UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá

JAVIER ALEJANDRO RODRÍGUEZ TRAVIESO

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE DE MISTURAS DE GÁS NATURAL E HIDROGÊNIO (GN-H_2-AR) RICAS EM HIDROGÊNIO.

Guaratinguetá
2026

JAVIER ALEJANDRO RODRÍGUEZ TRAVIESO

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE DE MISTURAS DE GÁS NATURAL E HIDROGÊNIO (GN-H_2) RICAS EM HIDROGÊNIO.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Mecânica - Transmissão e Conversão de Energia.
Orientador(a): Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez (UNESP).

Coorientador(a): Prof. Dr. Einara Blanco Machín (UdeC – Universidad de Concepción, Chile)

Guaratinguetá
2026

Travieso, Javier Alejandro Rodríguez
T782d Determinação experimental dos limites de inflamabilidade de misturas de gás natural e hidrogênio (GN-H_2-AR) ricas em hidrogênio / Javier Alejandro Rodríguez Travieso – Guaratinguetá, 2026.
93f : il.
Bibliografia: f. 78-83

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez
Coorientadora: Profª. Drª Einara Blanco Machín

1. Combustão. 2. Gás natural. 3. Hidrogênio.
4. Metano. I. Título.

CDU 662.9 (043)

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto esperado desta pesquisa é multifacetado e alinha-se diretamente com os desafios da transição energética global.

Potencial Científico e Técnico: O trabalho contribui com um conjunto de dados experimentais inéditos sobre os limites de inflamabilidade para misturas de gás natural com altas frações de hidrogênio. Esta contribuição preenche uma lacuna crítica na literatura técnica, fornecendo uma base empírica essencial para a validação de modelos teóricos de combustão e para o desenvolvimento de análises de risco mais precisas.

Potencial Social e de Segurança: O impacto social mais direto é o aumento da segurança na cadeia de valor do hidrogênio. Ao determinar os novos limites de perigo, esta pesquisa fornece o conhecimento necessário para prevenir acidentes, como fugas e explosões, em infraestruturas de transporte, armazenamento e utilização final, protegendo vidas e comunidades.

Potencial Econômico e Inovador: Os dados gerados são fundamentais para a atualização de normas técnicas nacionais e internacionais. Isto permite que a indústria inove com segurança, projetando equipamentos (como gasodutos, queimadores e turbinas) mais eficientes e adaptados para operar com misturas ricas em hidrogênio, fomentando o avanço da economia do hidrogênio.

Desenvolvimento Sustentável e Inserção Regional/Nacional: A pesquisa apoia diretamente as metas de desenvolvimento sustentável ao viabilizar, de forma mais segura, a utilização de um combustível de baixo carbono. Posiciona o laboratório e a universidade como um centro de referência nesta área de estudo, contribuindo para a inserção do Brasil no cenário internacional da pesquisa em energias limpas.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The expected impact of this research is multifaceted and directly aligned with the challenges of the global energy transition.

Scientific and Technical Potential: This work contributes a novel set of experimental data on the flammability limits for natural gas blends with high hydrogen fractions. This contribution fills a critical gap in technical literature, providing an essential empirical basis for validating theoretical combustion models and developing more accurate risk analyses.

Social and Safety Potential: The most direct social impact is the enhancement of safety across the hydrogen value chain. By determining the new hazard limits, this research provides the necessary knowledge to prevent accidents, such as leaks and explosions, in transportation, storage, and end-use infrastructures, thus protecting lives and communities.

Economic and Innovative Potential: The data generated is fundamental for updating national and international technical standards. This enables the industry to innovate safely, designing more efficient equipment (such as pipelines, burners, and turbines) adapted to operate with hydrogen-rich blends, thereby fostering the advancement of the hydrogen economy.

Sustainable Development and Regional/National Insertion: The research directly supports sustainable development goals by enabling the safer use of a low-carbon fuel. It positions the laboratory and the university as a reference center in this field of study, contributing to Brazil's insertion in the international landscape of clean energy research.

JAVIER ALEJANDRO RODRÍGUEZ TRAVIESO

Determinação Experimental dos Limites de Inflamabilidade de misturas de gás natural e hidrogênio (GN-H2) ricas em hidrogênio

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 22/09/2026

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
NESTOR PROENZA PEREZ
Data: 22/09/2026 11:21:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. NESTOR PROENZA PÉREZ
Orientador - UNESP

gov.br Documento assinado digitalmente
THIAGO AVERALDO BIMESTRE
Data: 22/09/2026 11:29:06-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. THIAGO AVERALDO BIMESTRE
UNESP

Prof. Dr. GERMAN RAUL CHUMPITAZ AYALA
Universidad Tecnológica de Perú

"Aos meus pais, tios e irmãos, minha base e meu porto seguro. Agradeço por me derem a força e apoio para cumprir esta meta e aos meus avôs, que as suas memórias se fazem presente e me inspiram cada dia, na certeza e na fé de que tudo posso naquele que me fortalece."

Obrigado Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à espiritualidade que me guiou, deu força e acompanhou os meus passos ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Néstor Proenza Pérez, pela imensa paciência, dedicação e por acreditar no meu potencial desde o primeiro dia. Seus ensinamentos e sua orientação foram o pilar para a concretização deste sonho.

À minha coorientadora, Prof. Dr. Einara Blanco Machín, por todo o apoio, valiosas contribuições e incentivo constante.

Aos meus pais e à minha família, por serem a minha base, pelo amor incondicional e por todos os sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, pela amizade, companheirismo e pelas discussões que enriqueceram este trabalho.

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

“As universidades serão o que são suas bibliotecas”

(Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

RESUMO

A incorporação de hidrogênio (H_2) nas redes de gás natural como estratégia de descarbonização altera as propriedades de combustão da mistura, modificando os limites de inflamabilidade e os parâmetros de segurança. Este trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente os limites inferior (LII) e superior (LSI) de inflamabilidade de misturas ternárias $CH_4/C_3H_8/H_2$, com frações de H_2 entre 29% e 72% em volume, mantendo o Índice de Wobbe próximo ao de referência do gás natural. A metodologia baseou-se na norma ASTM E681, utilizando uma câmara esférica de 5 L à pressão atmosférica e temperatura ambiente, com preparação por pressões parciais e inspeção visual via câmera de alta velocidade. O funcionamento operacional do sistema foi verificado por meio de ensaios preliminares com metano e propano. Os resultados mostraram que o H_2 ampliou a faixa de inflamabilidade das misturas, principalmente pelo aumento do LSI, que passou de 19,25% para 26,94%, enquanto o LII variou entre 4,24% e 4,93%. A análise pela Lei de Le Chatelier indicou melhor concordância para o LSI (desvios de 0,48% a 7,26%) do que para o LII (desvios de 16,93% a 40,02%), que apresentou tendência de subestimação pelo modelo teórico. Conclui-se que misturas ricas em hidrogênio ampliam significativamente a região inflamável, reforçando a necessidade de dados experimentais específicos para garantir a segurança em aplicações energéticas.

Palavras-chave: Limites de Inflamabilidade; Hidrogênio; Gás Natural; Metano; Propano; Segurança; Combustão.

ABSTRACT

The incorporation of hydrogen (H_2) into natural gas grids as a decarbonization strategy alters the combustion properties of the mixture, modifying flammability limits and safety parameters. This work aimed to experimentally determine the lower (LFL) and upper (UFL) flammability limits of ternary $CH_4/C_3H_8/H_2$ mixtures, with H_2 volume fractions ranging from 29% to 72%, while maintaining the Wobbe Index close to the natural gas reference value. The experimental methodology was based on the ASTM E681 standard, using a 5 L spherical vessel operating at atmospheric pressure and room temperature, with mixture preparation by partial pressures and visual inspection via a high-speed camera. The operational performance of the experimental system was verified through preliminary tests with methane and propane. The results showed that H_2 widened the flammability range of the mixtures, mainly due to an increase in the UFL, which rose from 19.25% to 26.94%, while the LFL varied between 4.24% and 4.93%. Analysis using Le Chatelier's Law indicated better agreement for the UFL (deviations from 0.48% to 7.26%) than for the LFL (deviations from 16.93% to 40.02%), which showed a trend of underestimation by the theoretical model. It is concluded that hydrogen-rich mixtures significantly expand the flammable region, reinforcing the need for specific experimental data to ensure safety in energy applications.

Keywords: flammability limits; hydrogen; natural gas; methane; propane; safety; combustion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de Hidrogênio.....21
Figura 2: Hidrogênio Verde.....22
Figura 3: Sistemas de estado gasoso, líquido e sólido de armazenamento de hidrogênio em larga escala (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019).....24
Figura 4: Efeito da pressão reduzida em 298K 29
Figura 5: Forma geral das temperaturas dos limites de inflamabilidade.....30
Figura 6 : Diagrama dos limites de inflamabilidade em função do oxigênio 33
Figura 7: Critérios para determinação dos limites de inflamabilidade. Fonte: (URAL, 2008). 35
Figura 8: Critério para a inspeção visual dos limites de inflamabilidade segundo a norma ASTM E681 LII&LSI (ASTM, 2023). 35
Figura 9: Propagação de uma chama no LII (TIAN et al., 2017) 36
Figura 10: Esquema do dispositivo experimental para a determinação dos limites de inflamabilidade pelo método do aumento de pressão. Fonte:(JUNIOR et al., 2018). 37
Figura 11: Dispositivo padrão de determinação experimental dos limites de inflamabilidade pelas normas EN 1839 (T), EN 1839 (B).....38
Figura 12: Vista geral do aparato experimental.....47
Figura 13: Detalhe da bancada experimental e do sistema de combustão esférico para ensaios de inflamabilidade. 48
Figura 14: Interior da câmara de combustão.....49
Figura 15: Placa de agitação magnética. 49
Figura 16: Controladores de fluxo mássico e válvulas de corte nas linhas de gás....50
Figura 17: Bomba de vácuo (Edwards RV5). 51
Figura 18: Pressostato/transmissor digital Trafag DPC 8380 e registrador de dados portátil Omega OM-CP-OCTPRO utilizados no monitoramento das condições experimentais. 52
Figura 19: Abrigo externo dos cilindros de gases utilizados nos ensaios. 52
Figura 20: Vista geral da bancada experimental utilizada nos ensaios de inflamabilidade. 55
Figura 21: Evolução das composições nominais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$ definidas pelo critério do Índice de Wobbe. 59

Figura 22: Registros visuais da propagação de chama nos ensaios de validação com metano e propano: (a) metano próximo ao LII; (b) metano próximo ao LSI; (c) propano no LII = 2,1% vol.; (d) propano no LSI = 9,5% vol. 62
Figura 23: Comparação dos resultados de validação experimental com valores de referência para metano e propano. 64
Figura 24: Registro visual da propagação de chama em condições próximas ao LII e ao LSI das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$. 66
Figura 25: LII teóricos recalculados e experimentais em função da fração real média de H_2. 69
Figura 26: LSI teóricos recalculados e experimentais em função da fração real média de H_2. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Energia mínima de ignição para algumas substâncias. 31
Tabela 2:Limites de inflamabilidade no ar e O2 32
Tabela 3: Limites de inflamabilidade de alguns compostos em 1 atm e 298 K. 40
Tabela 4: Contribuição de grupos funcionais. 41
Tabela 5: Composições nominais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$ definidas pelo critério do Índice de Wobbe. 58
Tabela 6: Limites teóricos iniciais de inflamabilidade das misturas nominais $CH_4/C_3H_8/H_2$ calculados pela Lei de Le Chatelier. 60
Tabela 7: Resultados Experimentais para a Validação com Metano e Propano. 63
Tabela 8: Composições reais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$ obtidas experimentalmente por pressões parciais. 67
Tabela 9: Comparação entre os limites de inflamabilidade teóricos recalculados e experimentais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$. 68
Tabela 10: Faixa de inflamabilidade experimental das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$. 71
Tabela 11: Limites experimentais de inflamabilidade com incerteza associada. 73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAFT	Temperatura de Chama Adiabática Fechada
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNT	Nanotubos de Carbono
COL	Custo Nivelado do Hidrogênio
GN	Gás Natural
GEE	Gases com Efeitos de Estufa
$GtCO_2$	Gigatoneladas de Dióxido de Carbono
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
LII	Limite Inferior de Inflamabilidade
LSI	Limite Superior de Inflamabilidade
MOF	Metal-Organic Framework
OMS	Organização Mundial da Saúde
PIM	Polímeros com Microporosidade Intrínseca
TAI	Temperatura de Autoignição

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Concentração em percentagem em volume (%)
C_3H_8	Propano
CH_4	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2	Hidrogênio
ΔH_{Comb}	Entalpia de combustão (MJ/kg)
L	Limite de inflamabilidade de um componente puro (%vol)
O_2	Oxigênio
P	Pressão (kPa)
P_{atm}	Pressão atmosférica (kPa)
Pi	Pressão parcial do componente i (kPa)
P_{vap}	Pressão de vapor (kPa)
T	Temperatura (°C)
Y	Fração molar
Yi	Fração molar do componente i
$\frac{\Delta L}{L}$	Incerteza relativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 17

1.1 MOTIVAÇÃO 19

1.2 JUSTIFICATIVA.....19

1.3 OBJETIVOS 20

2 REVISÃO DA LITERATURA.....21

2.1 FUNDAMENTOS E DESAFIOS DO USO DO HIDROGÊNIO NA COMBUSTÃO..... 21

2.2 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO 23

2.3 LIMITES DE INFLAMABILIDADE.....26

2.3.1 Fundamentos Físicos e Teóricos dos Limites. 26

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM OS LIMITES DE INFLAMABILIDADE. 28

2.4.1 Pressão…….....28

2.4.2 Temperatura.....29

2.4.3 Energia de ignição. 30

2.4.4 Turbulência 32

2.4.5 Diluentes da mistura combustível-oxidante 32

2.5 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS E NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE.....33

