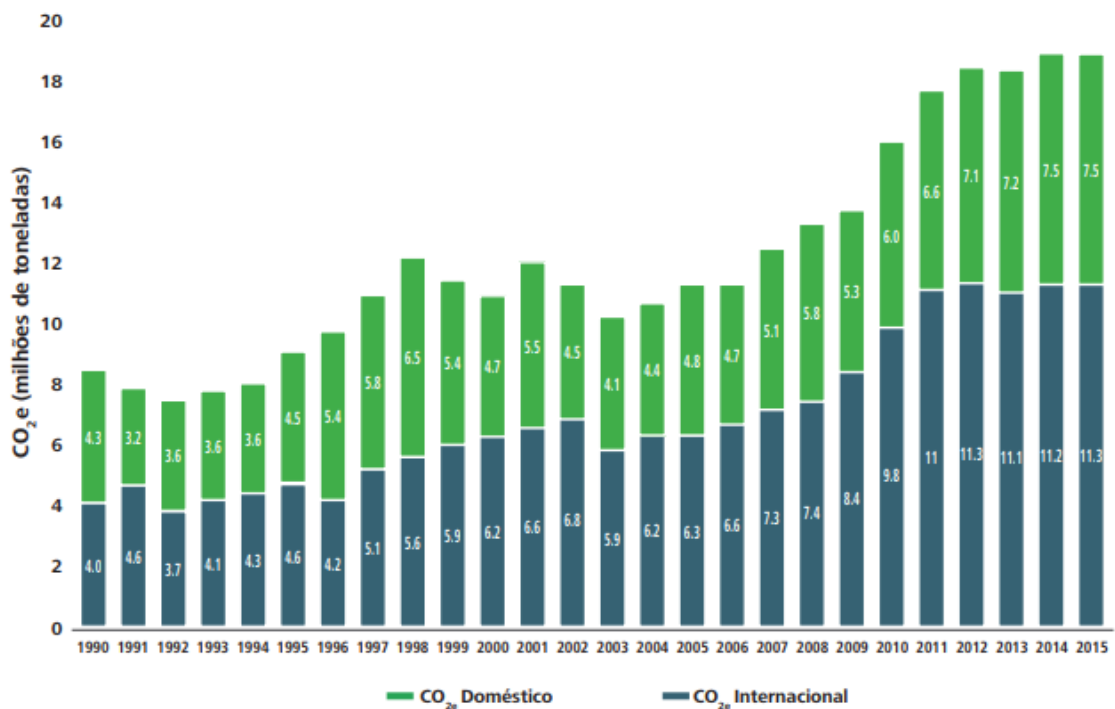
Como um marco importante na história do transporte aéreo, após a Segunda Guerra, a partir de esforços simultâneos na Inglaterra e Alemanha, a turbina a gás foi aperfeiçoada a ponto de ser adotada em aplicações aeronáuticas, utilizando-se um novo combustível, o querosene de aviação, o qual é um acionador primário que apresenta, como vantagens destacadas, uma excelente relação peso/potência e elevado empuxo. Em suas várias versões (motor a jato, turbopropulsor, turbofan), as turbinas a gás são atualmente os motores mais adotados em aeronaves, inclusive, nos modernos helicópteros, restringindo-se o uso da gasolina de aviação aos aviões leves e antigos helicópteros com motores a pistão (CGEE, 2010).

Em 1943, foram apresentadas, na Inglaterra e nos Estados Unidos as primeiras especificações de combustíveis aeronáuticos. Até então, as aeronaves eram acionadas por motores a pistão e voavam em baixas altitudes, não sendo necessário um estudo específico sobre o assunto. Tais especificações sofreram diversas mudanças ao longo dos anos, principalmente, em relação à proteção e segurança. Atualmente, existem os combustíveis JP-5 e JP-8 para uso militar e Jet A e Jet A-1 para uso comercial. A diferença entre o Jet A, que é usado nos Estados Unidos, e o Jet A-1, utilizado no resto do mundo, encontra-se no ponto de congelamento, o qual, para o Jet A, é de -40°C e para o Jet A-1 é de -47°C (AZEVEDO, 2013). Especificações para os combustíveis são detalhadas nas normas do ministério de defesa dos EUA (MINISTRY OF DEFENCE, 2006).

O crescimento do transporte aéreo de carga e o de passageiros tem sido significativo e, mesmo com os ganhos possíveis de eficiência energética, estimados entre 30 a 50%, a demanda de combustíveis aeronáuticos tende a se expandir, com perspectivas de dobrar ou

triplicar até 2050 (IEA, 2010). 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). A Figura 2 apresenta o crescimento de emissões de CO₂ no Brasil.

Figura 2: Emissões de CO₂ no Brasil



Fonte: ANAC (2015).

A utilização dos novos biocombustíveis pode expandir-se rapidamente, atingindo mais de 10% da procura de combustível no transporte rodoviário e 33% no setor da aviação até 2040 (IEA, 2015). Possivelmente os biocombustíveis são a melhor opção para a indústria aeronáutica na diminuição de emissão de CO₂ e a manutenção da eficiência energética das aeronaves.

Além de baixa emissão de CO₂, os biocombustíveis a serem utilizados no setor de aviação necessitam satisfazer os parâmetros de operação das turbinas a gás, sendo necessário um estudo aprofundado em suas propriedades de forma que se ofereça uma combustão segura e confiável. De acordo com Blakey *et al.* (2011), as características desejáveis para um combustível de aviação são:

- Poder calorífico elevado para o máximo de alcance ou de carga útil. Isso pode significar uma energia específica alta ou alta densidade energética.

- Boa atomização.
- Evaporação rápida.
- Características de queima eficientes, incluindo a capacidade de reignição em altitude.
- Baixo risco de inflamabilidade e consequente explosão.
- Capacidade térmica específica elevada.
- Ausência de contaminantes.
- Formação mínima de carbono.
- Baixa viscosidade e alta lubricidade - bom armazenamento e bombeamento, baixo ponto de congelamento para facilitar a operação a elevadas altitudes.
- Boa estabilidade térmica química.
- Ampla disponibilidade e custo aceitável.
- Produtos de combustão ambientalmente aceitáveis.
- Bom armazenamento no solo e manuseio com segurança.

Muitas dessas características são contraditórias, não sendo assim tão fácil a substituição do combustível fóssil pelo renovável (BLAKEY *et al.*, 2011).

2.2 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DE AVIAÇÃO

Os combustíveis fósseis de aviação são classificados em gasolina de aviação, querosene de aviação e diesel. Antes do surgimento da gasolina de aviação, era utilizada a gasolina automotiva para o abastecimento de motores de aviação, produto altamente volátil, com baixo ponto de fulgor e facilmente inflamável nas condições de operação. Faz-se um breve detalhamento desses combustíveis a seguir.

2.1.1 Gasolina de aviação

A gasolina mais usada pela aviação é conhecida como 100LL, ou 100 *low lead*, a qual possui baixo teor de chumbo e 100 e 130 de octanagem. Quanto maior a octanagem, maior a capacidade do combustível de ser comprimido em elevadas temperaturas sem que ocorra a detonação (REALPE, 2016).

Um aditivo especial, chamado etil-fluido, composto de chumbo tetraetila (61,45%), brometo de etileno (17,85%), cloreto de etileno (18,80%) e produtos inertes e corantes (1,9%), garante a capacidade antidetonante da gasolina de aviação. Devido a problemas de

manuseio e por conter chumbo, substância tóxica e cancerígena, a utilização de gasolina de aviação é evitada por grande parte da aviação comercial (GOMES, 2013).

2.1.2 Querosene de aviação

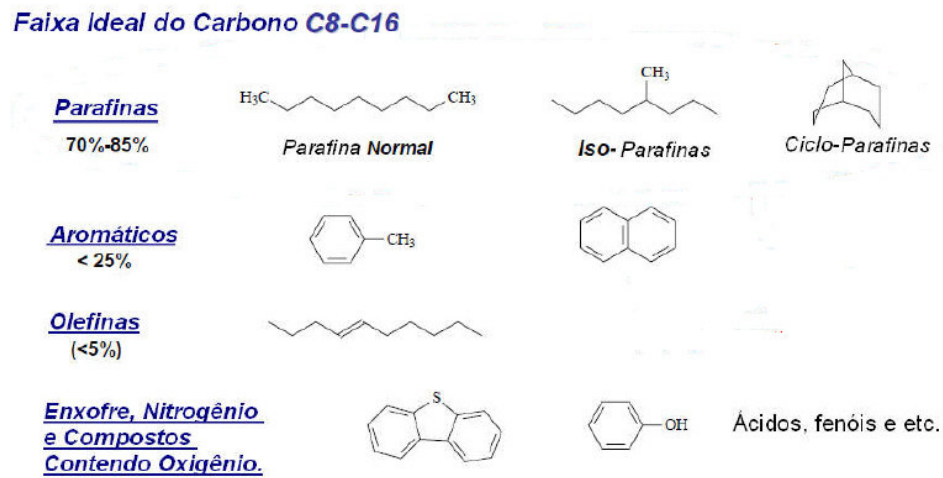
É utilizado como combustível em motores a jato (turbinas), sendo condicionado a permanecer no estado líquido e homogêneo até a zona de combustão das aeronaves. Apresenta resistência química e física às variações de temperatura e pressão e boa lubricidade devido à alta rotação desses tipos de motores. No Brasil, é especificado como QAV-1 pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), sendo compatível com o *Aviation Fuel Quality Requirements for Operated Systems JET A-1* da *ASTM International (American Society for Testing and Materials)* (GOMES, 2013).

Segundo Ramos (2017), o querosene de aviação comercial, também conhecido internacionalmente como JET-A1, assemelha-se ao JP usado pela Força Área dos Estados Unidos. No Brasil, é conhecido como QAV-1, cuja identificação interna é BR0030 (PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. – FISPQ BR0030). É composto de 70 a 72% de hidrocarbonetos parafínicos, 20 % de hidrocarbonetos aromáticos, 5% de hidrocarbonetos oleofínicos e aproximadamente 3% de enxofre, nitrogênio e compostos oxigenados. A composição química do QAV-1 é formada por iso-parafinas como ilustra a Figura 3. Suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.

2.1.3 Diesel

Derivado da destilação do petróleo bruto e constituído basicamente por hidrocarbonetos, o diesel é um combustível composto, principalmente, por átomos de carbono, hidrogênio e baixas concentrações de enxofre, nitrogênio e oxigênio. Devido à sua baixa volatilidade, não só o risco de incêndio é reduzido, mas também a formação de bolhas de vapor nas linhas de combustível (*vapor lock*), fenômeno responsável por boa parte dos incidentes de parada ou perda de potência em voo nos motores, especialmente em grandes altitudes e subidas rápidas (GOMES, 2013).

Figura 3: Composição química do QAV-1



Fonte: Ramos (2017).

Tabela 1: Propriedade Fisico-Químicas do QAV-1

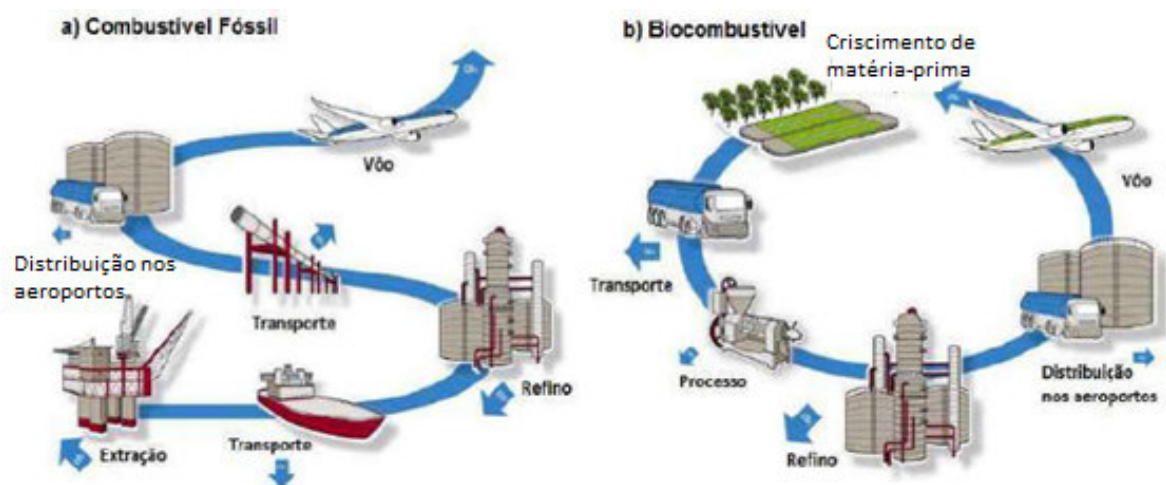
Propriedade	Valor
Aromáticos Max (% vol)	25
Enxofre Max. (%p/p)	0,3
Acidez (mg KOH/g)	0,15
Viscosidade cinemática a 20°C (cSt)	1,81
Viscosidade dinâmica a 20°C (mPa.s)	1,46
Massa específica a 20 °C (kg/m ³)	808
Tensão superficial a 20°C (mN/m)	24,45
Ponto de congelamento (°C)	-47
Poder calorífico inferior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

Fonte: Ramos (2017).

2.3 BIOCOMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO

Os biocombustíveis, produzidos de forma sustentável, reduzem as emissões de CO₂ em seu ciclo de vida em relação aos combustíveis fósseis. O dióxido de carbono, absorvido pelas plantas durante o crescimento da biomassa, é equivalente à quantidade produzida quando o combustível é queimado em um motor de combustão, retornando para a atmosfera (Figura 4). Esse processo permite que o biocombustível receba a condição de carbono neutro durante o seu ciclo de vida (LLAMAS *et al.*, 2012).

Figura 4: Comparação entre o ciclo de carbono de (a) combustível fóssil (b) biocombustível



Fonte: ATAG (2011).

Os biocombustíveis de aviação são produzidos a partir de diversas fontes biológicas e apresentam benefícios, como redução da emissão dos gases efeito estufa, utilização de recursos renováveis, compatibilidade com a infraestrutura já existente e sustentabilidade. Entre eles, destacam-se o biodiesel, o etanol aeronáutico e o bioquerosene de aviação. Atualmente existem diferentes rotas tecnológicas para produção de combustíveis alternativos de aviação os quais serão descritos a seguir.

2.4 BIODIESEL

Biodiesel é um combustível que pode ser usado em qualquer turbina de gás sem modificação. O biodiesel é melhor do que o diesel convencional em termos de teor de enxofre, ponto de fulgor, conteúdo aromático e biodegradabilidade. Houve um interesse renovado na utilização de óleos vegetais para a produção de biodiesel devido à sua natureza menos poluente e renovável, em comparação com o combustível convencional de petróleo

diesel. Devido aos seus benefícios ambientais, a quota de biodiesel no mercado de combustíveis automotivos está crescendo rapidamente (DEMIRBAS, 2006). Atualmente no Brasil, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) antecipou o aumento da porcentagem de biodiesel no diesel fóssil para 10% determinado pela lei nº 13.263/16.

O biodiesel requer muito pouca modificação na turbina a gás em até 20% de mistura com o diesel fóssil. Pode também ser usado em sua forma pura e ser armazenado com o diesel fóssil, não sendo portanto, preciso infraestrutura separada. Na turbina a gás, o biodiesel reduz os hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono e particulados sem reduzir a potência. Em uma mistura de 20% de biodiesel, há uma redução de 12% de emissão de CO₂, 20% de particulados e 20% de hidrocarbonetos não queimados. Em biodiesel puro, as reduções foram de 48% de CO e partículas e de 68% de hidrocarbonetos não queimados para turbinas a gás, mas há um aumento nos NO_x (1-6%) (GUPTA ET AL *et al.*, 2010).

A produção do biodiesel, em geral, vem da extração de óleo vegetal proveniente de biomassa. O óleo vegetal não pode ser usado diretamente em uma turbina a gás por possuir uma alta viscosidade, portanto, é necessário passar por processos de modo que se diminua essa viscosidade. Alguns processos são usados não só para produzir biodiesel, bem como reduzir a viscosidade dos óleos vegetais. Os processos que usam óleo vegetal são pirólise, microemulsificação, diluição em diesel fóssil e transesterificação. Esses são considerados de primeira geração. Os processos de produção do biodiesel que não têm como matéria prima o óleo vegetal são de segunda geração e serão detalhados no item 2.5. As propriedades termoquímicas do biodiesel e do diesel são apresentadas na Tabela 2.

2.4.1 Pirólise

A pirólise é um processo termoquímico que, mediante a adição de calor e um catalisador a um combustível, produz outro combustível líquido ou gasoso. Envolve um processo endotérmico com ausência do ar ou oxigênio e a divisão de componentes químicos para produzir pequenas moléculas. O material a pirolisar pode ser: óleos vegetais, gordura de animais, ácidos graxos naturais e ésteres metílicos de ácidos graxos. A decomposição térmica de triglicerídeos produz alcanos, alquenos, aromáticos e ácidos carboxílicos. A pirólise de gorduras tem sido estudada por mais de 100 anos, especialmente nas regiões com carências de reservas petrolíferas (CORONADO, 2010).

2.4.2 Microemulsões

As microemulsões com solventes, como o metanol, etanol e 1-butanol, foram investigadas para resolver o problema da elevada viscosidade nos óleos vegetais. Uma microemulsão é definida como uma dispersão coloidal em equilíbrio de uma microestrutura de um fluido óticamente isotrópico, cujos tamanhos variam entre 1 – 150 nm, formados espontaneamente a partir de dois líquidos imiscíveis. As microemulsões melhoram as características do *spray* por vaporização dos constituintes com baixo ponto de ebulição. O desempenho, em curto prazo, das microemulsões do etanol aquoso em óleos de soja foi quase tão bom como aquele reportado para o diesel convencional, apesar do baixo número de cetano e poder calorífico (SRIVASTAVA, 2000).

Tabela 2: Comparação entre biodiesel e diesel segundo a norma americana

Propriedades	Diesel	Biodiesel
Norma	ASTM D975	ASTM D6751
PCI (BTU/Gal) [kJ/m ³]	129050 [35,968]	118170 [32,935]
Viscosidade Cinemática a 40 °C [cS]	1,3 a 4,1	4 a 6
Densidade (lb/gal) [kg/l] a 15 °C	7,079 [0,847]	7,328 [0,878]
Sedimentos de Água (% vol)	0,05 max	0,05 max
Carvão, wt %	87	77
Hidrogênio, wt %	13	12
Oxigênio, por dif. wt %	0	11
Enxofre, wt%	0,0015 max	0 a 0,0024
Ponto de ebulição (°C)	180 a 340	315 a 350
Ponto de fulgor (°C)	60 a 80	100 a 170
Ponto de Cristalização (°C)	-35 a 5	-3 a 15
Ponto de Fluidez (°C)	-35 a -15	-5 a 10
Número de Cetano	40 a 55	48 a 65

Fonte: Coronado (2010).

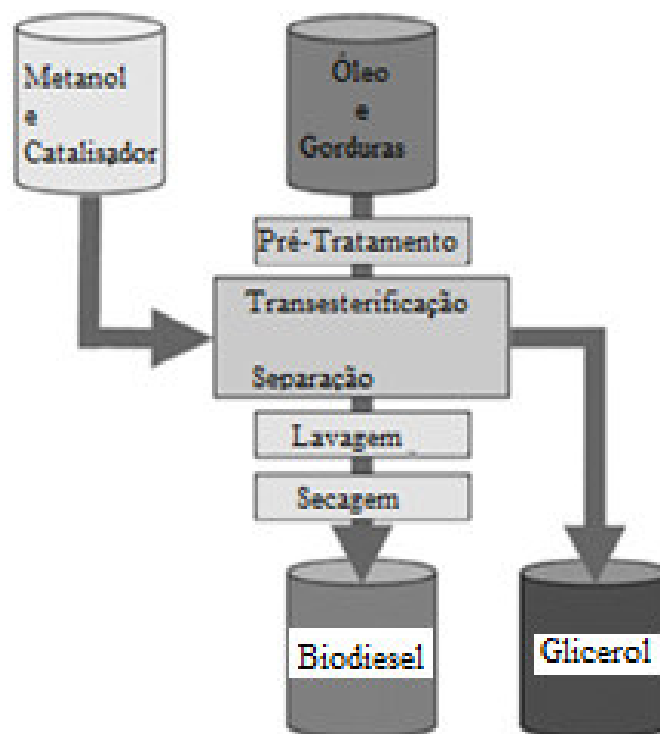
2.4.3 Transesterificação

A transesterificação é um dos principais processos de produção de biodiesel, cujo esquema é apresentado na Figura 5. Segundo Neves (2008), a reação química, usualmente

denominada de transesterificação, é a etapa de conversão do óleo ou gordura nos ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos que constituem o biodiesel.

O processo de transesterificação é influenciado por diferentes fatores, dependendo da condição de operação. Esses fatores incluem: quantidade de ácidos graxos livres no óleo vegetal, tipo de álcool e razão molar, tipo e concentração de catalisador, temperatura e tempo da reação, tempo de agitação, purificação do produto final. Os álcoois usados no processo normalmente são etanol e metanol por serem mais comerciais e tradicionais, mas nada impede o uso de outros álcoois (MOFIJUR, 2013).

Figura 5: Processo de produção de biodiesel - transesterificação



Fonte: Mahmudul et al. (2017).

O processo pode ser categorizado em função do catalisador usado. Assim, têm-se a catálise ácida e a catálise alcalina. Para se quebrar os triglicerídeos, é necessário a presença de catalisadores. Eles podem ser ácidos ou básicos, sendo hidróxido de sódio e de potássio os mais usados por razões econômicas, disponibilidade no mercado e reação mais rápida em relação aos catalisadores ácidos. A quantidade de catalisador depende do conteúdo de ácidos graxos do óleo vegetal. O processo global de transesterificação de óleos vegetais e gorduras é

uma sequência de três reações reversíveis e consecutivas, em que os monoglicerídeos e os diglicerídeos são os intermediários.

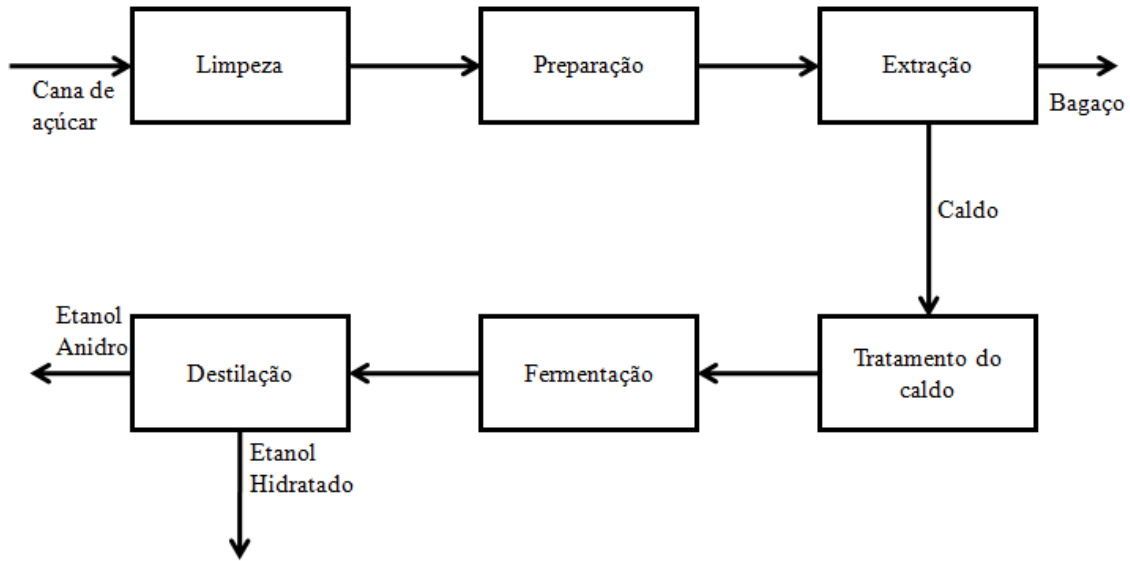
2.5 ETANOL

O etanol é o biocombustível líquido mais utilizado atualmente. Ele é normalmente obtido por meio da fermentação alcoólica da sacarose da cana-de-açúcar ou do milho (60-70% de amido). Madeira e palha também podem ser convertidas para bioetanol pelo processo de hidrólise (Etanol de 2ª geração). Amidos e biomassa celulósica, geralmente, requerem um tratamento prévio e caro (AZEVEDO, 2013).

O processo de produção de etanol é bem conhecido no Brasil. Usa-se como matéria-prima, a cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar, quando chega à indústria, passa por um processo de limpeza para retirar impurezas mais grosseiras, sendo cortada em picadores e seguindo para as moendas. As moendas fazem parte da extração do caldo, tendo como produto secundário o bagaço, o qual é enviado para a planta de cogeração. O caldo extraído das moendas passa por peneiras para retirar resíduos finos, é clarificado e tratado de forma que fique com o grau de açúcar requerido para a etapa de fermentação. O caldo é, então, fermentado e depois vai para a etapa de destilação em que há separação entre o álcool anidro e o hidratado. A Figura 6 apresenta um esquema da produção do etanol.

Segundo Gupta *et al.* (2010), a característica de queima limpa do etanol estende a vida útil da turbina em até 100%. Pier (1999) afirma que suas desvantagens incluem os problemas de manipulação os quais ocorrem devido à sua evaporação rápida, sua miscibilidade na água e ao seu baixo ponto de ignição. Suas propriedades são apresentadas na Tabela 3.

Figura 6: Esquema da produção do etanol



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3: Propriedades físico-químicas do etanol hidratado

Propriedades	Etanol Hidratado
Massa específica (a 20°C) (kg/m ³)	807 – 811
Temperatura de ebulição a 1atm (°C)	78,4
Calor latente de vaporização a temperatura de ebulição (kJ/kg)	854,99
Viscosidade cinemática do liquido a 300 K (m ² /s)	1,78x10 ⁻⁶
Tensão superficial do liquido a 300 K (N/m)	0,0223

Fonte: Paz (2007).

2.6 BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO (BIO-QAV)

O bioquerosene de aviação é definido pela ANP na lei nº 12.490/2011 como substância derivada de biomassa renovável que pode ser usada em turbo reatores e turbopropulsores aeronáuticos ou, conforme regulamento, em outro tipo de aplicação que possa substituir, parcial ou totalmente, o combustível de origem fóssil.

No Brasil, existe um projeto de lei Nº 3213/2009 que dispõe “sobre a criação do Programa Nacional do Bioquerosene como incentivo à sustentabilidade ambiental da aviação

brasileira, e das outras providências”, estabelecendo incentivos à pesquisa e ao desenvolvimento em combustíveis renováveis a partir da biomassa.

Em 2012, na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, a Rio +20, a União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (UBRABIO) lançaram a Plataforma Brasileira de Bioquerosene (PBB). O intuito desse lançamento foi firmar as importâncias socioeconômica e ambiental do uso de biocombustíveis no transporte aéreo, contando com o apoio de diversas empresas do setor aéreo. A PBB é uma cadeia de valor integrada do Bio-QAV, a qual integra desde a agricultura até a “asa do avião”.

Em 2013, BOEING, EMBRAER, FAPESP e UNICAMP, juntamente com as empresas patrocinadoras, realizaram uma avaliação sobre o futuro dos biocombustíveis de aviação no Brasil de modo a incluir tópicos como agricultura, tecnologia de conversão, logística, sustentabilidade, comercialização e políticas. Originou-se, assim, o relatório intitulado como “Plano de Voo para Biocombustíveis de Aviação no Brasil: Plano de Ação”.

O bioquerosene de aviação, também conhecido como querosene parafínico sintético (*SPK*), é constituído por hidrocarbonetos renováveis cujas propriedades são quase idênticas ou, em alguns casos, superiores às do QAV-1. A combustão de *SPKs* produz emissões de CO₂ mais baixas do que o combustível a jato de combustível fóssil. Há também a vantagem de conter muito pouco enxofre, sendo, portanto, o bioquerosene de aviação identificado pela IATA como a alternativa mais viável para a substituição de combustíveis fósseis na aviação (GUTIÉRREZ-ANTONIO *et al.*, 2017).

É necessário que o bioquerosene de aviação seja “*drop-in*”, o que quer dizer que são compatíveis com as tecnologias atuais, sem a necessidade de alterações nos motores, aeronaves e infraestrutura de distribuição já existente, podendo, inclusive, ser misturados, em proporções adequadas com o QAV-1 de origem fóssil. Uma de suas vantagens, por conseguinte, é que não compromete a segurança no sistema de aviação (LLAMAS *et al.*, 2012).

As propriedades do bioquerosene de aviação, no Brasil, são definidas pela Resolução ANP n° 63 de 05/12/2014, na qual se define que os querosenes de aviação alternativos são o querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (*SPK-FT*), querosene parafínico sintético por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (*SPK-HEFA*) e iso-parafinas sintetizadas (*SIP*). *SPK-FT* e *SPK-HEFA* podem ser misturados em até 50% no QAV-1 e os *SIP* podem ser misturados em até 10% no QAV-1. É proibida, contudo, a mistura de mais de um tipo de bioquerosene. O regulamento técnico da ANP n° 05/2014 estabelece as propriedades do querosenes alternativos apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades dos *SPK* e *SIP*

Propriedades	<i>SPK</i>	<i>SIP</i>
Aromáticos Max (% m/m)	0,5	0,5
Farnesano (%m/m)	-	97
Enxofre Max. (mg/kg)	15	2
Acidez (mg KOH/g)	0,0 15	0,015
Massa específica a 15 °C (kg/m ³)	730 a 770	765 a 780
Ponto de congelamento (°C)	-40,0	-60,0
Ponto de fulgor (°C)	38	100
Ponto Final de Ebulição (°C)	300	255
Existência de gomas máx. (MG/100mL)	7	7
Entalpia de combustão (MJ/kg)	-	43,5

Fonte: ANP Resolução nº 20 (adaptado).

2.6.1 Matéria-prima

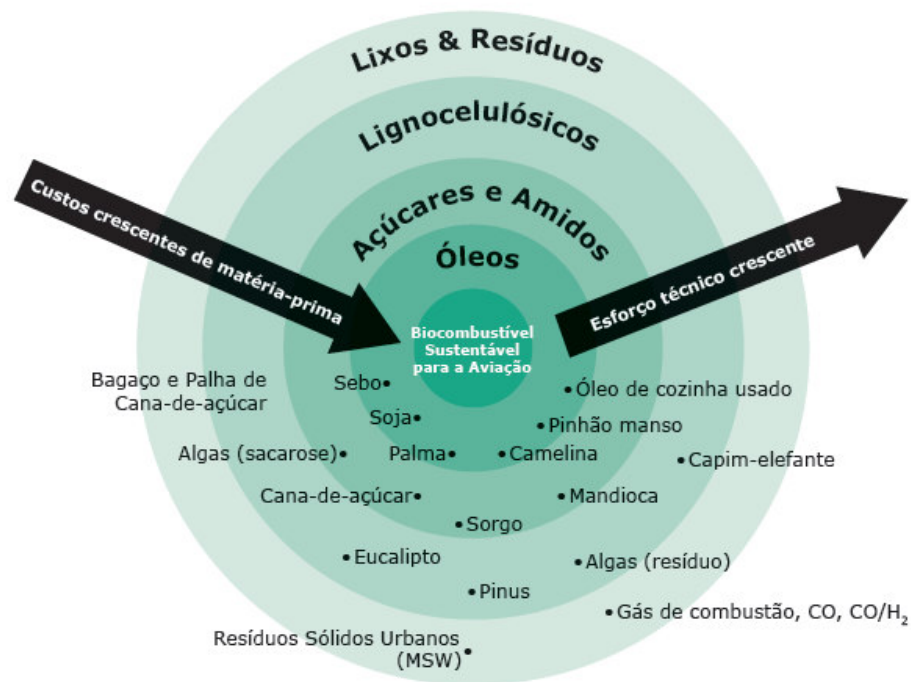
Para que a matéria-prima esteja apta para a produção de bioquerosene, ela deve possuir características tais como não ameaçar a biodiversidade, não interferir nos ecossistemas naturais e ser produzida de forma que o solo e a água não sejam sobrecarregados, não necessitar de grandes quantidades de insumos agrícolas, proporcionar redução de emissão e conteúdo energético maior ou igual comparados ao combustível tradicional, não concorrer com o setor de alimentos, agregar valor socioeconômico às comunidades locais, ser cultivada em terras não utilizadas para a produção de alimentos e terras marginais (ICAO, 2011; SWAFEA, 2011).

As principais fontes de matéria-prima são óleos vegetais e matérias açucaradas que passam por processos de produção para obtenção dos combustíveis alternativos de aviação. Algumas matérias-primas têm sido propostas adequando-se às características citadas anteriormente, como pinhão manso, camelina e algas, sendo que estas possuem composição significativa em termos de óleos graxos (CGEE, 2010).

Em resumo, pode-se relacionar a matéria-prima com o quanto próximo ela está e pode ser convertida em biocombustível de aviação. A Figura 7 ilustra, de maneira simplificada, que quanto mais perto do centro, mais cara é a matéria-prima, porém, a tecnologia de conversão é

menos cara ou mais simples de ser realizada. A seguir, descrevem-se algumas matérias-primas.

Figura 7: Matéria prima e posição quanto ao custo e esforço de conversão



Fonte: Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: Plano de ação (2013).

2.6.1.1 Pinhão manso

Pinhão manso ou *jatropha* é uma cultura energética não comestível, considerada pouco exigente e pode ser cultivada em climas desfavoráveis e solos improdutivos. Suas sementes possuem teor óleo entre 30 a 40% (CGEE, 2010). Após a extração do óleo, a torta produzida pode ser usada como adubo, pois é rica em N, K e P. Seu cultivo ocorre na África do Sul, Américas do Sul e Central e Sudeste da Ásia (VAN DER HAGEN, 2012).

2.6.1.2 Camelina

Camelina é considerada rústica, resistente à seca e tolerante a solos fracos, produzindo sementes com alto teor de óleo. O óleo é composto por ácidos graxos insaturados e todos com 18 átomos de carbono.

Os rejeitos, após a extração do óleo, podem ser usados como ração animal e seu custo é pequeno seus mercados atuais são Noroeste do EUA e o sul do Canadá. Já que ela pode ser

usada como cultura de rotação, torna-se um benefício para os agricultores que podem obter lucro adicional com seu cultivo (REALPE, 2016).

2.6.1.3 Algas

As algas possuem alto teor de lipídeos, alta taxa de absorção de dióxido de carbono, baixo uso do solo e alta taxa de crescimento, mas, o principal benefício com o uso das algas reside no fato de não afetar a produção agrícola, não havendo concorrência entre culturas de alimentos.

A biomassa produzida após a extração do óleo de algas pode ser usada como ração animal, para a preparação de bioplástico e para a nutrição, enquanto a biomassa seca pode ser processada para a produção de energia. As microalgas têm sido amplamente investigadas para a finalidade de combustível, já que são de fácil cultivo e podem ser colhidas o ano todo. Em comparação com outras culturas energéticas, as algas podem produzir 30 vezes mais rendimento por acre e ser processadas para obter variedade de combustíveis renováveis (SINGH, 2011).

2.6.2 Rotas de obtenção de Bio-QAV

Em geral, os processos de produção de bioquerosene de aviação transformam a biomassa por meio de diferentes rotas de processamento e, recentemente, estão sendo desenvolvidos diversos estudos sobre as rotas de produção de bioquerosene de aviação.

Podem-se dividir as rotas de obtenção em três grandes áreas: processos termoquímicos, bioquímicos e hidrocessamento. O primeiro consiste na transformação da biomassa por pirólise, gaseificação e melhoramento. O segundo envolve processamento da biomassa obtendo açúcares que podem ser convertidos em combustíveis por meio da fermentação, existindo estudos em curso para desenvolvimento de novos organismos para otimização desse processo. O último envolve o tratamento de gorduras e óleos na presença de hidrogênio com objetivo de remover o oxigênio da matéria prima.

As rotas de produção de combustível têm muita importância na determinação das suas características, pois o método adotado para produzir o combustível influencia na composição do produto, no custo de combustível, nas propriedades do combustível, na disponibilidade e no impacto ambiental (GROWING, 2010).

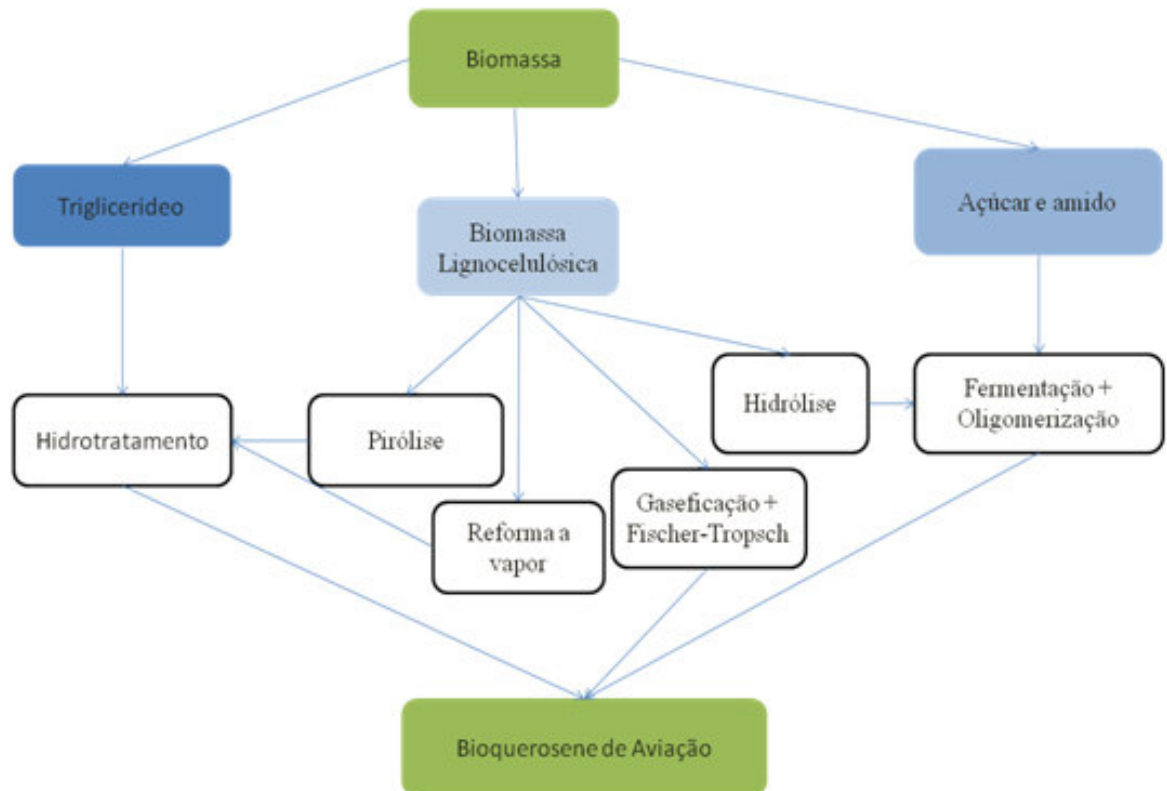
Neuling e Kaltschmitt (2014) definem as rotas existentes de conversão para produção de bioquerosene de aviação, citando entre elas: hidroprocessamento de ésteres a ácidos graxos (*HEFA*), álcool para bioquerosene (*ATJ*), biomassa para líquido (*BTL*), açúcar para hidrocarbonetos (*DSHC*). A Figura 8 ilustra um esquema das rotas de produção de bioquerosene de aviação.

2.6.2.1 Hidroprocessamento de éster a ácidos graxos (*HEFA*)

Este processo utiliza, como matéria-prima o óleo vegetal. Maity (2015) define o hidroprocessamento como sendo a conversão química de matéria-prima de triglicérides por hidredesoxigenação, hidroisomerização e hidrocraqueamento para produzir bioquerosene de aviação. O esquema de produção por *HEFA* é ilustrado na Figura 9.