2.5.1 Métodos Experimentais 33

2.6 MODELOS PREDITIVOS DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE.....38

2.6.1 Métodos Empíricos e Simplificados. 39

2.6.2 Método por Contribuição de Grupo Molecular. 41

2.6.3 Método por Temperatura de Chama Adiabática (CAFT). 41

2.6.4 Influência da Temperatura e Pressão nos Modelos. 42

2.6.5 Limites para Misturas de Combustíveis. 43

2.7 ESTADO DA ARTE DE MISTURAS H_2-GN (OU H_2-CH_4-C_3H_8). 44

3 METODOLOGIA..... 46

3.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL. 46

3.1.1 Bancada Experimental.....46

3.1.2 Câmara de Combustão e Sistema de Ignição. 47

3.1.3 Interior da câmara.....49

3.1.4 Placa de agitação magnética.....49
3.1.5 Sistema de Alimentação e Evacuação de Gases. 50
3.1.6 Sistema de Vácuo e Controle de Pressão. 50
3.1.7 Sensores e Aquisição de Dados. 51
3.1.8 Armazenamento de Gases. 52
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 52
3.2.1 Preparação da Mistura. 53
3.2.2 Execução do Ensaio. 53
3.2.3 Ignição e Critério de Inflamabilidade.....53
3.3 MATERIAIS. 54
3.4 VALIDAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL. 54
3.5 ANÁLISE DE INCERTEZA. 55
3.6 DEFINIÇÃO DAS MISTURAS DE ESTUDO 56
3.6.1 Desenho do Experimento. 56
3.6.2 Cálculo das Misturas. 57
3.6.3 Cálculo dos Limites Teóricos das Misturas. 59
3.6.4 Cálculo das pressões parciais teóricas.....60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 62
4.1 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA. 62
4.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE PARA MISTURAS $CH_4/C_3H_8/H_2$. 65
5 CONCLUSÕES..... 75
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. 77
REFERÊNCIAS……..78
ANEXO A – REGISTRO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS MISTURAS $CH_4/C_3H_8/H_2$..... 84
DADOS CURRICULARES.....90

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial têm gerado um aumento constante do consumo energético global, o qual permanece fortemente baseado em fontes fósseis como petróleo, carvão e gás natural (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Este cenário contribui diretamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa GEE, que atingiram 57,4 $GtCO_2$ em 2022, com 67% provenientes da queima de combustíveis fósseis (PROGRAMME, 2023). O Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas, alerta que o aquecimento global superior a 1,5 °C até 2050 resultará em eventos climáticos extremos e elevação do nível do mar, evidenciando a urgência de ações concretas ((IPCC), 2027). Como resposta, a Agência Internacional para as Energias Renováveis, propõe uma transição energética a os países e setores produtivos baseada em buscar formas mais limpas e eficientes de gerar, transportar e consumir energia através das fontes renováveis como a única via para limitar o aquecimento global (IRENA, 2021).

O hidrogênio verde H_2 é visto como um vetor energético promissor para descarbonizar setores de difícil eletrificação (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2022). Por ser armazenável e transportável em larga escala, o H_2 oferece vantagens sobre as baterias no contexto da intermitência das fontes solares e eólicas (ASIF et al., 2023). No entanto, o armazenamento de H_2 ainda enfrenta limitações técnicas e custos elevados, especialmente nas formas comprimida, líquida ou via amônia (MA et al., 2024). Além disso, as propriedades físicas do H_2, como alta inflamabilidade e difusividade, exigem cuidados rigorosos de segurança (DJUKIC et al., 2019).

Em presença disso, o aproveitamento da infraestrutura de gás natural existente surge como uma alternativa estratégica para viabilizar a introdução do H_2 na matriz energética atual (TOGUN et al., 2024).

Neste âmbito, o hidrogênio H_2 está a ser estudado como um vetor de energia sustentável e como um meio de armazenar energia renovável à escala dos serviços públicos (power-to-gas) (P2G) (SADEQ et al., 2024).

A mistura de H_2 na rede de gasodutos de gás natural GN existente foi proposta como um meio de aumentar a produção de sistemas de energias renováveis, tais como grandes parques eólicos e solares (QUINTINO et al., 2021). Se implementada

com concentrações relativamente baixas, menos de 5%–15% de H_2 por volume, essa estratégia parece viável sem aumentar significativamente os riscos associados à rede de distribuição (QUINTINO et al., 2021).

O maior problema com a queima de misturas de GN- H_2 é que os parâmetros básicos de combustão do GN se alteram na mistura devido às propriedades de combustão do H_2, devido a essas questões surgem desafios estruturais como a fragilização por hidrogênio, que compromete a integridade de tubulações metálicas em função do crescimento de trincas por fadiga. Estudos mostram que a adição controlada de impurezas gasosas como CO ou O_2 pode mitigar esse efeito, permitindo a reutilização segura da infraestrutura de GN (LAUREYS et al., 2022).

Dessa forma, o transporte energético pelos sistemas de distribuição convencionais, observou-se que para concentrações de H_2 abaixo de 20% em volume, não são necessárias modificações hidráulicas significativas, embora a perda de pressão aumente com a fração de H_2 (KOO et al., 2023).

Todos estes desafios, sejam eles estruturais como a fragilização ou operacionais como a perda de pressão, convergem para um tema central e inegociável: a segurança. Para gerir os riscos associados à introdução de hidrogênio na rede, é imperativo compreender como as suas propriedades de combustão alteram o comportamento do gás. Dentre todos os parâmetros de segurança, os limites de inflamabilidade são fundamentais, pois definem a faixa de concentrações em que uma mistura de combustível e ar pode inflamar e sustentar uma chama (CARVALHO; MCQUAY, 2007). Conhecer estes limites é o primeiro passo para estabelecer procedimentos operacionais seguros e para a avaliação, prevenção e minimização dos perigos de incêndio e explosão, desde o transporte até ao consumidor final (CORONADO et al., 2014).

Dessa forma, o estudo detalhado dos limites de inflamabilidade para misturas de hidrocarbonetos gasosos com hidrogênio torna-se essencial para garantir a segurança e a viabilidade técnica da introdução do hidrogênio na matriz energética atual. A presente dissertação busca contribuir com dados experimentais focados nos limites de inflamabilidade de misturas de metano, propano e hidrogênio, que são essenciais para subsidiar políticas públicas, normas técnicas e o desenvolvimento de aplicações energéticas seguras no contexto da transição energética.

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho está relacionada ao crescente empenho mundial em tecnologias energéticas sustentáveis e a urgente necessidade de descarbonização de setores industriais intensivos em energia. O H_2 tem sido amplamente considerado como um vetor energético limpo promissor, particularmente quando é produzido a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, destaca-se a mistura de hidrogênio com gases combustíveis, como o gás natural, como uma das estratégias para a sua inserção gradual no sistema energético, aproveitando a infraestrutura existente para transporte e distribuição.

No entanto, a viabilidade técnica desta solução depende fortemente do conhecimento dos limites de inflamabilidade das misturas resultantes, que variam conforme a composição e as condições de operação. A adição de H_2 a hidrocarbonetos altera significativamente o comportamento da combustão, ampliando os limites de inflamabilidade e, consequentemente, os riscos associados.

A maior parte dos estudos disponíveis concentra-se em frações de até 20%–30% de H_2 em volume. Essas concentrações moderadas são frequentemente avaliadas porque muitos estudos estão direcionados ao blending em infraestruturas existentes de gás natural, buscando condições mais próximas dos cenários operacionais atualmente considerados para a introdução gradual de H_2 na rede (SOFIAN et al., 2024).

Assim, este estudo visa fornecer dados técnicos essenciais para ampliar o uso seguro do H_2 na matriz energética, contribuindo para o desenvolvimento de soluções viáveis num cenário de transição energética global.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar do crescente número de estudos sobre a adição de hidrogênio a gases combustíveis, ainda existem lacunas técnicas relevantes quanto à segurança dessas misturas em concentrações elevadas de H_2. A maior parte dos trabalhos disponíveis na literatura concentra-se em teores de até 20%–30% de hidrogênio, enquanto misturas com concentrações superiores a 30% permanecem comparativamente pouco exploradas.

A falta de dados experimentais para essas faixas de mistura, especialmente para combustíveis multicomponentes, limita a adoção industrial do H_2 em larga escala. Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de ampliar o conhecimento sobre

os limites de inflamabilidade de misturas ternárias de metano, propano e hidrogênio, com foco em frações ricas em H_2.

O estudo experimental destes limites, validado por normas reconhecidas como a ASTM E681, é fundamental. Os resultados obtidos contribuirão para a definição de diretrizes mais robustas de segurança e projeto, favorecendo a transição energética com maior aproveitamento do hidrogênio como vetor de energia limpa.

1.3 OBJETIVOS

Determinar experimentalmente os Limites Inferiores e Superiores de Inflamabilidade LII e LSI de misturas GN-H_2. O foco reside em misturas que simulam gás natural enriquecido com frações de hidrogênio até 75% em volume, visando preencher a lacuna de dados experimentais existentes na literatura e fornecer parâmetros de segurança para a transição energética.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Realizar uma revisão da literatura sobre os limites de inflamabilidade de combustíveis gasosos, com ênfase na Lei de Le Chatelier para misturas multicomponentes ricas em hidrogênio.
- Estimar os limites de inflamabilidade utilizando a Lei de Le Chatelier para as misturas definidas, utilizando esses valores teóricos como base de comparação para avaliar os desvios dos dados experimentais.
- Validar o aparato experimental (esfera de 5L) através de ensaios com combustíveis puros (metano e propano), comparando os resultados com valores de referência da norma ASTM E681.
- Determinar experimentalmente os Limites Inferiores e Superiores de Inflamabilidade LII e LSI para as misturas ternárias CH_4-C_3H_8-H_2, cobrindo faixas de concentração de hidrogênio de até 75% em volume.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FUNDAMENTOS E DESAFIOS DO USO DO HIDROGÊNIO NA COMBUSTÃO.

O hidrogênio verde H_2 é apontado como um vetor energético promissor para descarbonizar setores de difícil eletrificação (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2022). Para compreender melhor esse papel, define-se vetor energético às substâncias ou dispositivos que armazenam energia de modo a que esta possa ser libertada posteriormente de forma controlada, se diferençam das fontes de energia primária, na medida em que, ao contrário das fontes primárias, são produtos manufaturados, nos quais foi previamente investida uma determinada quantidade de energia para a sua produção (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Embora o hidrogênio verde se destaque por seu baixo impacto ambiental, é importante reconhecer as demais rotas de produção atualmente disponíveis conforme apresentado na (Figura 1) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).



Figura 1: Produção de Hidrogênio.

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, (2022).

A Figura 1 apresenta as rotas de produção do hidrogênio (H_2), categorizadas por cores. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2022), a síntese de cada uma delas é a seguinte:

- Verde: eletrólise da água com eletricidade de fontes renováveis (solar, eólica, hídrica). Sem emissões de CO_2.
- Amarelo: eletrólise da água com eletricidade da rede elétrica (que pode ter fontes fósseis).

- Rosa/Roxo/Vermelho: eletrólise da água usando energia nuclear.
- Turquesa: pirólise do metano, que gera carbono sólido em vez de CO_2.
- Azul: reforma de gás natural ou carvão com captura e armazenamento do CO_2.
- Preto/Cinza: reforma de gás natural sem captura de CO_2 (emissões elevadas).
- Marrom: gaseificação de carvão (também com altas emissões de CO_2).
- Branco: subproduto de processos industriais (sem rota específica de produção).

Dentre os diversos tipos de vetores energéticos utilizados, podem-se citar baterias eletroquímicas, condensadores eléctricos, hidrogênio, água represada, ar pressurizado, carvão vegetal, gasolina, entre outros (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). O hidrogênio verde é um tipo de vetor energético que pode ser utilizado na distribuição de energias renováveis como por exemplo: A eletricidade gerada pelas turbinas eólicas pode ser aplicada na produção de hidrogênio através da eletrólise da água, que, por sua vez, é utilizada num veículo a pilhas de combustível de hidrogênio. A Figura 2, ilustra de forma simplificada o processo de produção e uso do hidrogênio verde a partir de fontes renováveis, como solar eólica e biogás (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

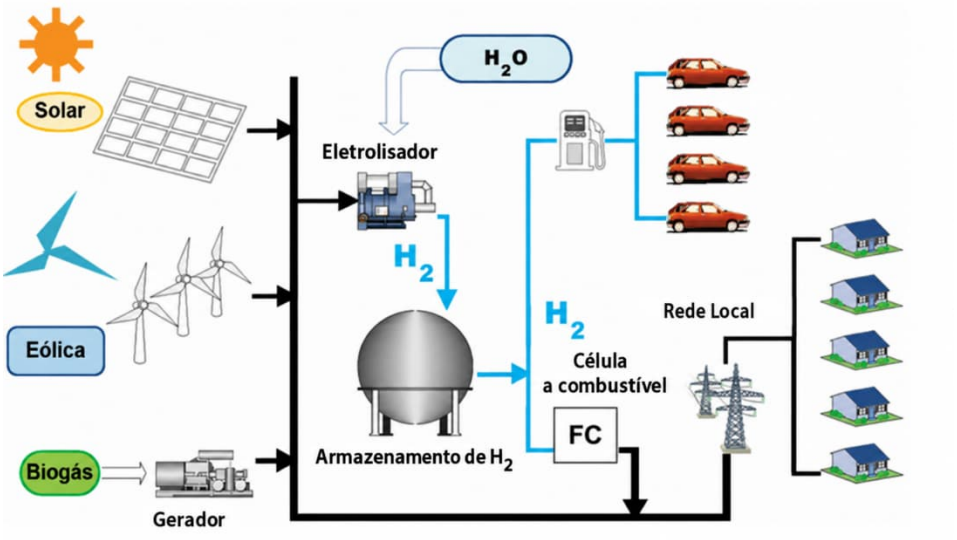


Figura 2: Hidrogênio Verde.

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, (2022).

A eletricidade gerada por fontes renováveis como solar, eólica e biogás é utilizada para alimentar um eletrólisador que separa a água (H_2O) em hidrogênio H_2 e oxigênio. O hidrogênio produzido é então armazenado em tanques e pode ser utilizado de duas formas principais: como combustível para veículos com célula a combustível

(FC), ou para geração de eletricidade distribuída, alimentando a rede local e abastecendo residências.

Para além do uso localizado, a viabilização do hidrogênio como um vetor energético de impacto em larga escala depende de soluções eficientes para o seu transporte e distribuição. Neste contexto, uma das alternativas mais atrativas do ponto de vista económico e logístico é o aproveitamento da vasta infraestrutura de gasodutos de gás natural já existente (TOGUN et al., 2024). A estratégia de misturar o hidrogênio na rede atual ('blending') permitiria transportar grandes volumes de energia limpa. No entanto, esta solução introduz desafios técnicos significativos que devem ser rigorosamente avaliados para garantir a integridade e a segurança do sistema (DJUKIC et al., 2019).

O principal problema associado à implementação do H_2 na rede de gasodutos de Gás Natural (GN) atual, é a fragilização por H_2 refere-se ao facto de que, depois de o aço absorver e difundir os átomos de hidrogênio, a estrutura da rede fica fragilizada, o que faz com que o material perca tenacidade, a resistência à tração e a ductilidade são significativamente reduzidas e é mais provável que ocorra uma fratura frágil (LAUREYS et al., 2022). Num ambiente de alta pressão, os tubos sem costura têm frequentemente de suportar pressões internas e externas elevadas, e o fenómeno da fragilização pelo hidrogênio tem um impacto particularmente significativo no seu desempenho (DJUKIC et al., 2019). A fragilização por hidrogênio é particularmente grave em aplicações que transportam hidrogênio. A fratura frágil causada pela fragilização por hidrogênio geralmente não tem qualquer aviso óbvio, mas uma vez que ocorre, pode causar fugas ou mesmo explosão, o que ameaça seriamente a segurança e a confiabilidade do sistema de tubulações, este risco de uma combustão descontrolada é um dos principais desafios de segurança para o uso do hidrogênio (CAO et al., 2025). No entanto, estudos recentes indicam que a adição de certas impurezas gasosas pode neutralizar o efeito da fragilização, submetendo tubos de aço A333 a ensaios de crescimento de fissuras por fadiga dentro de câmaras de gás segundo as normas ASTM E 647, observou-se que a introdução de CO em H_2 inibe a cinética de fissuramento acelerado (KOMODA et al., 2019).

2.2 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO

O armazenamento e transporte de hidrogênio ainda apresentam desafios a serem superados à medida que se desenvolve a economia do hidrogênio. Em relação

ao armazenamento, existem sistemas de estado gasoso, líquido ou sólido (ABE et al., 2019).

A Figura 3 ilustra as diferentes metodologias de armazenamento. Os sistemas de estado gasoso de armazenamento de hidrogênio dispõem de compressores e variam de acordo com os tipos de compartimentos, que podem ser subterrâneos ou acima do solo e normalmente são feitos de materiais metálicos. Os altos custos operacionais deste sistema para manter o hidrogênio com pressões entre 100 e 400 bar impedem o armazenamento de grandes quantidades de gás hidrogênio comprimido (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019). Já os sistemas de armazenamento de estado líquido dispõem de tecnologias de resfriamento para garantir o armazenamento do hidrogênio liquefeito a -253 ºC e 1 atm com requisitos de energia de 20 a 40 MJ/kg (VALENTI, 2016). Além disso, os materiais utilizados devem ser isolantes térmicos para manter a temperatura do sistema. Apesar da liquefação do hidrogênio apresentar-se como uma técnica bem estabelecida, o desafio são os altos custos deste processo na cadeia de produção do hidrogênio (CARDELLA et al., 2017). Além dos altos custos para ambos os sistemas mencionados anteriormente, os sistemas de armazenamento em estado gasoso e líquido são volumosos e oferecem riscos relacionados a vazamentos.

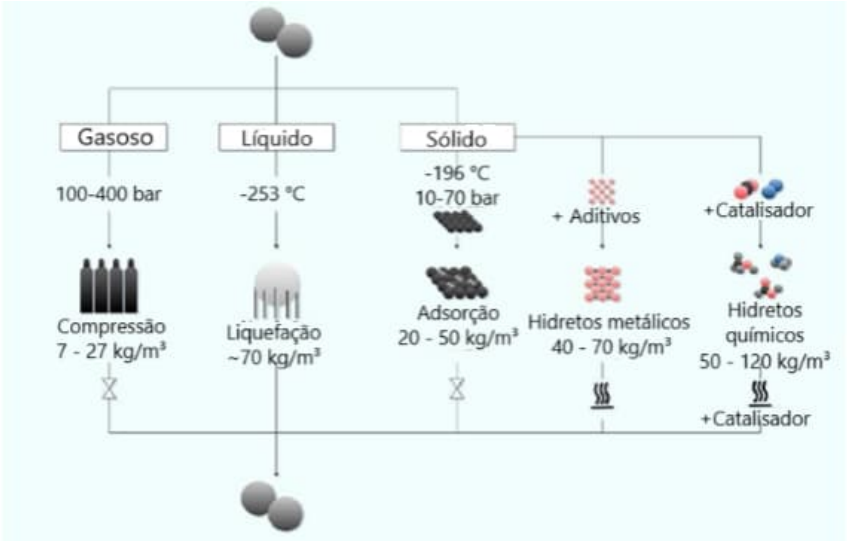


Figura 3: Sistemas de estado gasoso, líquido e sólido de armazenamento de hidrogênio em larga escala.

Fuente: ANDERSSON; GRÖNKVIST, (2019).

Já no que diz respeito aos armazenamentos em sistemas de estado sólido, o hidrogênio se combina física ou quimicamente com outros materiais e pode ser liberado por estímulos cinético, térmicos ou hidrólise. Nas combinações físicas o gás

hidrogênio é adsorvido a superfície de um substrato através das interações de Van der Waals. Como são interações fracas, a dessorção cinética é suficiente para liberação do hidrogênio. Os substratos utilizados incluem estruturas metálicas orgânicas (MOF), nanotubos de carbono (CNT) e polímeros de porosidade intrínseca (PIM) (PRACHI R. et al., 2016).

Nas combinações químicas, através da adsorção química podem ser formados hidretos metálicos, complexos e químicos. Os hidretos metálicos são formados quando em contato com a superfície sólida de metais puros e ligas metálicas o hidrogênio se dissocia em dois átomos formando um material sólido, que reage reversivelmente com o hidrogênio através da termólise (liberação através do aquecimento) ou hidrólise (liberação através da reação com água) (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019).

O hidreto metálico apresenta-se como uma das formas mais seguras, econômicas, leves e compactas de armazenamento de hidrogênio. Já os hidretos complexos através de ligações covalentes o hidrogênio forma uma estrutura cristalina composta de boro ou alumínio e elementos do primeiro e segundo grupo da tabela periódica (ABE et al., 2019).

O déficit nos métodos de reversibilidade dos hidretos complexos dificulta a aplicação em larga escala. Por fim, os hidretos químicos são formados com catalisadores através de combinações de carbono, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio e se dissociam através de catalisadores e termólise (DOS SANTOS PUGA; OLORTIGA ASENCIOS, 2023).

No que diz respeito ao transporte, o hidrogênio pode ser transportado por rodovias, transporte marítimo e dutos. Além das aplicações e propriedades físico-químicas do hidrogênio, deve ser considerada a distância e a quantidade a ser transportada (GERBONI, 2016). Em distâncias acima de 1500 km e/ou grandes quantidades de hidrogênio a ser transportado os gasodutos são mais adequados. Para o transporte via gasodutos é necessária uma alta pressão no local de produção e uma recompressão do gás no destino. A energia necessária para a compressão de gás hidrogênio de 20 a 70 bar é de 2,4 MJ/kg (MA et al., 2021). Para distâncias abaixo de 1500 km recomenda-se o transporte por navio de hidrogênio em estado líquido e a energia necessária para a liquefação requer 55-65 MJ/kg (MA et al., 2021). Por fim, para distâncias inferiores a 2 km e/ou destino variado recomenda-se o uso de caminhão com reboque de cilindros de hidrogênio de alta pressão (MA et al., 2021).

A diversidade de métodos de armazenamento e transporte, seja em estado gasoso a alta pressão ou líquido a temperaturas criogénicas, evidencia que o hidrogênio é manuseado em condições energéticas que apresentam desafios de segurança inerentes (LOWESMITH et al., 2007). Um risco comum a todos estes métodos é a possibilidade de um vazamento acidental, que levaria à formação de uma mistura de hidrogênio com o ar atmosférico. A questão de segurança mais fundamental em tal cenário é determinar a faixa de concentrações em que esta mistura se torna perigosa e capaz de inflamar. Esta questão é respondida precisamente pela definição dos limites de inflamabilidade, um parâmetro crucial para a análise e mitigação de riscos (CORONADO et al., 2014).

2.3 LIMITES DE INFLAMABILIDADE

A caracterização dos limites de inflamabilidade de misturas gasosas é fundamental para a segurança operacional e para o controle de processos térmicos. Nesse contexto, entende-se que, 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).

Fundamentos Físicos e Teóricos dos Limites.

Embora a definição prática dos limites seja baseada na observação da propagação da chama, a física fundamental que explica a existência desses limites foi discutida no trabalho clássico de Spalding (1957). Segundo o autor, a propagação da chama está condicionada ao balanço entre a geração de calor pela reação e as perdas térmicas. À medida que a mistura se aproxima do limite de inflamabilidade, esse balanço deixa de ser suficiente para sustentar uma propagação estável, resultando na extinção da chama.

Esta abordagem, focada nas perdas térmicas, foi a base da compreensão dos limites por décadas. No entanto, o modelo de Spalding foi baseado em cinética simplificada e focado principalmente em perdas condutivas/radiativas.

Décadas depois, esta visão foi refinada e complementada, notavelmente pelos trabalhos de Law e Egolfopoulos em os anos 1991-1992. Em vez de focar apenas nas

perdas térmicas, eles demonstraram que a extinção da chama no limite de inflamabilidade é, fundamentalmente, um fenômeno cinético.

Law & Egolfopoulos (1991) propuseram um critério cinético baseado no balanço entre as reações de ramificação de cadeia (chain branching), que produzem radicais e sustentam a chama (principalmente $H + O_2 \rightarrow O + OH$), e as reações de terminação de cadeia (chain termination), que os consomem (como $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$, crucial em misturas pobres). O limite de inflamabilidade ocorre precisamente quando a taxa de terminação de radicais se iguala e supera a taxa de ramificação, levando ao colapso da reação (LAW; EGOLFOPOULOS, 1991).

Este trabalho também foi pioneiro ao usar a técnica de chama em escoamento contra-corrente (counterflow) para medir os limites. Esta técnica permite controlar o estiramento da chama (flame stretch), um efeito de deformação do escoamento que está sempre presente em experimentos reais e que afeta fortemente os limites. O efeito do estiramento depende da difusão preferencial das espécies, medida pelo Número de Lewis (Le). Para misturas ricas em hidrogênio ($Le < 1$), o estiramento tende a fortalecer a chama, enquanto para hidrocarbonetos ($Le > 1$), ele a enfraquece.

Finalmente, Law & Egolfopoulos (1992) consolidaram estas ideias na "Teoria Unificada Termo-Cinética" (unified chain-thermal theory). Este trabalho-chave formaliza que os limites de inflamabilidade não são nem puramente térmicos (Spalding) nem puramente cinéticos (Law & Egolfopoulos (1991), mas que os dois mecanismos atuam simultaneamente. O limite fundamental é, então, definido como um "ponto de virada" (turning point), onde a combinação das perdas de calor (térmicas) e da competição entre as taxas de ramificação e terminação de radicais (cinética) supera a capacidade da chama de gerar calor e radicais, levando à extinção (LAW; EGOLFOPOULOS, 1992).

Existem dois limites de inflamabilidade, o inferior e o superior, para cada mistura combustível-oxidante. O Limite Inferior de Inflamabilidade (LII) corresponde à concentração mínima de combustível na mistura combustível-oxidante capaz de sustentar a propagação da chama, enquanto o Limite Superior de Inflamabilidade (LSI) corresponde à concentração máxima capaz de sustentar essa propagação (JUNIOR et al., 2018).

Estes limites 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).

Na prática, os limites de inflamabilidade são parâmetros fundamentais para a avaliação e prevenção de riscos de incêndio e explosão, bem como para a definição de medidas de proteção em processos que envolvem combustíveis gasosos. Entretanto, os valores determinados experimentalmente dependem das condições de ensaio, como temperatura, pressão, composição da mistura, geometria do recipiente e método de detecção, não devendo ser considerados propriedades absolutamente invariáveis do combustível (CORONADO et al., 2014).

2.4 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 (CARVALHO; MCQUAY, 2007).

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). Este comportamento é ilustrado na Figura 4., que mostra a aproximação dos limites inferior e superior à medida que a pressão diminui.

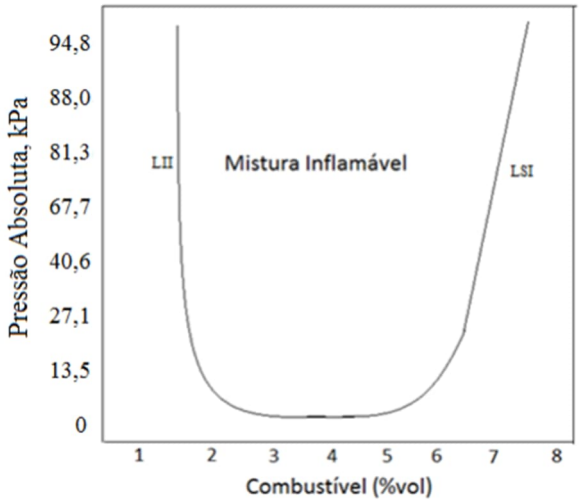


Figura 4: Efeito da pressão reduzida em 298K

Fonte: Coward; JONES et al., (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 diminui 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 o limite inferior diminui 0,15% em volume. 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 (CORONADO et al., 2014).