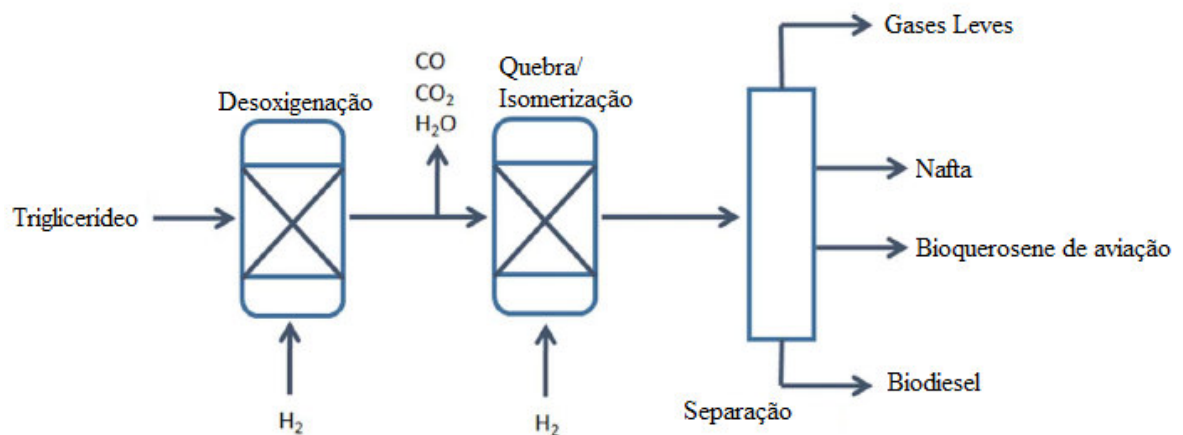
Na secção reativa, a matéria-prima dos triglicerídeos é primeiro convertida em hidrocarbonetos lineares de cadeia longa, com hidrogênio e um catalisador sólido à alta pressão e temperatura. Para isso, são realizadas reações de desoxigenação e descarbonilação, gerando água, monóxido de carbono e dióxido de carbono como subprodutos. Os hidrocarbonetos lineares de cadeia longa gerados no primeiro reator entram num segundo, onde ocorre a fissuração e a isomerização. Desta forma, as cadeias de hidrocarbonetos estão na gama de C8 e C16, correspondendo à bioquerosene de aviação. Além disso, gases leves, nafta e diesel verde são produzidos. Deve-se esclarecer que a separação dos hidrocarbonetos renováveis é realizada, geralmente, por meio de destilação (GUTIÉRREZ-ANTONIO *et al.*, 2017).

Figura 8: Rotas de produção de bioquerosene de aviação



Fonte: Gutiérrez-Antonio et al. (2017).

Figura 9: Esquema de produção *HEFA*



Fonte: Gutiérrez-Antonio et al. (2017).

Os bioquerosenes feitos por *HEFA* são adequados para motores de aeronaves convencionais sem modificação do motor e não possuem problemas de especificação. Esses combustíveis evitam a possibilidade de corrosão da turbina, e a combustão do combustível é

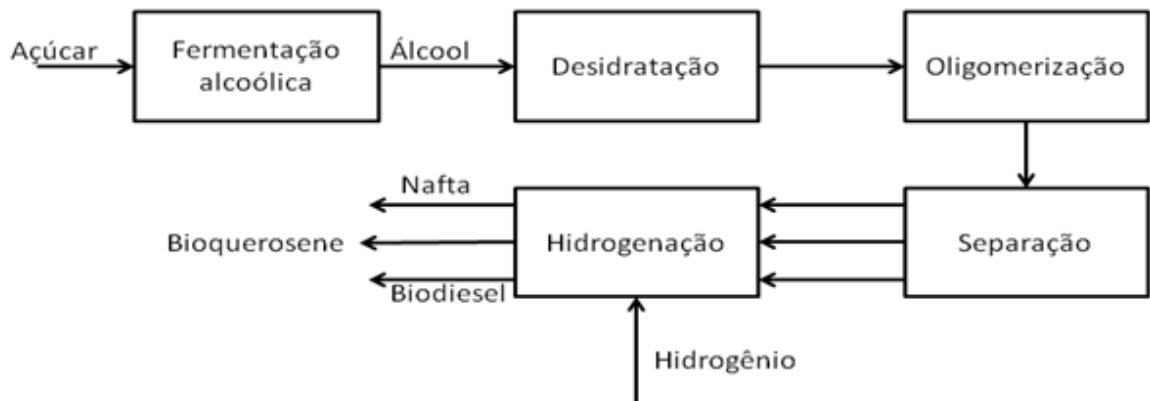
completamente livre de cinzas. Por causa das melhores propriedades de fluxo frio, eles são altamente aptos para voos de altitude mais elevada (HARI *et al.*, 2015).

2.6.2.2 Álcool para Bioquerosene (ATJ)

Esse processo faz a transformação de álcoois em outros combustíveis por meio da mudança de sua estrutura por processo biológico ou químico. Independente da matéria-prima, esse processo segue quatro etapas: desidratação, oligomerização, separação e hidrogenação. Após a fermentação alcoólica "clássica", os álcoois são transformados em alquenos por separação de água por desidratação. Normalmente, isto é realizado por meio de reações catalíticas ácidas com ácido sulfúrico ou fosfórico a temperaturas de cerca de 170 a 200 ° C e/ou pelo uso de catalisadores de óxido metálico. Após a desidratação, os alcenos de cadeia curta (eteno ou buteno) são fundidos a moléculas mais longas via oligomerização catalítica controlada (NEULING; KALTSCHMITT, 2014).

Após a separação do produto por destilação, é realizado um passo de hidrogenação final. Aqui, as ligações duplas insaturadas são saturadas com hidrogênio para gerar alcanos, que depois, podem ser utilizados como biocombustíveis. Essa reação catalítica, que utiliza catalisadores Ni, Pt ou Pd, pode ser realizada à pressão e temperatura ambiente. Um desempenho melhor foi observado usando-se pressões e / ou temperaturas mais altas (NEULING; KALTSCHMITT, 2014). A Figura 10 ilustra o esquema de produção ATJ.

Figura 10: Esquema de produção por ATJ



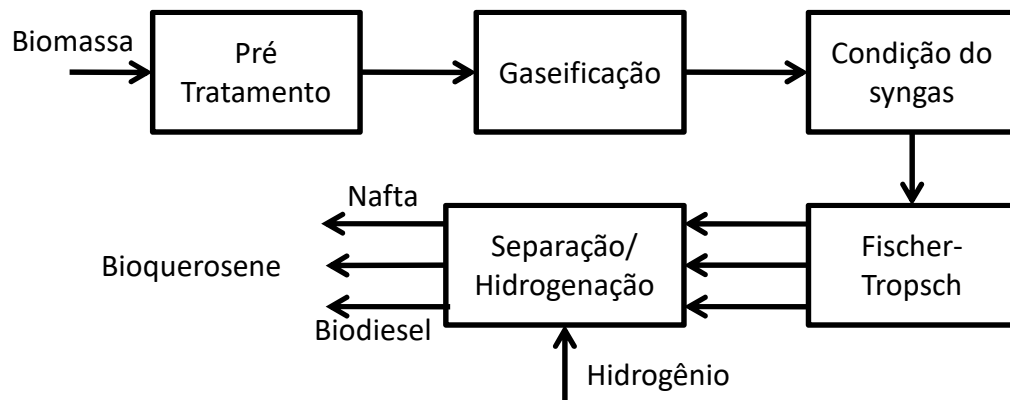
Fonte: Neuling; Kaltschmitt (2014).

2.6.2.3 Biomassa para líquido (BTL)

Esse processo de produção é feito a partir da gaseificação de biomassa seguido da sintetização de combustível líquido por Fischer-Tropsch (FT), hidrotratamento e destilação para separação dos combustíveis. Gutiérrez-Antonio *et al.* (2017) afirmam que a gaseificação seguida pelo processo de síntese Fischer-Tropsch é uma das melhores opções para a produção de bioquerosene de aviação e outros componentes. O diagrama de fluxo do *BTL* é apresentado na Figura 11.

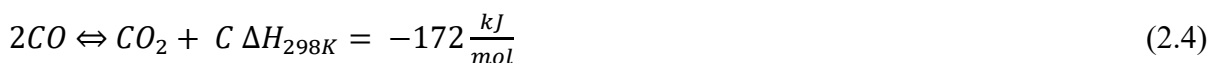
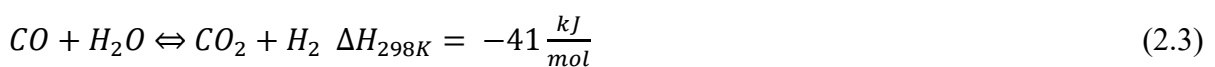
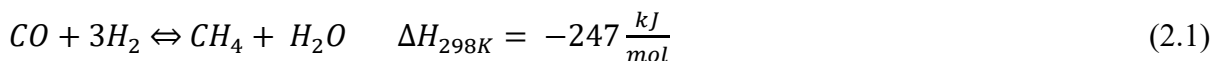
Deshmukh *et al.* (2013) definem gaseificação como sendo a combustão incompleta ou oxidação parcial da biomassa que resulta na produção de gases combustíveis compostos, principalmente, por monóxido de carbono e hidrogênio. O objetivo do processo de gaseificação é não somente maximizar a conversão de carbono do combustível sólido bem como o valor de aquecimento do gás de produto.

Figura 11: Diagrama de fluxo do *BTL*



Fonte: Neuling; Kaltschmitt (2014).

Segundo Neves (2008), o processo de síntese Fischer-Tropsch pode ser descrito pelas equações (2.1),(2.2),(2.3) e (2.4), sendo que a reação (2.2) é a desejável do processo, pois ela fornece os hidrocarbonetos de cadeia longa, sendo, portanto necessária a escolha de um catalisador favorável; entre eles, estão Co e Fe (NEVES, 2008).



Snehesh *et al.* (2017) afirmam que as reações FT requerem gás de síntese com relação $H_2/CO > 2,1$. A gaseificação de oxigênio-vapor da biomassa gera o gás de síntese que é ideal para reações de FT. Para uma razão H_2/CO mais baixa, é necessário um reator de reforma adicional para aumentar o teor de H_2 e satisfazer a estequiometria FT.

Uma das desvantagens dos combustíveis FT é o preço de produção comparado aos combustíveis convencionais. Na literatura, existem diversos estudos sobre produção de combustíveis FT a partir de biomassa. Swanson *et al.* (2010) analisam o custo de produção com base nos gaseificadores de baixa ou de alta temperatura, enquanto que Rafati *et al.* (2017) analisam o efeito dos catalisadores nos custos de produção de combustível FT. Já Imorb *et al.* (2016) estudam a recirculação dos gases não transformados no reator de Fischer-Tropsch para o gaseificador, e Snehesh *et al.* (2017) analisam a utilização dos gases não transformados para cogeração.

2.6.2.4 Açúcar para Hidrocarbonetos (*DSHC*)

No processo direto de açúcar para hidrocarbonetos, as paredes das células de biomassa são quebradas e os açúcares de hemicelulose são liberados. Após a hidrólise enzimática, que remove os materiais sólidos, açúcares líquidos são, muitas vezes, concentrados por remoção de 50% da água. Os intermediários de hidrocarbonetos são produzidos processando-se açúcares concentrados por meio do processo de fermentação anaeróbica e usando-se fermentação alimentada ou contínua. Os produtos resultantes são, então, enviados para uma etapa de separação de fases para recuperar os combustíveis hidrocarbonados (WANG; TAL, 2016).

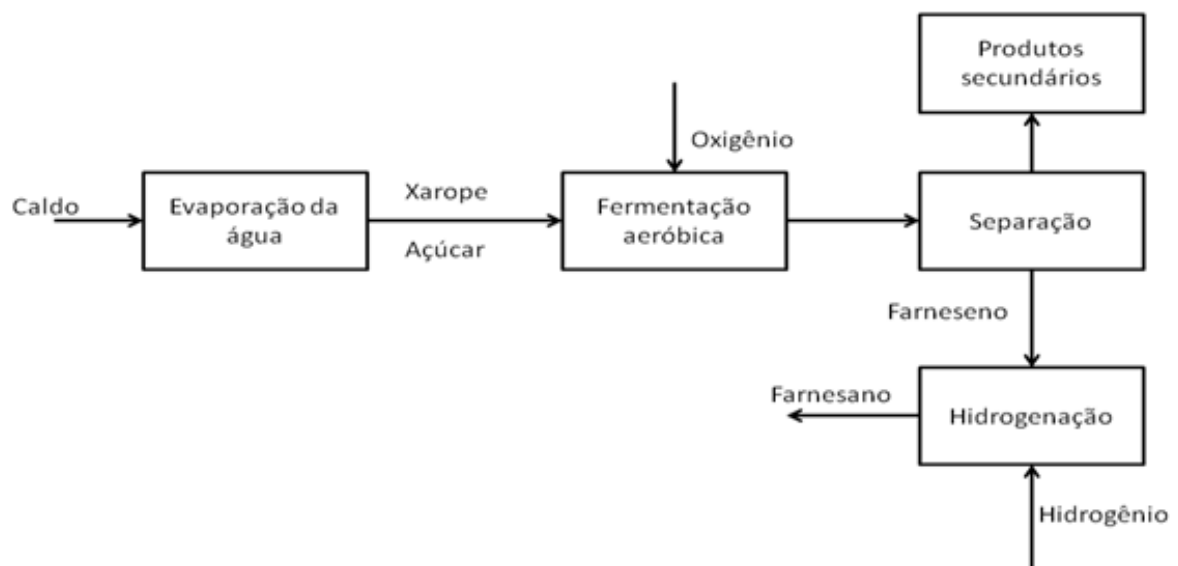
Durante a fermentação aeróbia avançada do processo da Amyris *DSHC*®, microrganismos especiais de levedura geneticamente modificados convertem moléculas de açúcar em alcenos C15, chamados farneseno, e outros produtos secundários. Para a produção de querosene através de tal processo de fermentação, são necessários diferentes tipos de enzimas e fungos. Eles podem ser cultivados em tanques especiais ou adquiridos de produtores de enzimas especializadas. Após a separação do farneseno da suspensão digerida, o hidrocarboneto de cadeia longa é atualizado para farnesano por meio de hidrotreamento. Depois, ele pode ser usado diretamente como um bioquerosene de aviação. Os produtos secundários do processamento de *DSHC* são, na maior parte hidrocarbonetos para a indústria química e o ácido artemisinico para a droga da antimalária (NEULING; KALTSCHMITT, 2014). A Figura 12 ilustra o diagrama do processo *DSHC*.

2.7 FARNESANO

O farnesano produzido por DSHC, pela empresa Amyris, é uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos com fórmula $C_{15}H_{32}$ (Amyris FISPQ, 2016). Sintetizado a partir da hidrogenação do farneseno, produto da fermentação do caldo da cana de açúcar pela levedura geneticamente modificada. A Figura 13 ilustra o mecanismo de formação do farnesano.

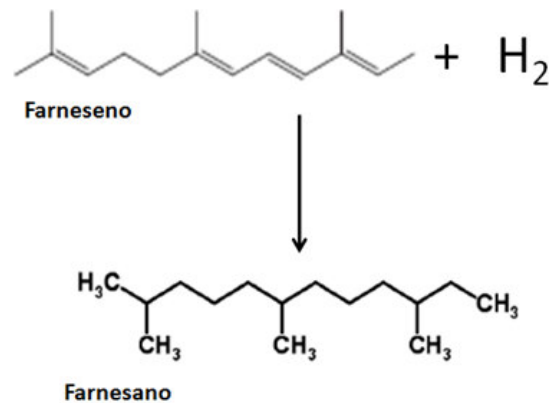
George *et al.* (2015) afirmam que a estrutura do farneseno (trans- β -farneseno) é atraente para aplicações químicas especiais, como solventes, microemulsificadores e vitaminas. A forma totalmente reduzida de farneseno (farnesano) está sendo buscada como um diesel biossintético alternativo e é o mais próximo dos biocombustíveis à base de isoprenóides para a comercialização.

Figura 12: Fluxograma de produção *DSCH*



Fonte: Neuling; Kaltschmitt (2014).

Figura 13: Mecanismo de formação do farnesano



Fonte: Produção do próprio autor

Chuck e Donnelly (2014) testaram nove biocombustíveis potenciais provenientes de fontes sustentáveis quanto a compatibilidade com JET-A1. Entre eles, foi testado o farneseno. Eles concluíram que, apesar do farneseno ter uma excelente densidade energética, ele se mostra muito viscoso para ser utilizado como combustível de aviação e presumiram também, instabilidade como oxidante.

O farnesano é um biocombustível muito versátil, podendo ser usado não só em motores convencionais da combustão interna, bem como no setor de aviação, quando misturado com JET-A1. Carvalho (2014) definiu o farnesano como o diesel da cana e estudou sua aplicação em motores a diesel em misturas com o diesel fóssil. O farnesano apresentou potência satisfatória e redução significativa de gases poluentes NO_x e SO_2 .

O farnesano é livre de impurezas, tal como o enxofre, e seu processo de combustão diminui significativamente os particulados nos gases de exaustão. Segundo Santos (2013), entre os poluentes emitidos pela combustão, os particulados são os mais prejudiciais ao meio ambiente. Particulados menores que 100 nm são conhecidos como fuligem e diminuem a eficiência do processo de combustão. O farnesano, quando adicionado ao QAV-1, inibe a formação dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos para cada mistura, considerados os principais precursores da formação da fuligem.

Millo *et al.* (2014) estudaram os efeitos causados pelo uso de uma mistura de 30% de farnesano com diesel em um pequeno motor diesel e concluíram que as emissões específicas de CO e HC foram reduzidas significativamente com a mistura em cargas baixas e médias.

Por outro lado, Conconi (2013) pesquisou a energia de ativação do processo de combustão do farnesano, diesel e biodiesel. Considerando que quanto menor a energia de ativação menor é o atraso de ignição, quando comparado ao biodiesel o farnesano apresenta

menor energia de ativação, sendo assim melhores características de combustão. Entretanto quando há presença do Diesel a energia de ignição diminui ainda mais na fase inicial do processo térmico, conseqüentemente melhorando o desempenho da ignição da mistura. Quando a mistura é feita com biodiesel novas características são apresentadas, sendo que em cada proporção há um comportamento diferente.

Soriano *et al.* (2017) verificaram a formação de fuligem em um motor diesel convencional alimentado por diesel de baixo enxofre, combustível gás para líquido (GTL), biodiesel e farnesano. Concluíram que, sob as condições específicas do trabalho realizado por eles, o farnesano é o combustível parafínico mais promissor para o motor Diesel dos dias atuais.

Braun-Unkhoff, M. *et al.* (2017), em sua pesquisa sobre a emissão de combustíveis alternativos para aviação, afirmaram que, quanto maior a quantidade de farnesano misturado no combustível para aviação, menor são as emissões. Já Oßwald P. *et al.* (2017) investigaram a cinética de combustão de compostos terpênicos de combustível de aviação; entre eles, o farnesano. A investigação foi realizada experimentalmente por um reator de fluxo acoplado à alta temperatura atmosférica com detecção de espectrometria de massa por feixe molecular (MBMS). Concluíram que o farnesano é aquele que tem menos tendência a produzir precursores de fuligem.

Recentemente, Ritcher S. *et al.* (2018) estudaram as características de combustão do farnesano, comparando-a com o combustível convencional Jet A-1 e medindo o tempo de retardamento da ignição em um tubo de choque de pressão e velocidade de chama laminar. Chegaram à conclusão de que o comportamento de combustão do farnesano é semelhante ao do Jet A-1, diferindo apenas em temperaturas abaixo de 1000K.

Com o aumento do interesse sobre a utilização de combustíveis alternativos de aviação e por possuir diversas rotas de produção, os biocombustíveis fazem parte do futuro da indústria aeronáutica.

O combustível utilizado neste trabalho será o farnesano, e suas propriedades físico-químicas serão apresentadas no Capítulo 5.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: LIMITES DE INFLAMABILIDADE

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre inflamabilidade, sua definição, os fatores que influenciam este parâmetro, métodos teóricos de predição, métodos experimentais de determinação, sua importância na indústria aeronáutica e inflamabilidade nos combustíveis aeronáuticos.

3.1 LIMITES DE INFLAMABILIDADE

Se um dado conjunto de condições permite a propagação de uma chama estável e se as condições são progressivamente mudadas até um estado em que uma chama estável não se propaga mais, este estado então é um limite de estabilidade. Vários comportamentos diferentes poderão ocorrer. Se a chama simplesmente não se propaga, este limite é chamado de limite de inflamabilidade (CARVALHO; MCQUAY, 2007).

Existem dois limites de inflamabilidade, o inferior e o superior, para cada mistura combustível-oxidante. O limite inferior de inflamabilidade (LII) corresponde à quantidade mínima de gás combustível, e o limite superior de inflamabilidade (LSI) corresponde à quantidade máxima de gás combustível capaz de produzir chama na mistura combustível-oxidante. Os limites de inflamabilidade são dados em porcentagem volumétrica na mistura combustível-oxidante.

Os limites de inflamabilidade são as principais propriedades que representam as características de inflamabilidade de combustíveis específicos. Tais limites são as fronteiras que separam as regiões da mistura oxidante-combustível em que ocorre ou não a propagação de chama (CORONADO *et al.*, 2012).

Os limites de inflamabilidade são, muitas vezes, utilizados por profissionais de segurança e no processo de proteção para avaliação, prevenção e minimização dos perigos de incêndio e explosão, além do *design* de mecanismos ou ações de proteção. Também se reconhece que os testes feitos para a determinação dos limites de inflamabilidade são feitos, na maioria das vezes, em circunstâncias ideais (pressão e temperatura padrão) e não podem ser garantias para todas as aplicações possíveis nem impor margens de segurança para se ter em conta outros fatores como processos de flutuação, as misturas não homogêneas e erros de medição (QUINTERO, 2013).

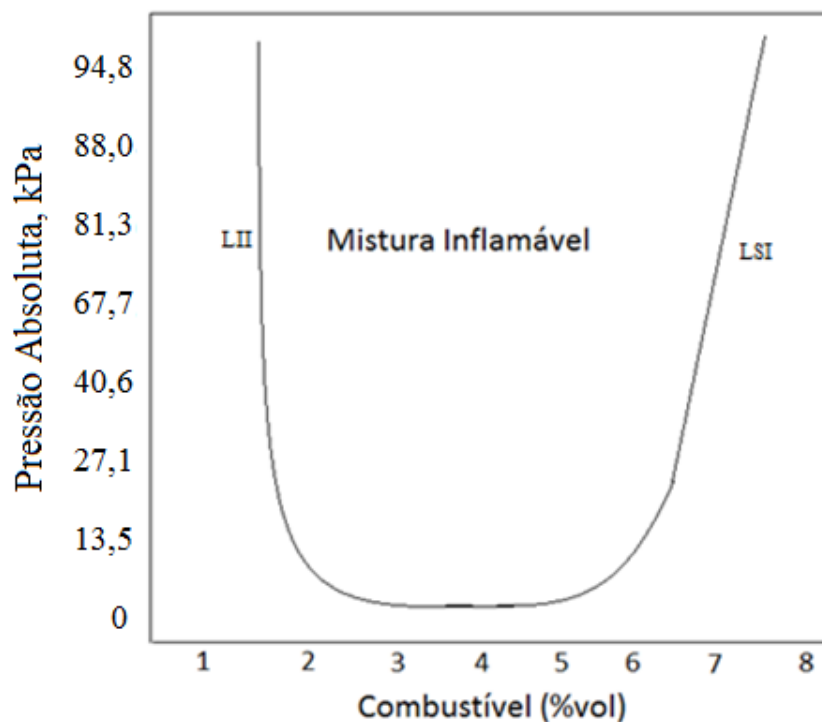
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM OS LIMITES DE INFLAMABILIDADE

Existem fatores que influenciam os limites de inflamabilidade, tais como: pressão, temperatura, diluente, energia de ignição, entre outros. Esses fatores podem aumentar ou diminuir a diferença entre o limite inferior e superior. Não apenas se apresentam tais influenciadores mais detalhadamente a seguir, mas bem se descreve como cada um afeta os limites de inflamabilidade.

3.2.1 Pressão

Variações normais da pressão atmosférica não possuem efeitos significativos nos limites de inflamabilidade. O efeito de grandes variações de pressões não é uniforme e é específico para cada mistura inflamável. Abaixo da pressão atmosférica, conforme a pressão diminui (em temperatura constante), os valores dos dois limites se aproximam e a distância entre eles é reduzida até que certa pressão seja alcançada, sendo que abaixo dela não ocorre mais propagação de chama. Isso se deve ao fato de que a concentração de gás é baixa demais para sustentar a combustão (ARNALDOS *et al.*, 2001). Isso se apresenta na Figura 14.

Figura 14: Efeito da pressão reduzida em 298K



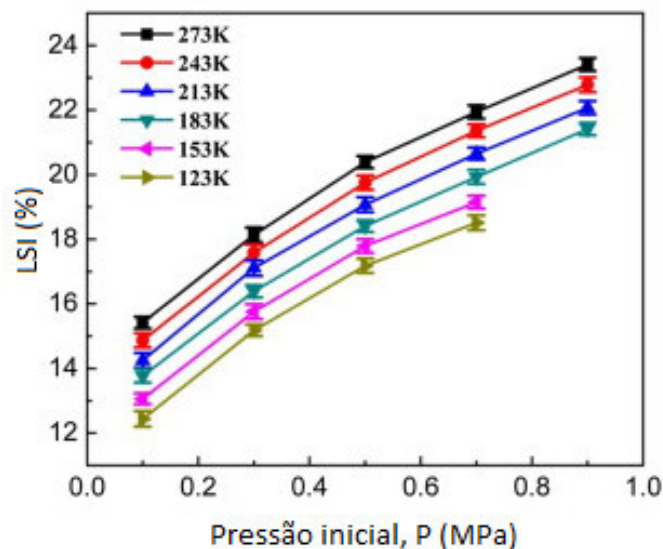
Fonte: Coward; Jones (1952)

Segundo Lovachev *et al.* (1973), para pressões inferiores à pressão atmosférica, os limites de inflamabilidade atingem certa pressão crítica, a qual representa o limite inferior para esse tamanho do recipiente.

Cui *et al.* (2016) realizaram experimentos com o metano e verificaram que, com o aumento da pressão, o LSI aumentou, enquanto o LII diminuiu e o alcance dos limites de inflamabilidades se tornou maior. Quando a pressão inicial sobe de 0,1MPa para 0,9MPa, o limite superior aumenta por volta de 8% em volume de combustível, enquanto que o limite inferior diminuiu de 0,15% em volume. A pressão, portanto, afeta significativamente o limite superior como se verifica na Figura 15.

O efeito da pressão sobre os limites de inflamabilidade é muito menos previsível que o efeito da temperatura. Assim, o aumento da pressão pode causar, em alguns casos, diminuição do LII e, em outros casos, causar um aumento deste (QUINTERO, 2013).

Figura 15: Efeito da pressão inicial no limites superior de inflamabilidade no metano



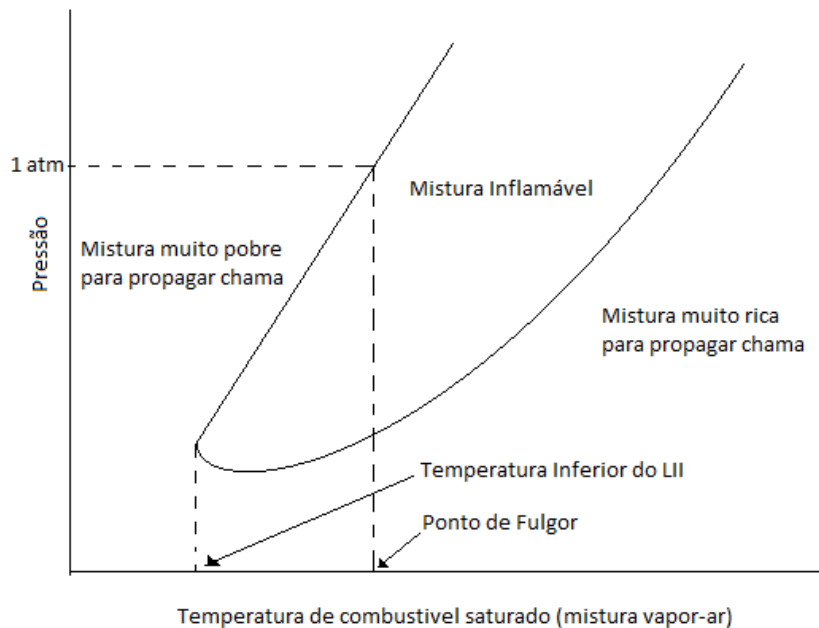
Fonte: Cui et al. (2016).

3.2.2 Temperatura

Se a temperatura da mistura inflamável correspondente ao LSI diminuiu gradualmente enquanto a pressão é constante, uma temperatura é alcançada tal que o limite superior de inflamabilidade coincide com o ponto de orvalho do combustível. Essa temperatura é a temperatura do limite superior de inflamabilidade para uma dada pressão. Por outro lado, se a temperatura diminuiu ainda mais, todas as concentrações estão na curva de equilíbrio vapor-ar

que representa inflamabilidade da mistura até que alcance o ponto que coincide com o limite inferior de inflamabilidade naquela temperatura e pressão. Esta temperatura representa a temperatura inferior do LII e, também, coincide com o ponto de fulgor (JONES *et al.*, 1952), como se apresenta na Figura 16.

Figura 16: Forma geral das temperaturas dos limites de inflamabilidade.

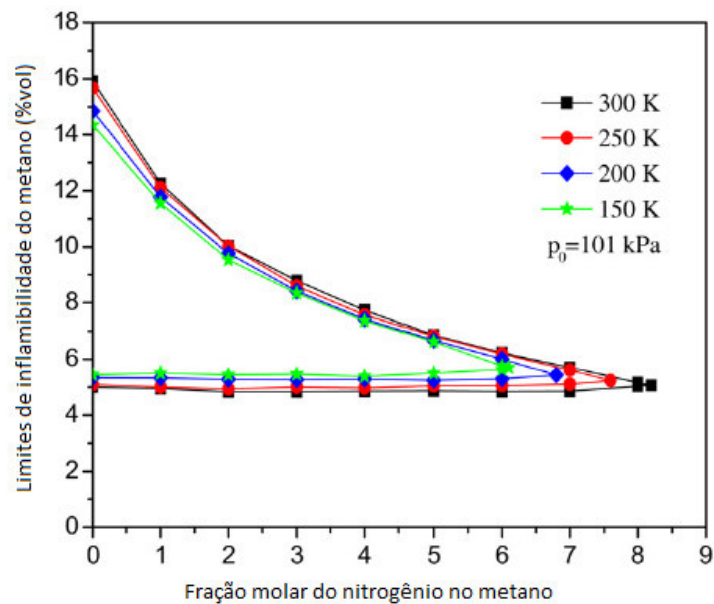


Fonte: Jones et al. (1952).

A temperatura de autoignição (TAI) também pode ser definida como a temperatura necessária para os elementos de um sistema combustível-ar começar um regime explosivo. Essa variável está relacionada com propriedades físicas de transporte envolvido na composição, sendo consideravelmente maior do que o ponto de ebulição e extremamente maior do que o ponto de fulgor. Assim como os limites de inflamabilidade, a temperatura de autoignição de misturas de gás é um dos parâmetros mais importantes para caracterizar riscos de acidentes e segurança de operações com substâncias combustíveis, por isso é referência ao manuseio seguro de equipamentos e processos (QUINTERO, 2013).

LI *et al.* (2011) estudaram o efeito da baixa temperatura nos limites de inflamabilidade e estabeleceram uma montagem experimental que determina os limites de inflamabilidade de mistura metano-nitrogênio em ar em baixas temperaturas e pressão atmosférica, sendo a incerteza de 0,2%. Concluíram que, com a diminuição da temperatura inicial, os limites de inflamabilidade superior diminuem, enquanto os limites inferiores de inflamabilidade aumentam. A Figura 17 apresenta os resultados de LI *et al.* (2011).

Figura 17: Limites de inflamabilidade do metano diluído com nitrogênio em baixas temperaturas e a pressão atmosférica



Fonte: LI et al. (2011).

3.2.3 Energia de ignição

Os riscos de explosão são medidos em probabilidade da existência de uma mistura inflamável e da presença de fonte de ignição adequada. O LII e o LSI são, assim, limites que definem a extensão do domínio de explosividade de uma composição à temperatura ambiente e pressão ambiente dentro da qual a explosão é possível na presença de uma fonte de ignição adequada, mas sendo a explosão impossível independentemente da força da fonte de ignição (Hertzberg *et al.*, 1986). A Tabela 5 e a Figura 18 indicam a mínima energia de ignição para algumas substâncias.

A energia de ignição depende da composição da mistura. O mínimo de energia de ignição foi medido para hidrocarbonetos em ar para diversas substâncias comuns. A maioria dos resultados foram de 0,2 mJ, normalmente para uma mistura rica (CORONADO *et al.*, 2012).

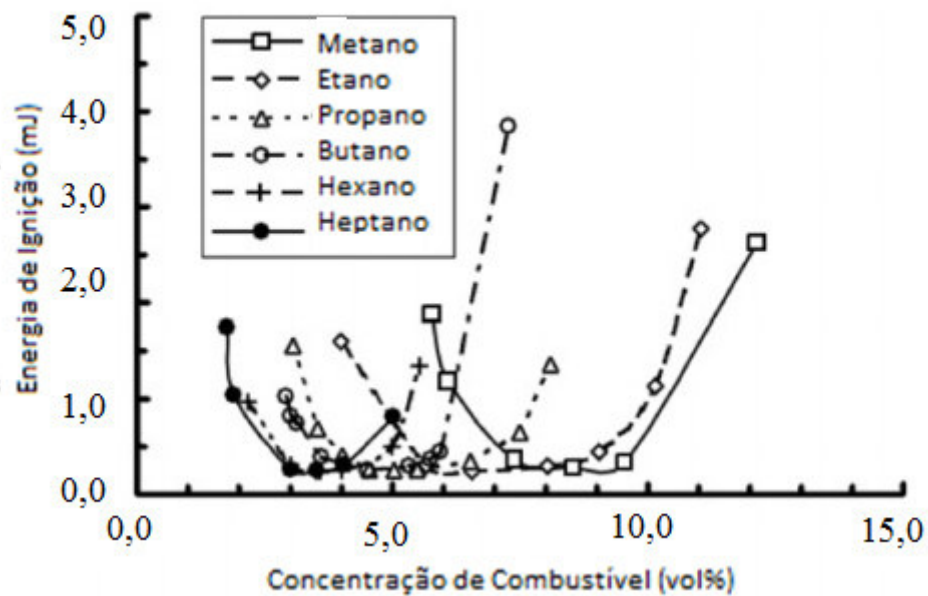
Geralmente as misturas inflamáveis de gás ou vapor precisam de uma energia de ignição para iniciar uma combustão. As composições de uma mistura inflamável que depende da intensidade da fonte de ignição para poder queimar são definidas como limites de ignição, ao contrário dos limites de inflamabilidade que são independentes da intensidade da fonte de ignição (QUINTERO, 2013).

Tabela 5: Energia mínima de ignição para algumas substâncias

Substância	Energia de ignição mínima (mJ)
Dissulfeto de carbono	0,01-0,02
Hidrogênio	0,019
Acetileno	0,02
Metano	0,29
Etano	0,24
Propano	0,25
n-Butano	0,25
n-Hexano	0,25
Etileno	0,12
Benzeno	0,22
Amônia	>100

Fonte: Mannan (2005).

Figura 18: Energia de ignição mínima de alguma substâncias



Fonte: Drysdale (2011).

O intervalo de ignição é sempre maior do que o intervalo de inflamabilidade, sendo que o limite inferior de ignição é inferior ao limite inferior de inflamabilidade e o limite superior de ignição é maior que o limite superior de inflamabilidade (Marmentini, 2011). Para uma certa gama de energia de ignição, os limites de ignição dependem somente do combustível a

ser testado, ao contrário dos limites de inflamabilidade que possuem dependência de outros fatores (JONES *et al.*, 1952).

3.2.4 Turbulência

Poucas observações foram feitas em relação ao efeito de turbulência nos limites de inflamabilidade, mas foi mostrado que os limites inferiores do metano e do etano no ar são reduzidos se ocorrer algum tipo de turbulência, sendo ela por ventilador ou fluxo de movimento da mistura e que o alcance dos limites de inflamabilidade são mais abertos pelo fluxo de movimento (COWARD; JONES, 1952). Esse efeito desaparece em altas velocidades.

3.2.5 Diluentes da mistura combustível-oxidante

Um parâmetro conhecido como concentração de oxidante limite (COL) é normalmente usado junto dos limites de inflamabilidade. COL é a concentração de oxidante na mistura oxidante-combustível-diluyente na qual a deflagração não pode ocorrer em especificadas condições. (CORONADO *et al.*, 2012)

A quantidade de oxigênio (oxidante) é um fator importante na determinação dos limites de inflamabilidade. Em geral, o limite inferior é praticamente o mesmo em ar ou em oxigênio. Antes de 1960, poucos resultados comparativos estavam disponíveis para mostrar que esta diferença é realmente pequena entre o ar e o oxigênio. Nos dias de hoje, é fato que o limite inferior é praticamente o mesmo para misturas com ar ou oxigênio. Em contrapartida, o limite superior é muito maior em oxigênio do que em ar. Isto acontece porque o limite inferior está na zona de excesso do oxidante, mas, trocando-se oxigênio por nitrogênio, não afeta o parâmetro como, por exemplo, a temperatura de chama. A Tabela 6 representa os diferentes limites em ar e oxigênio (CARVALHO; MCQUAY, 2007).

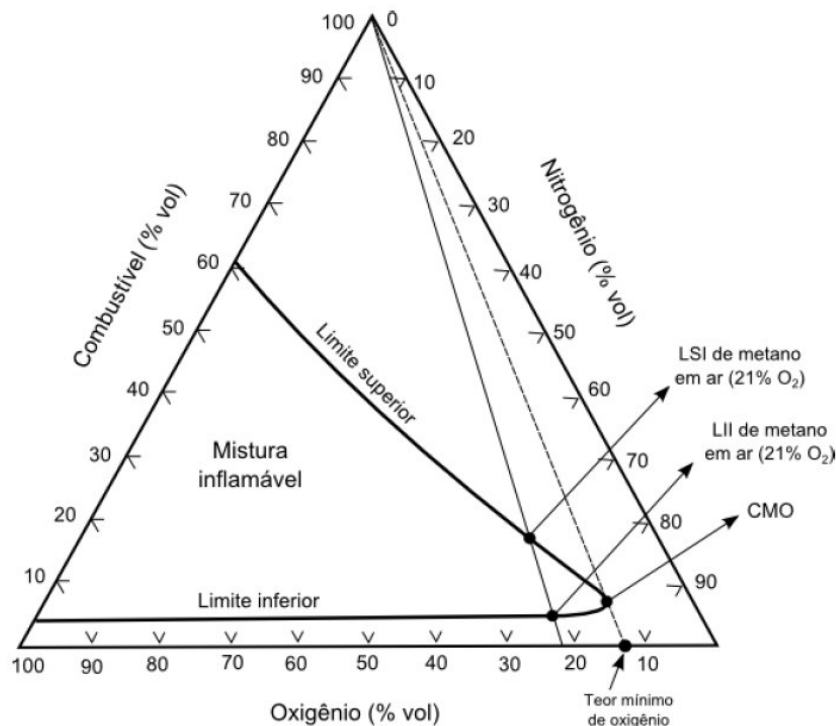
Zabetakis (1965) estudou o efeito da quantidade de oxigênio nos limites de inflamabilidade do metano, ilustrado na Figura 19, em que a quantidade mínima de oxigênio é de 12%, pois, abaixo desse valor, não há propagação e, quanto maior for a concentração de oxigênio, menor é a energia de ignição.