Temperatura

Se a temperatura da mistura inflamável correspondente ao LSI diminui 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 (JONES et al., 1952). Essa temperatura é a temperatura do limite superior de inflamabilidade para uma dada pressão. Por outro lado, se a temperatura diminui 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). A Figura 5, ilustra a forma geral das curvas de temperatura para os limites de inflamabilidade.

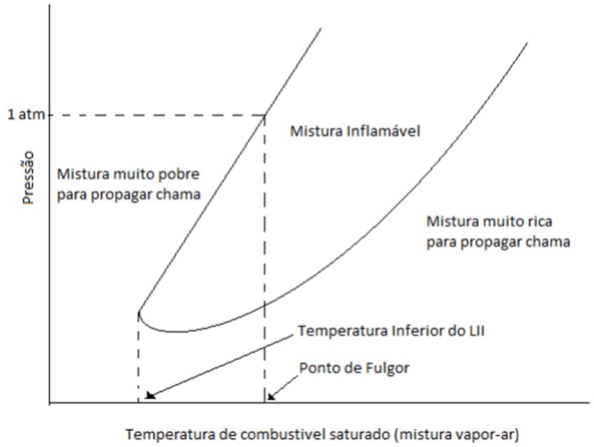


Figura 5: Forma geral das temperaturas dos limites de inflamabilidade.

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 (CORONADO et al., 2014).

Lee et al. (2011) estabeleceram uma montagem experimental para estudar o efeito da baixa temperatura e determinar os limites de inflamabilidade de misturas de metano-nitrogénio em ar a pressão atmosférica, obtendo uma incerteza de 0,2%. Concluíram que, com a diminuição da temperatura inicial, o limite superior de inflamabilidade diminui, enquanto o limite inferior aumenta.

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., 1988). A Tabela 1 indica 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 (CORONADO et al., 2014).

Tabela 1: 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).

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; ZANOELO, 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).

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.

Diluentes da mistura combustível-oxidante

Um parâmetro conhecido como concentração de oxidante limite (COL) é normalmente usado junto dos limites de inflamabilidade. O COL é a concentração de oxidante na mistura oxidante-combustivel-diluente 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 (CARVALHO; MCQUAY, 2007). 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 2 resume os limites de inflamabilidade de diferentes substâncias no ar e no oxigênio puro (CARVALHO; MCQUAY, 2007).

Tabela 2:Limites de inflamabilidade no ar e O_2

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; MCQUAY, (2007).

Zabetakis, (1965) estudou o efeito da quantidade de oxigênio nos limites de inflamabilidade do metano, ilustrado na Figura 6, 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.

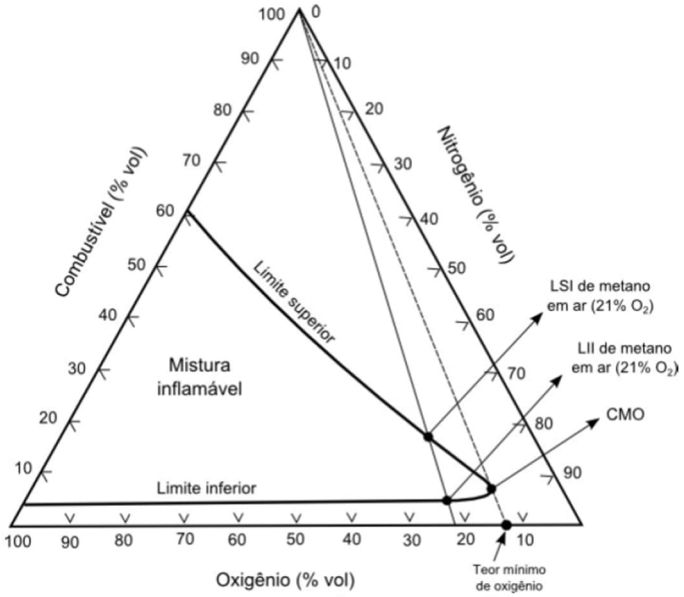


Figura 6 : Diagrama dos limites de inflamabilidade em função do oxigênio

Fonte: ZABETAKIS, (1965).

Fica evidente, portanto, que os limites de inflamabilidade não são propriedades intrínsecas e fixas de um gás, mas sim parâmetros que dependem fortemente das condições do sistema, como a temperatura, a pressão e a presença de diluentes. Todos estes fatores afetam, em maior ou menor medida, os limites de inflamabilidade, os quais, como já foi discutido, são de suma importância para a análise de segurança em processos industriais (CORONADO et al., 2014). Consequentemente, a confiabilidade e a comparabilidade dos dados de inflamabilidade dependem criticamente do método e do aparato experimental utilizados para a sua determinação. Esta sensibilidade às condições de ensaio é a razão pela qual foram desenvolvidas normas rigorosas, como a ASTM E681, que estabelecem um procedimento padronizado para garantir que os resultados sejam consistentes e aplicáveis.

2.5 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS E NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE.

Métodos Experimentais

Os principais métodos para determinação de limites de inflamabilidade se dividem em normas que utilizam o critério visual e normas que utilizam o critério de

pressão (ASTM E681,2015) resumidos na Figura 7. Para o critério visual, o recipiente a ser utilizado deve ser de vidro ou outro material transparente, pois não é necessário que suporte altas pressões. Neste método, o critério utilizado para definir a propagação da chama é a observação visual da sua ascensão no recipiente (ZABETAKIS, M. G., 1965). Por outro lado, no critério de pressão, considera-se como critério de ignição um aumento de 5 a 7% da pressão inicial da mistura (CARVALHO; MCQUAY, 2007). Por conta do aumento da pressão como consequência da propagação de chama dentro do recipiente de teste, para o critério de pressão o recipiente utilizado deve ser fabricado em material resistente que suporte a alta elevação de pressão (CORONADO et al., 2014).

Os métodos de cálculo dos limites de inflamabilidade incluem a avaliação visual e os métodos de aumento de pressão. Dentre os métodos que utilizam o critério visual, uma das principais referências é a norma ASTM E681. A norma exige recipientes esféricos de 5 ou 12 litros, correspondentes a diâmetros internos de 222 e 295 mm (JUNIOR et al., 2018). O critério visual para o recipiente de 5L específica é que as chamas devem mover-se para cima e para os lados da ignição, perto das paredes do recipiente ou a 13 mm das paredes do recipiente (ZABETAKIS, M. G., 1965). Para o reservatório de 12 litros, a propagação da chama é definida como a propagação da chama para cima e para os lados da parede do reservatório, formando um arco superior a 90°, medido a partir do ponto de ignição até as paredes do reservatório, como se mostra na Figura 8 (JUNIOR et al., 2018).

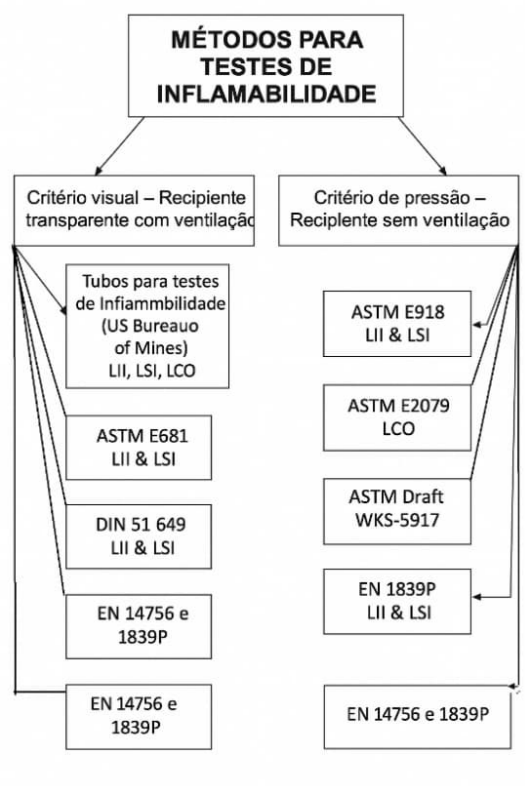


Figura 7: Critérios para determinação dos limites de inflamabilidade.

Fonte: URAL, (2008).

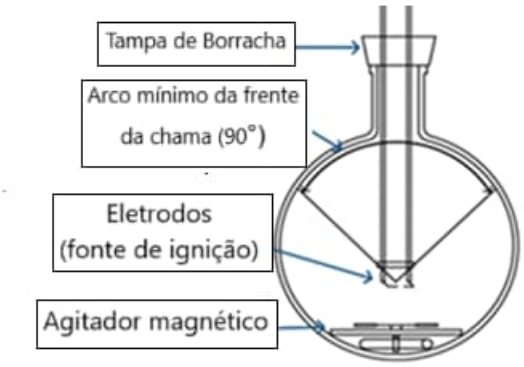


Figura 8: Critério para a inspeção visual dos limites de inflamabilidade segundo a norma ASTM E681 LII&LSI.

Fonte: ASTM, (2023).

A chama deve ser contínua ao longo da seta indicada na parede do reservatório, dando origem a uma propagação como a mostrada na Figura 9. Se a propagação da chama não for reproduzível ou a sua extensão não for clara, por exemplo, propagação não uniforme, estrutura irregular da chama ou se a chama não

encher quase metade do reservatório até à concentração máxima de inflamabilidade no ar, utiliza-se uma probabilidade de ignição de 50% (JUNIOR et al., 2018).

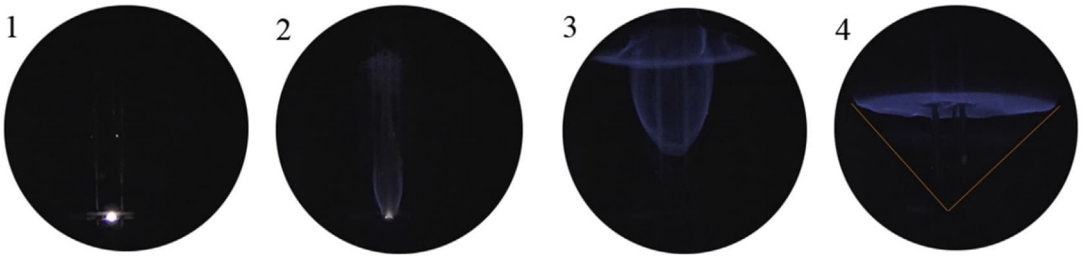


Figura 9: Propagação de uma chama no LII.

Fonte: TIAN et al., (2017).

Então, para o cálculo dos limites de inflamabilidade, utilizam-se as equações 2 e 3 respectivamente:

$$LII = \frac{I_P}{P} * 100\% \quad (2)$$

$$LIS = \frac{S_P}{P} * 100\% \quad (3)$$

Onde I_p y S_p som a quantidade de combustível gasoso em kPa para o LII y LIS respectivamente, P é a preção total do ensaio em kPA (ASTM, 2023). Além disso, a norma apresenta um método teórico para o cálculo dos limites de inflamabilidade para a determinação das dimensões das amostras iniciais de ensaio em função da concentração estequiométrica de combustível C_s no ar (ASTM, 2023), apresentadas nas equações 4 e 5:

$$LII = 0{,}54 * C_s \quad (4)$$

$$LIS = 3{,}5 * C_s \quad (5)$$

A Lei de Le Chatelier fornece uma estimativa teórica valiosa para os limites de inflamabilidade, especialmente para o LII. No entanto, a determinação de valores precisos e fiáveis, que são cruciais para aplicações de segurança, exige a realização de ensaios experimentais (ASTM E681,2015). Conforme discutido na seção anterior, um dos métodos padronizados mais robustos é aquele baseado no método do aumento de pressão. A Figura 10 apresenta um esquema do dispositivo experimental típico utilizado para a determinação dos limites de inflamabilidade por este método.

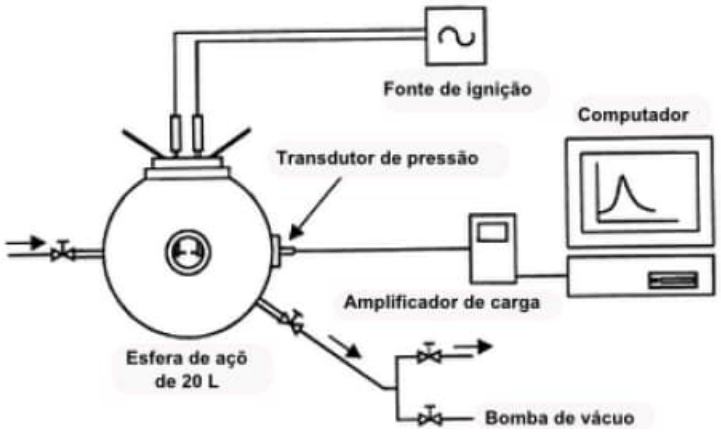


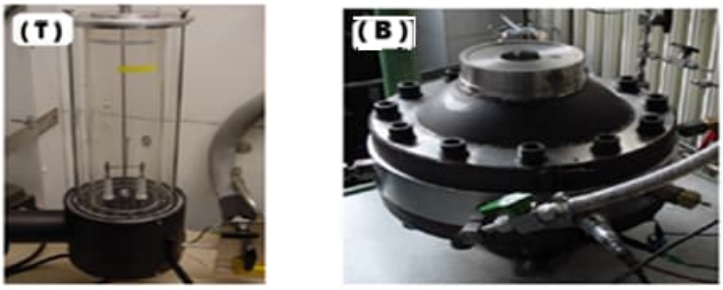
Figura 10: Esquema do dispositivo experimental para a determinação dos limites de inflamabilidade pelo método do aumento de pressão.

Fonte: JUNIOR et al.,(2018).

A norma ASTM E918 utiliza um método que é empregado para determinar os limites de inflamabilidade em condições de alta temperatura (até 200°C) e pressão inicial acima de 200 psi (~13,8 Bar). Ele é aplicável a misturas com pressão de explosão inferior a 2000 psi (~138 Bar). O recipiente de teste é um cilindro de metal resistente à alta pressão. A propagação da chama é definida como a reação de combustão que resulta em uma pressão de pelo menos 7% acima da pressão absoluta inicial. A Figura 10 ilustra o esquema do equipamento seguindo a norma ASTM E918 utilizado por de Smet et al., (1999).

A Figura 11 apresenta os dispositivos padrões para a determinação dos limites de inflamabilidade pelas normas (T) EN 1839(T) e (B) EN 1839(B). O primeiro método é o EN 1839(T), que considera um tubo vertical com um volume de pelo menos 1,52 L (D = 8 cm). O critério de inflamabilidade neste caso estabelece que uma mistura é inflamável se, após a ignição, a chama se afastar (e se espalhar) a uma distância maior que 100 mm da fonte de ignição. O segundo método é o EN 1839(B), no qual é utilizada uma bomba esférica de 5L. No entanto, o critério de inflamabilidade utilizado é o critério de aumento de pressão. Uma mistura é classificada como inflamável quando a pressão aumenta em 5% em comparação com a pressão inicial (ASTM E681,2015).

Figura 11: Dispositivo padrão de determinação experimental dos limites de inflamabilidade pelas normas EN 1839 (T), EN 1839 (B).



Essas metodologias normativas constituem a referência para compreender e comparar os resultados obtidos em estudos experimentais anteriores.

Fonte: Adaptado de Quintero Cartagena (2013), com imagens de SAFEKINEX (2006).

Miao et al. (2011) conceberam uma bancada de ensaios de acordo com a norma europeia EM 1839, que inclui uma câmara de combustão de volume constante e sistemas de ignição Schlieren de alta velocidade, aquisição de dados e fotografia. Dois lados da câmara são feitos de vidro de quartzo para permitir o acesso ótico. As fotografias da propagação da chama foram registradas com uma câmara CCD de alta velocidade Redlake HG-100 K. Como resultado, foram apresentados os limites de inflamabilidade das misturas de GN e CH_4 enriquecidas com frações de H_2 de 20%, 40%, 60% e 80%, bem como correlações para essas composições.

Em seu trabalho, Coronado et al., (2014), utiliza a norma ASTM E-681 estabelecida pela American Society for Testing and Materials, salientando a importância da utilização de uma câmara de alta velocidade para registar a propagação da chama. O estudo utilizou um transdutor para monitorar a pressão, mas a determinação da inflamabilidade foi baseada no critério visual, permitindo a análise da estrutura da chama.

A análise destes trabalhos de referência demonstra a importância e a complexidade dos ensaios experimentais na determinação dos limites de inflamabilidade. Para além da medição direta em laboratório, a literatura apresenta também uma abordagem complementar que é fundamental para a análise de segurança: o uso de modelos preditivos para estimar estes limites.

2.6 MODELOS PREDITIVOS DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE.

Para além dos métodos experimentais descritos anteriormente, a literatura apresenta diversos modelos teóricos e preditivos para o cálculo dos limites de inflamabilidade. Estes modelos são ferramentas valiosas para realizar estimativas

iniciais, compreender a influência de diferentes parâmetros físico-químicos e otimizar o planejamento de ensaios experimentais. A seguir, serão apresentados alguns dos principais modelos encontrados na literatura, desde regras empíricas simples até abordagens mais complexas baseadas na estrutura molecular e na termodinâmica da combustão.

2.6.1 Métodos Empíricos e Simplificados.

Diversos modelos simplificados foram propostos na literatura para uma primeira estimativa dos limites de inflamabilidade. Uma regra empírica comum, válida para a maioria dos combustíveis em condições normais (1 atm e 298 K), sugere que o LII é aproximadamente metade da concentração estequiométrica, enquanto o LSI é cerca de três vezes este valor (GLASSMAN IRVIN, 2014). Outras abordagens incluem o cálculo do LII com base na entalpia de combustão do combustível (ΔH_{Comb}), conforme a Equação (6) (ALBAHRI, 2003) ou utilizando a razão entre a pressão de vapor (P_f) e a pressão atmosférica (P_0), como na Equação (7) (CORONADO et al., 2012). Embora úteis para uma estimativa inicial, estes modelos podem apresentar desvios significativos para alguns compostos.

$$LII[\%vol.] = \frac{-4354}{\Delta H_{comb}} \quad (6)$$

$$LII = \frac{P_f}{P_0} x100 \quad (7)$$

A Tabela 3, compilada por Coronado et al., (2014), apresenta os limites de inflamabilidade de referência para diversos compostos.

Os métodos empíricos e os valores da Tabela 3 são úteis como um ponto de partida para os ensaios. No entanto, para uma maior precisão no cálculo, a literatura descreve modelos mais robustos. As seções seguintes apresentarão duas dessas abordagens mais complexas: o método por contribuição de grupo molecular e o método baseado na temperatura de chama adiabática (CAFT).

Tabela 3: Limites de inflamabilidade de alguns compostos em 1 atm e 298 K.

N°	Composto	Fórmula Química	LII	LSI
1	Acetileno	CH -CH	2,5	100
2	Amônia	NH_3	15	28
3	Benzeno	C_6H_6	1,3	7,9
4	Gás de alto forno	-	35	74
5	Butano	$CH_3CH_2CH_2CH_3$	1,6	8,4
6	Álcool Butílico	$CH_3(CH_2)_2CH_2OH$	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_6H_{12}	1,3	8
11	Etano	CH_3CH_3	3	12,5
12	Álcool Etil	C_2H_6O	3,3	19
13	Etileno	$H_2C\text{-}CH_2$	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	$CH_3(CH_2)_5CH_3$	1,1	6,7
18	Hexano	$CH_3(CH_2)_4CH_4$	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_3OH	6	36
24	Éter Metil	$(CH_3)_2{}^o$	3,4	27
25	Nafta	-	0,8	5
26	Octano	$CH_3(CH_2)_6CH_3$	1	6,5
27	Pentano	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	1,5	7,8
28	Propanol	CH_3CH_3CHO	2,6	17
29	Propano	$CH_3CH_2CH_3$	2,1	9,5
30	Tolueno	$C_6H_5CH_3$	1,2	7,1

Fonte: CORONADO et al.,(2012).

2.6.2 Método por Contribuição de Grupo Molecular.

Outra abordagem para prever os limites de inflamabilidade é o método por contribuição de grupo molecular. Este método, proposto por Frutiger et al., (2016), baseia-se na ideia de que os limites de um composto podem ser calculados somando as contribuições de seus diferentes subgrupos moleculares (de primeira (C_j), segunda (M_k) e terceira (E_I) ordem). O cálculo é realizado utilizando as equações 8 e 9 respectivamente:

$$LII = LII_{const} * \exp \quad (8)$$

$$LSI = LSI_{const} * \exp \quad (9)$$

Nestas equações N_j, D_k, O_I, representam a quantidade de cada grupo na molécula. A Tabela 4 apresenta alguns exemplos dos valores de contribuição para diferentes grupos funcionais, conforme definidos por (FRUTIGER et al., 2016).

Tabela 4: Contribuição de grupos funcionais.

Tipo	Constante	LII [%vol.]	LSI [%vol.]
1°	CH_3	-0,24	-1,15
1°	CH_2	-0,23	-0,14
1°	CH	-0,23	0,89
2°	CO-O-CO	0,07	-0,1
2°	Aromático C-$CH(CH_3)_2$	-0,24	-0,27
2°	Aromático C-$C(CH_3)_3$	0,01	0,3
3°	Anel aromático s1s2	0,12	-0,01
3°	Anel aromático s1s3	-0,01	-0,07

Fonte: FRUTIGER et al., (2016).

2.6.3 Método por Temperatura de Chama Adiabática (CAFT).

Um método amplamente utilizado e baseado em princípios termodinâmicos é o da Temperatura de Chama Adiabática Fechada (CAFT). Este método assume que os limites de inflamabilidade correspondem à concentração de combustível que resulta numa temperatura de chama adiabática específica (MENDIBURU et al., 2017). Para o LII, o modelo assume que a combustão é completa (Equação 10). Já para o LSI, o modelo diferencia entre a reação de combustão que desconsidera a formação de condensado (Equação 11) e a que considera essa formação (Equação 12) (MENDIBURU et al., 2023). Com base nestas reações, calcula-se a quantidade de oxidante necessária para atingir a temperatura de chama limite.

$$C_{x_C}H_{x_H}O_{x_o} + \nu_{ar}^{LII}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow n_{CO_2}CO_2 + n_{H_2O}H_2O + (\nu_{ar}^{LII} - \nu_{ar}^{S})O_2 + 3.76\nu_{ar}^{LII}N_2 \quad (10)$$

$$C_{x_C}H_{x_H}O_{x_o} + \nu_{ar}^{LSI}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow n_{CO_2}CO_2 + n_{CO}CO + n_{H_2O}H_2O + n_{H_2}H_2 + 3.76\nu_{ar}^{LII}N_2 \quad (11)$$

$$C_{x_C}H_{x_H}O_{x_o} + \nu_{ar}^{LSI}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow n_{CO}CO + n_{C}C + n_{H_2O}H_2O + n_{H_2}H_2 + 3.76\nu_{ar}^{LII}N_2 \quad (12)$$

Com base nestas reações, determina-se o número de mols do oxidante necessário para atingir a temperatura de chama limite. Em seguida, a percentagem em volume do combustível na mistura, que corresponde aos limites de inflamabilidade, ν_{ar}^{LII} e ν_{ar}^{LSI}, é calculada através da equação 13 (MENDIBURU et al., 2015, 2016, 2017).

$$LII/LSI = \frac{100}{1 + \upsilon_{ar}^{LII/LSI}} \quad (13)$$

Em resumo, embora o CAFT seja uma ferramenta poderosa, os seus resultados devem ser sempre complementados com dados experimentais para uma avaliação de segurança completa (MENDIBURU et al., 2023).

2.6.4 Influência da Temperatura e Pressão nos Modelos.

Os modelos apresentados anteriormente são, em geral, para condições normais de temperatura e pressão (1 atm e 298 K). No entanto, é fundamental considerar a influência destas variáveis nos limites de inflamabilidade. Para a variação da temperatura inicial, a equação 14 empírica proposta por Zabetakis, Michael G., (1965) é amplamente utilizada:

$$\frac{LI_T}{LI_0} = 1 \pm 0{,}000721(T - T_0) \quad (14)$$

Onde o sinal negativo (-) é utilizado para o LII, o sinal positivo (+) é utilizado para o LSI, o subíndice (0) é referente à referência utilizada para o cálculo e o subíndice (T) refere-se à temperatura que se quer calcular o LI.

Para o efeito da pressão inicial em temperatura constante, Zabetakis, Michael G., (1965) apresentam as Equações 15 – 16 que são validadas para pressões de 1 – 680 atm, que demonstram uma dependência logarítmica.

$$LII_P = 4{,}9 - 0{,}71\log(P) \quad (15)$$

$$LSI_P = 14{,}1 + 2{,}04\log(P) \quad (16)$$

Esta dependência logarítmica com a pressão é um comportamento geral, embora existam diversas outras equações empíricas na literatura para descrever esta relação (MENDIBURU et al., 2023).

2.6.5 Limites para Misturas de Combustíveis.

Para misturas de gases combustíveis, a determinação experimental dos limites pode ser um processo complexo. Por essa razão, modelos preditivos são frequentemente utilizados na literatura para estimar estes limites como uma primeira aproximação. Dentre os modelos disponíveis, o mais amplamente conhecido e aplicado é a Lei de Le Chatelier.

É importante notar que a equação de Le Chatelier pode ser apresentada de duas formas, dependendo se a composição da mistura é expressa em percentagem em volume (C) ou em fração molar (y).

I. Usando Percentagem em Volume (C):

Neste caso, a soma das concentrações dos componentes combustíveis é 100% ($\sum Ci = 100$), e a fórmula utiliza 100 no numerador, equação 17:

$$L_{mistura} = \frac{100}{\frac{C_1}{L_1} + \frac{C_2}{L_2} + \dots} \quad (17)$$

II. Usando Fração Molar (y):

Neste caso, a soma das frações molares dos componentes combustíveis é 1 ($\sum yi = 1$), e a fórmula utiliza 1 no numerador, equação 18:

$$L_{mistura} = \frac{1}{\frac{y_1}{L_1} + \frac{y_2}{L_2} + \dots} \quad (18)$$

Nestas equações, y_1, y_2, ..., y_n representam as frações molares de cada combustível na mistura (livre de oxidante), e L_1, L_2, ..., L_n são os limites de inflamabilidade de cada componente individual.

É importante notar que, conforme a literatura, a Lei de Le Chatelier apresenta uma boa precisão para o cálculo do LII. No entanto, o modelo pode gerar desvios significativos para o LSI. Isto ocorre porque, em misturas ricas (próximas ao LSI), a baixa quantidade de oxigênio leva a reações de combustão incompletas e complexas, que o modelo simplificado de Le Chatelier não consegue prever com exatidão (MENDIBURU et al., 2020). Dada a complexidade das misturas ternárias com

hidrogênio estudadas nesta dissertação, o uso exclusivo de modelos teóricos poderia introduzir erros de segurança, tornando a validação experimental imprescindível.

2.7 ESTADO DA ARTE DE MISTURAS H_2-GN (OU H_2-CH_4-C_3H_8).

A transição para o uso de hidrogênio (H_2) na rede de gás natural (GN) existente é um dos tópicos de maior relevância na atual agenda de descarbonização, o que é evidenciado pelo crescimento exponencial do número de publicações científicas sobre o tema, particularmente desde 2020 (SOFIAN et al., 2024).

Esta transição, no entanto, levanta desafios críticos. Uma revisão recente e abrangente do tema, como a de Sofian et al.,(2024), demonstra que grande parte da pesquisa atual tem focado na integridade estrutural dos gasodutos, especificamente nos efeitos de corrosão e fragilização por hidrogênio (HE) nos materiais. Embora fundamentais, estes estudos sobre materiais não resolvem diretamente os desafios de segurança associados às propriedades de combustão das misturas H_2/GN. O mesmo artigo Sofian et al.,(2024) aponta a necessidade de mais estudos detalhados sobre o comportamento de vazamentos e a formação de nuvens inflamáveis, um risco que é governado diretamente pelos limites de inflamabilidade.