Tabela 6: Limites de inflamabilidade no ar e O₂

Combustível	LI (%)		LS (%)	
	Ar	O ₂	Ar	O ₂
Hidrogênio	4	4	74	94
Monóxido de carbono	12	16	74	94
Amônia	15	15	28	79
Metano	5	5	15	61
Propano	2	2	10	55

Fonte: Carvalho e McQuay (2007).

Figura 19: Diagrama dos limites de inflamabilidade em função do oxigênio

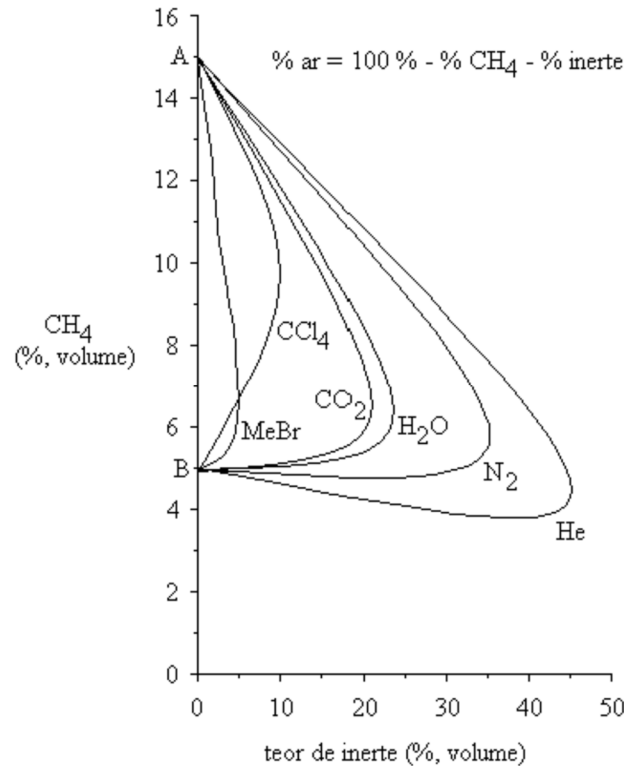


Fonte: Zabetakis (1965).

Além do ar e O₂, pode haver limites de inflamabilidade em outros tipos de gases. A Figura 20 apresenta os limites de inflamabilidade do metano em diferentes tipos de gás inerte. Os pontos A e B no eixo vertical são os limites superior e inferior de metano em ar, respectivamente. A adição de diluentes estreita a faixa dos limites e, a partir de certo valor, impede a propagação. Diferentes gases diluentes produzem diferentes efeitos, com a efetividade dependente do calor específico. Isso sugere que a natureza do efeito é relacionada com maior ou menor temperatura de chama adiabática e também com a cinética química. A

temperatura de chama adiabática é a maior temperatura final que se pode atingir a partir de uma mistura de determinada proporção entre combustível e oxidante. (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2018).

Figura 20: Limites de inflamabilidade de várias misturas metano/ar/gás inerte



Fonte: Zabetakis (1965).

3.3 MISTURA DE GASES COMBUSTÍVEIS

Se existem dois diferentes tipos de hidrocarbonetos misturados com ar individualmente e estão no limite inferior de inflamabilidade, quando misturados entre si, a mistura nova estará também no limite inferior de inflamabilidade, o mesmo vale para o limite superior (CARVALHO; MCQUAY, 2007). Os limites inferiores e superiores de misturas de combustíveis podem ser determinados pela lei de Le Chatelier (Eqs 3.1 e 3.2).

$$LII_{mist} = \frac{100}{\left(\frac{C_1}{LII_1}\right) + \left(\frac{C_2}{LII_2}\right) + \dots + \left(\frac{C_i}{LII_i}\right)} \quad (3.1)$$

$$LSI_{mist} = \frac{100}{\left(\frac{C_1}{LSI_1}\right) + \left(\frac{C_2}{LSI_2}\right) + \dots + \left(\frac{C_i}{LSI_i}\right)} \quad (3.2)$$

nos quais C_1, C_2, \dots, C_i (%base volumétrica) são as proporções de cada combustível na mistura. Para o cálculo de LFL, a lei de Le Chatelier possui uma grande exatidão para diversos tipos

de misturas (CORONADO *et al.*, 2012). Glassman (2008) afirma que a lei não tem precisão para misturas que contêm H₂, por causa da cinética química do mesmo, e hidrocarbonetos insaturados e, também, para compostos de componentes químicos similares.

Zlochower e Green (2009) estudaram o efeito sobre o COL e limites de inflamabilidade em gases e misturas de gases, afirmando que o COL também segue a lei de Chatelier, obtendo-se um excelente resultado com os dados experimentais, pela fórmula a seguir:

$$COL_{mist} = \frac{\sum x_i R_i}{\sum_{COL_i} \frac{x_i R_i}{COL_i}} \quad (3.3)$$

sendo R_i a razão molar estequiométrica combustível-oxigênio, $\sum x_i R_i$ é a razão estequiométrica combustível da mistura- oxigênio e COL_i é a concentração limite de oxidante no componente.

3.4 MODELOS TEÓRICOS DE PREDIÇÃO DE LIMITE DE INFLAMABILIDADE

De acordo com Glassman (2008), em geral, o limite superior de inflamabilidade é três vezes a quantidade estequiométrica de concentração e seu limite inferior é a metade da concentração estequiométrica, mas não é uma regra geral, pois existem valores que divergem. A Tabela 7 apresenta os valores de limites de inflamabilidade para alguns compostos.

3.4.1 Método por entalpia de combustão

Albahri (2003) define o limite inferior de inflamabilidade em função da entalpia de combustão do composto, dada pela equação (3.4).

$$LII = - \frac{4354}{\Delta H_{comb}}$$

(3.4)

ΔH_{comb} é a entalpia de combustão e o LII é dado por porcentagem de volume.

3.4.2 Método por Pressão de vapor

Coronado *et al.* (2012), dizem que o limite inferior de inflamabilidade pode ser calculado usando-se o vapor de pressão do combustível e a pressão atmosférica padrão, como apresentado na Eq (3.5).

$$LII = \frac{P_f}{P_0} \times 100 \quad (3.5)$$

P_f é a pressão de vapor no ponto de fulgor e P_0 é a pressão atmosférica.

Tabela 7: Limites de inflamabilidade de alguns compostos

	Composto	Fórmula Química	LII	LSI
1	Acetileno	CH:CH	2,5	100
2	Amônia	NH ₃	15	28
3	Benzeno	C ₆ H ₆	1,3	7,9
4	Gás de alto forno	-	35	74
5	Butano	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	1,6	8,4
6	Álcool Butílico	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	1,4	11,2
7	Monóxido de carbono	CO	12,5	74
8	Gás de coqueria	-	4,4	34
9	Ciclo propano	(CH ₂) ₃	2,4	10,4
10	Ciclo hexano	C ₆ H ₁₂	1,3	8
11	Etano	CH ₃ CH ₃	3	12,5
12	Álcool Etil	C ₂ H ₆ O	3,3	19
13	Etileno	H ₂ C:CH ₂	2,7	36
14	Diesel		1,3-1,4	6,0-7,6
15	Gasolina Premium (automotiva)	-	1,3-1,4	6-7,6
16	Gasolina comercial de aviação	-	1	6-7,6
17	Heptano	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	1,1	6,7
18	Hexano	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	1,1	7,5
19	Hidrogênio	H ₂	4	74,2
20	Gás Natural	-	3,8-6,5	13-17
21	Querosene	-	0,7	5
22	Metano	CH ₄	5	15
23	Álcool Metil	CH ₃ OH	6	36
24	Éter Metil	(CH ₃) ₂ O	3,4	27
25	Nafta	-	0,8	5
26	Octano	CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃	1	6,5
27	Pentano	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	1,5	7,8
28	Propanol	CH ₃ CH ₂ CHO	2,6	17

Fonte: Coronado et al. (2012).

3.4.3 Método Algébrico

Coronado *et al.* (2012) também apresentam outra equação que permite o cálculo do limite inferior a partir do mínimo número de mols requerido para reação de propagação da chama.

$$LII = \frac{100}{1 + n_a} \quad (3.6)$$

n_a é o número de mols de ar por mols de combustível na mistura no LII.

3.4.4 Método por temperatura de chama adiabática

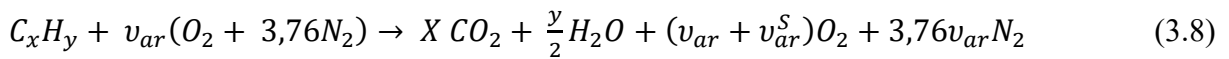
Shebeko *et al.* (2002) propõem uma equação utilizando a combustão completa do composto, desconsiderando perdas, com uma temperatura de chama adiabática de 1600K. Calcula-se o número de mols de O_2 dessa reação e, assim, faz-se o cálculo do LII por meio da Eq. (3.7)

$$LII = \frac{100}{1 + v_{a0}} = \frac{100}{1 + g_f \Delta H_f + g_c n_C + g_H n_H + g_O n_O + g_N n_N} \quad (3.7)$$

$$g_f = 0,0236 \frac{\text{mol}}{\text{kJ}}, g_c = 8,737 \frac{\text{mol}}{\text{kJ}}, g_H = 2,488 \frac{\text{mol}}{\text{kJ}}, g_O = -0,522 \frac{\text{mol}}{\text{kJ}},$$

$g_N = -0,494 \frac{\text{mol}}{\text{kJ}}, n_C, n_H, n_O, n_N$ que são os números de mols de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio respectivamente da equação de combustão. ΔH_f é a entalpia de formação do composto.

Mendiburu *et al.* (2015) propõem uma equação que prediz os valores dos limites de inflamabilidade por meio da equação de combustão completa em que se utiliza a temperatura de chama adiabática.



$v_{ar}^S = x + 0,25y$ (número de mols estequiométricos de oxigênio da reação)

$$v_{ar} = \frac{v_{ar}^S \Delta \bar{h}_{O_2} + \bar{h}_{f,F}^0 - x \bar{h}_{CO_2} - 0,5y \bar{h}_{H_2O}}{\bar{h}_{ar,P} - \bar{h}_{ar,R}} \quad (3.9)$$

$\bar{h}_{ar} = \Delta \bar{h}_{O_2} + 3,76 \Delta \bar{h}_{N_2}$ e P é o índice dos produtos, R é o índice dos reagentes. As entalpias são da combustão completa com saída dos produtos na temperatura de chama adiabática. Assim, calcula-se o limite inferior de inflamabilidade.

$$LII = \frac{100}{1 + v_{ar}} \quad (3.10)$$

3.4.5 Método por contribuição de grupo molecular

Frutiger *et al.* (2016) propõem a determinação dos limites de inflamabilidade por contribuição de grupo molecular da estrutura. Tem-se a contribuição de primeira ordem (C_j), de segunda ordem (M_k) e de terceira ordem (E_l), sendo apresentadas algumas contribuições na Tabela 8. A equação é dada pelas Eqs (3.11) e (3.12).

$$LII = LII_{const} * \exp(\sum_j N_j C_j + \sum_k D_k M_k + \sum_l O_l E_l) \quad (3.11)$$

$$LSI = LSI_{const} * \exp(\sum_j N_j C_j + \sum_k D_k M_k + \sum_l O_l E_l) \quad (3.12)$$

N_j , D_k , O_l são a quantidade de contribuição da primeira, segunda e terceira ordem respectivamente.

3.4.6 Correlações empíricas

Existem inúmeras correlações empíricas para a predição dos limites de inflamabilidade. Na Tabela 9, referenciam-se alguns autores e seus parâmetros utilizados para calcular os limites de inflamabilidade.

Tabela 8: Contribuição de grupos funcionais

Tipo	Constante	LII [%vol]	LSI [%vol]
-	-	4,53	129,96
1°	CH3	-0,24	-1,15
1°	CH2	-0,23	-0,14
2°	CO-O-CO	0,07	-0,1
2°	aromáticoC-CH(CH3)2	-0,24	-0,27
3°	anel aromático s1s2	0,12	-0,01

Fonte: Frutiger et al. (2016).

Tabela 9: Métodos de predição de limites de inflamabilidade

Limite Inferior de Inflamabilidade		Limite Superior de Inflamabilidade	
Referência	Parâmetros	Referência	Parâmetros
Shimy (1970)	N° C	Shimy (1970)	N° C e N° H
Shebeko (1983)	Contribuições atômicas	Seaton (1991)	Contribuições estruturais
Seaton (1991)	Contribuições estruturais	Albahari (2003)	Contribuições estruturais; (HC)
Albahari (2003)	Contribuições estruturais; (HC)	Jones (1928)	C _{est}
Jones (1928)	C _{est}	Thornton (1917)	β
Thornton (1917)	β	Miloshev (1982)	Ponto normal de ebulição
Funk (1974)	β	Hanley (1998)	Calor de combustão
Suzuki-Ishida (1995)	H _{combustão} , T _c e P _c	Suzuki-Koide (1944)	Calor bruto de combustão
Spakowaski (1952)	Entalpia de combustão	Spakowski (1952)	LII
Hanley (1998)	Entalpia de combustão	Suzuki-Ishida (1995)	H _{combustão} , T _c e P _c
Gharagheizi (2009)	Estruturas moleculares	Gharagheizi (2009)	Estruturas Moleculares
Miloshev (1982)	Ponto normal de ebulição	Pan (2009)	Estruturas Moleculares

Fonte: Rowley (2010).

3.5 MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE INFLAMABILIDADE

Métodos para medição de inflamabilidade de gases são conhecidos há um bom tempo e tentativas de padronizar o teste não foram eficazes. Os mais modernos métodos de teste são comparados na Tabela 10.

Além dos quatro dispositivos padrões apresentados na Figura 21, Quintero (2013) afirma que há um quinto método conhecido, a norma ASTM E918, em que se utiliza como frasco de combustão um recipiente esférico de 20 L com dois eletrodos para provocar a faísca

como fonte de ignição. Neste método, a inflamabilidade é determinada pelo aumento da pressão registrada, ou seja, a pressão da explosão deve exceder um determinado valor.

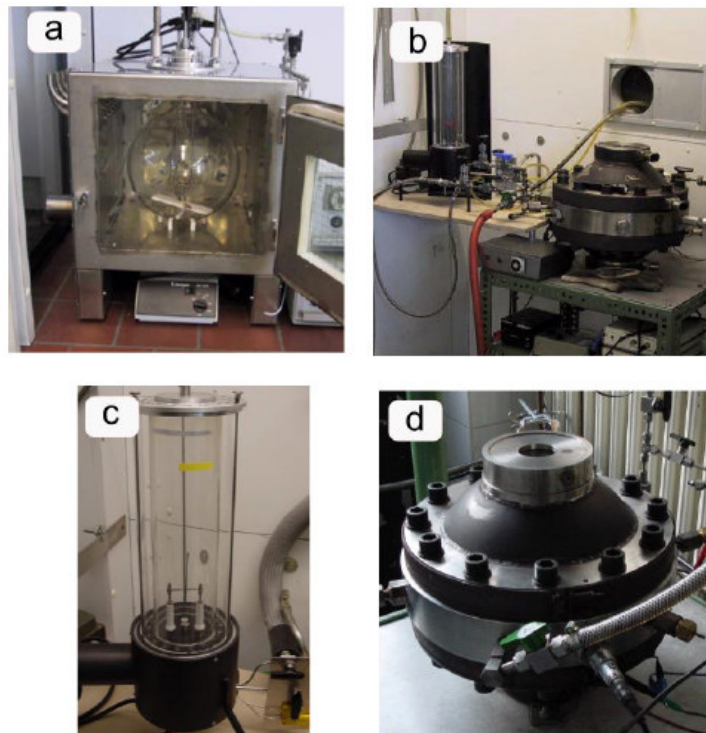
Tabela 10: Comparação entre os testes de inflamabilidade

	DIN 52649-1	EN 1839(T)	EN 1839(B)	ASTM 681-01
Frasco	Vidro; Cilíndrico (60x300mm)	Vidro; Cilíndrico (80x300mm)	Fechado, Cilíndrico ou esférico; V > 5L	Vidro; V= 5L
Ignição	Faísca; 0,5s; 10W	Faísca; 0,2s;10W	Fusível: 10-20J; Faísca 0,2 s	Faísca; 0,5s; 10W
Critério	Visual	Visual	Pressão	Visual
Repetição	5	4	4	1
Limite de Inflamabilidade	Último ponto sem ignição	Último ponto sem ignição	Último ponto sem ignição	Média dos valores com e sem ignição

Fonte: Coronado et al. (2012).

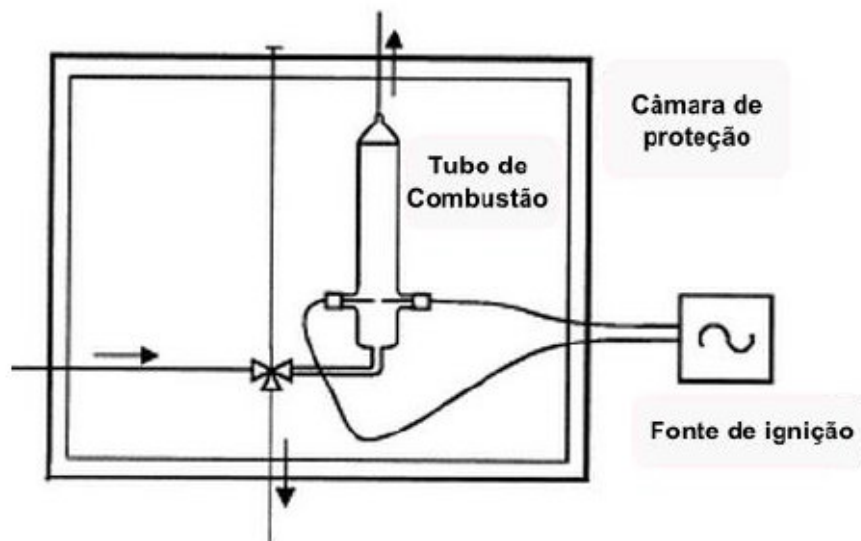
De Smedt *et al.* (1999) comparam os métodos DIN 52649 e o ASTM E918, com o propósito de converter os dados de um aparelho para outro. Em temperatura e pressão ambiente, achou-se uma diferença significativa (1 % vol) no limite superior de inflamabilidade para os hidrocarbonetos testados. Então eles propuseram um novo critério para criar um acordo dos resultados obtidos. As Figuras 22 e 23 apresentam esquemas dos equipamentos usados por De Smedt *et al.* (1999).

Figura 21: Dispositivos padrões de determinação experimental dos limites de inflamabilidade
 A) ASTM 681-01, B) DIN 52649, C) EN 1839 (T), D) EN 1839 (B)



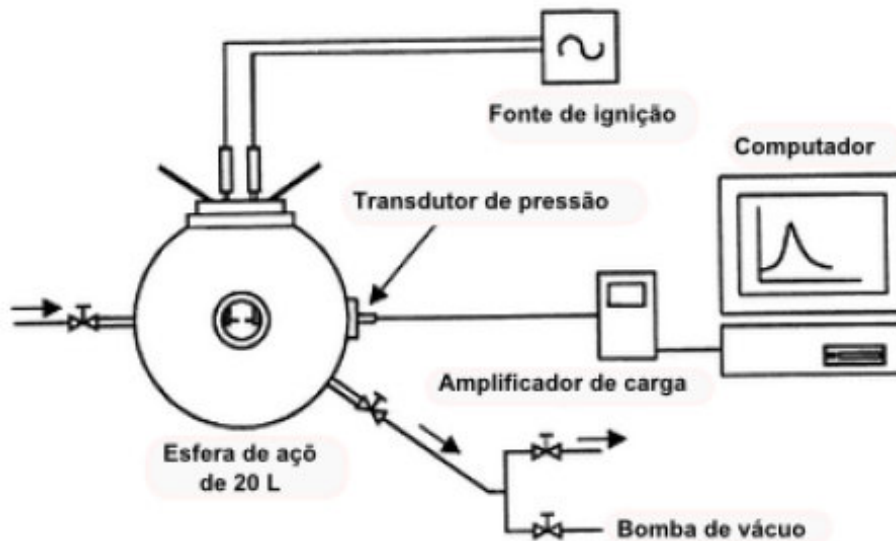
Fonte: Quintero (2013).

Figura 22: Esquema do equipamento segundo a norma DIN 52649. Critério visual.



Fonte: De Smedt et al., (1999).

Figura 23: Esquema do equipamento segundo a norma ASTM E918. Critério de pressão.



Fonte: De Smedt et al. (1999).

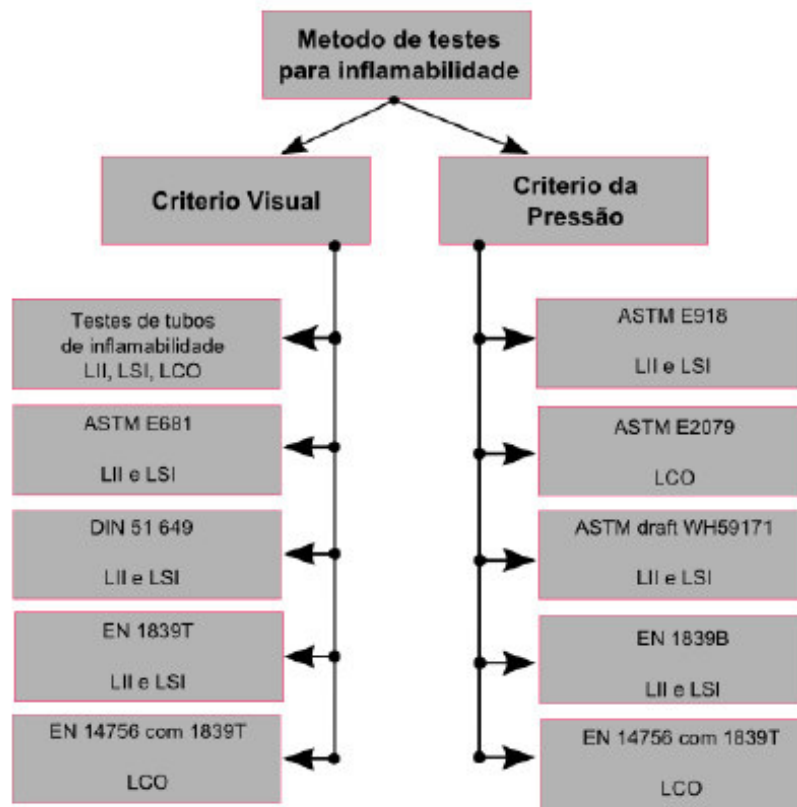
Desse modo, os métodos experimentais de medição de inflamabilidade foram divididos em dois critérios, o visual e o de pressão, podendo-se também verificar se possui ou não ventilação. A Figura 24 apresenta os métodos e os critérios que são utilizados.

No critério visual, os recipientes são transparentes, mas incapazes de suportar a carga produzida pela deflagração da chama, sendo necessária a ventilação para que se evite o aumento da pressão e se observe a chama formada para decidir se há inflamabilidade ou não.

Quintero (2013) afirma que o método visual é inerentemente subjetivo, porque o limite de inflamabilidade da mistura são chamas finas não contínuas. Além disso, qualquer observador não consegue distinguir a propagação da chama, devido ao movimento de combustão autossustentável, do movimento da chama devido ao efeito conhecido como *Buoyant Rise* ou do movimento da chama devido ao fluxo de convecção induzido pela ventilação de descarga. Uma prática comum, portanto, é a obtenção de um registro de vídeo de alta velocidade de cada teste.

No critério de pressão, o tamanho do recipiente é determinante, sendo proibido o teste em recipientes muito pequenos. Esses recipientes são projetados de forma que suportem a pressão máxima de explosão, pois a ignição é feita no meio do frasco esférico, realizando com o aumento de pressão entre 3 a 7 % da pressão inicial.

Figura 24: Testes padrões de inflamabilidade

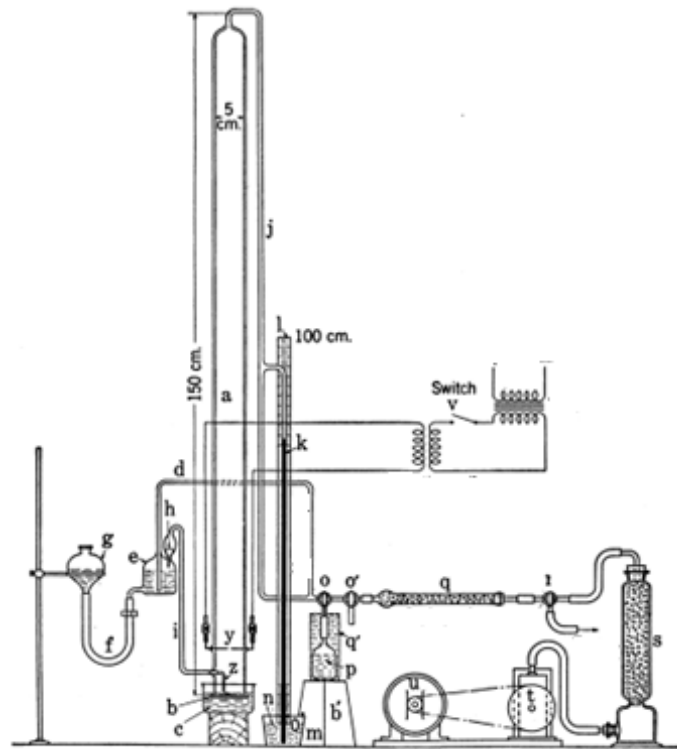


Fonte: Coronado et al. (2012).

3.5.1 Método do Tubo Bureau of Mines

Esse teste é realizado em tubos estreitos, de 2 cm a 7,5 cm de diâmetro e, pelo menos, 1m de altura. Uma mistura combustível-oxidante somente é considerada inflamável, em teoria, se puder propagar chama ao longo de um tubo infinito. Por esse método, a propagação de chama ao longo do tubo inteiro é necessária para a mistura se considerar inflamável, utilizando-se o critério visual (ROWLEY, 2010). A Figura 25 representa o esquema do equipamento.

Figura 25: Esquema do equipamento do método Bureau of Mines



Fonte: Coward; Jones (1952).

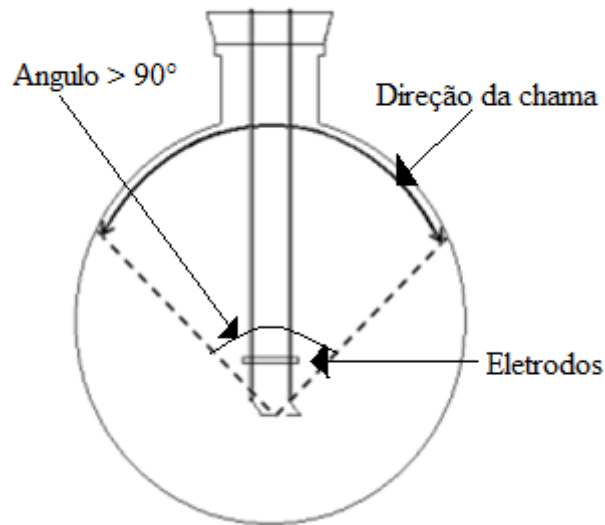
3.5.2 ASTM E681

O método ASTM E681 abrange a determinação do limite inferior e superior de inflamabilidade de químicas com suficiente pressão de vapor para formar misturas inflamáveis na pressão atmosférica e na temperatura de teste. É baseado em ignição elétrica e observação visual da propagação da chama (CORONADO *et al.*, 2012).

Mesmo com a medida sendo feita em frascos esféricos, o critério de propagação de chama foi empiricamente desenhado para reproduzir medidas em tubos com total propagação de chama (ROWLEY, 2010). A mistura é considerada inflamável quando se forma uma chama contínua em um arco de 90 graus de ângulo, medidos a partir da fonte de ignição nos recipientes esféricos acima de 12L, como apresentado na Figura 26.

Com o recipiente esférico de 5 L, a frente da chama deve se mover para cima e para fora, afastando-se da fonte de ignição para as paredes do recipiente esférico ou, pelo menos, 13 mm a partir da parede.

Figura 26: Critério visual de propagação de chama – ASTM E681



Fonte: Rowley (2010).

3.5.3 DIN 52649

Esta norma foi criada em 1986, sendo posteriormente dividida em EN1839 (T) e EN1839 (B). Utilizando-se de critério visual, é possível calcular os limites inferior e superior de inflamabilidade. Requer um cilindro vertical de vidro com diâmetro de 60 milímetros e volume de 0,85L, tendo-se dois eletrodos como fonte de ignição localizada na parte inferior do tubo.

3.5.4 EN 1839 (T)

Esta norma europeia foi desenvolvida a partir do pressuposto de que, se uma mistura combustível-oxidante suporta qualquer ignição, isto pode resultar em situações potencialmente perigosas, desconsiderando se a propagação é possível ou não (ROWLEY, 2010). Utiliza-se do critério visual, com 8 cm de diâmetro, volume de 1,5 L, cilindro de vidro com o topo aberto com fâsca de ignição em baixo (critério de visualização da chama propagada a 10 cm verticalmente acima da ignição ou 12 cm horizontalmente a qualquer ponto do início da chama).

3.5.5 ASTM E918

Segundo Coronado *et al.* (2012), este método é feito para determinar os limites de inflamabilidade em temperaturas elevadas (acima de 200°C) e pressão inicial acima de 1378,95 kPa. É limitado para misturas que possuem pressão de explosão menos do que 13789,5 kPa. O recipiente de ensaio de metal resistente à pressão é um cilindro de apenas 1L, o qual, comparado a E681, é bem menor. A propagação de chama é definida com a reação de combustão que produz pelo menos pressão 7% acima da pressão absoluta inicial.

3.6 IMPORTÂNCIA DO LIMITE DE INFLAMABILIDADE NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

Desde a década de 1950, quando foi introduzido o querosene como combustível de aviação, os projetistas aeronáuticos têm tomado precauções sobre o espaço vazio em tanques de combustível de aviação, nos quais podem conter uma mistura de vapores, oxidante/combustível, o qual pode inflamar na presença de uma fonte de ignição, quando a mistura estiver dentro dos limites de inflamabilidade do combustível em uso (CORONADO *et al.*, 2012).

Após o acidente do voo TWA 800, que caiu perto da costa de Nova York em 1996, as preocupações sobre a formação de vapores nos tanques de aeronaves chegaram ao seu auge. Foi determinado que a razão crucial da perda do avião foi uma explosão dentro do tanque de combustível central da asa (*CWT*). Um significativo fator do TWA 800 foi a pequena quantidade de massa de combustível no *CWT*. Em pequenas razões de massa para volume, a pressão de vapor do Jet A diminui devido ao esgotamento dos componentes mais voláteis do combustível. No momento da explosão, havia no avião aproximadamente 50 galões de combustível Jet A. O combustível e o ar contido no tanque foram aquecidos pelo sistema de ar condicionado localizado abaixo do *CWT*. O aumento da vaporização do combustível na região vazia do tanque formou uma mistura inflamável a qual causou o acidente posteriormente (SHEPHERD *et al.*, 1997).

Quintero (2013) afirma que as condições para a ignição e propagação de chama dentro do tanque de combustível da aeronave dependem de vários parâmetros que incluem tipo de combustível, temperatura, pressão no tanque e concentração de oxigênio. Também se nota que a espuma e o *spray* do combustível, que pode se formar durante o reabastecimento ou durante o voo com liberação de oxigênio, podem aumentar os limites de inflamabilidade.

3.7 INFLAMABILIDADE NA AVIAÇÃO

Um tanque fechado parcialmente cheio de combustível, mantido à temperatura constante, eventualmente entrará em condição de equilíbrio entre combustível e vapor. Por definição, equilíbrio e máxima concentração combustível/ar são sinônimos. Por causa da limitação natural, esse equilíbrio é base para todos os procedimentos experimentais (NESTOR, 1967).

Considerando-se apenas condição de equilíbrio, uma razão particular de combustível/ar pode existir determinando temperatura e pressão do sistema. A temperatura determina a quantidade de vapor de combustível, pela pressão de vapor, enquanto a altitude determina a quantidade de ar. Para uma determinada combinação de temperatura e altitude, portanto, em condições de equilíbrio, o espaço vazio do tanque de uma aeronave pode ser considerado inflamável ou não inflamável (NESTOR, 1967).

Segundo Nestor (1967), o equilíbrio na inflamabilidade pode ser alterado por algumas variáveis, descritas a seguir.

- a) Natureza do combustível aeronáutico
 - Hidrocarbonetos predominantes na fração do vapor de combustível,
 - Pressão de vapor variável,
 - Alteração da característica do combustível devido à evaporação.
- b) Efeitos Mecânicos
 - *Design* e geometria do tanque de combustível,
 - Efeitos da parede do tanque que podem modificar as reações de combustão,
 - Intensidade e natureza da fonte de energia de ignição,
 - Pulverização mecânica do combustível.
- c) Efeitos das condições de voo
 - Mudanças de altitude,
 - Mudança de temperaturas,
 - Espaço vazio do tanque variável,
 - Ventilação do tanque,
 - Pulverização do combustível devido à agitação da aeronave em movimento,
 - Mistura de combustíveis devido ao reabastecimento da aeronave.

As condições de voo podem alterar os limites de inflamabilidade, por isso se torna necessário saber quais parâmetros na condição de voo existem e como afetam os limites de

inflamabilidade. Volatilidade do combustível é uma das principais características que correlaciona com a inflamabilidade. Algumas propriedades são medidas da volatilidade: ponto de fulgor, intervalo de destilação e pressão de vapor.

3.7.1 Ponto de fulgor

O ponto de fulgor coincide com a temperatura no limite inferior de inflamabilidade e é o padrão para classificar o risco de incêndio e explosão de combustíveis líquidos. Para as substâncias puras e misturas simples, por exemplo, alcanos, o ponto de inflamação pode estar exclusivamente relacionado com o limite de inflamabilidade do vapor por meio da pressão de vapor dependente da temperatura. Em combustíveis aeronáuticos, o ponto de fulgor apenas fornece uma indicação da inflamabilidade relativa entre diferentes combustíveis (SHEPHERD *et al.*, 2001).

3.7.2 Intervalo de destilação

Nestor (1967) afirma que dados de destilação são úteis para o cálculo de pressão de vapor de combustíveis. A dificuldade se encontra em obter uma pressão satisfatória para os dados de destilação, especialmente, para os componentes de menor ponto de ebulição.

3.7.3 Pressão de vapor

Pressão de vapor afeta a inflamabilidade pelo controle de quantidade de combustível no espaço vazio do tanque. Em um tanque parcialmente cheio, as moléculas do combustível escapam do líquido para a parte vazia acima. Ao se tratar de um tanque fechado, o espaço vazio é limitado e as moléculas continuam acumulando-se nesse espaço. Conforme o número de moléculas aumenta no espaço, o número de moléculas que retornam ao líquido cresce proporcionalmente. Se a temperatura se mantém constante, uma condição de equilíbrio é estabelecida quando o número de moléculas que sai do líquido é igual ao das que retornam ao líquido. A pressão que as moléculas do líquido exercem no espaço vazio é chamada de pressão de vapor (NESTOR, 1967).

3.7.4 Ignição

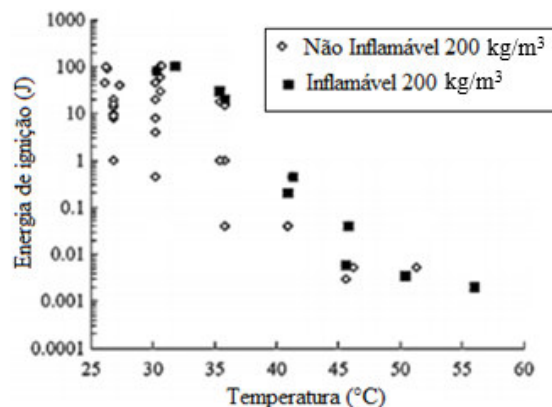
De acordo com Coronado *et al.* (2012), existem poucos dados sobre energia de ignição para combustíveis aeronáuticos, mas o mínimo de energia requerido para hidrocarbonetos é de 0,2 mJ, apropriado para combustíveis de aviação.

O fator chave para determinação da energia de ignição é a composição e a concentração de vapor de combustível. A concentração do vapor de combustível em equilíbrio com o combustível líquido é proporcional à pressão de vapor do combustível, P_{comb} , e inversamente proporcional à pressão ambiente, P_a (SHEPHERD *et al.*, 2001).

$$X_{comb} = \frac{P_{comb}}{P_a} \quad (3.13)$$

Shepherd *et al.* (2001) estudaram a dependência da quantidade de combustível no tanque, testando duas situações: uma com 200 kg de combustível por m^3 correspondendo a 25% do tanque cheio, e a outra praticamente com o tanque vazio com $3 \text{ kg}/m^3$ correspondendo a uma fina camada residual de combustível. Os testes foram feitos à pressão de 0,585 bar, que corresponde a uma altitude de 4267,2 m. Os resultados são apresentados nas Figuras 27 e 28.

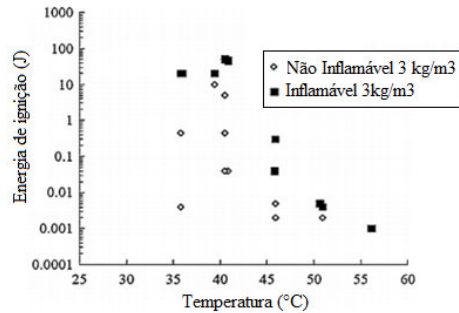
Figura 27: Energia de ignição de mistura JET A – Vapor ($200 \text{ kg}/m^3$)



Fonte: Shepherd et al., (2001).

Na Figura 28, os resultados mostram que abaixo de 30°C a mistura não pode ser ignitada mesmo com energia acima de 100J. A energia de ignição abaixa rapidamente conforme a temperatura passa de 50°C . No segundo caso (Figura 29), os resultados são parecidos, portanto, a quantidade de combustível líquido no tanque não afeta a relação de energia de ignição com a temperatura.

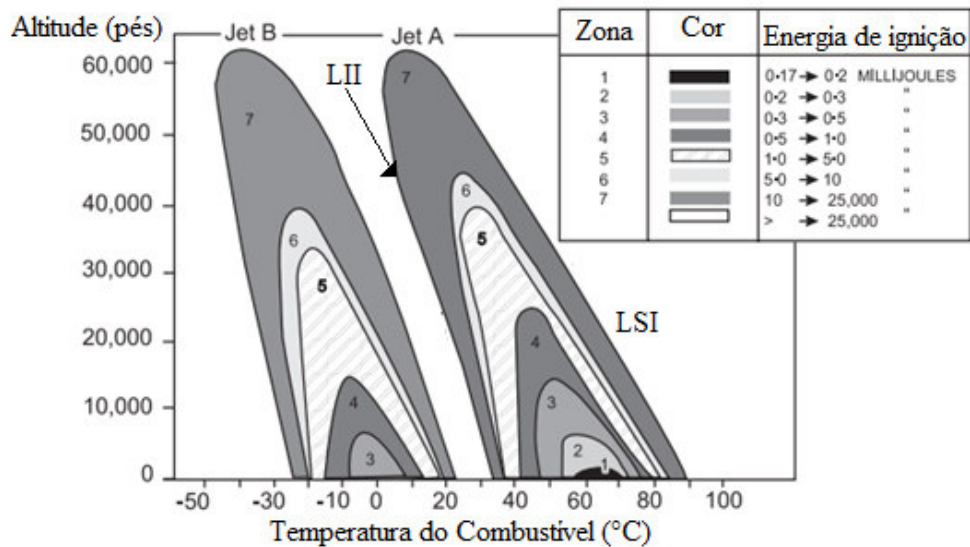
Figura 28: Energia de ignição de mistura JET A – Vapor (3 kg/m³)



Fonte: Shepherd et al., (2001).

Correlações entre altitude e energia de ignição podem ser feitas, como ilustra a Figura 29 para os combustíveis aeronáuticos JET A e JET B.

Figura 29: Mínima energia de ignição para os combustíveis JET A e JET B



Fonte: Fuel Flammability Task Group (1998).

3.8 INFLAMABILIDADE EM COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS

Há, pelo menos, vinte e três especificações ASTM D1655 para os combustíveis Jet A ou Jet A-1, que estabelecem limites máximos ou mínimos para propriedades ou medidas indicadas. Há diferença das nove especificações necessárias do combustível diesel ou seis da gasolina automotiva na ASTM (Goodger, 1982). De acordo com a norma padrão ASTM D1655, existem três tipos de combustível de turbina de aviação: a base de querosene, Jet A e

Jet A-1 (faixa de ponto de ebulição aproximado de 160-300 ° C) e baseado em nafta o Jet B (faixa de ebulição aproximada de 50-300 ° C). A diferença entre os Jet A e Jet A-1 é que o ponto de congelamento do Jet A-1 é -47 ° C e Jet A é de -40 ° C. O Jet B é pouco utilizado hoje em dia, exceto em algumas operações árticas, embora seja essencialmente o mesmo combustível JP-4, o combustível padrão militar dos EUA em uso até aproximadamente 10 anos atrás. Os atuais combustíveis de aviação militares dos EUA são JP-8, que é quase equivalente ao Jet A, e JP-5, que tem um elevado ponto de fulgor (FFTG, 1998).

Conforme discutido no Capítulo 2, há um grande interesse em uso de biocombustíveis na aviação. Com isso, é necessário o estudo de como os limites de inflamabilidade se comportam frente aos seus influenciadores. Não é possível prever uma regra geral de como os limites de inflamabilidade desses novos combustíveis de aviação vão comportar-se em condições de voo, mas, em geral, o que ocorre é que variações abaixo da pressão atmosférica diminuem a diferença entre os limites, o aumento da temperatura na mistura causa distanciamento entre os limites, diferentes gases diluentes produzem efeitos diferentes nos limites de inflamabilidade e, baseado nos resultados experimentais, os biocombustíveis de aviação necessitam de uma energia de ignição mínima de 0,2 mJ. O material e o método experimental que serão utilizados no trabalho serão esmiuçados no Capítulo 4.

4 BANCADA EXPERIMENTAL E MÉTODO DE ANÁLISE

Neste capítulo, primeiramente é detalhada a bancada experimental para testes de limite de inflamabilidade e o procedimento experimental. Tal bancada se encontra disponível para a realização dos testes experimentais na Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (Itajubá, MG), montada no Laboratório de Motores (Projeto FAPEMIG TEC-APQ-00467-11), instituição parceira com a UNESP, via convênio conjunto firmado entre as duas universidades. Em seguida, é realizado o cálculo da pressão de vapor para o farnesano, combustível alternativo de aviação, do QAV, mistura de 50% de farnesano em massa com QAV (F50) e mistura de 10% de farnesano em massa com QAV (F10). Por último é feito o cálculo de volumes mínimo e máximo teórico do farnesano, QAV, F50 e F10, cálculos estes necessários para os testes experimentais, pois o primeiro garante a evaporação do líquido no teste e o segundo fornece a quantidade teórica necessária de combustível para que a mistura combustível-oxidante seja inflamável. O número total de testes foi determinado pela limitação experimental da bancada, por exemplo, os testes foram feitos a uma temperatura inicial de 140 °C, pois a essa temperatura era garantida a total evaporação do combustível e a temperatura final de 210 °C, com intervalo de 10 °C para cada ponto de inflamabilidade. Foram realizados um total de 636 testes

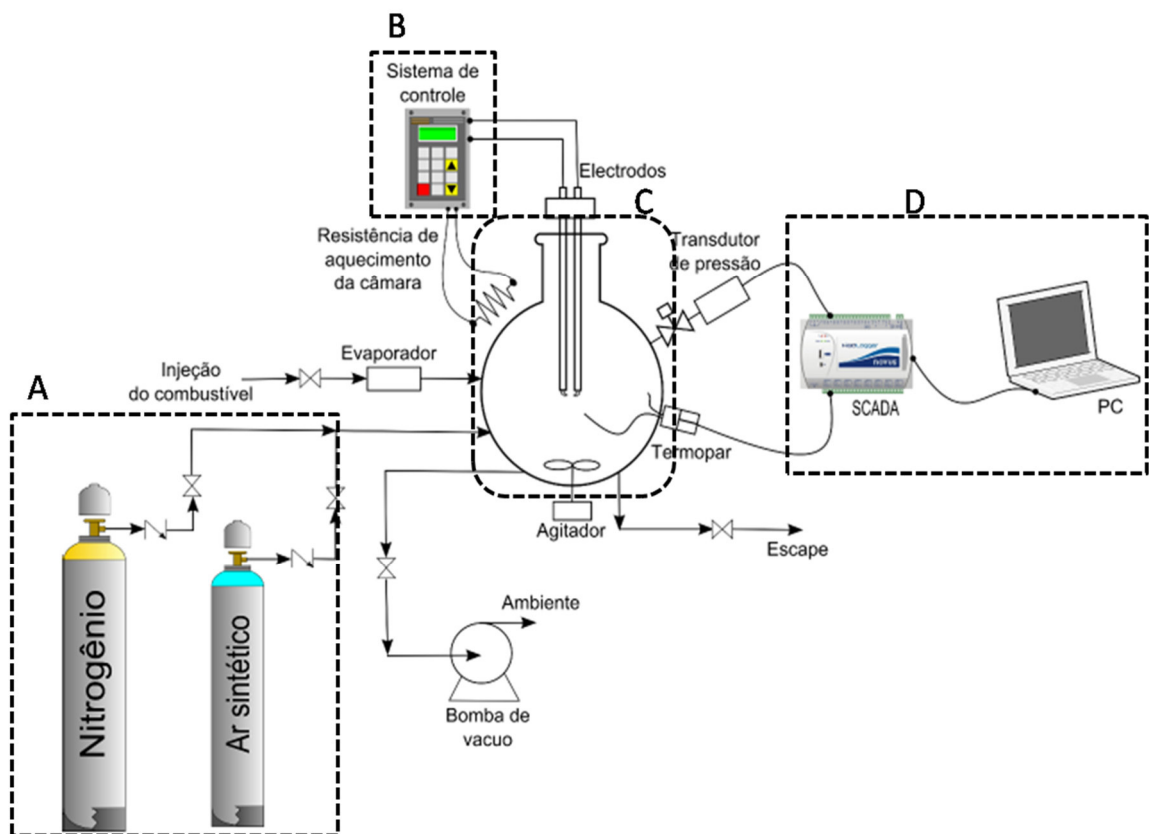
4.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental contém uma câmara de inflamabilidade, que foi construída seguindo a norma americana ASTM E681 com algumas modificações pertinentes para se trabalhar com pressões reduzidas. Além da câmara, a bancada possui dispositivos que medem as variáveis de operação e três sistemas: o sistema de controle, o sistema de fornecimento de gás e o sistema de aquisição de dados e monitoramento. A Figura 30 apresenta o esquema da bancada experimental.

Um evaporador é usado na linha de injeção de fluido ao recipiente. Isso garante que a amostra de combustível entre no recipiente sempre como vapor mesmo em baixas temperaturas. Uma seringa hipodérmica de 1 mL é usada para injeção de líquidos. O líquido tem que ser injetado a uma pressão menor do que a pressão de vapor do combustível analisado. O líquido passa para vapor após a injeção no recipiente. O evaporador é usado somente nos experimentos para determinar o limite inferior de inflamabilidade.

Uma rolha especial de fluorsilicone foi fixada a quatro hastes conectadas a quatro molas para segurá-las firmemente na tampa superior da câmara de inflamabilidade. O recipiente esférico de vidro está equipado com um transdutor de pressão de alta precisão e dois termopares, um posicionado perto da parede (tipo E) e o outro posicionado no núcleo interno do recipiente (tipo K). O transdutor de pressão mede a pressão inicial e a variação de pressão durante a inflamabilidade.

Figura 30: Esquema da Bancada Experimental: A – Sistema de fornecimento de gás, B – Sistema de controle, C – Câmara de Inflamabilidade, D - Sistema de aquisição de dados e monitoramento



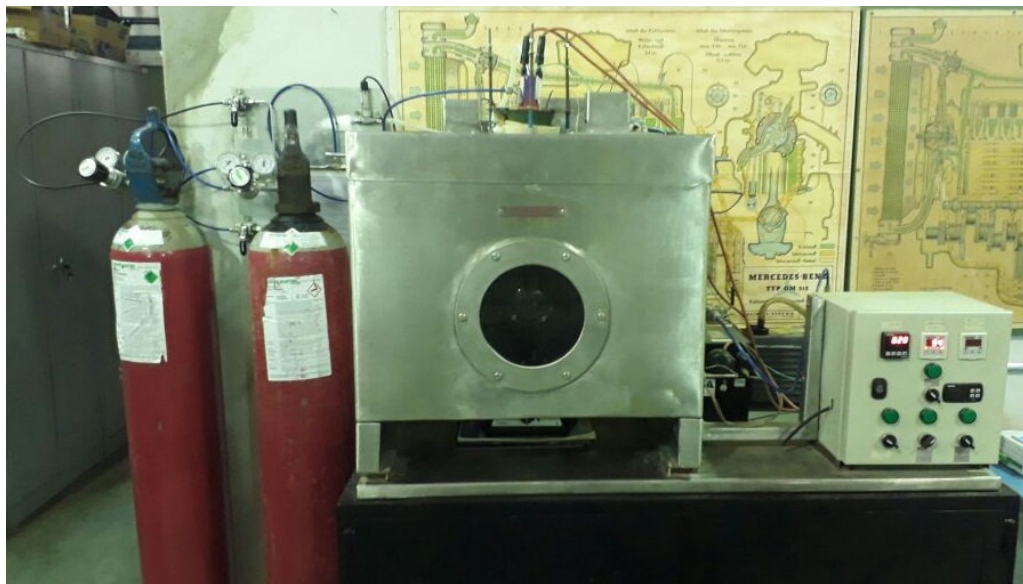
Fonte: Quintero (2013).

A abertura dos eletrodos de ignição é de 6,4 mm e a energia de ignição é de 90 J (aproximadamente 30 mA a 15 kV, fornecida pela bateria secundária de um transformador, sendo a duração da faísca de 0,2 s). O aparelho de inflamabilidade é automatizado, utilizando-se uma unidade de *Supervisor Control and Data Acquisition* (SCADA). O SCADA é conectado a um PC para monitoramento de todas as variáveis e armazenamento de dados

4.2 CÂMARA DE INFLAMABILIDADE

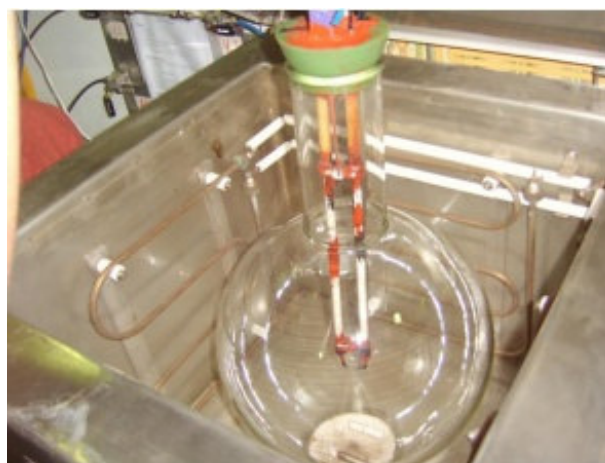
A câmara de inflamabilidade, Figura 31, segue os parâmetros da norma americana ASTM E681. O aquecimento dela é feito por meio de elementos elétricos, podendo sua temperatura atingir até 300°C. Ela possui isolamento térmico e uma janela de observação para a gravação da estrutura da chama, pelo critério visual. A câmara também possui um recipiente de teste esférico de 20,716 L, Figura 32. O volume especificado pela ASTM E681 foi aumentado, pois não há especificação na norma para o uso em altas temperaturas e pressões reduzidas (CORONADO et al., 2012).

Figura 31: Câmara de inflamabilidade



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 32: Recipiente de teste esférico (câmara de inflamabilidade)



Fonte Quintero (2013).

4.3 SISTEMA DE CONTROLE

Com o sistema de controle, configuram-se as variáveis e as condições de trabalho, por exemplo, a fixação da temperatura desejada para o teste. Ao fixar a temperatura de trabalho, é necessário esperar alguns minutos para que a temperatura dentro da câmara fique uniforme. Também é possível configurar a temperatura do evaporador, acionando-se a bomba de vácuo e os ventiladores para homogeneizar o ar quente dentro da câmara e acionando-se o *timer* para fixar o tempo de ignição recomendado pela norma. A Figura 33 apresenta o sistema de controle da bancada experimental.

Figura 33: Sistema de controle



Fonte: Produção do próprio autor

4.4 SISTEMA DE FORNECIMENTO DE GÁS

O sistema de fornecimento de gás, Figura 34, é constituído por um cilindro de gás inerte (N_2) e um cilindro de ar artificial (80% N_2 e 20% de O_2). O primeiro é utilizado para a limpeza do recipiente esférico após a propagação de chama para assegurar que não haja gases residuais da combustão ao final de cada teste. O segundo é utilizado como oxidante da mistura combustível-oxidante (QUINTERO, 2013).

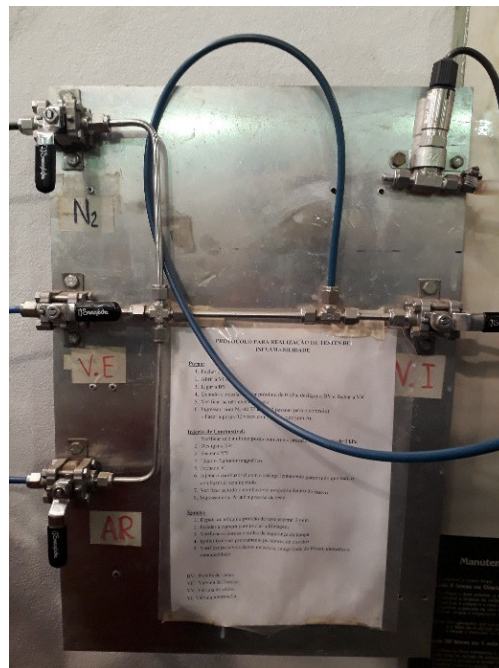
Esses cilindros de gases estão ligados por meio de tubulações e válvulas com o recipiente de combustão. O nitrogênio tem uma pureza mínima de 99,999% e impurezas máximas (ppm) de:

- $\text{THC} < 0,5$
- $\text{O}_2 < 1$
- $\text{H}_2\text{O} < 2$
- $\text{CO}_2 < 1$
- $\text{CO} < 1$

O ar sintético tem também uma pureza mínima de 99,999% e impurezas máximas (ppm) de:

- $\text{THC} < 0,1$
- $\text{H}_2\text{O} < 3$

Figura 34: Sistema de fornecimento de gases



Fonte: Produção do próprio autor.

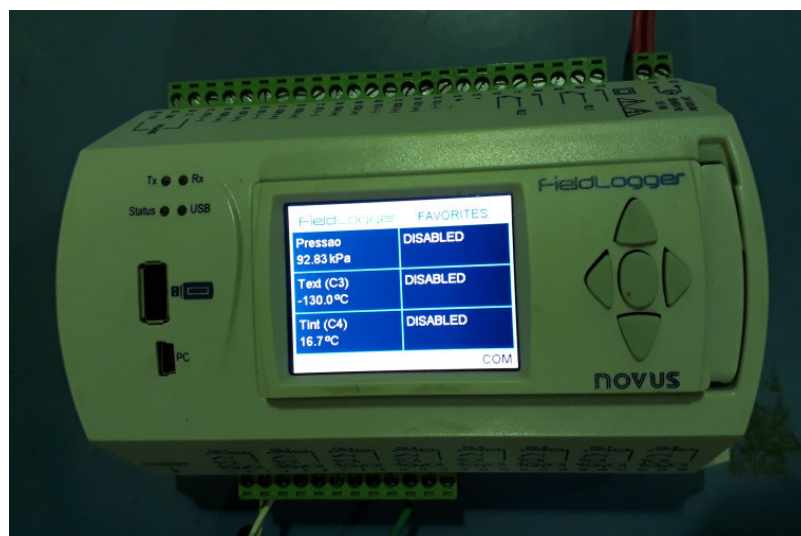
4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MONITORAMENTO

O sistema de supervisão e aquisição de dados, comumente abreviado SCADA (proveniente do seu nome em inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*), monitora as variáveis de trabalho do teste, tais como a pressão dentro do vaso esférico e a temperatura fornecida pelos termopares, tendo-se dois localizados no inferior, um no topo e outro no meio do frasco. O SCADA é ligado ao computador para ajudar não só no monitoramento de todas as variáveis, bem como ao armazenamento dos dados. O SCADA usado é um *Field Logger*,

figura 35, da marca NOVUS® (QUINTERO, 2013). Algumas características deste dispositivo são:

- Entradas analógicas: 8
- Entradas/saídas digitais: 8
- Saídas à rede: 2
- Memória interna: 2Mb
- Taxa de amostragem: 1000 m/s

Figura 35: *Field Logger*



Fonte: Produção do próprio autor

4.6 DISPOSITIVOS DE MEDIÇÕES DE VARIÁVEIS

Há três variáveis controláveis: pressão, temperatura e volume do combustível. Há também diferentes equipamentos para medição delas, conforme dito anteriormente, estando os equipamentos de pressão e temperatura estão interligados ao SCADA para o registro automático (QUINTERO, 2013).

A pressão é medida por meio de um transdutor de pressão ligado ao SCADA, cujas principais características são:

- Faixa de medição: 0 – 10 bar.
- Sinal de saída: 4 – 20 mA.
- Precisão: < 0,5% do fundo de escala (FE) (incluído não linearidade, histerese e repetibilidade).

- Resposta dinâmica: < 2 ms.

Para a medição de temperatura de registro, é usado um termopar tipo K, o qual permite a medição de temperaturas de -200 até os 1200°C aproximadamente e tem uma sensibilidade também aproximada de 41 μ V/°C. Na medição do volume de combustível fornecido, utilizam-se seringas hipodérmicas, as quais têm um volume máximo de 1 ml com uma tolerância ou limite máximo de erro de +/- 0,02 ml.

4.7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental é efetuado seguindo as recomendações da norma ASTM E681. Cada teste durou de 15 a 25 minutos. A diferença da duração se encontra na inserção do volume de combustível desejado, pois, para volumes maiores, são necessárias mais seringas e maior tempo para total evaporação do combustível. O processo experimental de manuseio do aparato consiste nos seguintes passos:

1. Ajustar a temperatura desejada,
2. Verificar o equipamento,
3. Purgar a câmara com o N₂, a uma pressão de 1 kPa,
4. Fixar um valor de pressão que garante a evaporação do combustível,
5. Injetar o volume requerido de combustível, utilizando a seringa hipodérmica,
6. Ligar o agitador magnético (400 rpm) para vaporização do combustível injetado,
7. Após vaporização do combustível, introduzir lentamente o ar sintético até que a pressão desejada seja alcançada,
8. Monitorar a pressão e a temperatura durante o processo,
9. Verificar os parafusos de retenção da proteção da tampa do frasco,
10. Desligar o agitador magnético após dois minutos de funcionamento,
11. Registrar os valores de pressão e de temperatura no interior do frasco,
12. Posicionar a câmara de alta velocidade em frente à janela de observação da câmara,
13. Desligar a luz ambiente,
14. Iniciar a gravação,
15. Ativar o eletrodo,
16. Observar a propagação de chama de acordo com as indicações da norma e
17. Retomar do processo para obtenção da propagação da chama para os dois limites de inflamabilidade, o superior e o inferior.

Como o teste utiliza o critério visual, o vídeo gravado é editado em um *software* de edição, o qual permite determinar se a amostra a uma determinada pressão e temperatura teve propagação de chama ou não. Indicações padrões que determinam se a mistura é inflamável ou não são de grande importância.

Conforme discutido no Capítulo 3, a norma ASTM E681 estabelece que a mistura é inflamável se a chama propagar para cima e para fora das paredes do recipiente, formando um arco maior do que 90°, medidos a partir da fonte de ignição em direção das paredes do recipiente. O limite de inflamabilidade é a média da concentração da primeira chama propagada e da concentração da não propagação de chama. A chama deve ser contínua ao longo da região do recipiente.

De acordo com Coronado *et al.* (2012), se a propagação da chama não puder ser reproduzida, ou sua extensão não for clara, por exemplo, não há propagação uniforme, estrutura irregular da chama, ou a chama não encheu, pelo menos, a metade do recipiente mesmo para a concentração máxima inflamável no ar, possivelmente uma ignição de 50% foi usada.

Por último, como a proposta deste trabalho é o teste de combustíveis alternativos de aviação em condição de voo comercial, os testes são realizados na faixa de pressão entre 20 e 101 kPa, pois considera-se que a altitude de cruzeiro é de 40000 pés (aproximadamente 18kPa). A temperatura de trabalho será entre 130 a 210°C. Nos testes, é necessário que o frasco contenha uma pressão abaixo da pressão de vapor do combustível para que o mesmo se vaporize completamente formando uma mistura inflamável com o ar sintético; por isso, torna-se importante o cálculo da pressão de vapor do combustível a ser utilizado.

4.8 CÁLCULO DA PRESSÃO DE VAPOR

Atkins e Jones (2012) definem a pressão de vapor como a pressão exercida pelo vapor que está em equilíbrio dinâmico com a fase condensada e deduzem a equação de Clausius-Clapeyron para pressão de vapor em temperaturas diferentes conforme a Eq. (4.1).

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{\Delta H_{vap}^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (4.1)$$

P_2 e T_2 são respectivamente a pressão [Pa] e a temperatura [K] para o estado 2, P_1 e T_1 são respectivamente a pressão [Pa] e a temperatura [K] para o estado 1, R é a constante dos gases e ΔH_{vap}° é a entalpia de vaporização do composto. Como R e ΔH_{vap}° são constantes para o mesmo composto, a equação pode ser reescrita segundo a Eq. (4.2).

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = A\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (4.2)$$

A é uma constante

Considera-se que o estado 1 é de referência e pode ser incluso em uma constante, portanto, tem-se a Eq. (4.3)

$$\begin{aligned} \ln P_2 &= \left(\ln P_1 - \frac{A}{T_1}\right) - \frac{A}{T_2} \\ \ln P_{vap} &= B - \frac{A}{T} \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.8.1 Farnesano

O farnesano é o combustível alternativo utilizado neste trabalho. A Figura 36 apresenta o farnesano adquirido pela empresa Amyris S.A, e suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 11.

Para o cálculo da pressão de vapor do farnesano em diferentes temperaturas, utiliza-se a equação (4.3) substituindo os dados da tabela 5.1 de pressão de vapor a 20°C e do ponto inicial de ebulição 198°C. O ponto inicial de ebulição é quando a pressão ambiente se iguala à pressão de vapor, tendo-se as Eq. (4.4) e (4.5).

Figura 36: Farnesano



Fonte: Produção do próprio autor

$$\ln 101325 = B - \frac{A}{471,15} \quad (4.4)$$

$$\ln 89,3 = B - \frac{A}{293,15} \quad (4.5)$$

Resolvendo as equações (4.4) e (4.5) tem-se que:

$$A = 5458,04$$

$$B = 23,11$$

Portanto a equação para o cálculo da pressão de vapor do farnesano em diferentes temperaturas é dada pela Eq. (4.6).

$$\ln P_{VAP-FAR} = 23,11 - \frac{5458,04}{T} \quad (4.6)$$

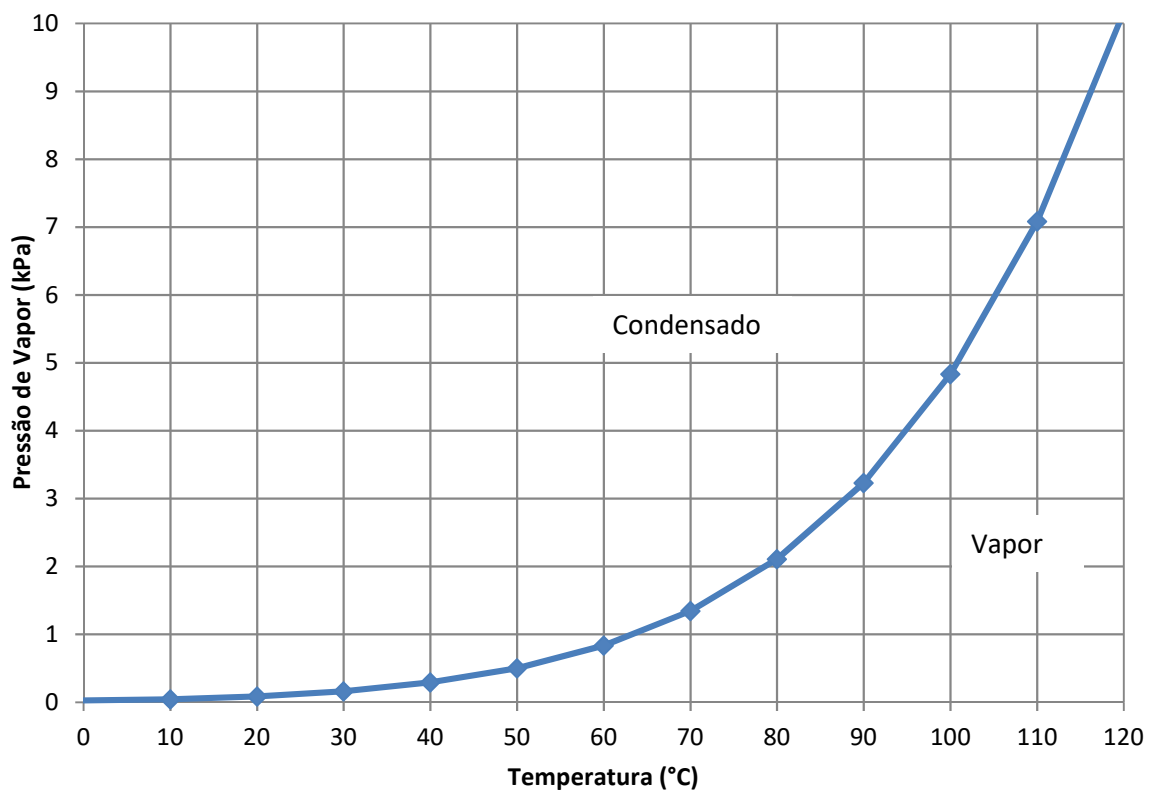
Tabela 11: Propriedades físico-químicas do Farnesano

Propriedades Farnesano	
Ponto Inicial de Ebulição	198 °C
Ponto de Fulgor	110 °C
Limite Inferior de Inflamabilidade(25°C)	0,48 %
Limite Superior de Inflamabilidade(25°C)	7,0 %
Pressão de Vapor (20°C)	89,3 Pa
Densidade Relativa (15°C)	0,77
Temperatura de Auto-Ignicção	197°C
Viscosidade (40°C)	2,325 mm ² /s
Peso Molecular	212,41 g/mol
Ponto de congelamento	< -78°C
Entalpia de combustão	44 MJ/kg
Existência de gomas máx. (MG/100mL)	<1

Fonte: Amyris FISQP (2017).

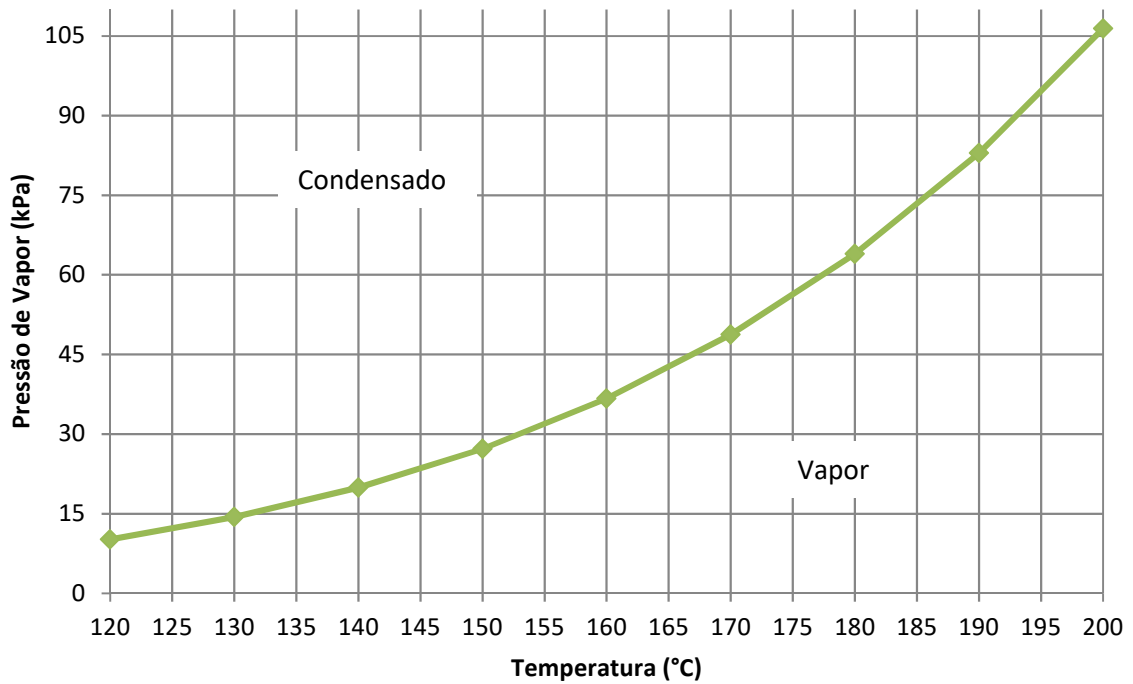
Por meio da equação (4.6) traça-se um gráfico de pressão de vapor por temperatura do Farnesano, apresentado nas Figuras 37 e 38.

Figura 37: Gráfico da pressão de vapor do farnesano por temperatura (até 10 kPa)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 38: Gráfico da pressão de vapor do Farnesano por temperatura (até 110 kPa)



Fonte: Produção do próprio autor

4.8.2 QAV

O QAV é usado para misturas com o farnesano nos testes experimentais. Suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 12.

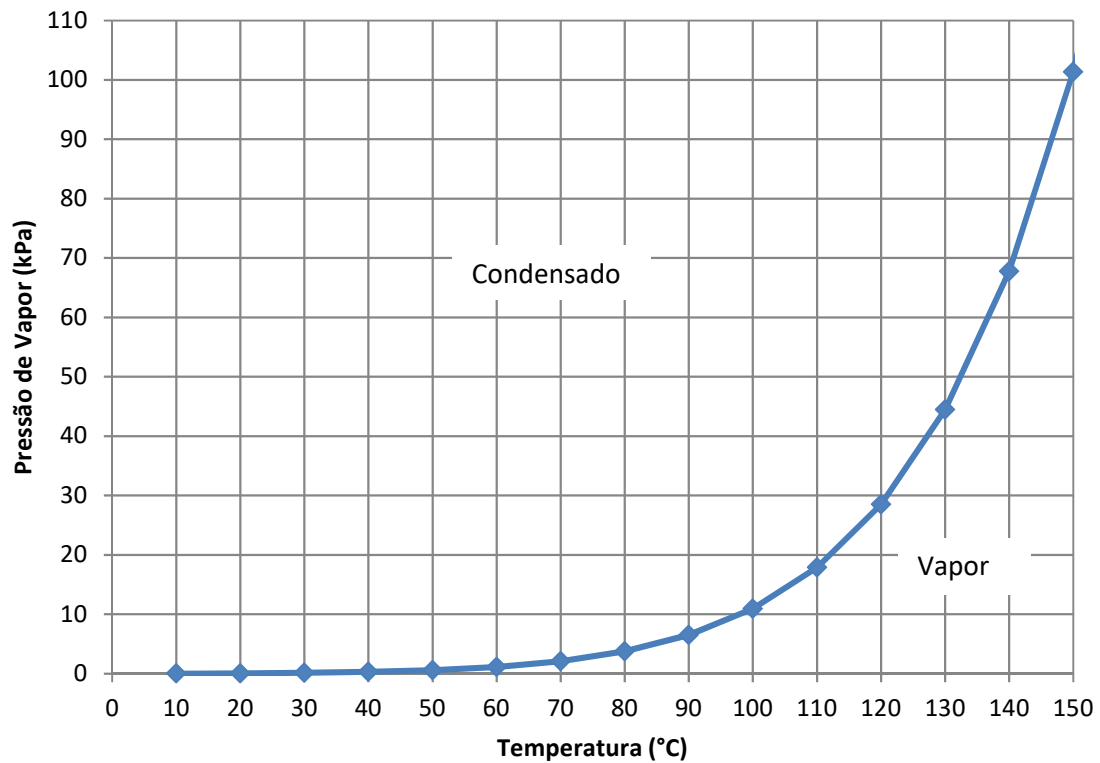
Tabela 12: Propriedades físico-químicas do QAV-1

Propriedades – QAV-1	
Ponto Inicial de Ebulição	150 °C
Ponto de Fulgor	40 °C
Limite Inferior de Inflamabilidade	0,7 %
Limite Superior de Inflamabilidade	5,0 %
Pressão de Vapor (20°C)	0,480 mmHg
Densidade	0,804
Temperatura de Auto-Ignicão	210°C
Ponto de congelamento	-20°C

Fonte: Petrobras FISQP – QAV-1 (2017)

A metodologia do cálculo é a mesma utilizada para o farnesano. A Figura 39 apresenta o gráfico da pressão de vapor do QAV-1.

Figura 39: Gráfico da pressão de vapor do QAV-1 por temperatura

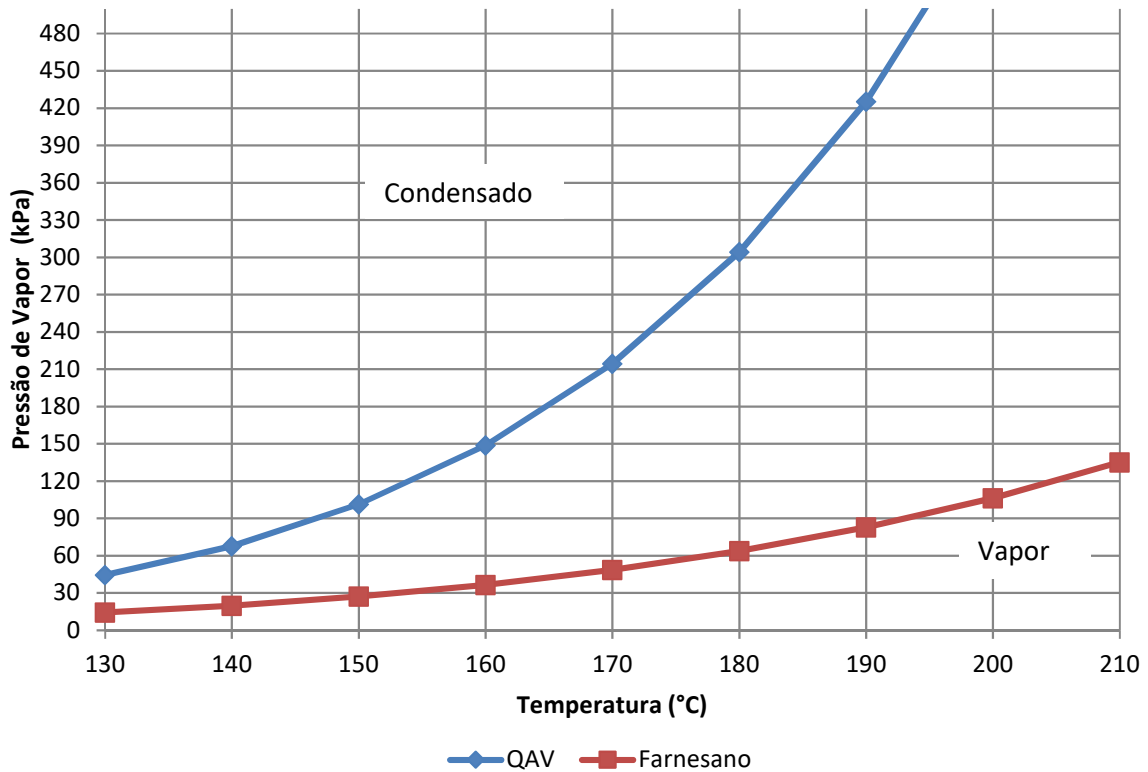


Fonte: Produção do próprio autor

4.8.3 Misturas - F50 e F10

Para as misturas F50 e F10, o ideal é se trabalhar com pressões abaixo das pressões de vapor dos dois combustíveis, pois, só assim, pode-se garantir a total evaporação das misturas. A Figura 40 apresenta o gráfico com as pressões de vapor dos dois combustíveis.

Figura 40: Pressão de vapor do QAV e farnesano



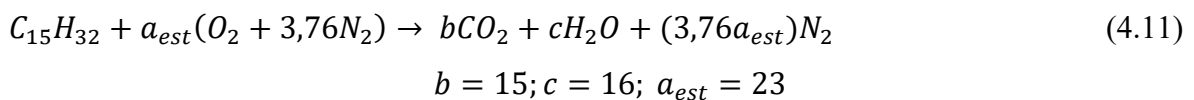
Fonte: Produção do próprio autor

4.9 VOLUMES MÍNIMO E MÁXIMO DE COMBUSTÍVEL

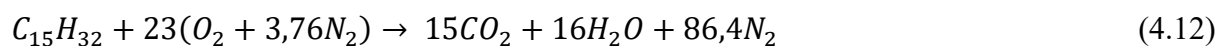
Para os cálculos dos volumes mínimo e máximo requeridos nos experimentos, utilizam-se o método apresentado por Coronado *et al.* (2012) e a norma ASTM E681, que calcula os volumes do etanol à pressão de 1 atm e 25 °C para se tornar uma mistura inflamável com o ar no recipiente de teste (20,716 L). O método será descrito a seguir.

4.9.1 Farnesano

A fórmula do farnesano é dada por $C_{15}H_{32}$. Primeiramente é necessária a reação de combustão estequiométrica do farnesano. A reação de combustão é dada pela Eq. (4.11).