Quando a pesquisa se foca nos limites de inflamabilidade, o estado da arte experimental ainda se baseia em simplificações significativas do gás natural. Trabalhos muito recentes, como o de Wang et al.,(2025), têm avançado na compreensão do efeito de diluentes inertes (como N_2 e CO_2) sobre os limites de misturas H_2/GN. No entanto, o próprio estudo de Wang et al.,(2025) aponta a limitação de que a maioria dos trabalhos, incluindo o deles, trata o "gás natural" como sendo metano (CH_4) puro. Esta simplificação ignora o impacto dos hidrocarbonetos mais pesados (como propano, C_3H_8, e butano, C_4H_{10}), que são componentes integrais do GN e que alteram significativamente as suas propriedades de combustão.

Uma revisão abrangente da teoria e dos métodos experimentais, como a de Mendiburu et al.,(2023), reforça a complexidade do tema. O artigo destaca que os limites de inflamabilidade dependem fortemente da composição da mistura e que métodos de estimativa clássicos, como a Lei de Le Chatelier, possuem limitações significativas para misturas multicomponentes complexas — exatamente o caso de misturas H_2-CH_4-C_3H_8.

Esta lacuna de dados experimentais tem uma consequência prática direta na análise de riscos. Trabalhos focados em segurança, como o de Remacha et al., (2025), desenvolvem modelos para prever a formação de atmosferas inflamáveis em

caso de vazamentos em ambientes fechados. O parâmetro de entrada mais crítico para estes modelos de segurança é o Limite Inferior de Inflamabilidade (LII). Remacha et al., (2025) concluem que o uso de modelos simplificados (ideais) leva a avaliações de risco imprecisas.

Deste modo, a literatura recente define claramente a lacuna de pesquisa:

I. Os modelos de segurança Remacha et al., (2025) precisam do LII real da mistura H_2/GN para serem precisos.
II. Os trabalhos experimentais atuais Wang et al.,(2025) ainda medem LII de misturas simplificadas (H_2/CH_4), tratando o GN como metano puro.
III. A teoria Mendiburu et al.,(2023) confirma que os componentes mais pesados (como o C_3H_8) não podem ser ignorados.

A obtenção de parâmetros de segurança por meio de dados empíricos é indispensável para validar e refinar os modelos teóricos de previsão, incluindo a equação de cálculo de misturas desenvolvida no âmbito deste projeto. Para garantir que as futuras ferramentas de planejamento de rede sejam baseadas em evidências sólidas, este trabalho adotará o critério visual referenciado na norma ASTM E681. Esta abordagem assegura uma confirmação direta e inequívoca da auto-sustentabilidade da chama, permitindo a correta determinação dos limites de inflamabilidade. Com o intuito de materializar essa investigação, o capítulo seguinte detalhará o aparato experimental e os procedimentos rigorosos que serão utilizados para aplicar este método e atingir os objetivos propostos.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a determinação experimental dos limites de inflamabilidade das misturas de combustível estudadas. Detalha-se o aparato experimental, os materiais utilizados, o procedimento de ensaio em conformidade com a norma ASTM E681, a análise da incerteza e os cálculos teóricos que serviram como base para o planejamento experimental.

Bancada Experimental.

O equipamento experimental encontra-se montado sobre um sistema de suporte estático-móvel, projetado especificamente para proporcionar estabilidade durante os ensaios e facilitar o deslocamento do conjunto dentro do laboratório. A Figura 12 mostra o aparato experimental utilizado na determinação dos limites de inflamabilidade: (a) câmara esférica de vidro borossilicato 3.3, com volume interno de 5 L alojada na câmara de contenção metálica; (b) câmera de alta velocidade utilizada para o registro da propagação da chama; (c) sistema de alimentação e mistura de gases, com tubulações de aço inoxidável, válvulas de agulha e válvulas solenóides; (d) tampão de borracha atuando como mecanismo passivo de alívio de pressão para a câmara de contenção externa; (e) Agitador Magnético, acoplado à câmara de vidro para garantir a homogeneização das misturas gasosas antes da ignição; (f) Painel de Controle (IHM), utilizado para o acionamento e controle sequencial das válvulas e dos processos de ensaio; (g) Data Logger Ômega, empregado para o registro e monitoramento contínuo da temperatura inicial do ensaio; (h) ponto de conexão da bomba de vácuo Edwards RV5, utilizada para a evacuação da câmara antes e após os ensaios; (i) transdutor de pressão digital (Trafag, modelo DPC 8380) utilizado para monitorar as pressões parciais; (j) par de eletrodos de tungstênio posicionado no centro geométrico do balão para a ignição.

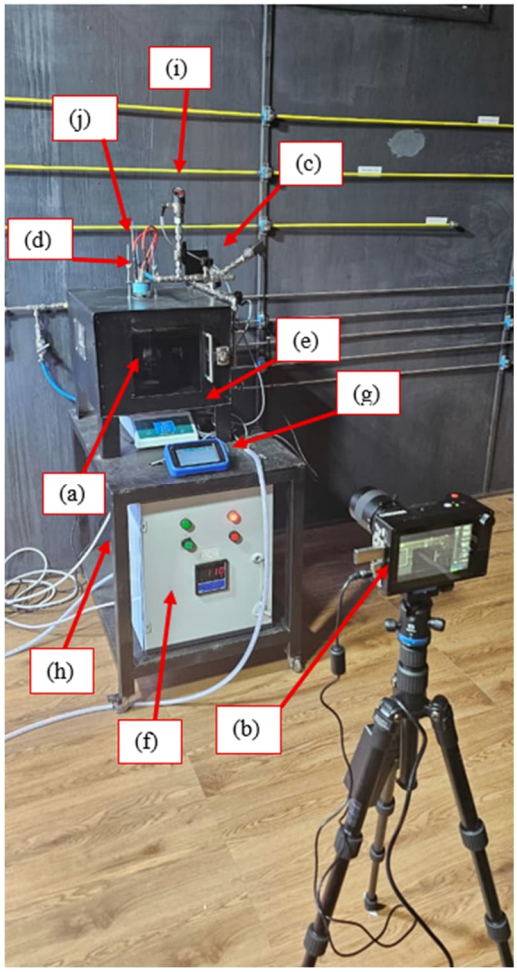


Figura 12: Vista geral do aparato experimental.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Câmara de Combustão e Sistema de Ignição.

O componente central do sistema é um balão esférico de fundo redondo DURAN®, com volume nominal de 5000 mL, fabricado em vidro borossilicato 3.3. O recipiente possui diâmetro externo de aproximadamente 223 mm, altura de 305 mm e gargalo com diâmetro externo de 50 mm, dimensões compatíveis com o recipiente de 5 L recomendado pela norma ASTM E681 para ensaios de inflamabilidade pelo critério visual (OVERVIEW, [s. d.]).

O balão foi utilizado exclusivamente em ensaios conduzidos à pressão atmosférica, não sendo operado como vaso pressurizado. A ficha técnica do recipiente informa o material, volume e dimensões geométricas, mas não especifica uma pressão máxima admissível de operação. Dessa forma, por razões de segurança, o sistema foi projetado para trabalhar próximo à pressão atmosférica, com pressão inicial em torno de 101,3 kPa, e com tampa elastomérica posicionada de forma a atuar

como mecanismo passivo de alívio de pressão durante a deflagração, como ilustrado na Figura 13.

Essa configuração está de acordo com a concepção da ASTM E681, que utiliza o frasco de vidro como recipiente visual de ensaio e recomenda que a câmara de proteção possua alívio de explosão para baixas sobrepressões, da ordem de até 6,9 kPa (INTERNATIONAL, 2015; OVERVIEW, [s. d.]).

O sistema de ignição foi posicionado no centro geométrico do balão e constituído por dois eletrodos metálicos isolados eletricamente. Conforme a recomendação da ASTM E681, foi adotado espaçamento de 6,4 mm entre as pontas dos eletrodos. A norma especifica, para ignição por centelha de alta tensão, uma fonte de aproximadamente 15 kV e 30 mA, com duração da descarga limitada entre 0,2 s e 0,4 s por temporizador. Esses parâmetros servem como referência para garantir uma ignição reprodutível sem alterar artificialmente a condição de inflamabilidade da mistura (INTERNATIONAL, 2015).

A condição de ignição foi mantida constante em todos os ensaios, de modo que as diferenças observadas entre as misturas fossem atribuídas principalmente à composição combustível-ar e não a variações na energia de ignição. A propagação da frente de chama foi registrada por uma câmera de alta velocidade, operando a 5000 quadros por segundo, permitindo a confirmação visual da propagação da chama conforme o critério adotado.

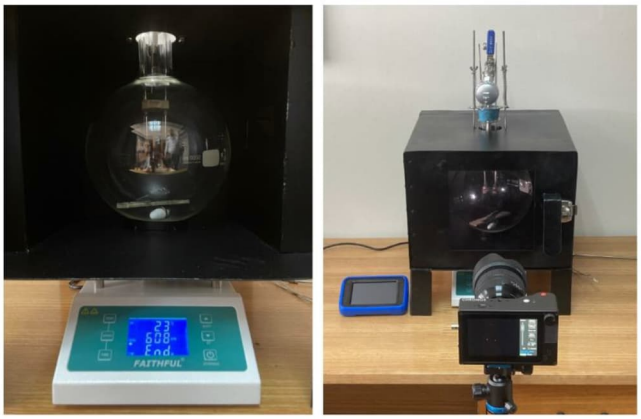


Figura 13: Detalhe da bancada experimental e do sistema de combustão esférico para ensaios de inflamabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Interior da câmara.

No interior da câmara de contenção encontra-se o balão de vidro de 5 L, no qual é preparada e contida a mistura gasosa a ser analisada. Para garantir a mistura dos gases, este dispõe de um misturador constituído por uma barra agitadora de 63,5 mm em forma de ovo, revestida a plástico. Trata-se de uma barra magnética que é ativada por uma placa de agitação magnética externa. Para a ignição, possui dois elétrodos isolados termicamente que geram a faísca necessária para a combustão. Esses componentes são fixados por elementos mecânicos e vedações elastoméricas, conforme apresentado na Figura 14.

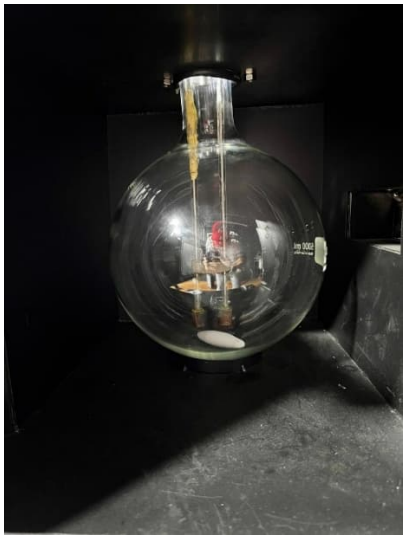


Figura 14: Interior da câmara de combustão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Placa de agitação magnética.

O agitador magnético utilizado faz girar a barra magnética no interior da câmara de inflamabilidade a uma velocidade de 400 rpm. Esse sistema de agitação contribui para a homogeneização da mistura gasosa antes da ignição.

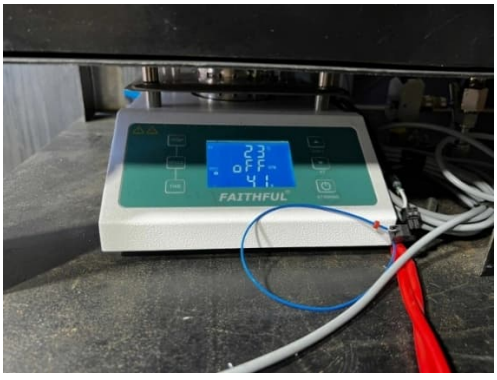


Figura 15: Placa de agitação magnética.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Sistema de Alimentação e Evacuação de Gases.

A Figura 16 mostra as linhas de alimentação dos gases, H_2, CH_4 e C_3H_8, conectadas aos respectivos cilindros de armazenamento. Cada linha possui controlador de fluxo mássico e válvula de fechamento, permitindo controlar a introdução dos gases e evitar a entrada simultânea de gases diferentes.

Estas possuem um sistema de descarga através de uma válvula de purga, garantindo que não fiquem resíduos da mistura, evitando contaminantes e por motivos de segurança do laboratório.



Figura 16: Controladores de fluxo mássico e válvulas de corte nas linhas de gás.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Sistema de Vácuo e Controle de Pressão.

A evacuação da câmara foi realizada por uma bomba de vácuo de palhetas rotativas Edwards RV5, pertencente à série RV. Segundo as especificações do fabricante, esse modelo apresenta velocidade de bombeamento de aproximadamente 5,1 m³/h a 50 Hz e 6,2 m³/h a 60 Hz, pressão final da ordem de 2×10^{-3}mbar e potência nominal de 0,45 kW a 50 Hz ou 0,55 kW a 60 Hz. A bomba foi empregada para remover gases residuais antes de cada ensaio, contribuindo para a reprodutibilidade da composição preparada por pressões parciais. A bomba encontra-se integrada na base do suporte, como mostra a Figura 17.



Figura 17: Bomba de vácuo (Edwards RV5).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Sensores e Aquisição de Dados.

A pressão durante a preparação das misturas foi monitorada por um presostato/transmissor digital Trafag DPC 8380, operado na faixa de pressão relativa de -1 a 0 bar. O instrumento foi utilizado para acompanhar a evacuação da câmara e a introdução sequencial dos gases por pressões parciais. Segundo o fabricante, o DPC 8380 utiliza princípio de medição por camada espessa cerâmica, possui precisão típica a 25 °C de ±0,5% do fundo de escala e saída analógica configurável (TRAFAG et al., [s. d.]). Os sinais dos sensores foram registrados por um sistema portátil de aquisição de dados Omega OM-CP-OCTPRO, utilizado para monitorar e armazenar as variáveis experimentais durante os ensaios. Esse registrador permitiu acompanhar as condições iniciais de pressão e temperatura antes da ignição, contribuindo para o controle e a rastreabilidade dos dados experimentais, conforme apresentado na Figura 18. Esse conjunto de instrumentação foi fundamental para controlar as pressões parciais dos gases introduzidos sequencialmente na câmara de combustão, verificar a pressão final da mistura antes da ignição e registrar as condições experimentais associadas a cada ensaio.