A reação estequiométrica de combustão do farnesano é apresentada na Eq. (4.12)



Na Tabela 11, observa-se que o LII é de 0,48% e o LSI é de 7,0% a 25°C. Por meio desses valores, acha-se o número de mols nos limites de inflamabilidade do farnesano, pela equação (4.13).

$$\frac{n_{LII/LSI}}{n_{LII/LSI} + n_{oxi}} = LII/LSI \quad (4.13)$$

Utiliza-se a equação de Clayperon (Eq. 4.14) para se obter o número de mols que cabem no volume de teste (20,716L), na temperatura de 25 °C, pressão atmosférica (101,325kPa) e com R de 8,314 [L.kPa.K⁻¹.mol⁻¹].

$$n = \frac{P*V}{R*T} \quad (4.14)$$

Por meio da Eq. (4.14) tem-se que o número de mols total no volume de teste é de 0,8468 mols. Para o cálculo do número de mols mínimo e máximo em 20,716 L, é feita uma relação simples a partir da reação de combustão (Eq. 4.15), com $y_{min/max}$ sendo o número de mols mínimo e máximo do farnesano em 20,716 L.

$$\frac{n}{n_{LII/LSI} + (n_{reag} - n_{FAR})} = \frac{y_{min/max}}{n_{LII/LSI}} \quad (4.15)$$

As massas mínima e máxima do farnesano para formar uma mistura inflamável, respectivamente, no recipiente de teste são dadas pela Eq. (4.16).

$$m_{min/máx FAR} = MM_{FAR} * y_{min/max} \quad (4.16)$$

A massa específica do farnesano é de 762 kg/m³ (Ramos, 2017). Os volumes mínimo e máximo de farnesano são dados pela Eq. (4.17).

$$vol_{min/max} = \frac{m_{min/máx FAR}}{\rho_{FAR}} \quad (4.17)$$

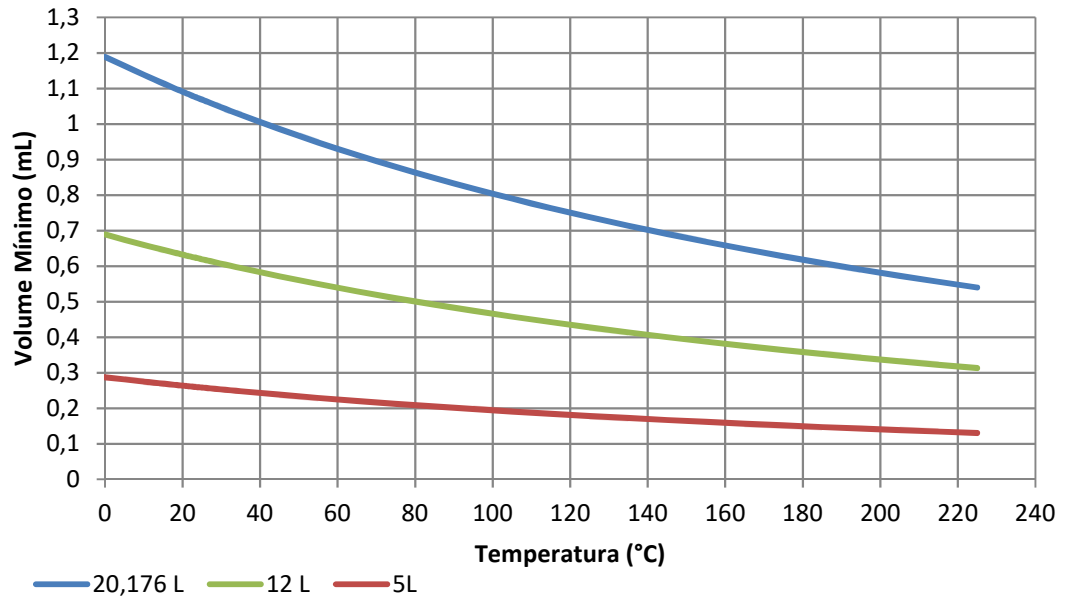
Os limites de inflamabilidade na pressão atmosférica em diferentes temperaturas seguem as equações (4.18) e (4.19) (Zabetakis, 1965).

$$LII_T = LII_{298}(1 - 0,00078(T - 298)) \quad (4.18)$$

$$LSI_T = LSI_{298}(1 - 0,000721(T - 298)) \quad (4.19)$$

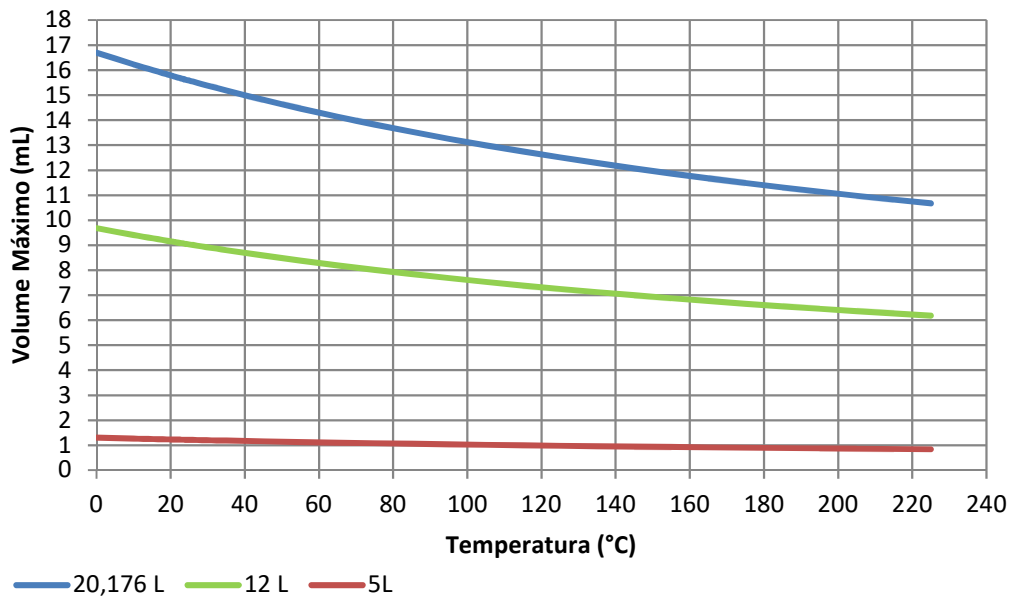
Com esse método, é possível determinar os volumes mínimo e máximo do farnesano para volumes de diferentes recipientes usados nas normas padrões da ASTM E681. As Figuras 41 e 42 ilustram a comparação entre os dois outros volumes da norma (5L e 12L) e o volume utilizado neste trabalho (20,176 L). Os gráficos servem como referência para o fornecimento de volume de farnesano nos testes, seguindo a norma ASTM E681 à pressão de 1 atm. As Figuras 43 e 44 apresentam os volumes mínimo e máximo necessários para formação de mistura inflamável do farnesano em diferentes temperaturas a 1atm, respectivamente.

Figura 41: Volume mínimo de farnesano em diferentes volumes de teste (1atm)



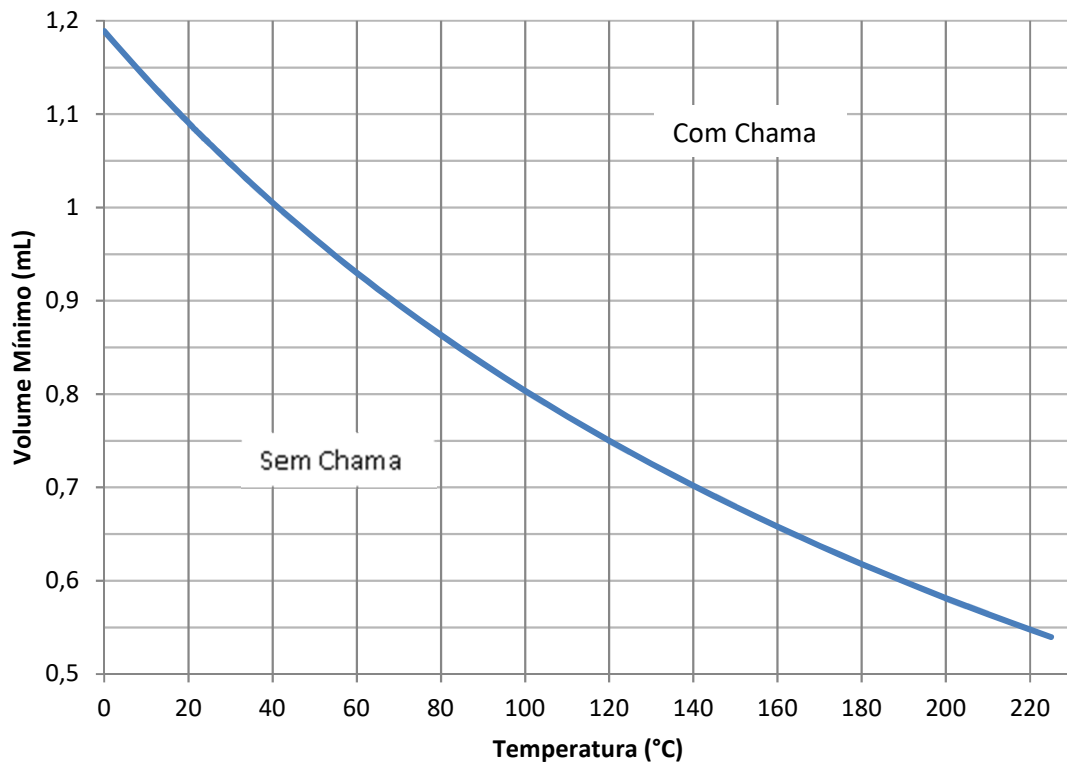
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 42: Volume máximo de farnesano em diferentes volumes de teste (1atm)



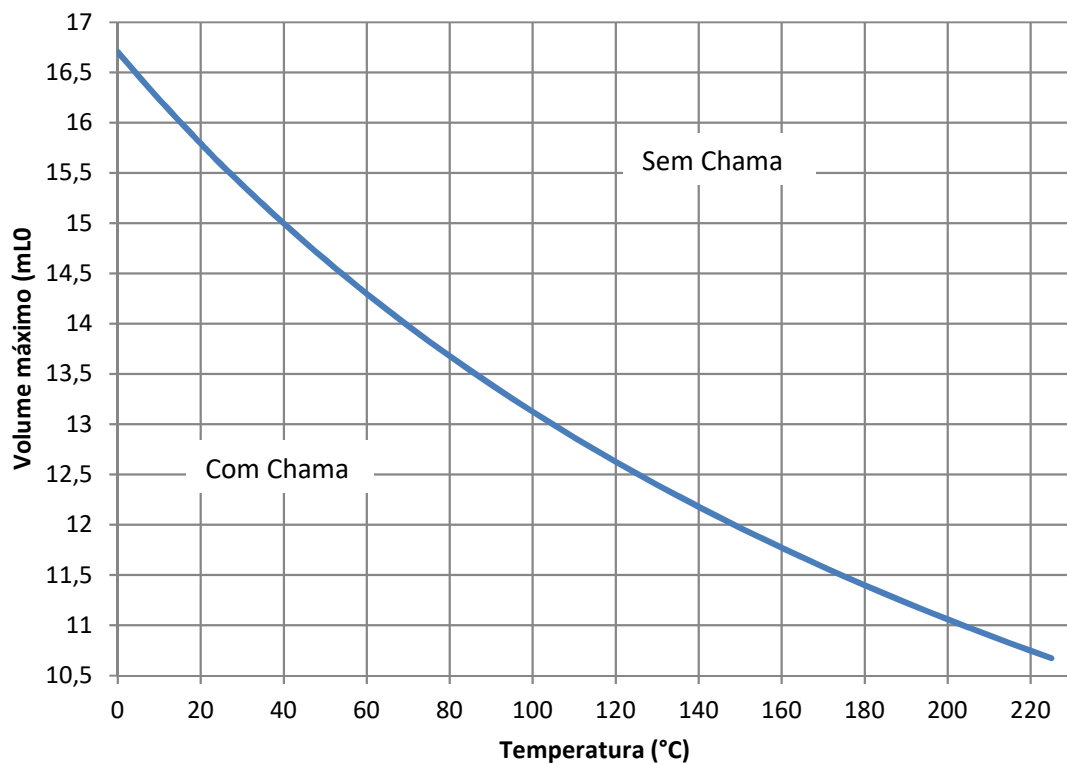
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43: Volume mínimo do farnesano vs temperatura (1 atm – 20,716 L)



Fonte: Produção do próprio autor

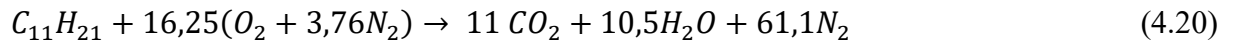
Figura 44: Volume máximo do Farnesano vs temperatura (1 atm – 20,176 L)



Fonte: Produção do próprio autor

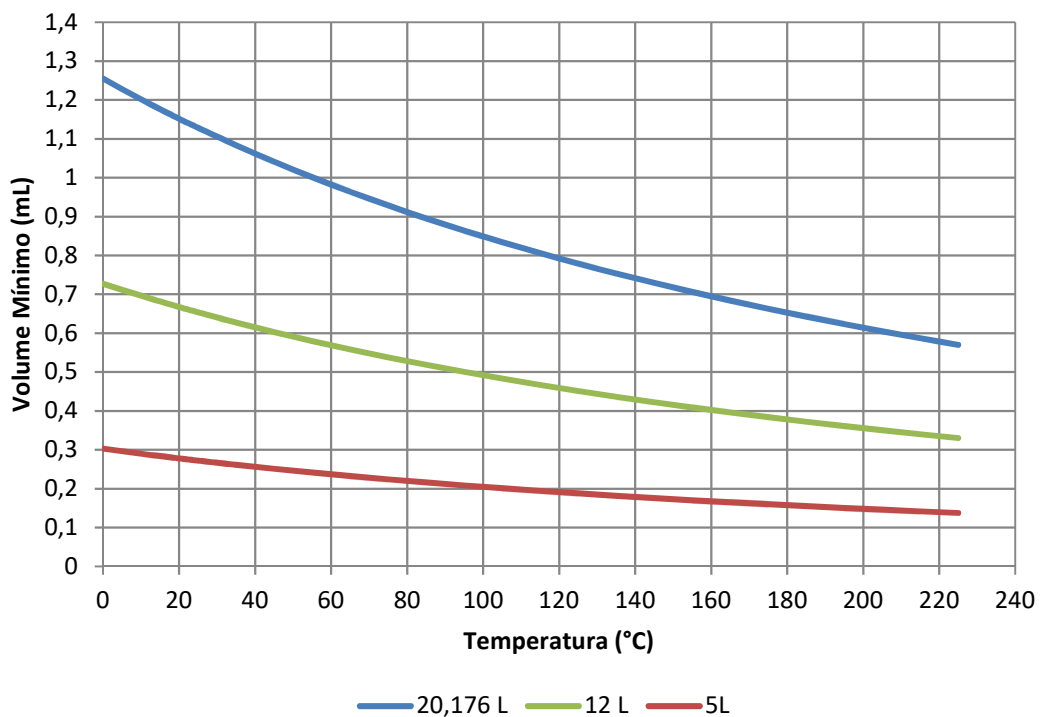
4.9.2 QAV

De acordo com Chong; Hochgreb (2011), a fórmula molecular aproximada do QAV é $C_{11}H_{21}$, portanto, a reação de combustão estequiométrica do QAV é dada pela equação (4.20).



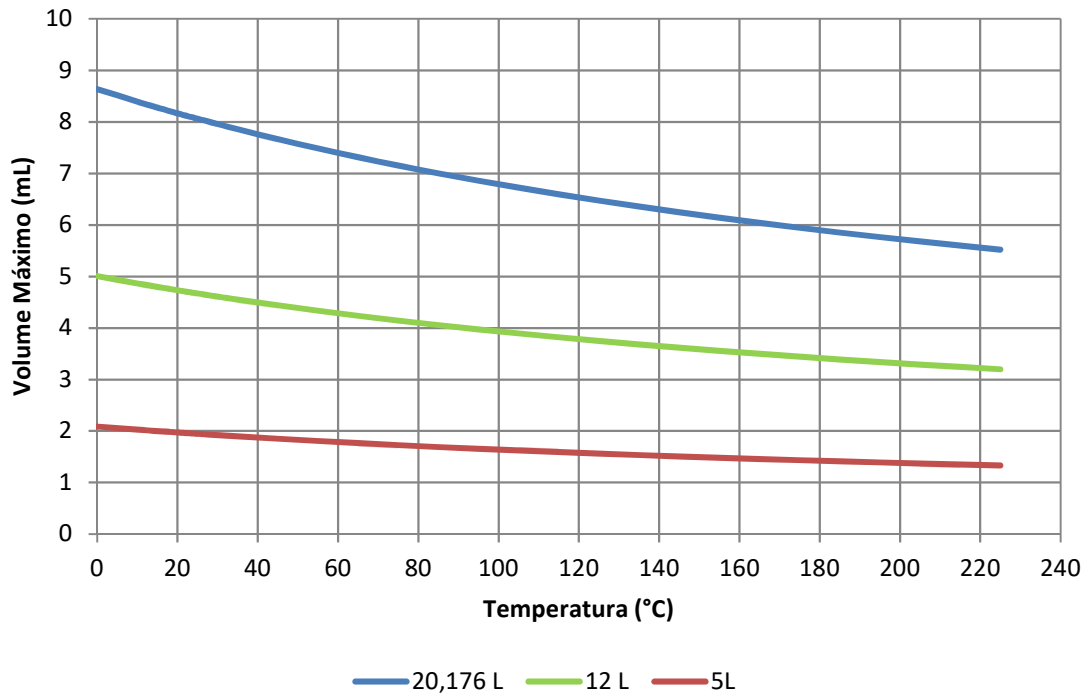
O método para o QAV é análogo ao farnesano. As Figuras 45 e 46 ilustram os volumes de QAV para diferentes volumes da norma ASTM E681 a pressão de 1 atm. As figuras 47 e 48 apresentam os volumes mínimo e máximo do QAV em diferentes temperaturas respectivamente.

Figura 45: Volume mínimo de QAV em diferentes volumes de teste (1atm)



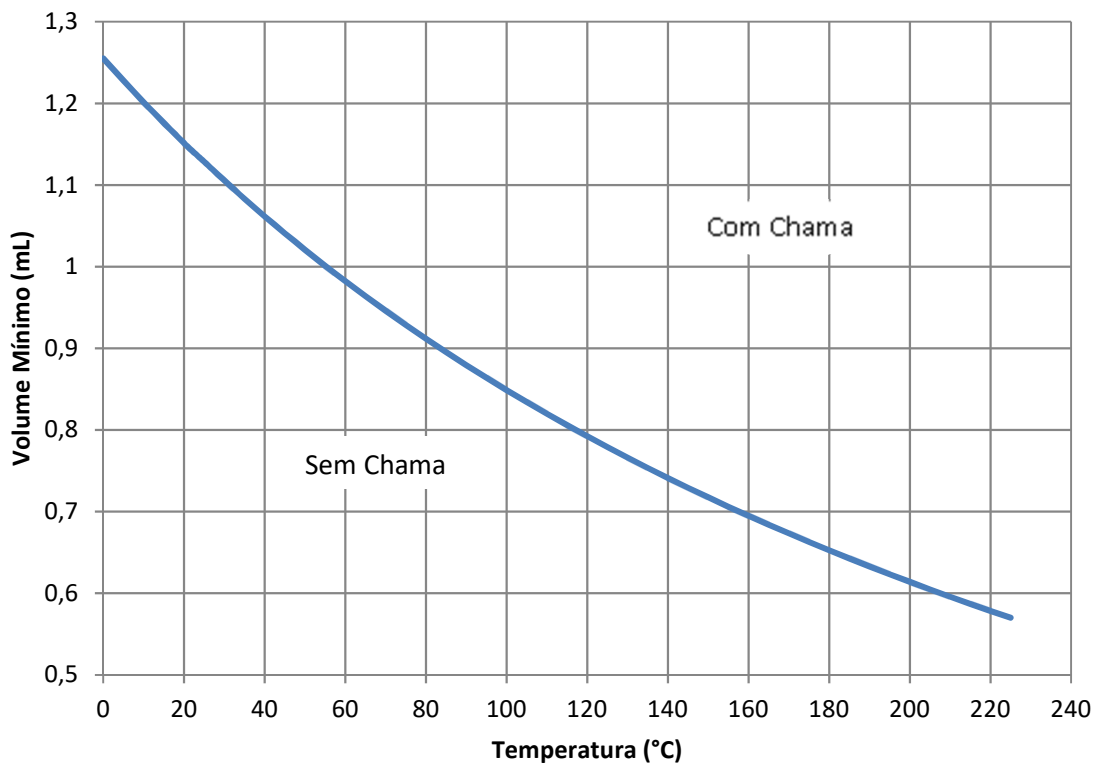
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 46: Volume máximo de QAV em diferentes volumes de teste (1atm)



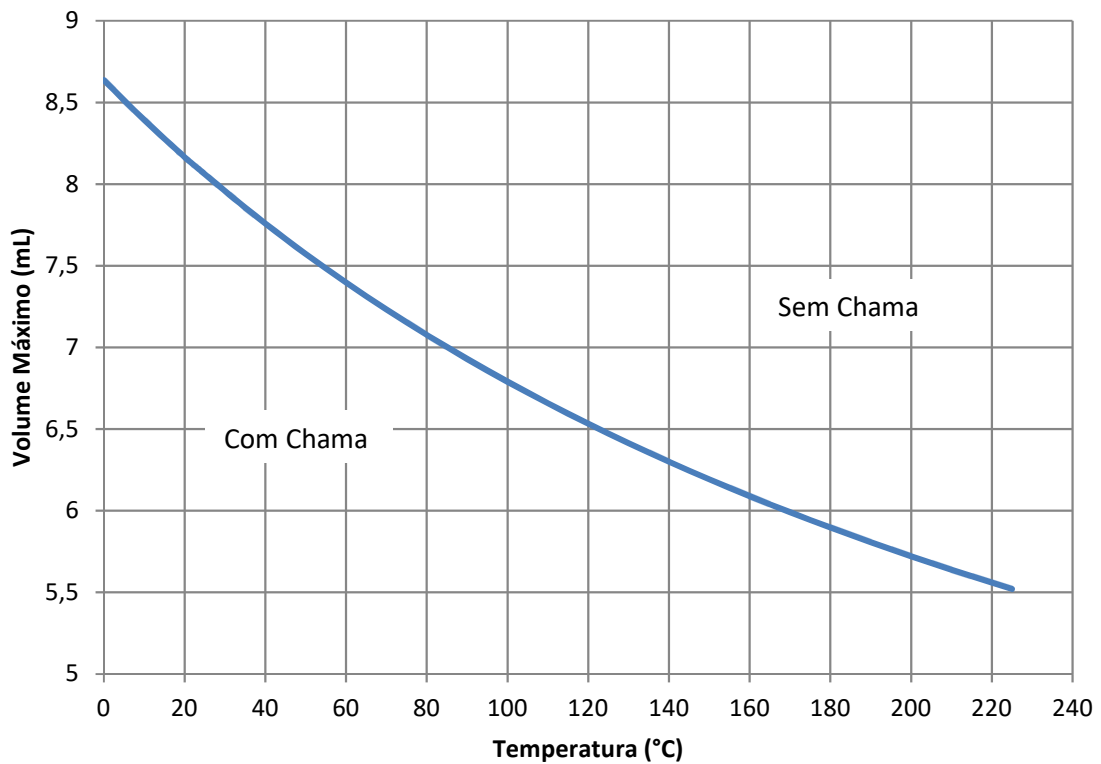
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 47: Volume mínimo de QAV vs temperatura (1 atm – 20,716 L)



Fonte: Produção do próprio autor

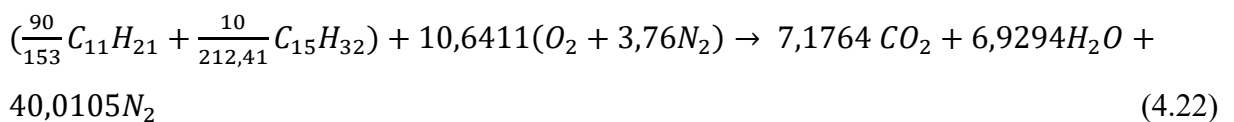
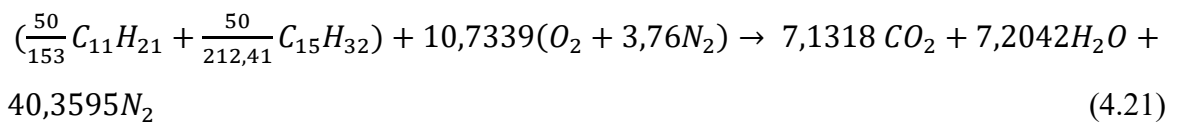
Figura 48: Volume máximo de QAV vs temperatura (1 atm – 20,716 L)



Fonte: Produção do próprio autor

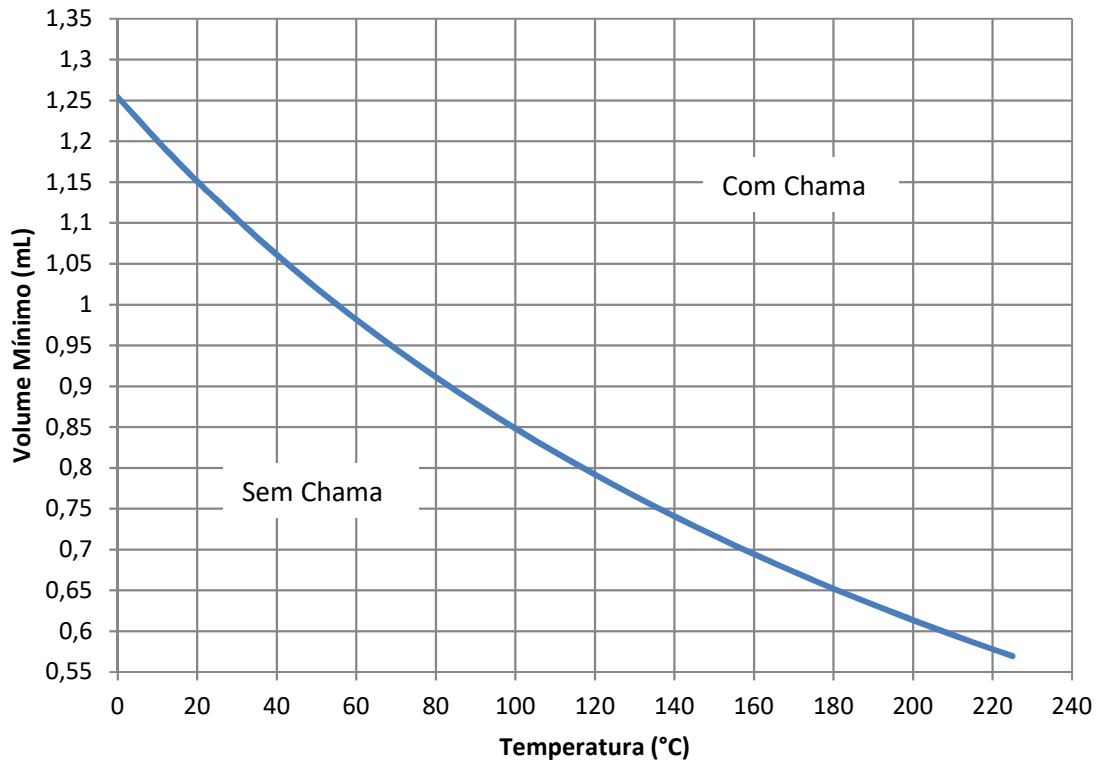
4.9.3 Mistura - F50 e F10

A equação de combustão estequiométrica para o F50 e para o F10 é dada pelas equações (4.21) e (4.22), respectivamente.



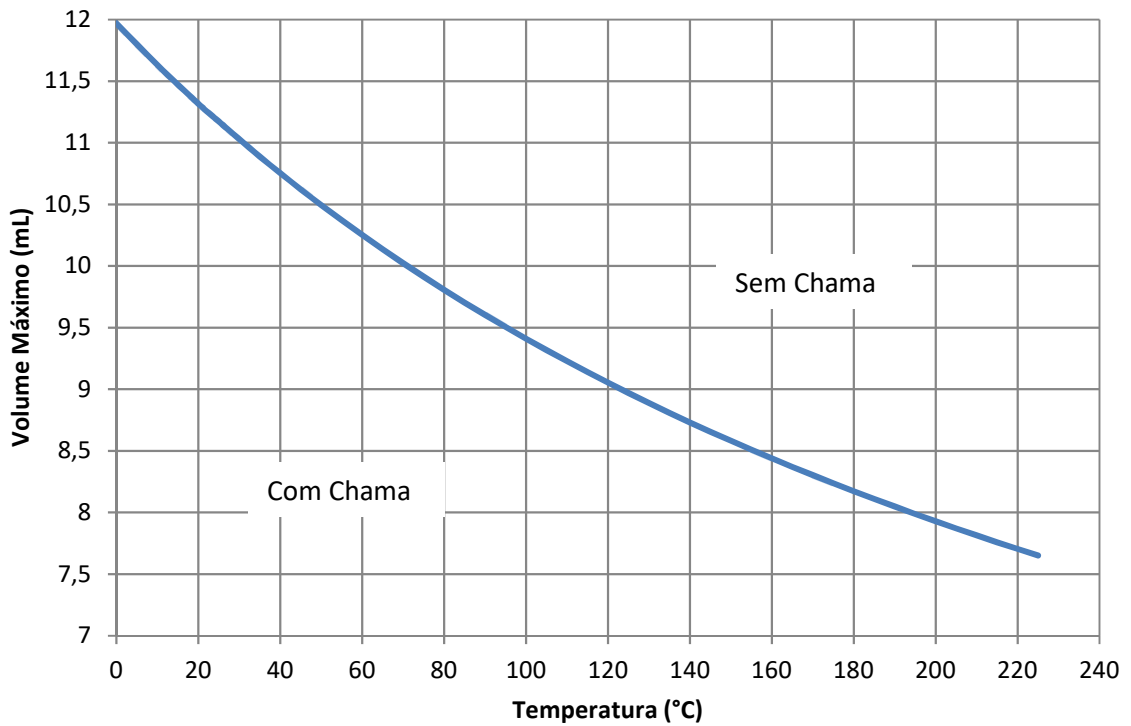
As Figuras 49 e 50 ilustram os volumes mínimo e máximo de F50, respectivamente. As Figuras 51 e 52 apresentam os volumes mínimo e máximo de F10, respectivamente.

Figura 49: Volume mínimo de F50 vs temperatura (1 atm – 20,716 L)



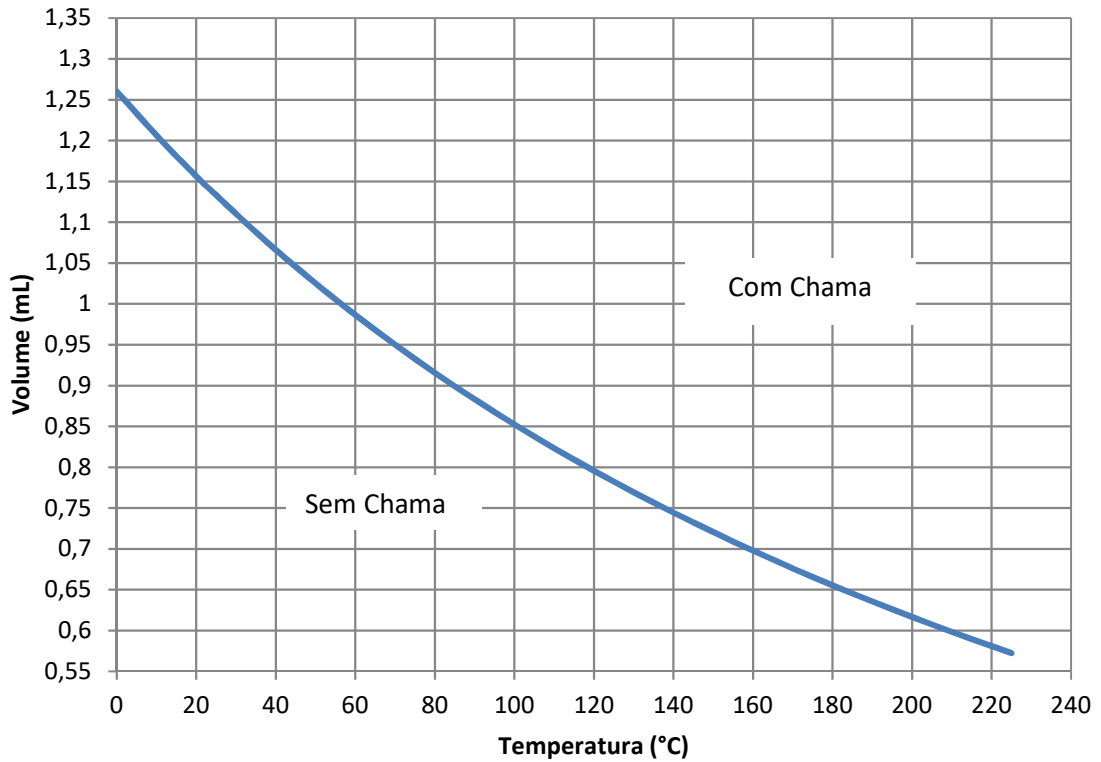
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 50: Volume máximo de F50 vs temperatura (1 atm – 20,716 L)



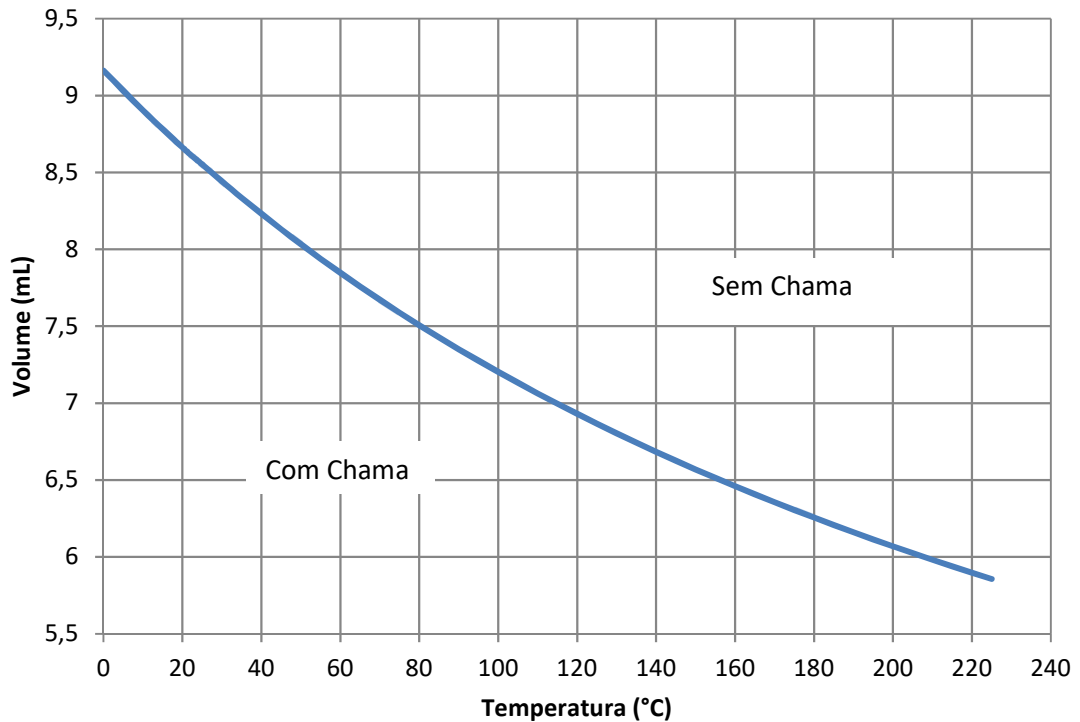
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 51: Volume mínimo de F10 vs temperatura (1atm- 20,716 L)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 52: Volume máximo de F10 vs temperatura (1 atm – 20,716 L)



Fonte: Produção do próprio autor

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse capítulo, primeiramente é apresentado como foi realizada a aquisição dos dados experimentais da bancada de ensaios. Depois são apresentados os resultados dos testes para determinação dos limites de inflamabilidade do Farnesano, QAV e suas misturas (10% e 50% em massa). O procedimento é realizado seguindo a norma ASTM E681 que utiliza de critério visual de propagação de chama. Também são gerados gráficos de temperatura por porcentagem de volumes para análise dos resultados posteriores.

5.1 REGISTRO DE DADOS

O registro de dados foi obtido manualmente. O registro leva em conta os seguintes fatores: tipo de combustível, data, pressão, temperatura, volume, hora e se houve inflamabilidade ou não. A Tabela 13 apresenta o modelo da folha de registro de dados do teste 130 como exemplo.

Tabela 13: Registro Manual de Dados – Teste 130

F50	Nº 130
Data	03/11/2017
Pressão, kPa	60
Temperatura, °C	155
Volume, mL	0,5
Hora	16:14
Inflamabilidade	Sim

Fonte: Produção do próprio autor

5.2 CORREÇÃO DE VOLUME PARA PORCENTAGEM A PARTIR DO RESULTADO EXPERIMENTAL

A correção dos volumes inseridos na câmara para porcentagem é definida como segue na Eq. 5.1.

$$LI = \frac{n^{\circ} \text{ de mols da amostra}}{n^{\circ} \text{ de mols de gás no recipiente}} \times 100\% = \frac{v \cdot \rho}{MW} \frac{1}{\left(\frac{V}{22.4}\right) \left(\frac{P}{P_0}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)} \times 100 \quad (5.1)$$

v é o volume da amostra, cm^3 ; ρ é a massa específica da amostra, g/cm^3 ; MW é massa molar do combustível, g/mol ; p é a pressão de teste, mmHg, T temperatura inicial, K; p_0 é pressão atmosférica padrão e T_0 é a temperatura padrão.

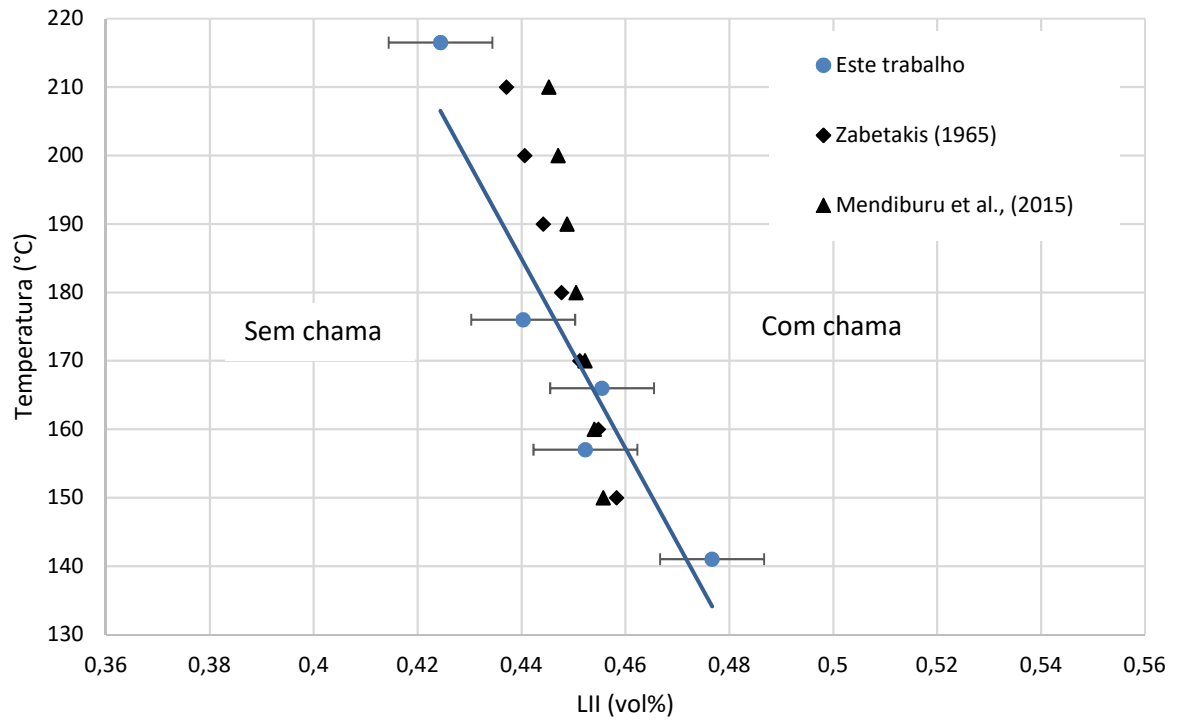
5.3 LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDADE

5.3.1 Pressão atmosférica

Foram realizados para a pressão atmosférica padrão o total de 87 testes. Os resultados possuem uma inclinação diferente do que o modelo teórico. Alguns testes foram feitos a temperatura entre 100 e 110°C, porém não houve total evaporação do farnesano sendo assim não válidos, portanto os testes restantes foram realizados a partir da temperatura inicial de 140°C, para a segurança de que o farnesano esteja completamente evaporado.