Figura 18: Pressostato/transmissor digital Trafag DPC 8380 e registrador de dados portátil Omega OM-CP-OCTPRO utilizados no monitoramento das condições experimentais.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Armazenamento de Gases.

Para garantir a segurança na manipulação dos combustíveis, os cilindros de gases comprimidos (Propano, Gás Natural e Hidrogênio) são armazenados em abrigos metálicos independentes, localizados no exterior do laboratório e fisicamente separados da área de ensaio. Cada cilindro está conectado a manômetros e válvulas reguladoras de pressão que permitem ajustar com precisão o fluxo para o sistema como se mostra na Figura 19.



Figura 19: Abrigo externo dos cilindros de gases utilizados nos ensaios.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção detalha o procedimento experimental utilizado para a determinação dos limites de inflamabilidade das misturas de gás natural e hidrogênio, em

conformidade com a norma ASTM E681. O método baseia-se na preparação de misturas precisas pelo método das pressões parciais e na observação visual da propagação da chama após a ignição.

Preparação da Mistura.

O procedimento para cada ensaio inicia-se com a definição da composição da mistura a ser testada. Esta composição é determinada pelo plano experimental, que visa avaliar o efeito da adição progressiva de hidrogênio ao gás base. Para uma dada concentração de combustível em ar (expressa em percentagem volúmica), a Lei de Dalton é então utilizada para calcular a pressão parcial necessária de cada componente (gás base, hidrogênio e ar sintético). O cálculo é realizado com a equação 19:

$$Pi = yi \cdot P_{final} \quad (19)$$

Onde:

Pi: pressão parcial do componente i (kPa).

yi: fração molar desejada do componente i na mistura final.

P_{final}: pressão total final da mistura, neste caso, a pressão atmosférica (101.325 kPa).

Antes da introdução dos gases, a câmara de combustão é evacuada com a bomba de vácuo até uma pressão de aproximadamente 0.1 kPa para garantir a remoção de gases residuais e a pureza da mistura.

Execução do Ensaio.

O enchimento da câmara é realizado de forma sequencial, introduzindo cada gás individualmente até atingir a sua respetiva pressão parcial, monitorizada através dos sensores de pressão. Geralmente, inicia-se pelo gás com a menor pressão parcial. Após o enchimento, a mistura é homogeneizada com um agitador magnético durante 5 minutos, seguido de um período de repouso de 2 minutos para garantir que a mistura esteja estagnada antes da ignição.

Ignição e Critério de Inflamabilidade.

O sistema de ignição é então ativado para gerar uma faísca e iniciar a combustão. O ensaio é gravado com a câmara de alta velocidade num ambiente escuro para permitir a visualização da chama. De acordo com o critério da norma ASTM E681, a mistura é considerada inflamável se for observada a propagação de

uma chama a partir do ponto de ignição e para além de um ângulo esférico definido. Caso contrário, a mistura é considerada não inflamável.

3.3 MATERIAIS.

O objetivo deste trabalho é estudar misturas de gás natural e hidrogênio. Entretanto, a composição do gás natural comercial pode variar dependendo de sua origem, o que dificultaria a reprodução dos resultados experimentais.

Para garantir o controle rigoroso das variáveis e assegurar a reprodutibilidade, decidiu-se usar uma mistura de gás modelo para simular o gás natural. Foi usada uma mistura de metano (CH_4), que é o principal componente do gás natural (>85%), e propano (C_3H_8). Essa abordagem permite que os resultados obtidos sejam fundamentais, consistentes e facilmente comparáveis com outros estudos.

Nos ensaios experimentais foram utilizados os seguintes gases, fornecidos pela empresa Indura S.A.

Combustíveis:

I. Metano (CH_4): Com um grau de pureza de 99,95%.
II. Propano (C_3H_8): Com um grau de pureza de ≥99,5%.
III. Hidrogênio (H_2): Com um grau de pureza de 99,95%.

Oxidante:

I. Ar Extra Puro: Mistura sintética de grau laboratorial (21% O_2 e 79% N_2).

3.4 VALIDAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL.

O processo de validação foi realizado com o objetivo de confirmar que o equipamento (Figura 20) estava em conformidade com as condições operacionais e de segurança exigidas pela norma ASTM E681. Para isso, uma série de verificações sistemáticas foi executada.

Primeiramente, foi realizado um rigoroso teste de estanqueidade, no qual a câmara foi pressurizada com ar e a queda de pressão foi monitorada ao longo do tempo para certificar a ausência de vazamentos. Em seguida, o sistema de vácuo foi avaliado, medindo-se os tempos de evacuação e confirmando a capacidade de atingir a pressão mínima de operação (~0.1 kPa), essencial para garantir a pureza das misturas. O sistema elétrico e de ignição também foi inspecionado, verificando-se a consistência e a robustez da faísca gerada. Finalmente, foi realizada a calibração dos sensores de pressão e temperatura, validando suas leituras contra padrões de referência para assegurar a precisão das medições.

Além disso, durante a validação, a estabilidade operacional do equipamento foi avaliada por meio da execução contínua de vários ciclos de teste no mesmo dia. Esse procedimento possibilitou verificar se os componentes mecânicos, elétricos e de controle não apresentavam variações de desempenho ao longo do tempo, mesmo sob uso repetido. A câmara de combustão permaneceu estanque em todos os momentos, sem evidência de vazamentos ou perda de pressão. Também foi constatado que a calibração dos sensores permaneceu estável, garantindo leituras precisas em cada teste. Esses resultados preliminares proporcionaram a confiança necessária para prosseguir com a campanha experimental completa, minimizando o risco de interrupções devido a falhas técnicas.



Figura 20: Vista geral da bancada experimental utilizada nos ensaios de inflamabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5 ANÁLISE DE INCERTEZA.

A confiabilidade dos limites de inflamabilidade determinados experimentalmente depende de dois fatores principais: a incerteza instrumental associada à preparação das misturas (composição) e a resolução do método de ensaio (tamanho do passo).

Para determinar a incerteza na composição das misturas preparadas pelo método das pressões parciais, utilizou-se o método de propagação de incertezas descrito por Kline e McClintock. Considerando que a fração molar (y_i) de um

componente é dada pela razão entre a sua pressão parcial (P_i) e a pressão total final (P_{total}), a incerteza combinada (U_{yi}) foi calculada através da equação 20 diferencial:

$$U_{yi} = \sqrt{\left(\frac{\partial y_i}{\partial P_i} \times U_{Pi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial P_{total}} \times U_{Ptotal}\right)^2} \quad (20)$$

Onde:

- U_P: representa a incerteza instrumental do transdutor de pressão (Trafag DPC 8380), especificada pelo fabricante como ±0.5% do fundo de escala (FS).
- P_{total} : é a pressão final da mistura (pressão atmosférica).

Aplicando esta equação às misturas testadas, a incerteza máxima associada à fração molar dos componentes foi estimada em aproximadamente ±0.89%.

Como as misturas foram preparadas pela introdução sequencial de diferentes gases, a incerteza da composição real depende das incertezas associadas às pressões parciais de cada componente combustível e da pressão total da mistura. Assim, a metodologia de propagação de incertezas foi empregada como procedimento complementar à norma ASTM E681, que estabelece o critério experimental de inflamabilidade, mas não fornece uma expressão única para a propagação das incertezas das pressões parciais.

3.6 DEFINIÇÃO DAS MISTURAS DE ESTUDO

Antes de calcular os limites teóricos com a Lei de Le Chatelier, foi necessário calcular as 6 misturas de combustível que seriam o foco deste estudo.

Nesta seção, são estimados teoricamente os Limites Inferiores de Inflamabilidade (LII) para o conjunto de misturas de combustível que serão investigadas. Este cálculo prévio é fundamental, pois serve como ponto de partida para os ensaios experimentais, otimizando o tempo e o consumo de gases, além de fornecer uma base de comparação para os resultados que serão apresentados no Capítulo 4.

Desenho do Experimento.

O foco deste trabalho é a determinação dos limites de inflamabilidade de misturas que possuam representatividade real para a engenharia de gás. As composições testadas não foram selecionadas aleatoriamente, mas calculadas para simular um cenário operacional viável de injeção de hidrogênio na rede.

A condição principal para o cálculo das misturas foi a intercambialidade. Para que a injeção de H_2 seja viável na infraestrutura existente sem a necessidade de

alterar os queimadores finais, a mistura ternária resultante deve possuir um Índice de Wobbe (IW) equivalente ao do Gás Natural (GN) de referência (~48 MJ/Nm³).

Para a determinação das misturas se desenvolveu uma metodologia de cálculo específica. A adição de H_2 reduz o Índice de Wobbe impondo um desafio termodinâmico, tornou-se necessário adicionar simultaneamente um gás rico, neste caso o propano, para compensar energeticamente a mistura e restabelecer o (IW).

Cálculo das Misturas.

A fim de determinar as seis misturas-bases para o estudo, recorreu-se a um método de cálculo, fundamentado nas Equações 21 e 22. O método baseia-se na mistura de duas correntes teóricas para atingir o ponto de operação desejado.

Definição das Correntes: A equação (21) mistura final é modelada como a combinação de uma corrente de Gás Natural puro com uma mistura intermediária de H_2 e C_3H_8:

$$1\,\text{Mix} = (1-n)\text{GN} + n[(1-f)H_2 + (f)C_3H_8] \quad (21)$$

Onde:

n: $\in$ [0,1] é a fração molar da mistura intermediária $[(1-f)H_2 + (f)C_3H_8]$ na mistura final. Portanto, 1 – n é a fração de GN na mistura final.

f: $\in$ [0,1] é a fração molar do componente (C_3H_8) dentro da mistura intermediária. Assim, na mistura intermediária: H_2 tem fração $(1-f)$ y (C_3H_8) tem fração f.

GN: é o gás natural adicionado diretamente à mistura final.

Frações Molares Resultantes: A Equação (22) representa as frações molares finais de cada espécie (CH_4, H_2, C_3H_8) são obtidas pelo balanço de massa das espécies:

$$x_{GN} = 1-n, \qquad x_{H_2} = n(1-f), \qquad x_{C_3H_8} = nf \quad (22)$$

Onde:

$x_{GN}; x_{H_2}; x_{C_3H_8}$: são as frações molares na mistura final de gás natural, hidrogênio e propano, respectivamente.

Verificação do fechamento: $(1-n) + n(1-f) + nf = 1$.

Após a definição das 6 composições teóricas, os valores foram inseridos em uma folha de cálculo de intercambiabilidade Excel para validação. Esta ferramenta computou o Poder Calorífico inferior (PCI) equação (23), a Densidade Relativa (SG) equação (24) e, finalmente, o Índice de Wobbe (WI) equação (25).

Onde:

$$PCI_{mix,vol} = \sum_i yi\, PCI_{i,vol} \quad (23)$$

$$SG = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ar\ T,P}} \quad (24)$$

$$WI_{inf} = \frac{PCI_{vol}}{\sqrt{SG}} \quad (25)$$

Conforme apresentado na Tabela 5, as seis composições definidas apresentaram valores de Índice de Wobbe muito próximos entre si, variando de 48,01 a 48,11 MJ/Nm³, atendendo ao critério energético adotado para o planejamento das misturas. Ressalta-se que a proximidade do Índice de Wobbe não implica, isoladamente, intercambialidade completa entre os combustíveis.

Esses valores decimais resultam do ajuste composicional realizado para manter o Índice de Wobbe próximo ao valor de referência adotado, evitando arredondamentos que alterassem as propriedades calculadas das misturas.

Tabela 5: Composições nominais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$ definidas pelo critério do Índice de Wobbe.

Mistura	f	n	H_2(%)	C_3H_8(%)	CH_4(%)	PCI (M/Nm^3)	SG	WI (MJ/Nm^3)
1	0.275	0.400	29.00	11.00	60.00	34.82	0.52	48.11
2	0.275	0.525	38.06	14.44	47.50	34.3	0.51	48.02
3	0.275	0.675	48.94	18.56	32.50	33.86	0.50	48.01
4	0.275	0.800	58.00	22.00	20.00	33.5	0.49	48.01
5	0.275	0.900	65.25	24.75	10.00	33.21	0.48	48.02
6	0.275	1.000	72.50	27.50	0.00	32.92	0.47	48.03

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para facilitar a visualização da evolução composicional das seis misturas, a Figura 21 apresenta graficamente as frações nominais de CH_4, C_3H_8 e H_2 definidas na Tabela 5.