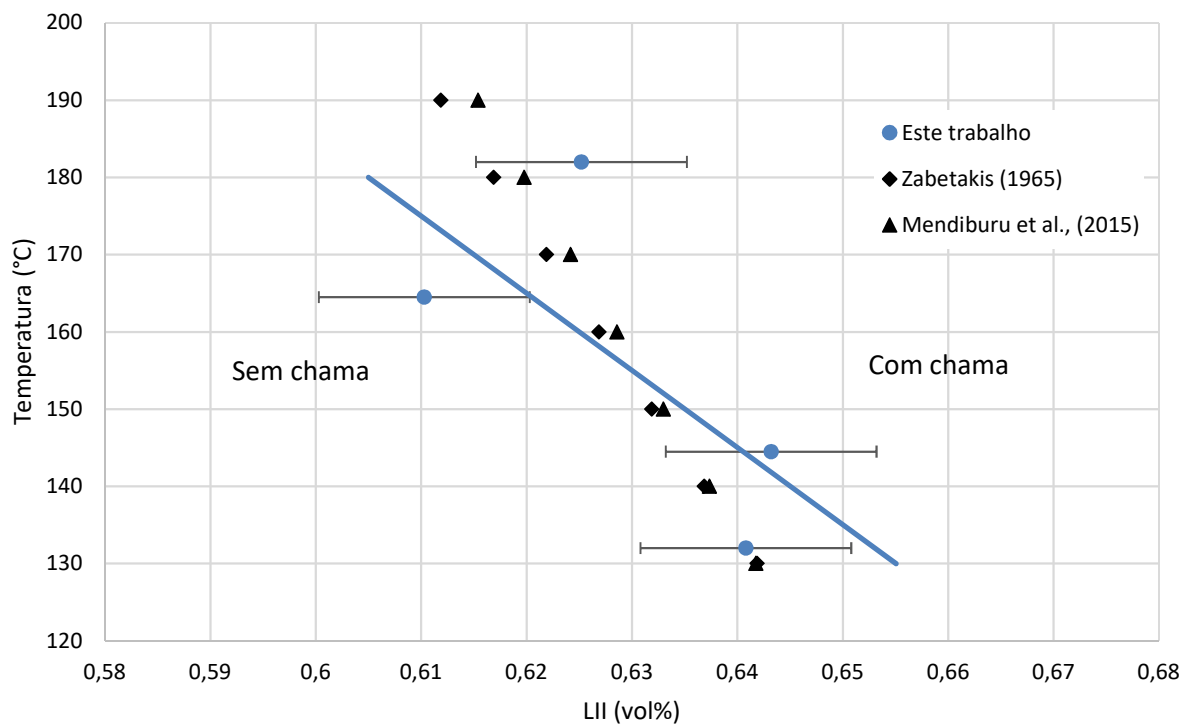
Foi utilizada para realização dos testes uma seringa hipodérmica de 1 mL com escala de 0,02 mL, portanto a resolução da medida é de $\pm 0,01$ mL. As Figuras 53, 54, 55, 56 apresentam os resultados experimentais do LII do farnesano e misturas, e a comparação com as curvas teóricas dadas por Zabestakis (1965) e Mendiburu *et al.* (2015). Por outro lado, a Tabela 14 apresenta de forma tabular os resultados. No Apêndice A são apresentados os volumes de combustível introduzido na câmara de inflamabilidade nos testes realizados a pressão atmosférica padrão (Tabela 14a).

Figura 53: Limite inferior de inflamabilidade do farnesano – 101,3 kPa



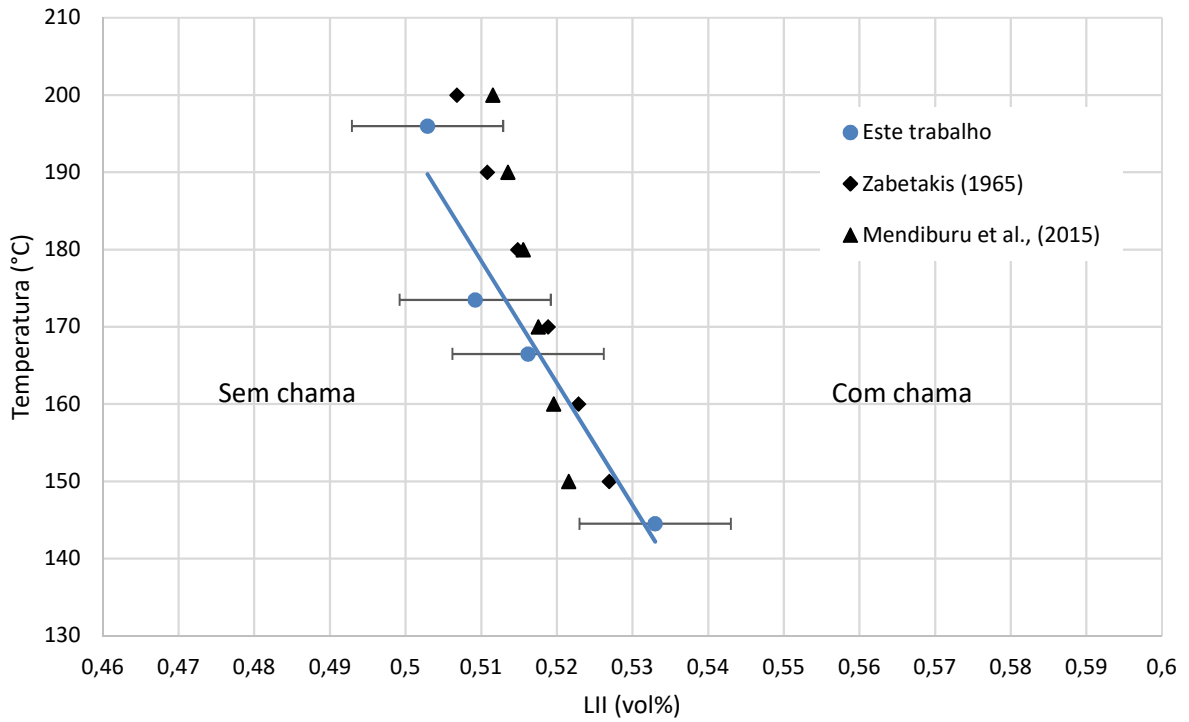
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 54: Limite inferior de inflamabilidade do QAV – 101,3 kPa



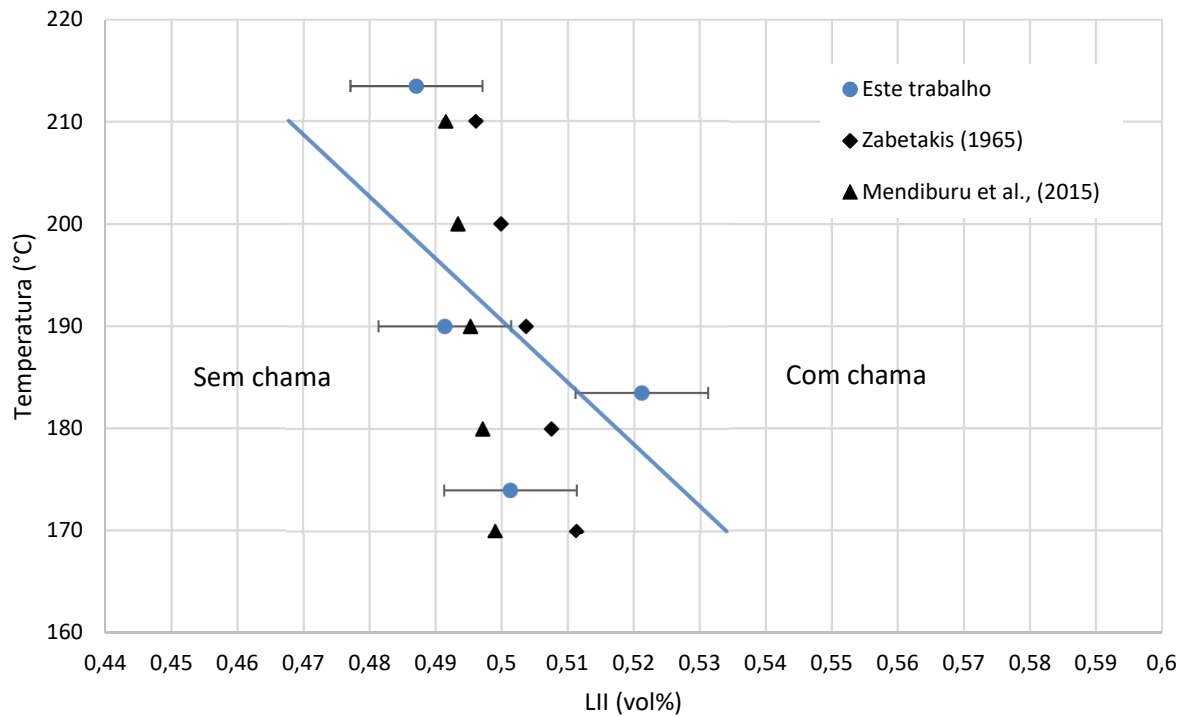
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 55: Limite inferior de inflamabilidade de F50 – 101,3 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 56: Limite inferior de inflamabilidade de F10 – 101,3 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 14: LII – 101,3 kPa

Farnesano – 101,3 kPa		QAV – 101,3 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
157	0,4523	132	0,6408
166	0,4555	144,5	0,6432
176	0,4403	164,5	0,6103
141	0,4767	182	0,6252
216,5	0,4244		
F50- 101,3 kPa		F10- 101,3 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
144,5	0,533	174	0,5013
166,5	0,5162	183,5	0,5211
173,5	0,5092	190	0,4914
196	0,5029	213,5	0,4871

Fonte: Produção do próprio autor

5.3.2 Pressões reduzidas

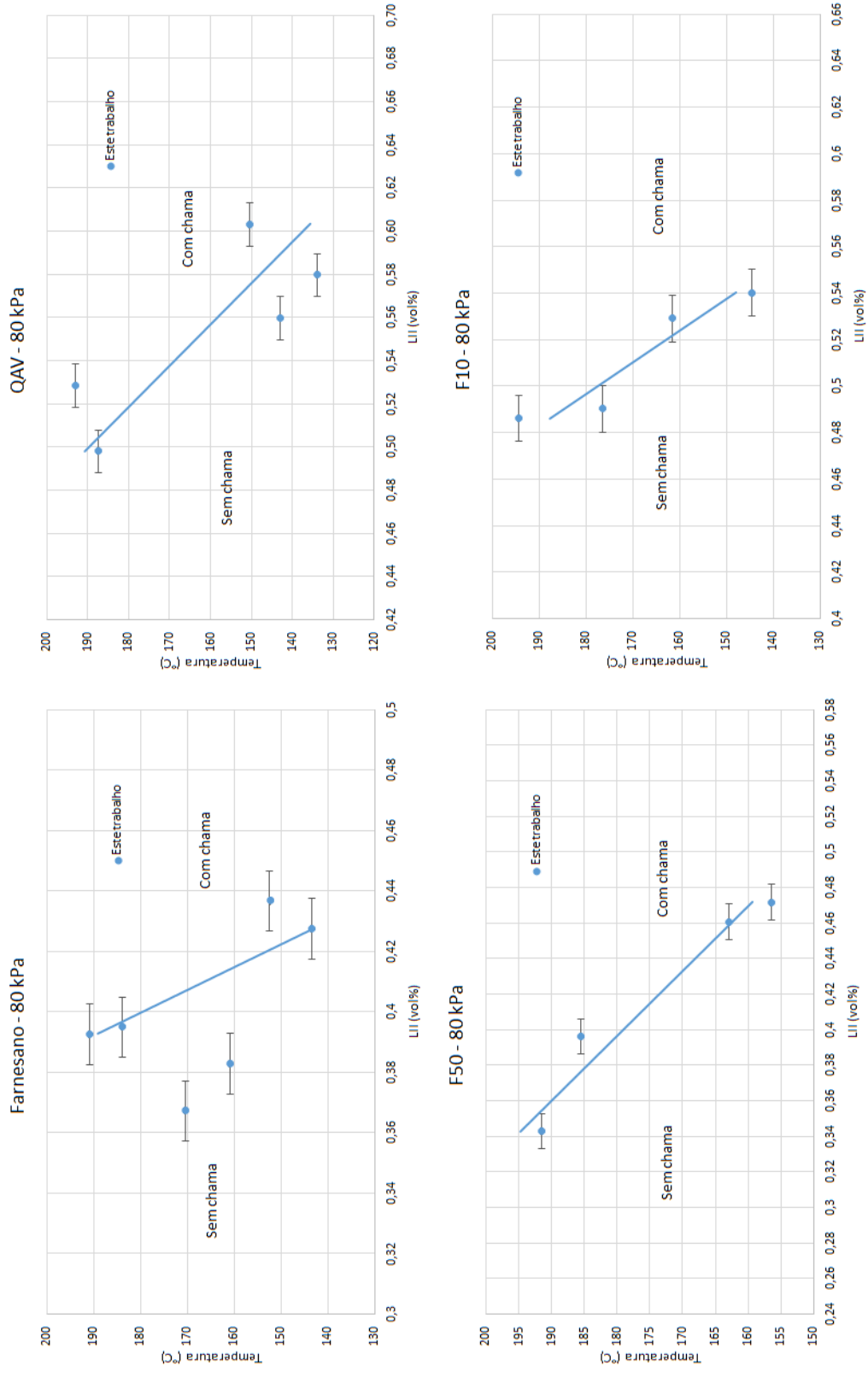
Para pressões reduzidas de 80, 60, 40 e 20 kPa foram realizados 269 testes. Todos os testes iniciaram a uma temperatura de 140°C para ter sucesso na evaporação da amostra no processo de admissão de combustível no recipiente de teste. Os resultados experimentais são apresentados em forma gráfica, Figuras 57, 58, 59, 60 e tabular, Tabelas 15,16,17,18. Os dados de volume inserido no recipiente de teste são dados no Apêndice A (Tabela (15a, 16a, 17a, 18a)).

Tabela 15: LII - 80 kPa

Farnesano - 80 kPa		QAV - 80 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
143,5	0,4274	134	0,5796
152,5	0,4366	143	0,5595
161	0,3828	150,5	0,6031
170,5	0,3672	187,5	0,4979
184	0,3949	193	0,5284
191	0,3926		
F50- 80 kPa		F10- 80 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
156,5	0,4716	144,5	0,5401
163	0,4606	161,5	0,529
185,5	0,3962	176,5	0,4902
191,5	0,3428	194,5	0,4861

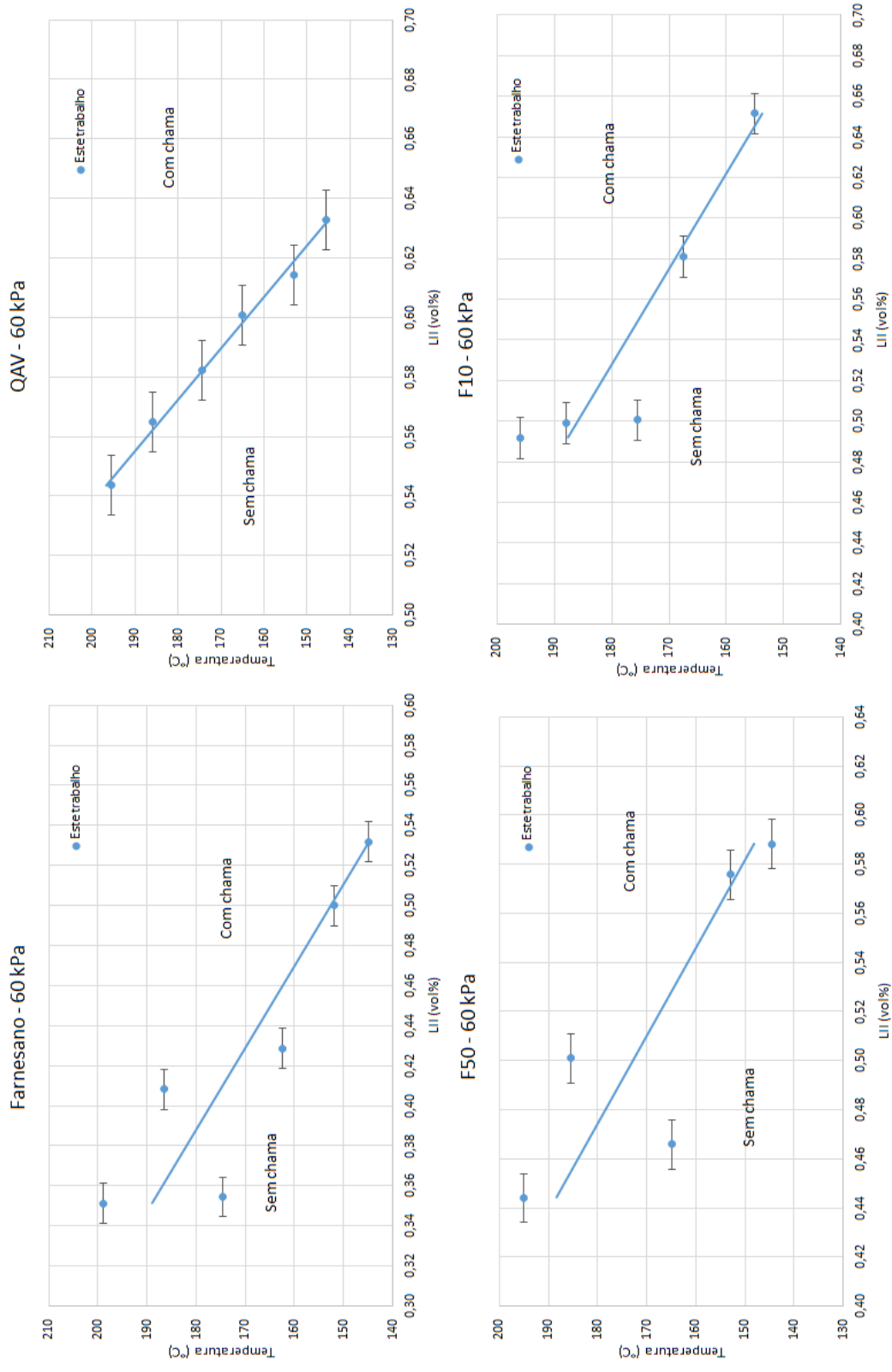
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 57: Limite inferior de inflamabilidade - 80 kPa



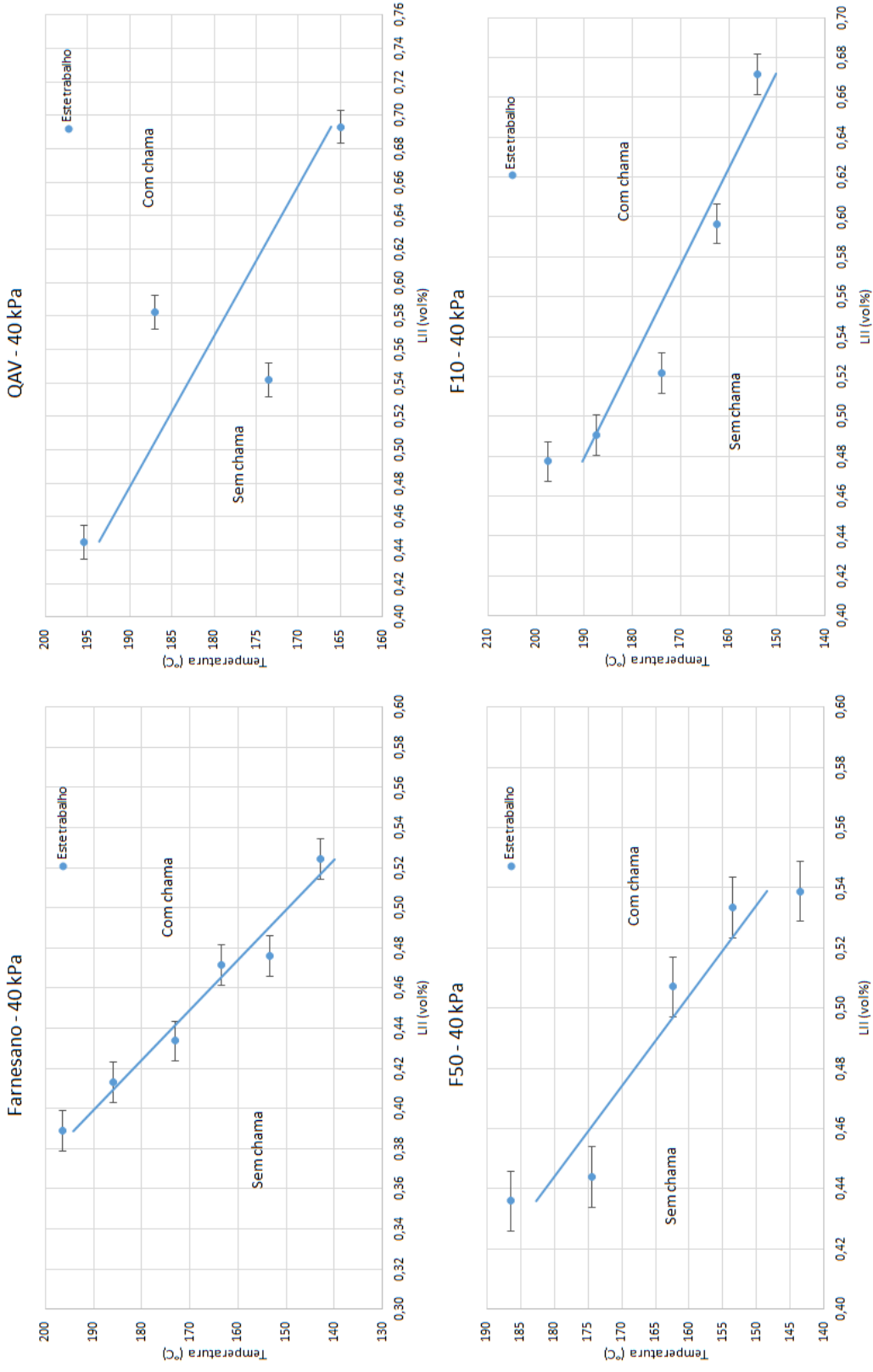
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 58: Limite inferior de inflamabilidade – 60 kPa



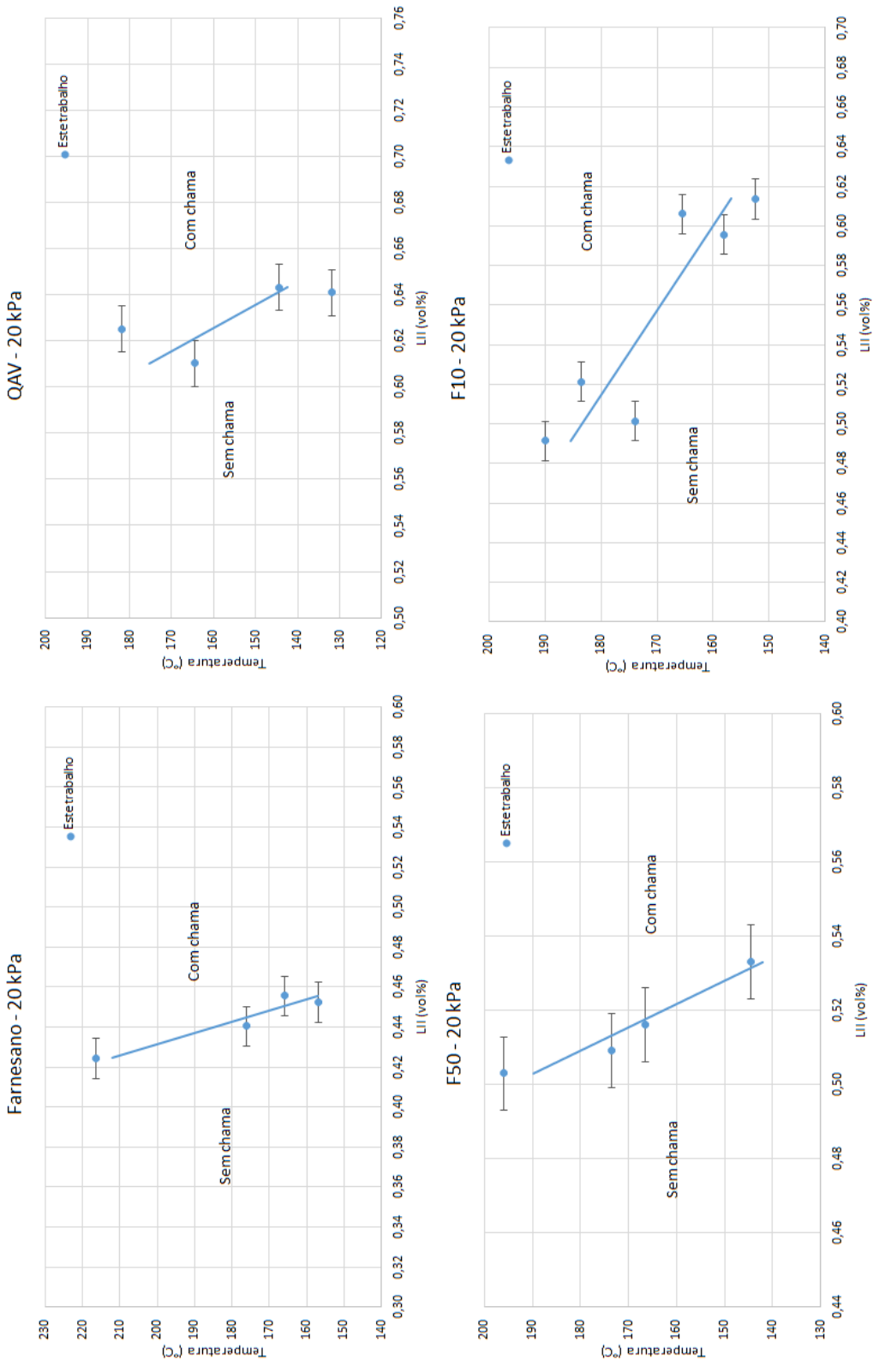
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 59: Limite inferior de inflamabilidade - 40 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 60: Limite inferior de inflamabilidade – 20 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 16: LII – 60 kPa

Farnesano - 60 kPa		QAV - 60 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
145	0,5318	145,5	0,6327
152	0,4999	153	0,6141
162,5	0,4286	165	0,6006
174,5	0,3545	174,5	0,5822
186,5	0,4081	186	0,5648
199	0,3512	195,5	0,5436
F50- 60 kPa		F10- 60 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
144,5	0,5881	155	0,6514
153	0,5756	167,5	0,5810
165	0,4659	175,5	0,5006
185,5	0,5009	188	0,4989
195	0,4440	196	0,4917

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 17: LII – 40 kPa

Farnesano - 40 kPa		QAV - 40 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
143	0,5243	165	0,6930
153,5	0,4761	173,5	0,5416
163,5	0,4715	187	0,5823
173	0,4336	195,5	0,4448
186	0,4132		
196,5	0,3888		
F50- 40 kPa		F10- 40 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
143,5	0,5388	154	0,6715
153,5	0,5334	162,5	0,5965
162,5	0,5071	174	0,5216
174,5	0,4438	187,5	0,4906
186,5	0,4359	197,5	0,4774

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 18: LII – 20 kPa

Farnesano - 20 kPa		QAV - 20 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
157	0,4523	132	0,6408
166	0,4555	144,5	0,6432
176	0,4403	164,5	0,6103
216,5	0,4244	182	0,6252
F50- 20 kPa		F10- 20 kPa	
T (°C)	LII (vol%)	T (°C)	LII (vol%)
144,5	0,533	152,5	0,6135
166,5	0,5162	158	0,5956
173,5	0,5092	165,5	0,6059
196	0,5029	174	0,5013
		183,5	0,5211
		190	0,4914

Fonte: Produção do próprio autor

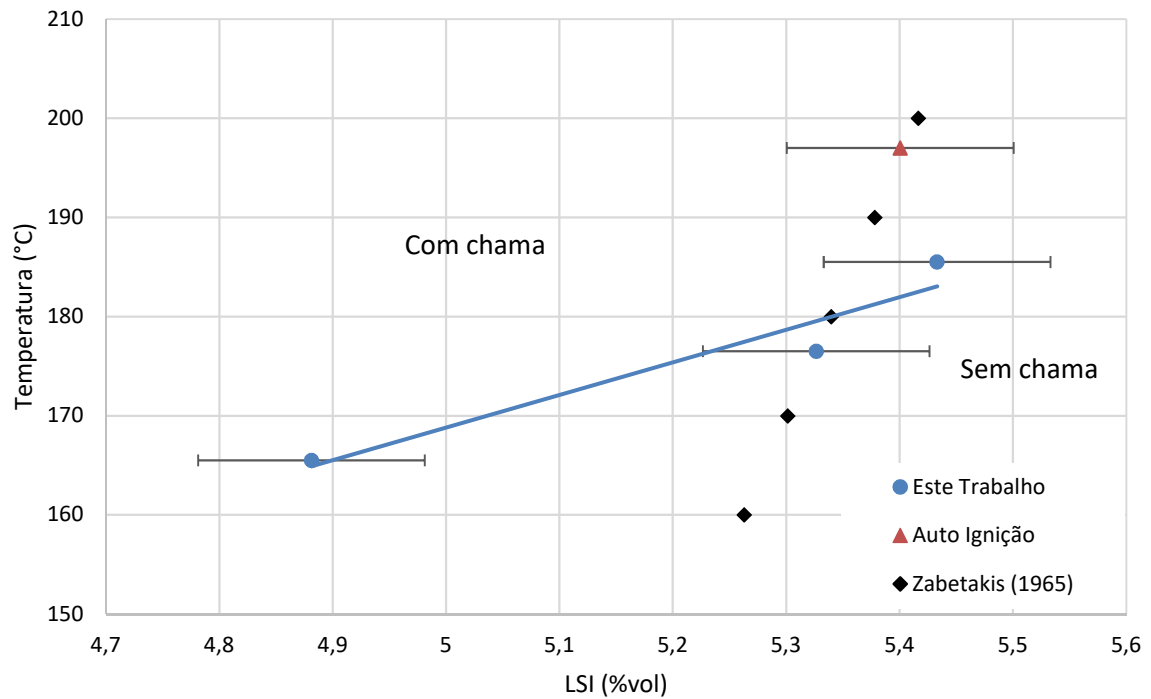
5.4 LIMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDADE

5.4.1 Pressão Atmosférica

Foram realizados para o limite superior de inflamabilidade a pressão atmosférica padrão um total de 64 testes, nos quais 43 serão utilizados para análise no próximo capítulo. Os resultados são satisfatórios, mas as curvas possuem maior inclinação e estão deslocados em relação a curva teórica. Um detalhe interessante que vale a pena ser comentado é o teste N° 636 realizado na temperatura de 197°C e com um volume de 8mL, antes de realizar a ignição padrão ocorreu a autoignição do farnesano, com a quebra do frasco de testes o que limitou os testes para o farnesano a temperatura de 190°C. O frasco foi trocado e a câmara está pronta para a realização de futuros testes.

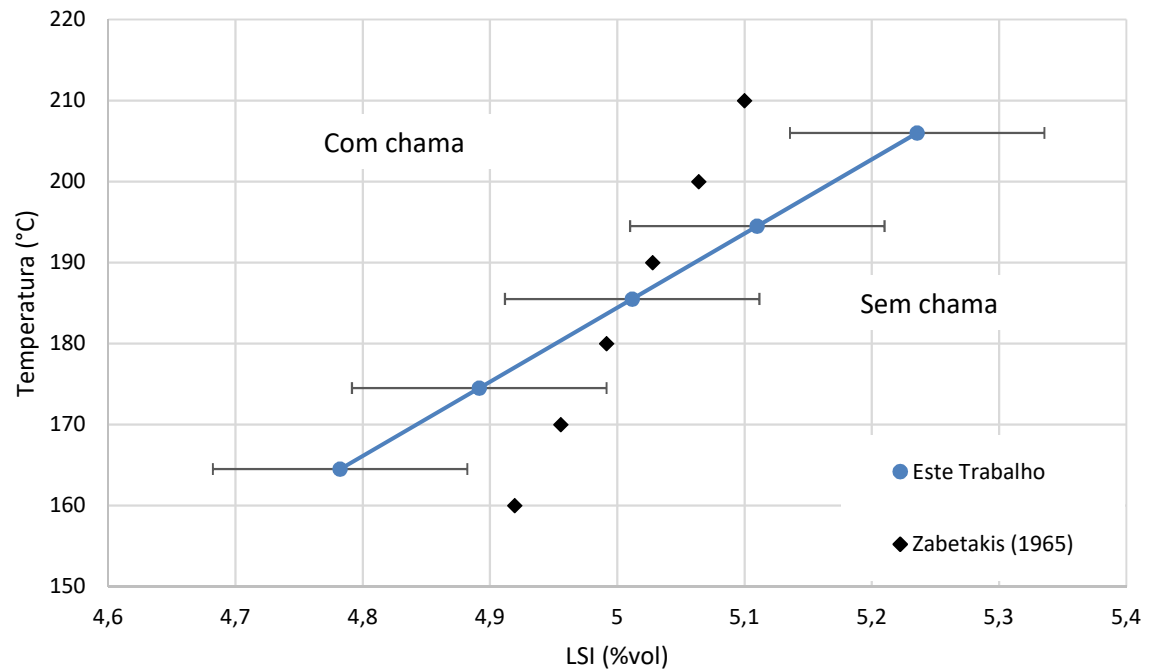
A resolução das medidas de volume inserido no frasco é de $\pm 0,1$ mL As Figuras 61 a 64 apresentam os gráficos de temperatura por porcentagem de volume dos resultados obtidos. A Tabela 19 apresenta o resultado em forma tabular para o LSI. No Apêndice A é apresentado os dados de volume das amostras inseridas no frasco de 20,716L para 101,3 kPa (Tabela 19a).

Figura 61: Limite superior de inflamabilidade de Farnesano – 101,3 kPa



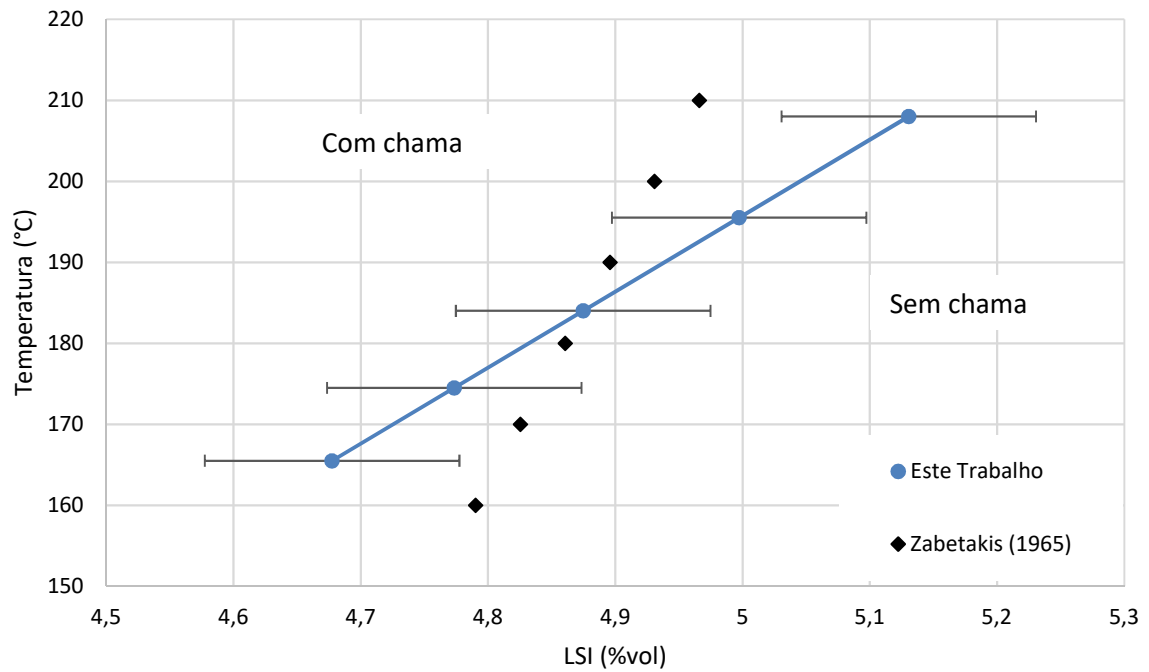
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 62: Limite superior de inflamabilidade de QAV – 101,3 kPa



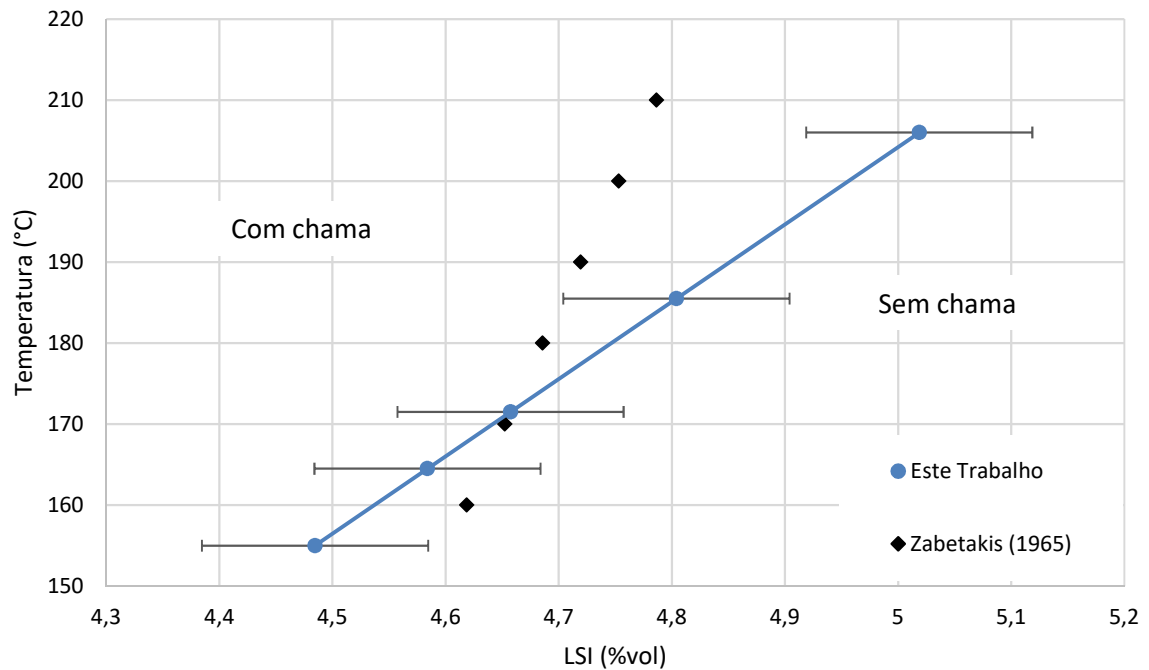
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 63: Limite superior de inflamabilidade do F50 – 101,3 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 64: Limite superior de inflamabilidade do F10 – 101,3 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 19: LSI - 101,3 kPa

Farnesano - 101,3 kPa		QAV - 101,3 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
165,5	4,881	164,5	4,782
176,5	5,327	174,5	4,891
185,5	5,433	185,5	5,012
		194,5	5,110
197	5,401	206	5,236
F50- 101,3 kPa		F10- 101,3 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
165,5	4,678	155	4,485
174,5	4,773	164,5	4,584
184	4,875	171,5	4,657
195,5	4,997	185,5	4,804
208	5,131	206	5,019

Fonte: Produção do próprio autor

5.4.2 Pressões Reduzidas

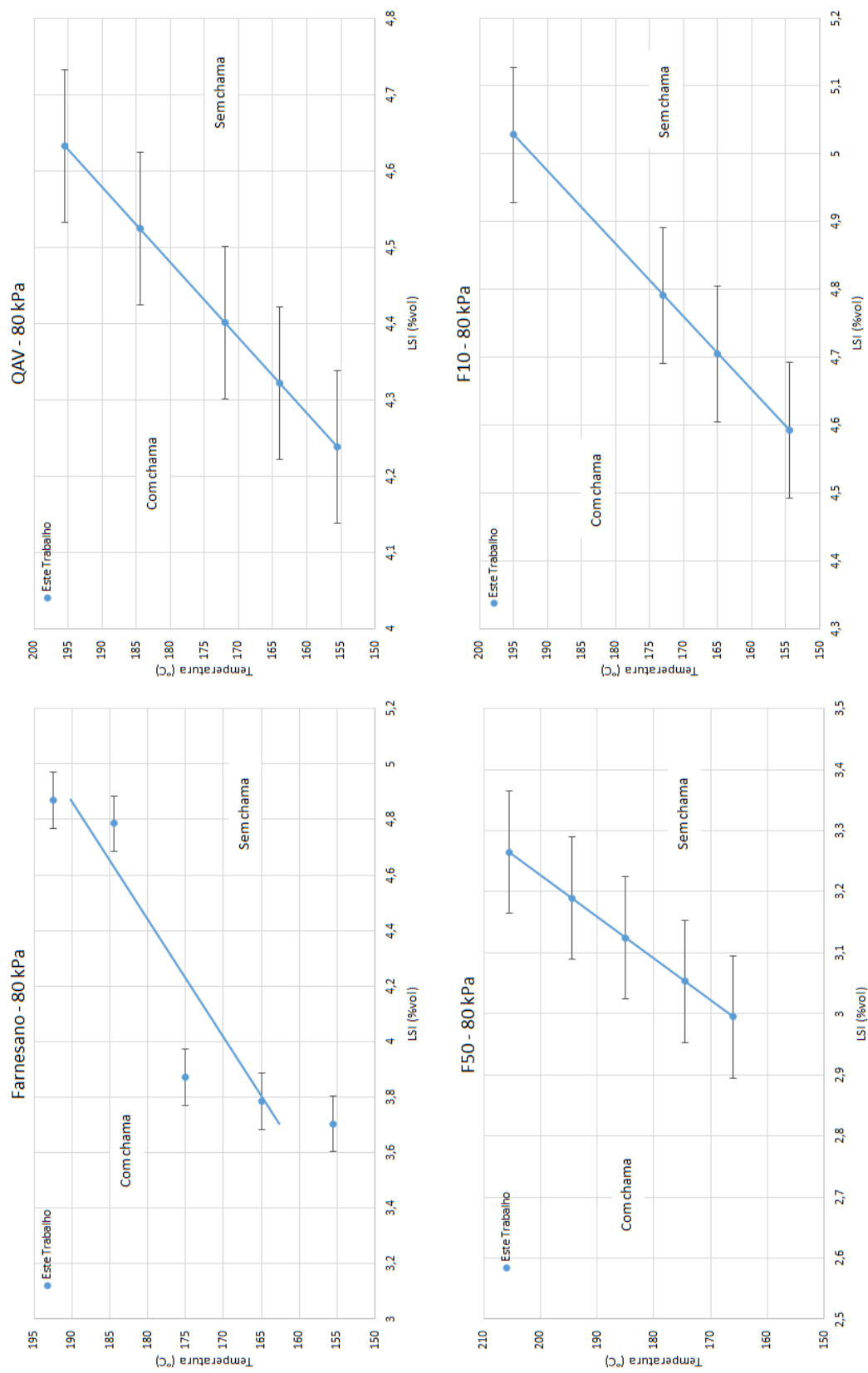
Foram realizados para o limite superior de inflamabilidade em pressões reduzidas um total de 204 testes, nos quais 182 serão utilizados para a análise no próximo capítulo. As figuras 65, 66, 67, 68 apresentam as curvas dos resultados experimentais e as tabelas de 20, 21, 22, 23 apresentam o LSI. No Apêndice A são apresentados os dados de volume de combustível inserido em cada teste realizado (Tabelas 20a, 21a, 22a, 23a).

Tabela 20: LSI - 80 kPa

Farnesano - 80 kPa		QAV - 80 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
155,5	3,703	155,5	4,237
165	3,785	164	4,321
175	3,871	172	4,401
184,5	4,786	184,5	4,524
192,5	4,869	195,5	4,633
F50- 80 kPa		F10- 80 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
166	2,995	154,5	4,593
174,5	3,053	165	4,705
185	3,125	173	4,791
194,5	3,189	195	5,028
205,5	3,264		

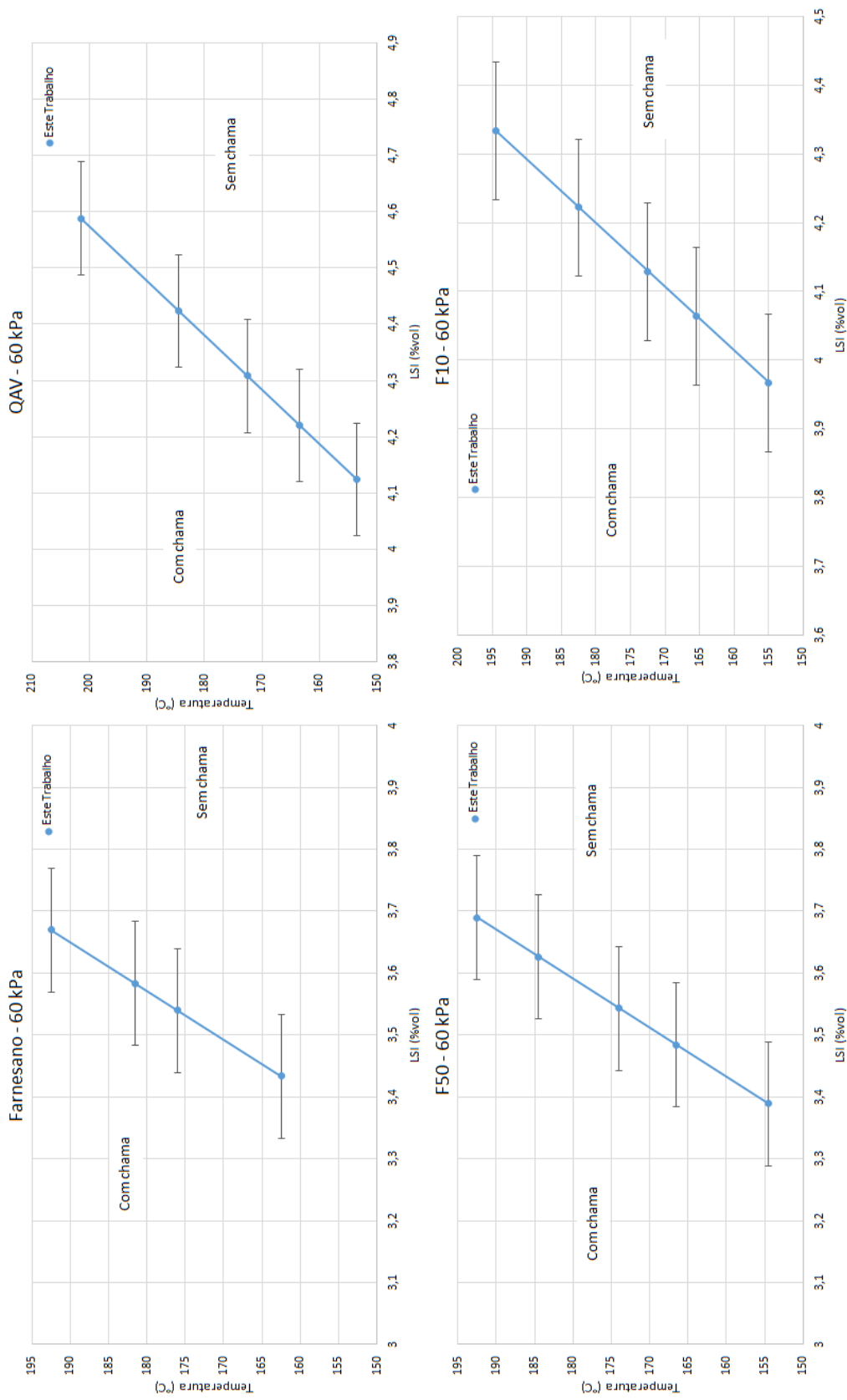
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 65: Limite superior de inflamabilidade – 80 kPa



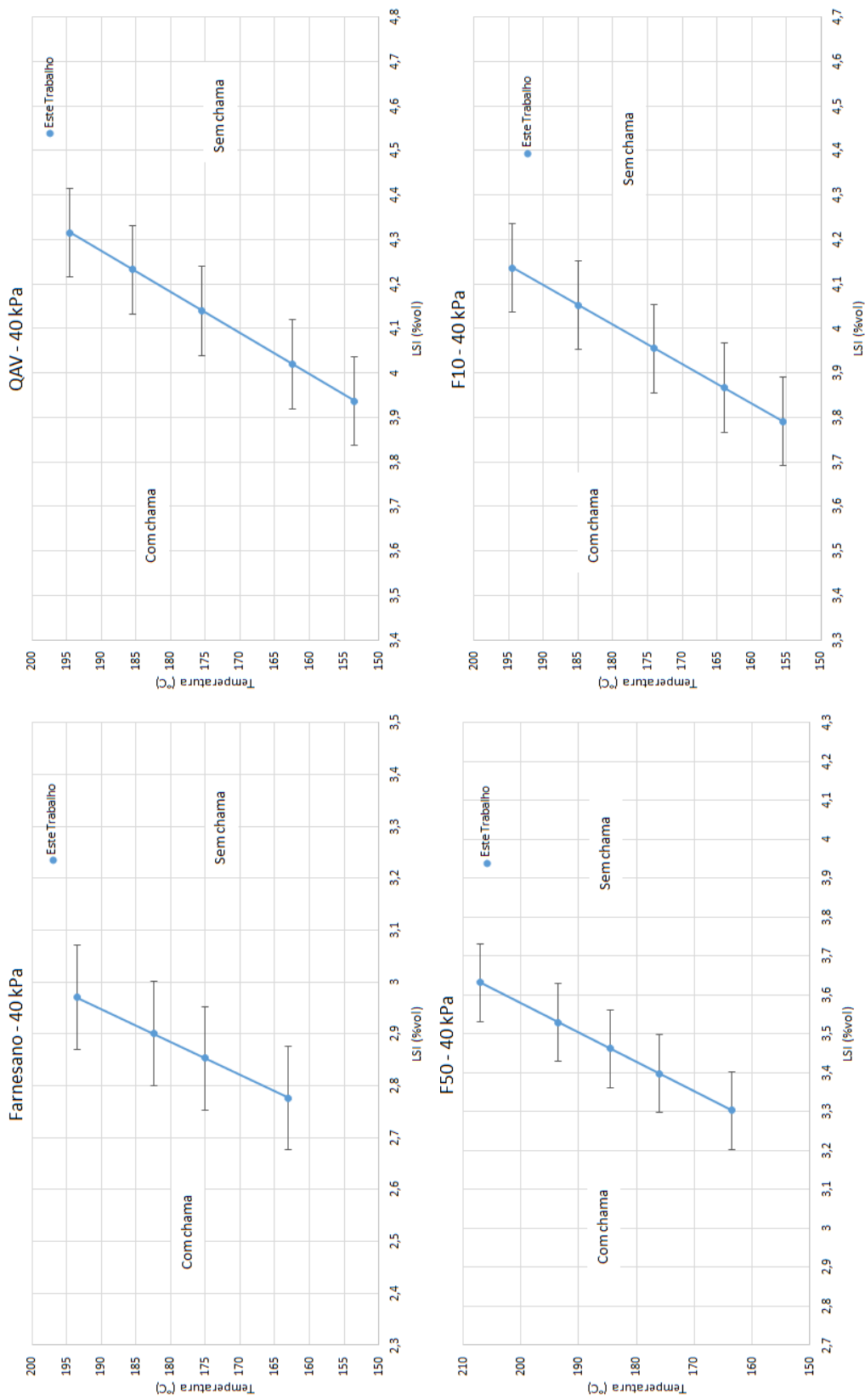
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 66: Limite superior de inflamabilidade – 60 kPa



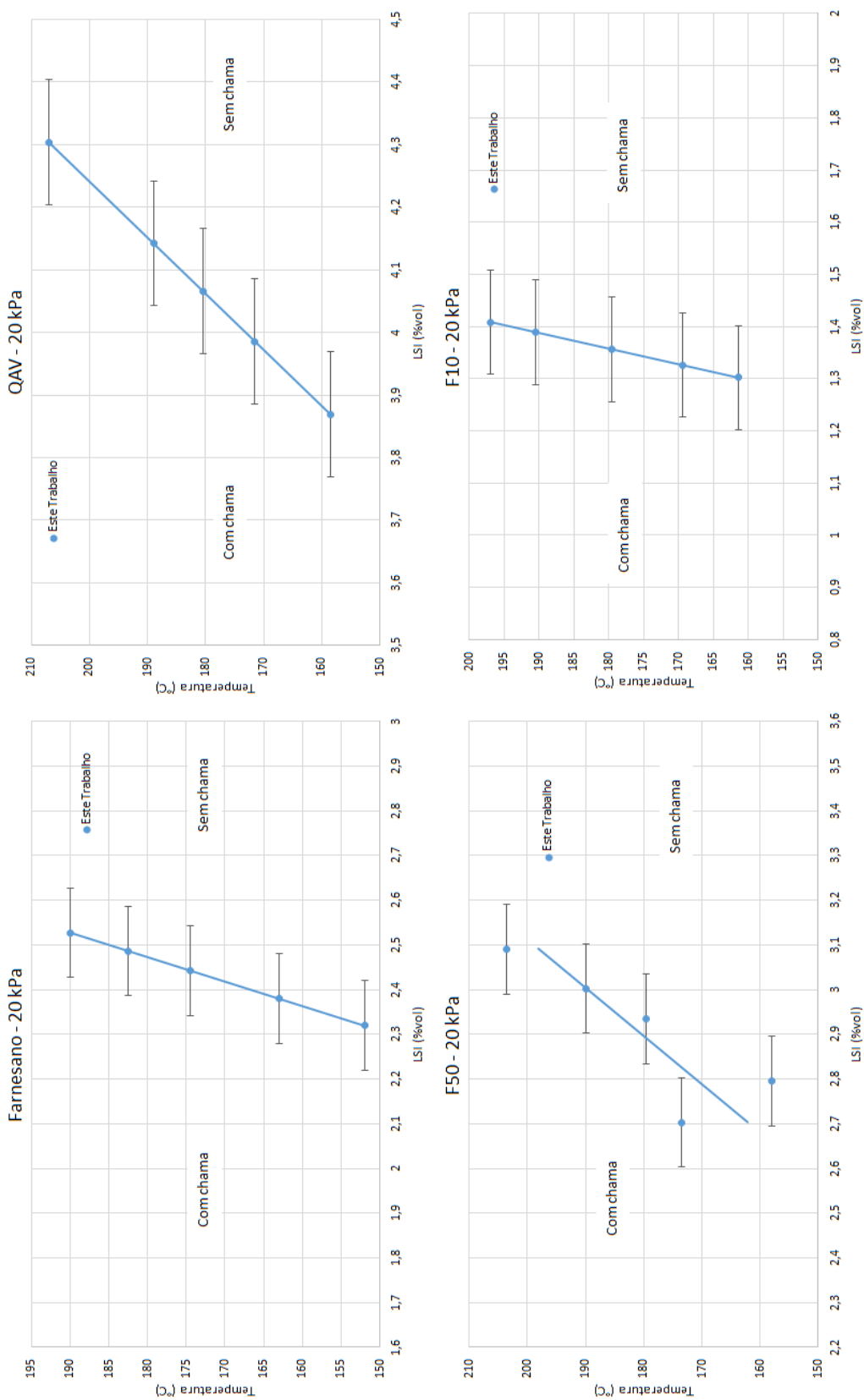
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 67: Limite superior de inflamabilidade – 40 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 68: Limite superior de inflamabilidade – 20 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 21: LSI - 60 kPa

Farnesano - 60 kPa		QAV - 60 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
162,5	3,433	153,5	4,124
176	3,540	163,5	4,221
181,5	3,583	172,5	4,308
192,5	3,670	184,5	4,424
		201,5	4,588
F50- 60 kPa		F10- 60 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
154,5	3,388	155	3,967
166,5	3,484	165,5	4,064
174	3,543	172,5	4,129
184,5	3,626	182,5	4,222
192,5	3,690	194,5	4,333

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 22: LSI - 40 kPa

Farnesano - 40 kPa		QAV - 40 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
163	2,776	153,5	3,9365
175	2,853	162,5	4,0195
182,5	2,900	175,5	4,1395
193,5	2,970	185,5	4,2318
		194,5	4,3148
F50- 40 kPa		F10- 40 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
163,5	3,303	155,5	3,791
176	3,397	164	3,866
184,5	3,461	174	3,955
193,5	3,529	185	4,052
207	3,632	194,5	4,136

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 23: LSI - 20 kPa

Farnesano - 20 kPa		QAV - 20 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
152	2,320	158,5	3,869
163	2,380	171,5	3,985
174,5	2,442	180,5	4,066
182,5	2,486	189	4,142
190	2,527	207	4,304
F50- 20 kPa		F10- 20 kPa	
T (°C)	LSI (vol%)	T (°C)	LSI (vol%)
158	2,795	161,5	1,302
173,5	2,703	169,5	1,326
179,5	2,934	179,5	1,356
190	3,003	190,5	1,389
203,5	3,090	197	1,408

Fonte: Produção do próprio autor

Foram apresentados neste capítulo os resultados experimentais dos testes realizados na bancada experimental para o limite de inflamabilidade inferior e superior do Farnesano, QAV-1, F50 e F10. No próximo capítulo será realizada a análise e discussão dos resultados experimentais, assim como deduções de equações para predição dos limites de inflamabilidade destes combustíveis.

6 ANÁLISE E DISCUSSÕES

Neste capítulo, será feito uma análise e discussão dos resultados experimentais obtidos e apresentados no capítulo anterior. São apresentadas equações para predição do LII e LSI a pressão atmosférica e para pressões reduzidas do farnesano, QAV, F50 e F10, apresentando os erros dessas novas equações. Finalmente, são apresentados os limites de inflamabilidade dos combustíveis testados em forma de gráficos de temperatura por porcentagem de volume.

6.1 LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDADE

6.1.1 Pressão atmosférica

Todos os pontos caracterizados como inflamáveis estiveram de acordo com a norma ASTM E681. Nas pressões de 101 e 80 kPa, os testes apresentaram um intenso ruído de detonação quando há propagação de chama. Diferentemente dos testes a pressões reduzidas (60, 40 e 20 kPa) as detonações não expulsavam a tampa do frasco, ocorria apenas o aumento de temperatura e pressão que caracterizam propagação de chama.

Dos resultados apresentados no Capítulo 5, nota-se que no caso do farnesano quando se eleva a temperatura há uma diminuição do LII nas pressões de 101,3, 80 e 60 kPa, não sendo comum pois esse deveria aumentar. De acordo com Ciccarelli *et al.* (2006), em seus testes de limite de inflamabilidade com amônia e hidrogênio, perceberam que em temperaturas altas ocorria reações antes da ignição da chama e que em misturas mais reativas ocorria a autoignição.

A temperatura de autoignição do farnesano, de acordo com a Tabela 11, é de 197°C, então o que ocorre é que nas temperaturas mais altas há oxidação parcial do farnesano, por conta das temperaturas próxima a de autoignição, diminuindo assim o LII. Não foi possível observar se a oxidação parcial ocorria no preenchimento com ar do recipiente de teste ou quando a misturas estava se tornando homogênea.

Na pressão de 20 kPa a chama propagada era diferente das outras pressões, ela era rápida e possuía formato esférico tomando conta de todo recipiente de teste. Isto ocorria pois como se trata de uma pressão bem baixa, não ocorre correntes de convecção e isso faz com que a chama tome um formato esférico. A chama era mais rápida em comparação com os outros testes pois como tinha pouco oxidante, esse era consumido rapidamente.

Na pressão atmosférica foi possível correlacionar uma equação linear para determinar o limite de inflamabilidade inferior de cada amostra utilizada, portanto este trabalho propõe a Eq (6.1) como equação de predição do LII dos combustíveis testados.

$$\frac{LII_{amostra}}{LII_{amostra,25^{\circ}C}} = a - b(T - 25) \quad (6.1)$$

Os coeficientes a e b foram calculados pelos métodos dos mínimos quadrados e a unidade da temperatura T é °C. São apresentados na Tabela 24, os coeficientes para cada amostra.

Tabela 24: Coeficientes para o LII à pressão atmosférica

Combustível	a	b
Farnesano	1,104	0,00117
QAV	1,086	0,00143
F50	1,034	0,00108
F10	1,14	0,00244

Fonte: Produção do próprio autor

Para o cálculo do erro das equações propostas por esse trabalho, utiliza-se das equações, proposta por Montgomery (2001), do erro médio absoluto (EMA) equação apresentada pela equação 6.2. A Tabela 25 apresenta o erro absoluto médio dos pontos experimentais em relação a equação proposta por este trabalho, como também em relação aos modelos de predição de Zabetakis (1965) e Mendiburu *et al.*, (2015).

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|LII_{teórico} - LII_{exp}|}{LII_{exp}} 100\% \quad (6.2)$$

Tabela 25: EMA - LII à pressão atmosférica padrão

	Combustíveis			
	Farnesano	QAV	F50	F10
Este Trabalho	1,17 %	1,88 %	0,715 %	2,84 %
Mendiburu <i>et al.</i> (2015)	2,33 %	6,41 %	1,44 %	4,03 %
Zabetakis (1965)	1,62 %	1,29 %	0,85 %	11,23%

Fonte: Produção do próprio autor

O erro médio absoluto foi menor do que 10% para todos os combustíveis, exceto para o F10 quando comparado com Zabetakis (1965). O EMA baixo demonstra que os testes foram

realizados de forma correta. A equação (6.1), com os respectivos coeficientes para cada combustível, pode prever o LII de forma segura.

6.1.2 Pressões reduzidas

Para pressões reduzidas é possível correlacionar o LII, pela Eq. (6.3), utilizando como referência o LII na pressão atmosférica.

$$\frac{LII(P_1)}{LII(P_0)} = c + d \left(1 - \frac{P_1}{P_0}\right) + e \left(1 - \frac{P_1}{P_0}\right)^2 \quad (6.3)$$

P_1 é a pressão desejada, P_0 é a pressão de referência, c e d são os coeficientes a serem calculados pelo método dos mínimos quadrados. A Tabela 26 apresenta os coeficientes para cada combustível testado.

Tabela 26: Coeficientes para o LII à pressões reduzidas

Combustível	c	d	e
Farnesano	0,8808	-0,489	0,983
QAV	1,684	-0,859	1,027
F50	1,406	-0,957	0,968
F10	-1,77	0,943	0,945

Fonte: Produção do próprio autor

De forma análoga ao LII à pressão atmosférica, o erro médio absoluto é calculado para a equação de predição das pressões reduzidas. O LII para pressões reduzidas não é comparado com nenhum modelo teórico, pois os modelos que existem na literatura são para pressões maiores do que a pressão atmosférica padrão. A Tabela 27 apresento o EMA para a equação de predição do LII às pressões reduzidas.

Tabela 27: EMA - LII à pressões reduzidas

Combustíveis	EMA
Farnesano	7,94 %
QAV	9,64 %
F50	8,94%
F10	9,93%

Fonte: Produção do próprio autor

As equações de predição do LII à pressões reduzidas apresentam erro médio absoluto menor que 10%, o que demonstra boa correlação.

6.2 LIMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDADE

6.2.1 Pressão Atmosférica

Os testes realizados a pressão de 101,3 e 80 kPa quando havia inflamabilidade ocorreu expulsão da tampa do frasco. Diferente do LII, a chama no LSI apresentou-se amarelada, o que era esperado, pois como a concentração de combustível é maior, a combustão acaba sendo incompleta, causando a chama amarelada. A combustão incompleta de um combustível gera produtos que são difíceis de saber a proporção exata de cada um, com isso o LSI se torna mais difícil de predizer.

Ao contrário do LII onde a concentração diminuía com o aumento da temperatura nas pressões de 101,3, 80 e 60 kPa por conta de estarem perto da autoignição, no LSI isso só ocorreu no teste n° 636, onde a mistura estava bem reativa. Como a quantidade de combustível no LSI é maior, comparado com o LII, o fenômeno de oxidação parcial em temperaturas próximas a de autoignição não foi detectado, havendo somente o aumento do LSI com o aumento da temperatura. Na pressão de 20 kPa ocorre o mesmo fenômeno do que o LII mas com uma diferença a chama é amarelada e não azul.

De forma análoga ao LII, é possível correlacionar a Eq. (6.4) para a predição do LSI para a pressão atmosférica padrão. A Tabela 28 apresenta os coeficientes f e g para cada combustível.

$$\frac{LII_{amostra}}{LII_{amostra,25^{\circ}C}} = f + g(T - 25) \quad (6.4)$$

Tabela 28: Coeficientes para o LSI à pressão atmosférica

Combustível	a	b
Farnesano	0,089	0,00435
QAV	0,0647	0,00217
F50	0,527	0,00018
F10	0,598	0,002

Fonte: Produção do próprio autor

Para o cálculo do erro das equações propostas por esse trabalho utiliza-se da Eq. (6.2). A Tabela 29 apresenta os erros médio absoluto. Os erros, tanto para o modelo teórico de Zabetakis (1965) quanto para a equação de predição proposta por este trabalho, são menores do 4% o que confirmam os testes experimentais realizados. Com a predição proposta por este trabalho é possível o cálculo do LSI de forma segura.

Tabela 29: EMA - LSI à pressão atmosférica padrão

	Combustíveis			
	Farnesano	QAV-1	F50	F10
Este Trabalho	1,16 %	0,62 %	2,64 %	2,15 %
Zabetakis (1965)	3,19 %	1,8 %	1,84 %	2,13 %

Fonte: Produção do próprio autor

6.2.2 Pressões reduzidas

De forma análoga ao item 6.1.2, é possível correlacionar a Eq. (6.5) que prediz o LSI para pressões reduzidas, tomando como referência a pressão atmosférica padrão.

$$\frac{LSI(P_1)}{LSI(P_0)} = i + j \left(1 - \frac{P_1}{P_0}\right) + k \left(1 - \frac{P_1}{P_0}\right)^2 \quad (6.3)$$

A Tabela 30 apresenta os respectivos coeficientes i , j e k para cada combustível testado.

Tabela 30: Coeficientes para o LSI à pressões reduzidas

Combustíveis	I	J	k
Farnesano	0,9954	-0,9863	0,4103
QAV	0,9938	-0,386	0,2976
F50	0,9413	-0,9505	0,7183
F10	0,9786	0,5113	-1,489

Fonte: Produção do próprio autor

As equações de predição para o LSI existentes na literatura são para pressões maiores do que a atmosférica, portantoo EMA será feito somente em relação às equações propostas neste trabalho. A Tabela 31 apresenta o erro médio absoluto das equações de predição deste trabalho para o LSI em pressões reduzidas.

Tabela 31: EMA - LSI à pressões reduzidas

Combustíveis	EMA
Farnesano	4,75 %
QAV	1,29 %
F50	12,76%
F10	18,90%

Fonte: Produção do próprio autor

As equações para o LSI em pressões reduzidas do farnesano e do QAV apresentam baixo erro médio absoluto, o que indica boa predição teórica. Já para o F50 e F10 apresentam maior erro médio absoluto, mas ainda assim é possível a predição do LSI para essas misturas.

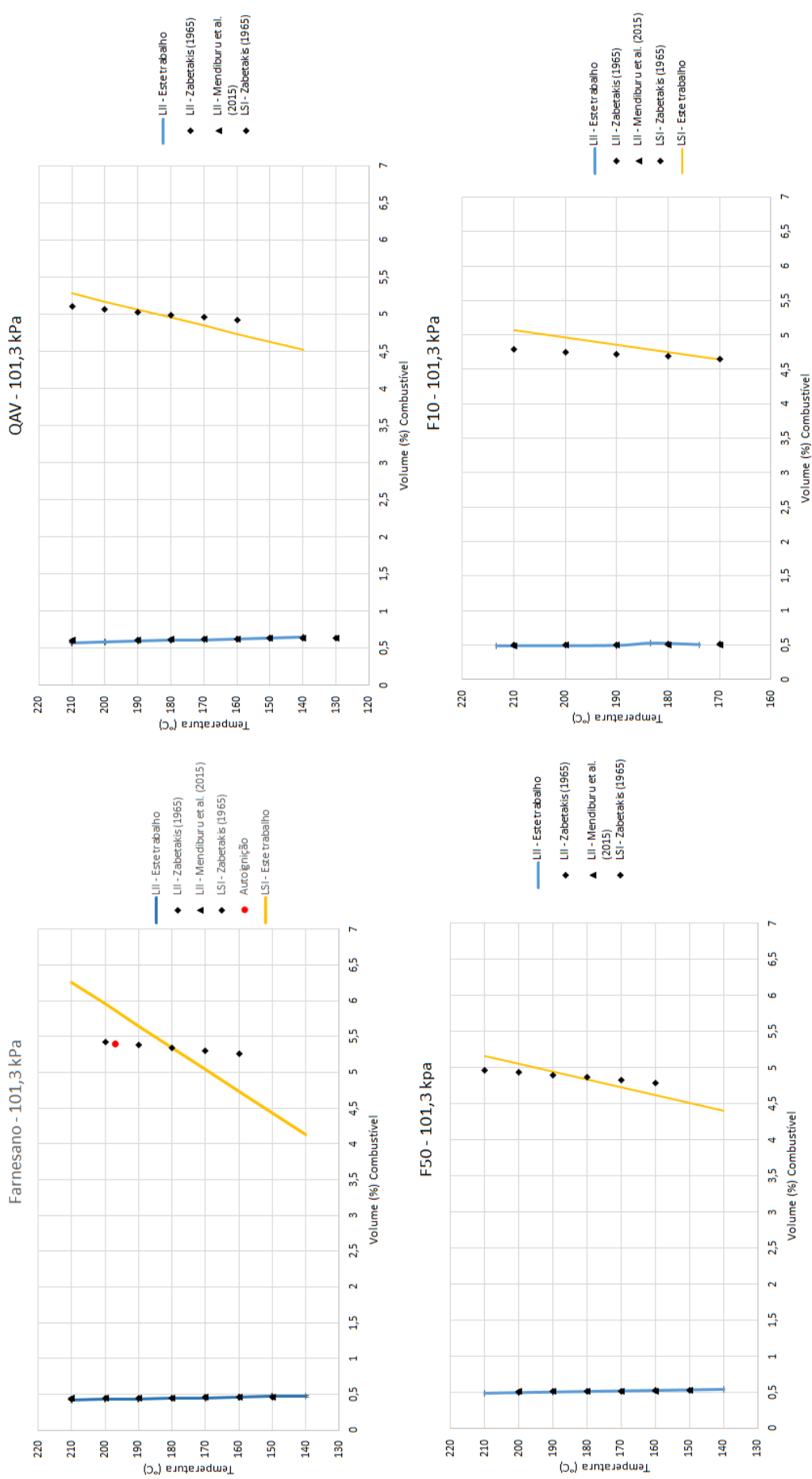
Resumindo as equações propostas por este trabalho apresentam baixo erro médio absoluto e é possível utilizá-las para calcular os limites de inflamabilidade dos combustíveis testados.

6.3 RESULTADOS FINAIS DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE

Apresentam-se nas figuras 69 a 73 os limites de inflamabilidade determinados neste trabalho nas pressões de 101,3, 80, 60, 40 e 20 kPa. Vale ressaltar que na figura 75 o LII das equações teóricas está praticamente uma em cima da outra por causa da escala do gráfico.

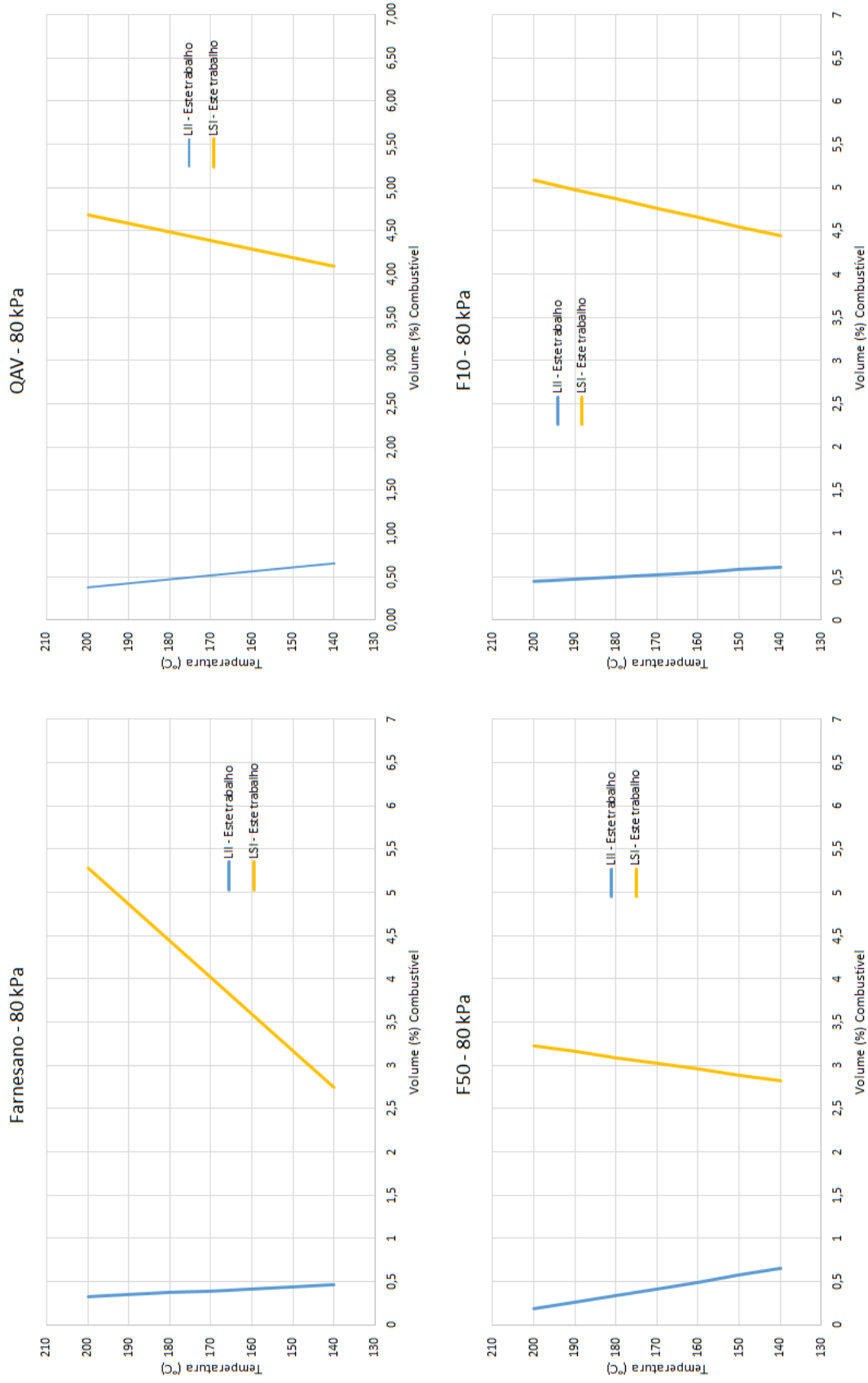
Os limites de inflamabilidade do farnesano apresentam semelhança com o do QAV. Quando misturados nas proporções de F50 e F10 o LII permanece praticamente inalterado e o LSI diminui comparado com o do QAV. Portanto o farnesano pode ser usado em sua forma pura no setor aeronáutico ou misturado com o QAV nas proporções de 10 e 50% em massa, pelo ponto de vista dos limites de inflamabilidade.

Figura 69: Limites de Inflamabilidade – 101,3 kPa



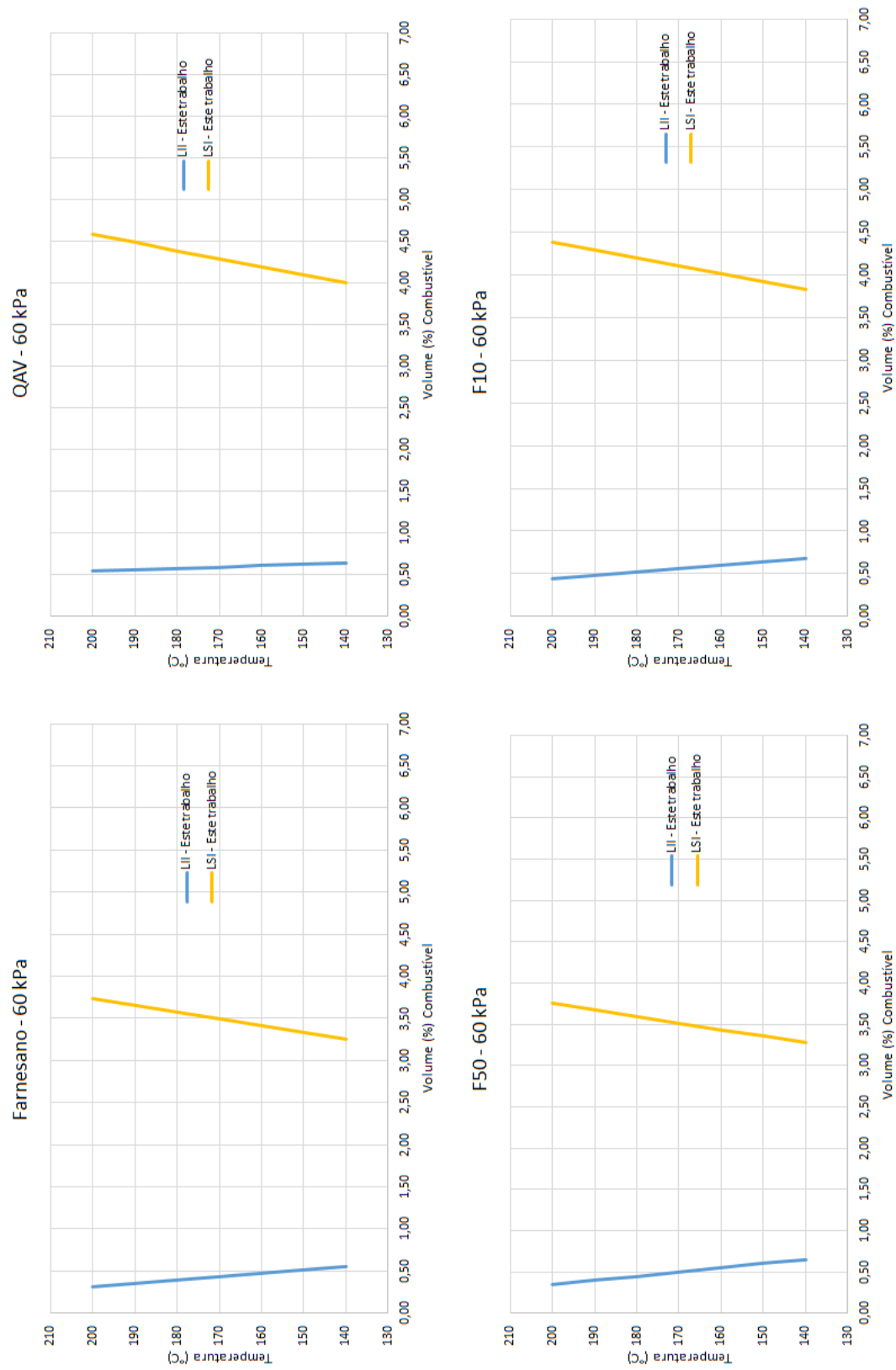
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 70: Limites de Inflamabilidade – 80 kPa



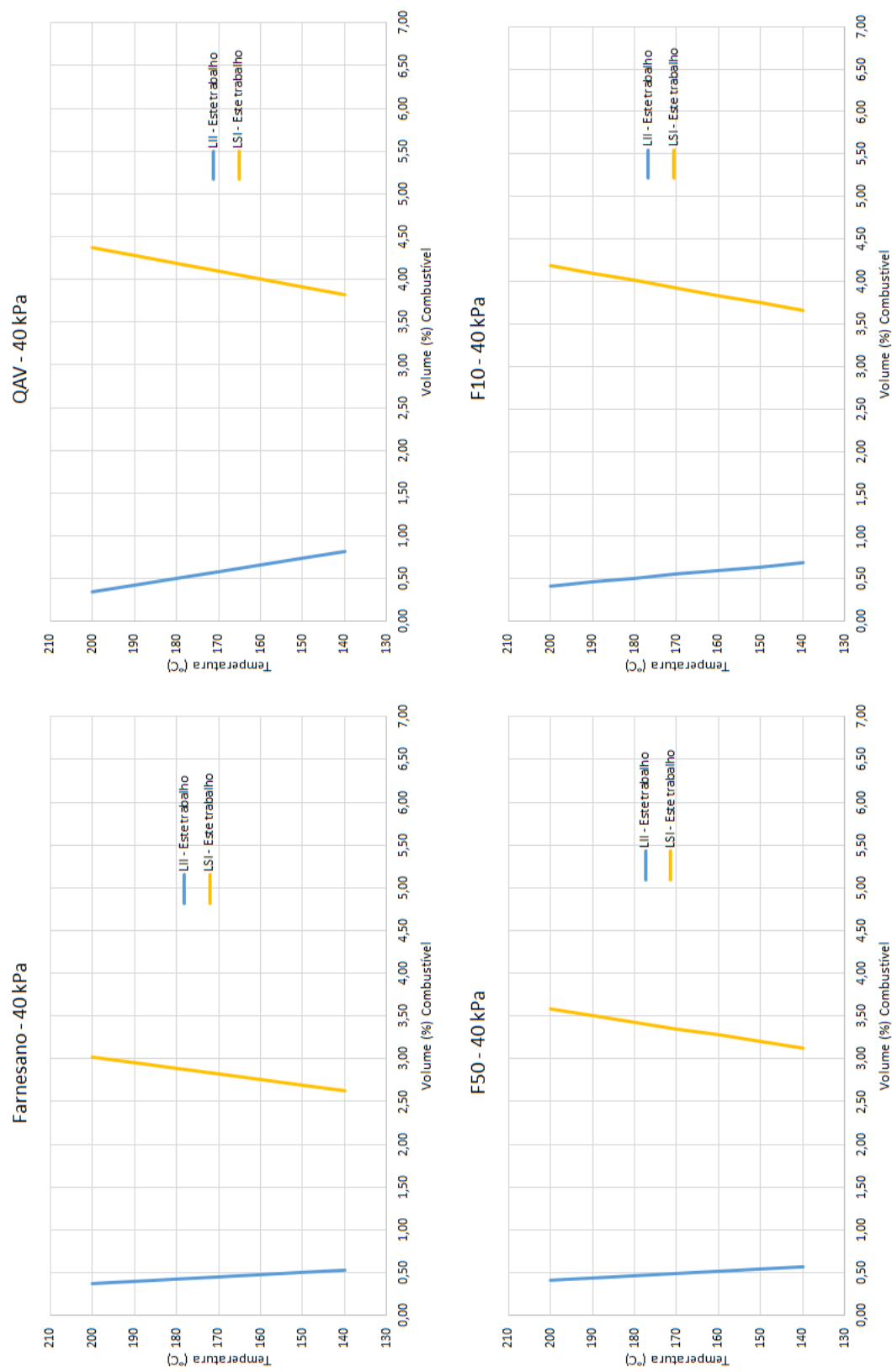
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 71: Limites de Inflamabilidade — 60 kPa



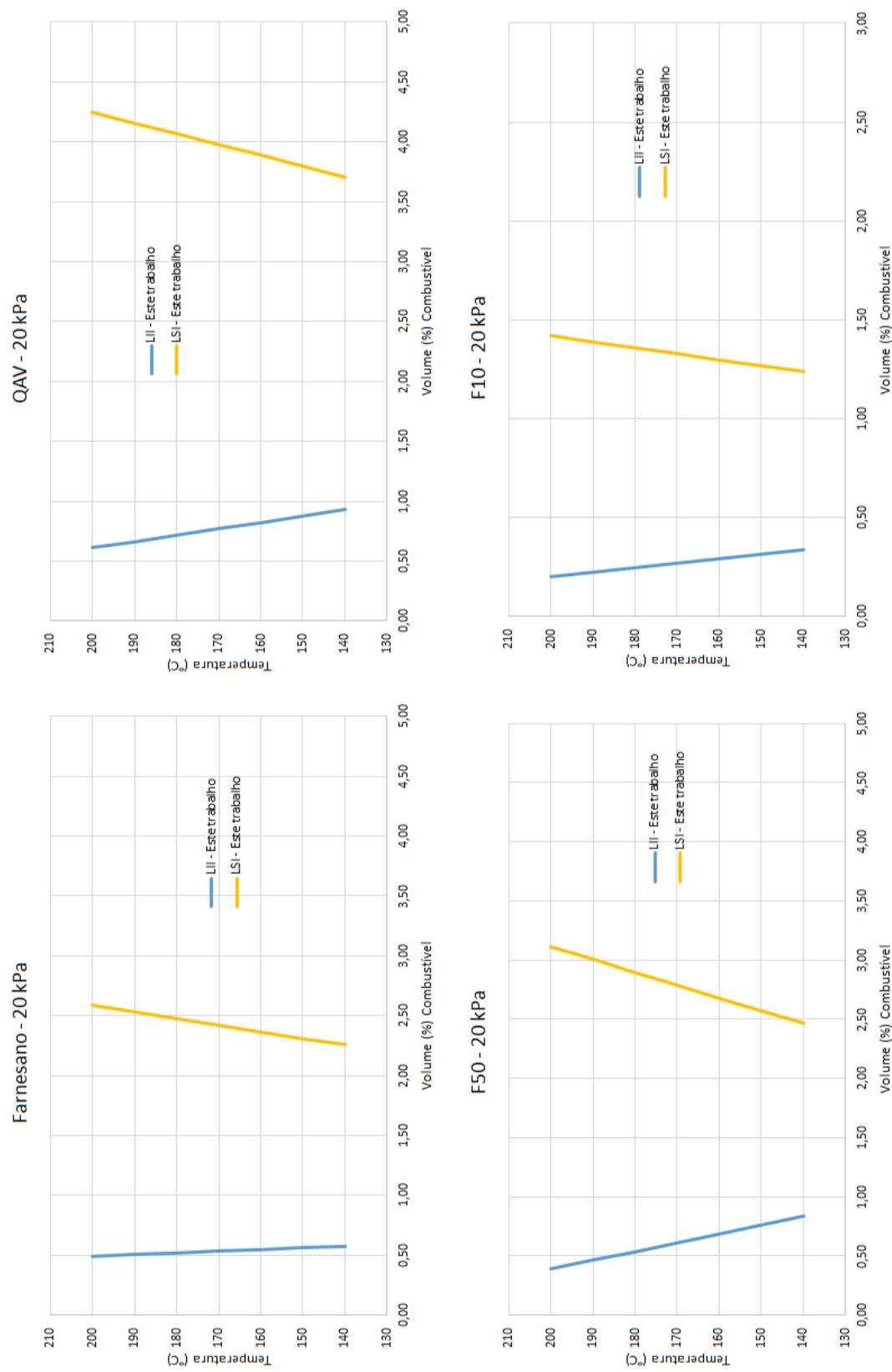
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 72: Limites de Inflamabilidade – 40 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 73: Limites de Inflamabilidade – 20 kPa



Fonte: Produção do próprio autor

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Foram realizados um total de 636 testes para determinação dos limites de inflamabilidade, a duração média de cada teste foi de 20 minutos. Nos testes em que havia inflamabilidade com expulsão da tampa do frasco se fazia necessário a recolocação do mesmo no frasco para garantir a selagem hermética.

Foram determinados experimentalmente os limites de inflamabilidade do farnesano, QAV e misturas de 10 e 50 % de farnesano em QAV para diferentes condições de temperatura e pressão (101,3, 80, 60, 40 e 20 kPa). Através das equações de predição proposta neste trabalho é possível calcular os limites de inflamabilidade para outras pressões e temperaturas, obtendo assim base de dados para um novo biocombustível do setor aeronáutico que tem alta visibilidade nos dias atuais.

Foi observado que para o limite inferior de inflamabilidade do farnesano nas pressões de 101,3, 80 e 60 kPa havia uma diminuição do mesmo quanto mais próximo a temperatura era da temperatura de autoignição, tal fenômeno não foi observado para o limite superior. Também se observa que os testes realizados nas pressões de 20 kPa, apresentaram chama esférica, por causa da baixa pressão onde não ocorre correntes de convecção, portanto deixa a chama em formato esférico e a chama era mais rápida em comparação aos outros testes, pois havia menor quantidade de oxidante para ser consumido.

Foi feita a análise de erros das equações de correlação proposta nesse trabalho. Para o LII em pressão atmosférica as equações de predição apresentam erro médio absoluto de 1,17%, 1,88%, 0,715%, 2,84% para o farnesano, QAV, F50 e F10, respectivamente. Para pressões reduzidas a média dos erros absolutos são 7,94%, 9,64%, 8,94%, 9,93% para o farnesano, QAV, F50 e F10, respectivamente.

Para o LSI os erros foram de 1,16%, 0,62%, 2,64%, 2,15% para o farnesano, QAV, F50 e F10, respectivamente. Para pressões reduzidas os erros do LSI foram de 4,75%, 1,29%, 12,76%, 18,90%, para o farnesano, QAV, F50 e F10, respectivamente.

O erro médio absoluto foi baixo menor do que 10% tanto para as equações de correlação quanto para os modelos teóricos existente na literatura, exceto para o LSI em pressões reduzidas das misturas (F50 e F10), demonstrando que os experimentos foram feitos de forma correta e que através das equações deste trabalho é possível calcular os limites de inflamabilidade dos combustíveis testados.

O farnesano é um combustível alternativo de aviação que está com alta visibilidade no momento, pois acaba de ser regularizado o uso do mesmo em concentrações de 10% com o

QAV em vôos comerciais, mas não é obrigatório o uso da mistura. Pelos resultados experimentais desse trabalho é possível concluir que o LII do farnesano, F50 e F10 não possui mudança significativa quando comparado com o do QAV e que o farnesano pode ser utilizado puro ou em misturas com o QAV pelo setor aeronáutico sem problemas pelo ponto de vista dos limites de inflamabilidade.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se validar as equações deduzidas através de outros métodos estatísticos. Também é proposto a realização de testes com diferentes inertes, por exemplo, N_2 . Se propõe a realização de testes com outras porcentagens de misturas de Farnesano em QAV e em diferentes pressões (90, 70, 50, 30 e 10 kPa).

Como outra possibilidade de trabalho futuro está a realização do estudo de limites de inflamabilidade para os outros combustíveis alternativos de aviação, produzidos por diferentes rotas de obtenção.

REFERÊNCIAS

ALBAHRI, T. A. Flammability characteristics of pure hydrocarbons. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 58, n. 16, p. 3629–3641, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E681**: standard test method for concentration limits of flammability of chemicals. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E918-83**: standard practice for determining limits of flammability of chemicals at elevated temperature and pressure. West Conshohocken: ASTM International, 2011.

AMYRIS BRASIL Ltda. **Ficha de informação de segurança de produto químico – fispq farnesano qav**. Biocombustível Farnesano. 2016. 10 p. Disponível em: <<https://farnesene.net/wp-content/uploads/2014/03/amyris-safety-data-sheet.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEL. **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. Disponível em: <www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/2018/n27/CP27-2018_Minuta1.docx> Acesso em: 4 jun. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Plano de ação para a redução das emissões de gases de efeito estufa da aviação civil brasileira**. 2.ed. 2015. 74 p. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/plano-de-acao-para-reducao-de-co2-no-transporte-aereo>>. Acesso em: 3 mai. 2017.

AIR TRANSPORT ACTION GROUP. **Beginner’s guide to aviation biofuels**. 2.ed. 2011. Disponível em: <<http://www.safug.org/assets/docs/beginners-guide-to-aviation-biofuels.pdf>>. Acesso em: 3 mai. 2017.

ARAÚJO, P. H. M. **Obtenção de bioquerosene de aviação “drop in” por pirólise rápida e desoxigenação catalítica a partir do licure (Syagrus Coronata)**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

ARNALDOS, J.; CASAL, J.; PLANAS-CUCHI, E. Prediction of flammability limits at reduced pressures. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 56, p. 3829–3843, 2001.

AZEVEDO, R. S. **Biocombustíveis para a indústria aeronáutica**: revisão, perspectivas, cálculos dos limites de inflamabilidade de misturas jet a-1/bioetanol e cálculo das emissões da frota aeronáutica. 2013. 110 f. Trabalho final de graduação (Bacharel em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil, 2013.

BLAKEY, S.; RYE L.; WILSON C. W. Aviation gas turbine alternative fuels: a review. **Proceedings of the Combustion Institute**, Beijing, v. 33, p. 2863-2885, 2011.

BRAUN-UNKHOFF, M.; RIEDEL, U. About the emissions of alternative jet fuels claus wahl. **CEAS Aeronaut Journal**, v. 8, p. 167–180, 2017.

BRITTON, L. G. Two hundred years of flammable limits. **Process Safety Progress**, New York, v. 21, p. 1-11. 2002.

CARVALHO, A. L. V. **Desempenho e emissões de gases de um mci-diesel utilizando óleo diesel e mistura de biocombustível**. 2014. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Energia) – Departamento de Ciências Térmicas, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2014.

CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. 179 p.

CARVALHO, J. A. et al. **Combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2018. 372 p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS; **Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios**. Séries de documentos técnicos, novembro, 2010. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/biocombustiveis_aeronauticos_24012011_9559.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2017.

CHUCK, C. J.; DONNELLY, J. The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene. **Applied Energy**, London, v. 118, p.83-91, 2014

CICCARELLI, G.; JACKSON, D.; VERREAULT, J. Flammability limits of NH₃-H₂-N₂-air mixtures at elevated initial temperatures. **Combustion and Flame**, New York, v. 144, n. 1-2, p. 53–63, 2006.

CONCONI, C. C.; CRNKOVIC, P. M. Thermal behavior of renewable diesel from sugar cane, biodiesel, fossil diesel and their blends. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 114, p. 6-11, 2013.

CORONADO, C. J. R. **Análise termoeconômica da produção de biodiesel: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos**. 2010. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

CORONADO, C. J. R. et al. Flammability limits: A review with emphasis on ethanol for aeronautical applications and description of the experimental procedure. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 241–242, p. 32-54, 2012.

COWARD, H. F.; JONES, G. W. **Limits of flammability of gases and vapors**. Washington: U.S. Dept of the Interior, Bureau of Mines. n. Bulletin 503.166 p. 1952. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/701575.pdf>>. Acesso em: 3 mai. 2018.

CUI, G. et al. C. Experimental study and theoretical calculation of flammability limits of methane/air mixture at elevated temperatures and pressures. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 41, p. 252-258, 2016.

DEMIRBAS, M. F. Current technologies for biomass conversion into chemicals and fuels. **Energy Sour Part A**, v. 28, p. 118-126, 2006.

DESHMUKH, R. et al. Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.55, p.163-174, 2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51649-1**: Determination of explosion limits of gases and gas/air mixtures. Berlin: DIN, 1986.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 1839**: Determination of explosion limits of gases and vapours. Berlin: DIN, 2004.

DRYSDALE, D. **An introduction to fire dynamics**. 3.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 574 p.

ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Growing america's energy future: renewable bioenergy, biomass program**. Washington: Energy, 2010. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f14/biomass_two_pager.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2018.

FUEL FLAMMABILITY TASK GROUP. **A review of the flammability hazard of jet a fuel vapor in civil transport aircraft fuel tanks**. Springfield: U.S. Federal Aviation Administration, 1998. 62 p. Disponível em: <<https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/ar98-26.pdf>>. Acesso em 25 mar. 2018.

FRIGO, E. P. et al. Bioquerosene: panorama da produção e utilização no brasil. **Revista Brasileira de Energia Renovável**, v. 3, p. 97-106, 2014.

FRUTIGER, J. et al. Group-contribution based property estimation and uncertainty analysis for flammability-related properties. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 318, p. 783-793, 2016.

FUNK, F. Calculation of the lower explosivity limit of combustible gases and vapors. **Chem.Tech**. v. 26, p. 779-780, 1974.

GEORGE, K. W. et al. Isoprenoid drugs, biofuels, and chemicals—artemisinin, farnesene, and beyond. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, Berlin, v. 148, p. 355, 2015.

GHARAGHEIZI, F. Prediction of upper flammability limit percent of pure compounds from their molecular structures. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 167, n. 1-3, p. 507–510, 2009b.

GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. **Combustion**. 4.ed. New York: Elsevier, 2008. 774 p.

GOMES, L. Motores e combustíveis de aviação. O impacto do abastecimento no transporte aéreo e a busca por alternativas ao jet fuel e à avgas. **Aero Magazine**, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/motores-e-combustiveis-de-aviacao_808.html>. Acesso em 04 abr. 2018.

GOODGER, E. M. Liquid fuels for transport. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 8, p. 233-260, 1982.

GUPTA, K. K.; REHMAN, A.; SARVIYA, R. M. Bio-fuels for the gas turbine: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14 p. 2946-2955, 2010.

GUTIÉRREZ-ANTONIO, C. et al. A review on the production processes of renewable jet fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 709-729, 2017.

HAGEN V. D. **The application of biojet fuels until 2050 scenarios for future developments**. 2012. 61 f. Dissertation (Master in Geoscience) – Faculty of Geoscience, Utrecht University, Utrecht, 2012.

HANLEY, B. A. Model for the calculation and the verification of closed cup flash points for multicomponent mixtures. **Process Saf. Prog**, v. 17, p. 86-97, 1998.

HARI, T. K.; YAAKOB, Z.; BINITHA, N. N. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1234-1244, 2015.

HERTZBERG, M.; CASHDOLLAR, K.; ZLOCHOWER, I. A. Flammability limit measurements for dusts and gases: ignition energy requirements and pressure dependences. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 21, n. 1, p. 303–313, 1988.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Halving emissions by 2050 – aviation brings its targets to Copenhagen**. Copenhagen, 2009. Disponível em: <<https://www.iata.org/>>. Acesso em: 12 out. 2018.

INTERNATION CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Aviation and sustainable alternative fuels: bio aviation fuel stock supply-challenges, strategies and recent developments**. Montreal: ICAO, 2011. Disponível em: <<https://www.icao.int/>> Acesso em 03 jul. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Oil market report, international energy agency**. Paris, 2010. Disponível em: <<https://www.iea.org/>> Acesso em 03 jul. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook special report, energy and climate change**. Paris, 2015. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>> Acesso em: 03 jul. 2018.

IM-ORB, K.; ARPORNWICHANOP, A. Techno-environmental analysis of the biomass gasification and Fischer-Tropsch integrated process for the co-production of bio-fuel and power. **Energy**, Stanford, v. 112, p. 121-132, 2016.

JONES, G. W. Inflammation limits and their practical application in hazardous industrial operations. **Chem. Re**, v.22, p. 1-26, 1928.

JONES G. W. et al. **Research on the flammability characteristics of aircraft fuels**. Washington: Unites State department of the interior, 1952. 104f. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/005805.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

LI, Z. et al. Effect of low temperature on the flammability limits of methane/nitrogen mixtures. **Energy**, Stanford, v. 36, n. 9, p. 5521–5524, 2011.

LLAMAS, A. et al. Biokerosene from babassu and camelina oils: production and properties of their blends with fossil kerosene. **Energy and Fuels**, Washington, v. 26, p. 5968-5976, 2012.

LOVACHEV L. A. et al. Flammability limits: an invited review. **Combustion and flames**, New York, v.20, p. 259-289, 1973.

MAHMUDUL, H. M. et al. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 497-509, 2017.

MAITY, S. K. Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: part I. **Renew Sustain Energy**, v. 43, p. 1427-1445, 2015.

MANNAN, S. **Lees' loss prevention in the process industries**. 3.ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005. 307 p.

MARMENTINI, B. M.V.; ZANOELO, É. F. An experimental investigation of flammability limits and autoignition temperatures of petrofuels and biofuels in a tubular burner. **Combustion Science and Technology**, New York, v. 183, n. 12, p. 1433–1444, 2011.

MENDIBURU, A. Z.; CARVALHO, J. A.; CORONADO, C. R. Estimation of lower flammability limits of C-H compounds in air at atmospheric pressure, evaluation of temperature dependence and diluent effect. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 285, p. 409– 418, 2015.

MENDIBURU, A. Z.; CARVALHO J. A.; CORONADO C. R. Estimation of upper flammability limits of C–H compounds in air at standard atmospheric pressure and evaluation of temperature dependence. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 304 p. 512–521, 2016.

MILLO, F. et al. Influence on the performance and emissions of an automotive euro 5diesel engine fueled with f30 from farnesane. **Fuel**, London, v. 138, p. 134-142, 2014.

MILOSHEV, M.; VULCHEV, D.; ZDRAVCHEV, Z. Relation between the concentration limits of flammability and physicochemical indexes of hydrocarbons. **God.Vissh. Khim.-TekhnolInst**, v. 27, p. 92-107, 1982.

MINISTRY OF DEFENCE. **defence standard 91-91, turbine fuels, aviation kerosene type, jet a-1, nato code: f-35, joint service designation aftur**. Washington: Ministry od defence, 2006. Disponível em: <<http://mindex-ltd.co.uk/wp-content/uploads/2015/02/91-91-issue-7-AMD-3-.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

MOFIJUR, M. et al. Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 441-455, 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Desing and analysis of experiment**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

NESTOR L. J. **Investigation of turbine fuel flammability within aircraft fuel tanks**. Washington: Federal Aviation Administration. p. 75. 1967. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/669001.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2018.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion routes for production of biokerosene - status and assessment. **Biomass Conv. Bioref**, v. 5, p. 367-385, 2014.

NEVES, A. A. S. **Avaliação do aproveitamento de óleos alimentares usados para a produção de biodiesel na área metropolitana do porto**. 2008. 276 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, 2008.

PAN, Y. et al. Prediction of the upper flammability limits of organic compounds from molecular structures. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 48, p. 5064-5069, 2009.

OBWALD P. et al. An experimental flow reactor study of the combustion kinetics of terpenoid jet fuel compounds: farnesane, p-menthane and p-cymene. **Fuel**, London, v. 187, p. 43-50, 2017.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Ficha de informação de segurança de produto químico – fispq br0030**, qav-1. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wcm/connect/9a86f549-e60c-456b-9b23-890ed437736e/fispq-comb-que-ro-avi-qav-jet-a1.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IZff24>>. Acesso em: 27 set. 2018.

PIER, J. R. **Comparisons of bio-fuels in high speed turbine locomotives: emissions, energy use and cost**. Washington: Transportation research board, 1999. 26 p. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.424.6000&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em 25 nov. 2018.

Plano de vôo para biocombustíveis de aviação no brasil: plano de ação, boeing/embraer/fapesp e unicamp. São Paulo: FAPESP, 2013. 60 f. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/plano-de-voo-biocombustiveis-brasil-pt.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

QUINTERO, J. G. C. **Determinação experimental e predição dos limites de inflamabilidade do etanol anidro e hidratado para uso na indústria aeronáutica**. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

RAFATI, M. et al. Techno-economic analysis of production of fischer-tropsch liquids via biomass gasification: the effects of fischer-tropsch catalysts and natural gas co-feeding. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 133, p. 153-166, 2017.

RAMOS, L. S. **Estudo para o desenvolvimento de um injetor jato-Y para misturas de combustíveis de aviação e biocombustíveis**. 2017. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

REALPE, K. T. C. **Prospecção tecnológica de combustível renovável para aviação: estudo de caso do diesel verde**. 2016. 152 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

RICHTER, S. et al. Experimental and modeling study of farnesane. **Fuel**, London, v. 215, p. 22-29, 2018.

ROWLEY, J. R. **Flammability limits, flash points, and their consanguinity: critical analysis, experimental exploration, and prediction**. 2010. 247 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Chemical Engineering) - Department of Chemical Engineering. Brigham Young University, Utah, 2010.

SANTOS, F. D. T. **Laser induced incandescence soot characterization in farnesane-kerosine wick-fed diffusion flames**. 2013. 106 f. Thesis (Doctor in Science Area of Aerodynamics, Propulsion and Energy) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

SEATON, W. H. Group contribution method for predicting the lower and upper flammable limits of vapors in air. **Journal of Hazard. Materials**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 169-185, 1991.

SHEBEKO, Y. N. et al. An analytical evaluation of flammability limits of gaseous mixtures of combustible–oxidizer–diluent. **Fire Safety Journal**, Oxford, v. 37, n. 6, p. 549–568, Sep. 2002.

SHEBEKO, Y. N.; IVANOV, A. V.; DMITRIEVA, T. M. Methods of calculation of lower concentration limits of combustion of gases and vapors in air. **Sov. Chem. Ind.**, v.15 n.3, p. 311-314, 1983.

SHEPHERD, J. E.; KROK J. C.; LEE J. J. **Jet a explosion experiments: laboratory testing**. Pasadena: explosion dynamics laboratory - report FM97-5, 1997. 74 p. Disponível em: <<https://authors.library.caltech.edu/25828/1/FM97-5.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

SHEPHERD, J. E.; KROK J. C.; LEE J. J. **Spark ignition energy measurements in jet a: part II**. Pasadena: explosion dynamics laboratory - report FM99-7, 2000. 78 p. Disponível em: <http://shepherd.caltech.edu/EDL/publications/reprints/galcit_fm99-7.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2018.

SHIMY, A. A. Calculating flammability characteristics of hydrocarbons and alcohols. **Fire Technology**, Boston, v. 6, n. 2, p. 135-139, 1970.

SINGH, A.; OLSEN, S. I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. **Applied Energy**, London, v. 88, p. 3548–35555, 2011.

SMEDT, G. et al. Comparison of two standard test methods for determining explosion limits of gases at atmospheric conditions. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 70, p. 105-113, 1999.

SNEHESH, A. S. et al. Fischer-Tropsch route for the conversion of biomass to liquid fuels - Technical and economic analysis. **Energy**, Stanford, v. 130, p.182-191, 2017.

SORIANO, J. A. et al. Oxidation reactivity and nanostructural characterization of the soot coming from farnesane - A novel diesel fuel derived from sugar cane. **Carbon**, Elmsford, v. 125, p. 516-529, 2017.

SPAKOWSKI, A. E. Pressure limit of flame propagation of pure hydrocarbon-air mixtures at reduced pressures. Washington: National. Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1952. 37 p. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930087331.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

SRIVASTAVA, A; PRASAD, R. Triglycerides-based diesel fuel. **Renew Sustain Energy**, v. 4, p. 111-133, 2000.

SUSTAINABLE WAY FOR ALTERNATIVE FUELS AND ENERGY INAVIATION (SWAFEA). **Final report 2011**. France: Swafea, 2011. 111 p. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Documents/SW_WP9_D.9.1%20Final%20report_released%20July2011.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2018.

SUZUKI, T.; ISHIDA, M. Neural network techniques applied to predict flammability limits of organic compounds. **Fire Mater**, v. 19, n. 4, p. 179-189, 1995.

SUZUKI, T.; KOIDE, K. Correlation between upper flammability limits and thermochemical properties of organic compounds. **Fire Mater**, v. 18, n. 6, p. 393-397, 1994.

SYAZA, A. I. et al. Inherent safety assessment of biodiesel production: flammability parameter. **Procedia Engineering**, v. 148, p.1177- 1183, 2016.

SWANSON, R. M. et al. Techno-economic analysis of biomass-to-liquids production based on gasification. **Fuel**, London, v. 89, p. 11-19, 2010.

THORNTON, W. M. The limits of inflammability of gaseous mixtures. **A.S.M.E. JOURNAL**, v. 39, p. 347, 1917.

VANDERSTRAETEN, B. et al. Experimental study of the pressure and temperature dependence on the upper flammability limit of methane/air mixtures. **Journal of Hazards Materials**, Amsterdam, v. 56, p. 237-246, 1997.

WANG, W. C.; TAO, L. Bio-jet fuel conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 801-822, 2016.

WHITE, A. G. Limits for the propagation of flame in inflammables gas/air mixtures. **Chemical Society**, London, v. 127, p. 48-62, 1925.

ZABETAKIS, M. G. **Flammability characteristics of combustible gases and vapors.** Pittsburgh: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1965. 130 p. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/7328370/>>. Acesso em: 3 out. 2017.

ZABETAKIS, M. G.; SCOTT, G. S.; JONES, G. W. Limits of flammability of paraffin hydrocarbons in air. **Industrial & Engineering Chemistry**, Washington, v. 43, n. 9, p. 2120-2124, 1951.

ZLOCHOWER, I. A.; GREEN, G. M. The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. v. 22. p. 499-505, 2009.

APÊNDICE A – Dados de volume inserido em cada teste

Tabela 14a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716L para pressão atmosférica

Exp. No.	Volume (mL)			Exp. No.	
Farnesano – 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
5	156	0,78	0,7	158	4
6	173	0,94	0,64	172	37
7	175	0,86	0,52	218	60
8	172	0,77	0,58	217	61
62	216	0,64	0,7	164	321
320	168	0,76	0,78	140	192
191	142	0,84			
F50– 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
11	156	0,76	0,7	156	12
38	172	0,7	0,64	175	39
55	194	0,66	1	109	48
187	146	0,78	1,1	114	49
322	166	0,72	0,6	192	56
			0,72	143	188
			0,66	144	189
			0,66	167	323
F10 – 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
50	174	0,58	0,54	174	40
52	191	0,56	0,5	173	51
59	215	0,52	0,44	190	53
185	144	0,72	0,5	189	54
327	183	0,6	0,48	212	63
			0,66	145	186
			0,54	184	326
QAV-1– 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
361	165	0,7	0,64	164	362
374	133	0,8	0,72	131	375
381	146	0,78	0,7	143	382
388	184	0,68	0,64	180	387

Tabela 15a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 80 kPa

Exp. No.	Volume (mL)			Exp. No.	
Farnesano – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem chama	T(°C)	
181	145	0,6	0,54	142	180
195	153	0,6	0,48	153	193
238	160	0,52	0,54	152	194
244	170	0,48	0,46	162	237
292	192	0,48	0,38	169	242
335	183	0,5	0,44	171	243
			0,42	193	290
			0,46	190	291
			0,46	185	334
F50 – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
15	153	0,7	0,58	155	17
16	158	0,64	0,84	131	29
176	144	0,76	0,7	139	175
233	165	0,52	0,46	161	234
247	171	0,46	0,34	172	245
287	191	0,44	0,4	169	246
333	184	0,5	0,38	192	286
			0,46	187	332
F10 – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
177	143	0,6	0,48	145	170
178	144	0,54	0,4	153	196
230	154	0,56	0,46	152	197
232	161	0,5	0,52	153	229
249	176	0,46	0,46	162	231
281	195	0,42	0,4	177	248
329	186	0,48	0,36	192	279
			0,4	194	280
			0,44	182	328
QAV – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
184	144	0,54	0,42	144	182
228	150	0,56	0,48	142	183
236	161	0,46	0,46	150	226
241	170	0,44	0,52	151	227
295	191	0,44	0,4	160	235
338	187	0,44	0,38	168	240
			0,36	192	293
			0,42	195	294
			0,38	188	339

Tabela 16a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 60 kPa

Exp. No.	Volume (mL)			Exp. No.	
Farnesano – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
101	147	0,56	0,5	143	102
128	151	0,52	0,46	153	127
169	162	0,44	0,38	163	170
218	174	0,36	0,3	175	217
289	201	0,34	0,28	197	288
319	186	0,4	0,34	187	318
F50 – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
96	145	0,52	0,46	144	97
130	155	0,5	0,44	151	129
171	168	0,4	0,34	162	172
205	176	0,34	0,28	178	204
285	196	0,34	0,24	198	282
315	185	0,4	0,3	196	283
			0,32	197	284
			0,32	187	313
			0,36	186	314
F10 – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
98	146	0,48	0,34	145	99
133	156	0,48	0,4	143	100
174	169	0,42	0,36	151	131
203	176	0,36	0,42	154	312
278	198	0,32	0,36	166	173
311	189	0,34	0,3	175	202
			0,26	199	276
			0,3	194	277
			0,3	187	312
QAV – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
103	145	0,46	0,4	146	104
126	155	0,44	0,38	151	125
168	166	0,42	0,36	164	167
225	177	0,4	0,34	172	239
266	199	0,36	0,3	192	267
316	185	0,38	0,32	187	317

Tabela 17a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 40 kPa

Exp. No.	Volume (mL)				Exp. No.
Farnesano – 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
115	146	0,38	0,32	140	116
140	156	0,34	0,28	151	139
164	165	0,32	0,24	163	160
216	172	0,3	0,28	164	163
273	197	0,26	0,24	174	215
305	188	0,28	0,2	196	274
			0,22	184	306
F50 – 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
105	144	0,36	0,3	143	106
138	154	0,32	0,26	153	137
161	162	0,3	0,24	163	160
207	174	0,26	0,2	175	206
270	198	0,24	0,16	190	268
307	186	0,24	0,22	191	269
			0,2	187	308
F10 – 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
11	147	0,3	0,22	151	134
136	152	0,34	0,28	156	135
159	162	0,3	0,24	163	158
201	172	0,26	0,2	176	200
272	195	0,22	0,18	179	252
309	188	0,24	0,18	200	271
			0,18	187	310
QAV– 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
121	141	0,36	0,3	145	120
141	154	0,26	0,2	162	142
166	166	0,3	0,2	157	143
224	173	0,26	0,24	168	165
264	195	0,2	0,2	174	223
304	188	0,26	0,16	196	265
			0,22	186	303

Tabela 18a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 20 kPa

Exp. no.	Volume (mL)			Exp. no.
Farnesano – 20 kPa				
	T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)
117	144	0,28	0,16	140
118	148	0,22	0,14	157
144	156	0,2	0,12	167
151	165	0,18	0,1	174
214	172	0,22	0,14	172
261	196	0,16	0,18	173
299	185	0,18	0,12	195
			0,14	194
			0,14	184
				300
F50 – 20 kPa				
	T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)
108	155	0,22	0,16	150
110	145	0,22	0,16	144
155	163	0,18	0,14	164
210	173	0,16	0,08	175
258	195	0,14	0,12	174
298	181	0,2	0,12	193
			0,14	180
			0,16	181
				297
F10 – 20 kPa				
	T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)
113	144	0,18	0,14	147
149	156	0,2	0,16	157
157	166	0,18	0,14	163
198	169	0,12	0,08	172
251	181	0,14	0,1	179
256	193	0,16	0,08	191
275	190	0,14	0,12	194
				255
QAV – 20 kPa				
	T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)
124	147	0,22	0,12	143
147	155	0,22	0,18	145
152	167	0,14	0,16	156
222	174	0,2	0,1	165
262	196	0,14	0,08	171
301	185	0,16	0,12	173
			0,16	172
			0,12	195
			0,12	184
				302

Tabela 19a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 101.3 kPa. Detalhe do teste N° 636 aonde ocorreu autoignição.

Exp. No.	Volume (mL)				Exp. No.
Farnesano – 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
550	175	8	9	176	554
584	185	8	8,5	177	555
601	166	7,5	8	165	579
			8,5	186	618
636	197	8			
F50– 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
346	157	6,5	7	156	345
414	166	6	7	163	412
460	174	6	6,5	165	413
493	185	6	6,5	175	460
514	196	6	6,5	184	494
599	207	6	6,5	195	515
			6,5	209	600
F10 – 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
344	155	5	5,5	155	343
415	164	5	5,5	165	416
464	172	5	5,5	171	465
482	185	5	5,5	183	483
597	205	5	5,5	207	598
QAV-1 – 101,3 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
411	164	5	6	165	408
463	173	4,5	5,9	164	409
495	185	4,5	5,5	165	410
496	186	5	5,5	185	497
516	194	5	5,5	195	517
614	175	5	5,5	174	615
630	207	5	5,5	205	629

Tabela 20a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 80 kPa

Exp. No.	Volume (mL)				Exp. No.
Farnesano – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem chama	T(°C)	
545	166	4,5	5	164	544
557	176	4,5	5	174	556
577	154	4,5	5	156	578
580	184	4,5	6	184	583
581	186	5	6	194	634
582	185	5,5			
617	187	5			
633	194	5			
634	191	5,5			
F50 – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
492	185	3,5	5	166	425
513	195	3,5	4,5	164	426
612	165	3,5	4	173	458
613	176	3,5	4,5	177	459
631	206	3,5	4	184	491
			4	194	512
			4	167	611
			4	205	632
F10 – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
350	156	3,5	4,5	155	352
351	154	4	4,5	164	418
417	166	4	4,5	172	467
466	174	4	4,5	195	619
620	195	4			
QAV-1 – 80 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
349	156	3,5	4,5	156	347
420	163	3,5	4	155	348
471	171	3,5	4,5	163	422
498	184	3,5	4	173	470
518	195	3,5	4	185	499
			4	196	519
			4	165	606

Tabela 21a Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 60 kPa

Exp. No.	Volume (mL)			Exp. No.	
Farnesano – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
536	193	3	3,5	192	537
542	166	3,5	4	162	543
560	177	3	4	174	558
570	182	3	3,5	175	559
603	162	3	3,5	181	569
			3,5	163	603
F50 – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
391	155	2,5	4	157	388
428	166	2,5	3,5	155	289
456	175	2,5	3	154	390
489	184	2,5	3	166	429
510	193	2,5	3	173	457
			3	185	490
			3	192	511
F10 – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
393	155	2	3	156	395
394	154	2,5	3	166	431
430	165	2,5	3	173	469
468	172	2,5	3	182	479
478	183	2,5	3	195	535
534	194	2,5			
QAV-1 – 60 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
358	154	2,5	3,5	155	356
424	165	2,5	3	153	357
472	172	2,5	3	164	423
500	184	2,5	3	173	473
622	202	2,5	3	185	501
			3	201	622

Tabela 22a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 40 kPa

Exp. No.	Volume (mL)				Exp. No.
Farnesano – 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
531	193	1,5	2	194	530
540	166	2	2,5	164	541
562	174	1,5	2	176	561
567	183	1,5	2	182	568
605	164	1,5	2	161	604
F50 – 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
455	175	1,5	2,5	161	439
487	185	1,5	2	177	454
508	196	1,5	2	184	487
610	165	1,5	2	191	509
625	208	1,5	2	162	609
			2	206	626
F10 – 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
401	156	1,5	2	155	400
440	164	1,5	2	166	441
445	173	1,5	2	175	444
476	184	1,5	2	185	477
532	192	1,5	2	197	533
QAV-1– 40 kPa					
	T(°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
395	153	1,5	2	154	396
432	163	1,5	2	162	433
450	177	1,5	2	174	451
502	185	1,5	2	186	503
522	194	1,5	2	196	523

Tabela 23a: Dados de volume inserido no frasco de 20,716 L para 20 kPa

Exp. no.	Volume (mL)			Exp. no.
T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
Farnesano – 20 kPa				
T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
529	189	0,5	191	528
538	162	0,5	164	539
563	174	0,5	175	564
565	181	0,5	184	566
572	153	0,5	151	572
F50 – 20 kPa				
T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
453	174	0,5	173	452
486	179	0,5	181	484
506	189	0,5	180	485
608	159	0,5	191	507
623	201	0,5	157	607
		1	206	624
F10 – 20 kPa				
T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
443	162	0,5	161	442
447	170	0,5	169	446
474	179	0,5	180	475
526	190	0,5	191	527
593	196	0,5	198	594
QAV-1– 20 kPa				
T (°C)	Chama	Sem Chama	T(°C)	
435	159	0,7	158	434
448	172	0,7	171	449
504	180	0,7	181	505
524	188	0,7	190	525
627	206	0,7	208	628