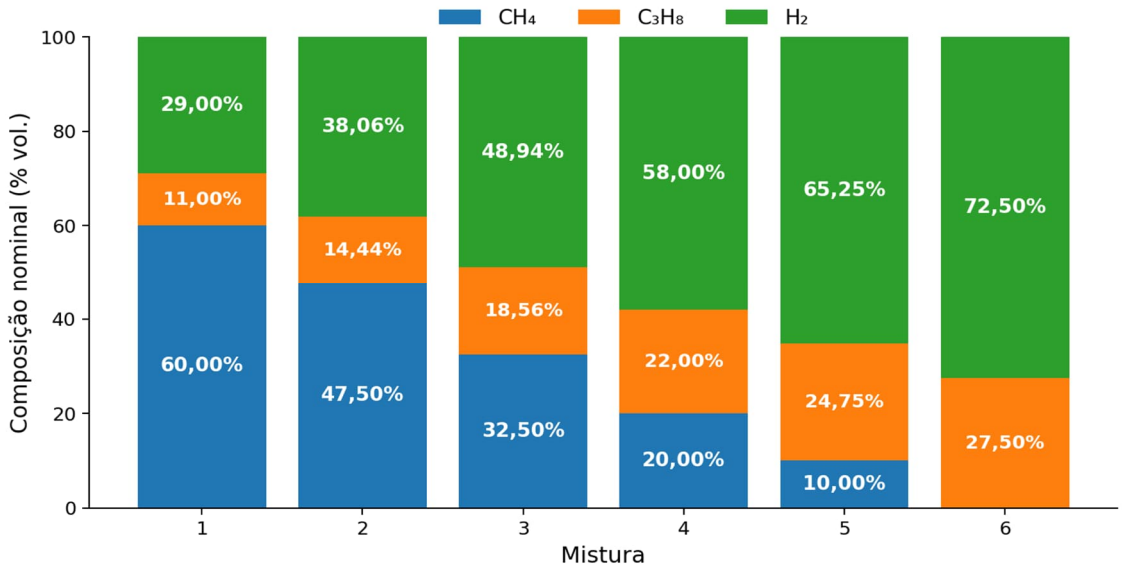


Figura 21: Evolução das composições nominais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$ definidas pelo critério do Índice de Wobbe.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se uma substituição progressiva do CH_4 pela corrente intermediária H_2/C_3H_8 ao longo das seis misturas. A fração de CH_4 diminui de 60,0% na Mistura 1 até 0% na Mistura 6, enquanto o H_2 aumenta de 29,0% para 72,5% e o C_3H_8 de 11,0% para 27,5%. Essa evolução é consequência do aumento do parâmetro n, mantendo-se fixa a proporção da corrente intermediária definida por f=0,275. Apesar da alteração significativa da composição, o Índice de Wobbe permaneceu entre 48,01 e 48,11 MJ/Nm³.

Cálculo dos Limites Teóricos das Misturas.

Para o cálculo teórico, utiliza-se a Lei de Le Chatelier, que é o método mais comumente empregado na literatura Mendiburu et al., (2020), ASTM, (2023), Quinto; Fernades, (2021). A equação, expressa em frações molares, é a seguinte:

$$LI_{mistura} = \frac{1}{\frac{y_{CH_4}}{L_{CH_4}} + \frac{y_{C_3H_8}}{L_{C_3H_8}} + \frac{y_{H_2}}{L_{H_2}}} \quad (26)$$

Onde:

$LI_{mistura}$: é o Limite Inferior de Inflamabilidade previsto para a mistura.

y_{CH_4}, $y_{C_3H_8}$ e y_{H_2}: são as frações molares do metano e do hidrogênio na mistura de combustível (livre de oxidante).

L_{CH_4}, $L_{C_3H_8}$ e L_{H_2}: são os Limites Inferiores de Inflamabilidade de cada componente puro. Para estes cálculos, foram utilizados os valores 5,0% - 15% para o metano, 2,1% - 9.5% para o propano e 4,0% - 75% para o hidrogênio, tomado da literatura referência Coronado et al., (2012).

A Tabela 6 apresenta os resultados destes cálculos para as diferentes composições definidas para este estudo.

Tabela 6: Limites teóricos iniciais de inflamabilidade das misturas nominais $CH_4/C_3H_8/H_2$ calculados pela Lei de Le Chatelier.

Mistura	H_2 (%)	C_3H_8 (%)	CH_4 (%)	$LII_{téorico}$ (%)	$LSI_{téorico}$ (%)
1	29.00	11.00	60.00	4.084	18.04
2	38.06	14.44	47.50	3.862	19.25
3	48.94	18.56	32.50	3.627	20.95
4	58.00	22.00	20.00	3.451	22.61
5	65.25	24.75	10.00	3.322	24.14
6	72.50	27.50	0.00	3.203	25.90

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

É importante clarificar como os valores teóricos apresentados na Tabela 6 devem ser interpretados. Estes resultados representam a percentagem mínima da mistura de combustível (comb.) que, ao ser combinada com ar, resulta numa mistura inflamável.

Tomando a Mistura 1 como exemplo, o LII teórico de 4,084% significa que se prevê que uma mistura total, contida na câmara de combustão, composta por 4,084% deste combustível (que por sua vez é 60% CH_4, 11% C_3H_8 e 29% H_2) e 95,916% de ar atmosférico, se encontrará exatamente no limite inferior de inflamabilidade.

Este valor teórico serve como o ponto de partida para os ensaios. No laboratório, serão testadas concentrações próximas a este valor (por exemplo, 3.2%, 3.6%, 4%) para determinar com precisão o limite experimental real.

Cálculo das pressões parciais teóricas.

Para poder preparar cada uma destas concentrações de teste na câmara, é necessário traduzir a percentagem volumétrica teórica como o LII de 4.084 % em pressões parciais concretas para cada gás. Este procedimento, baseado na Lei de

Dalton, garante a preparação de uma mistura precisa e reprodutível. O cálculo é detalhado a seguir, utilizando como exemplo o LII teórico da mistura 1 (4,084%).

Primeiro, calcula-se a pressão que a totalidade dos gases combustíveis (P_{comb_total}) deve ocupar na câmara. Esta corresponde à percentagem do LII multiplicada pela pressão total final (atmosférica).

$$P_{comb_total} = y_{LII} \cdot P_{total} \quad (27)$$

$$P_{comb_total} = 0.04084 \cdot 101{,}325\ kPa = 4.138113 kPa$$

Em seguida, esta pressão total do combustível (4.138 kPa) é distribuída entre os três componentes da Mistura 1 (60% CH_4, 10% C_3H_8, 29% H_2).

$$P_{CH_4} = 0{,}60 \cdot P_{comb\ total} = 0{,}60 \cdot 4.138113\ kPa = 2.4828678\ kPa$$

$$P_{C_3H_8} = 0{,}11 \cdot P_{comb\ total} = 0{,}11 \cdot 4.138113\ kPa = 0.45519243\ kPa$$

$$P_{H_2} = 0{,}29 \cdot P_{comb\ total} = 0{,}29 \cdot 4.138113\ kPa = 1.20005277\ kPa$$

Com base nestes cálculos, o procedimento para preparar a mistura no laboratório é o seguinte:

I. Evacuar a câmara até a pressão de vácuo (~0.1 kPa).
II. Introduzir Propano (C_3H_8) até a pressão atingir $0.45519243\ kPa$.
III. Introduzir Hidrogênio (H_2) até a pressão acumulada atingir $0.45519243 + 1.20005277 = 1{,}651977{,}07\ kPa$.
IV. Introduzir Metano (CH_4) até a pressão acumulada atingir
V. $1{,}65197707 + 2{,}4828678 = 4.138113\ kPa$.
VI. Finalmente, introduzir ar sintético até a pressão total final atingir 101.325 kPa.

Este método de cálculo é a base para a preparação de todas as concentrações de teste durante a fase experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA.

O processo de validação foi realizado com o objetivo de confirmar que o equipamento cumpria com as condições de hermeticidade, controle de variáveis críticas e segurança operacional exigidas pela norma ASTM E681. Para isso, foram realizados ensaios com combustíveis de referência (metano e propano), na temperatura de 25°C e pressão de 101.3kPa.

A Figura 22 apresenta os registros visuais da propagação de chama obtidos durante os ensaios de validação com metano e propano, em condições próximas aos limites inferior e superior de inflamabilidade.

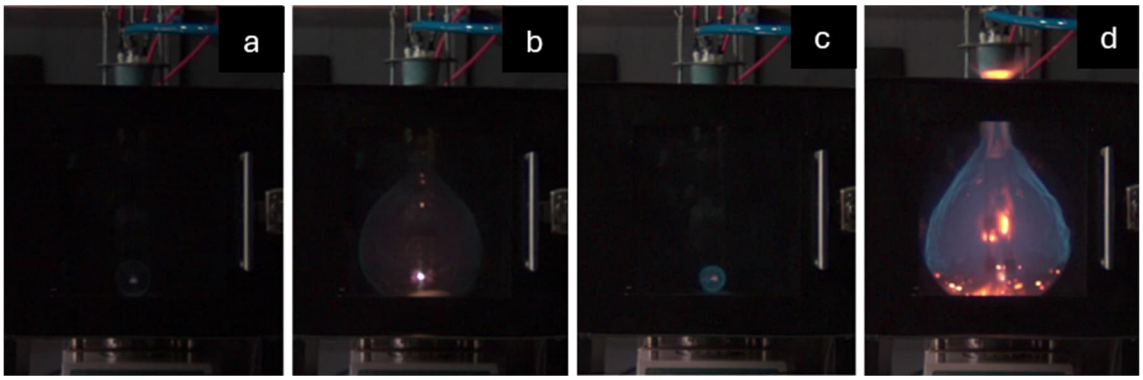


Figura 22: Registros visuais da propagação de chama nos ensaios de validação com metano e propano: (a) metano próximo ao LII; (b) metano próximo ao LSI; (c) propano no LII = 2,1% vol.; (d) propano no LSI = 9,5% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados dos testes de validação, são apresentados na Tabela7.

Tabela 7: Resultados Experimentais para a Validação com Metano e Propano.

N.º Teste	Combustível	%Combustível na mistura	Propagação de chama observada?	Temperatura [°C]	Pressão inicial [kPa]
1	Metano	2.0 %	Não	25.0	101.3
2	Metano	3.0 %	Sim	25.1	101.2
3	Metano	3.5 %	Sim	25.0	101.3
4	Metano	9.5 %	Sim	25.0	101.4
5	Metano	10.5 %	Não	25.2	101.3
6	Propano	1.5%	Não	25.0	101.3
7	Propano	2.1%	Sim	25.1	101.3
8	Propano	8.5%	Sim	25.0	101.4
9	Propano	9.5%	Sim	25.0	101.3
10	Propano	10.0%	Não	25.1	101.3

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados apresentados na Tabela 7, mostram comportamentos distintos para os dois combustíveis avaliados. Para o propano, observou-se propagação de chama entre 2,1% e 9,5% vol., sendo esses valores adotados experimentalmente como LII e LSI, respectivamente. Esses resultados apresentam boa concordância com os valores de referência reportados na literatura para propano-ar em condições próximas à temperatura ambiente e à pressão atmosférica (CARVALHO; MCQUAY, 2007; CORONADO et al., 2014).

Para o metano, foram observadas propagações de chama em 3,0%, 3,5% e 9,5% vol., enquanto não houve propagação em 2,0% e 10,5% vol. Dessa forma, considerando as concentrações efetivamente ensaiadas, foram adotados experimentalmente 3,0% vol. para o LII e 9,5% vol. para o LSI. Esses valores diferem da faixa de referência normalmente reportada para metano-ar, de aproximadamente 5,0% a 15,0% vol. (CARVALHO; MCQUAY, 2007; CORONADO et al., 2014). Portanto, os ensaios com metano não devem ser interpretados como uma validação quantitativa completa dos limites de inflamabilidade desse combustível.

A discrepância observada para o metano pode estar relacionada às condições específicas do ensaio e à sensibilidade do critério visual adotado, incluindo fatores como a menor intensidade luminosa da chama, a geometria da câmara, as perdas

térmicas, a energia de ignição e o procedimento de preparação da mistura por pressões parciais. Esses fatores não foram isolados individualmente neste trabalho e, portanto, não se atribui a diferença observada a uma causa única. Como a ASTM E681 utiliza a observação da propagação da chama como critério experimental, pequenas diferenças na identificação da frente de chama podem influenciar a classificação entre condição inflamável e não inflamável, principalmente em regiões próximas aos limites (INTERNATIONAL, 2015).

Nesse contexto, os ensaios com metano foram considerados principalmente como uma verificação operacional do aparato experimental, permitindo avaliar o funcionamento do sistema de preparação das misturas, da ignição e do registro visual da chama. Para o propano, por sua vez, foi obtida boa concordância quantitativa com os valores de referência. Assim, esta etapa não deve ser interpretada como uma validação quantitativa global da bancada, mas como uma verificação de seu funcionamento operacional, complementada por boa concordância experimental para o propano (CARVALHO; MCQUAY, 2007; CORONADO et al., 2014).

A Figura 23 apresenta uma síntese gráfica da comparação entre os resultados experimentais obtidos para metano e propano e os respectivos valores de referência da literatura.

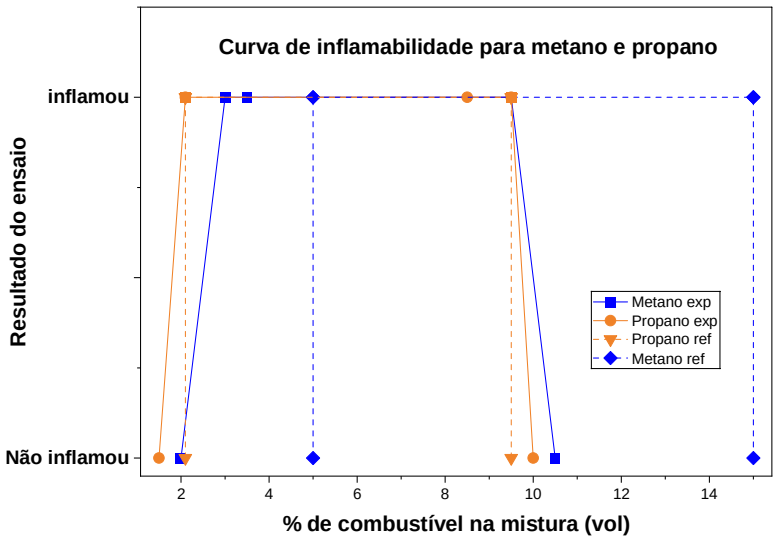


Figura 23: Comparação dos resultados de validação experimental com valores de referência para metano e propano.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 23 evidencia visualmente a boa concordância obtida para o propano e a divergência quantitativa observada para o metano. Essa comparação reforça que o aparato apresentou funcionamento operacional adequado durante a campanha de ensaios, mas também evidencia a necessidade de cautela na interpretação quantitativa de resultados obtidos exclusivamente pelo critério visual. Dessa forma, os ensaios preliminares forneceram a base operacional para a realização da campanha subsequente com as misturas ternárias $CH_4/C_3H_8/H_2$, mantendo-se constantes o aparato, o procedimento e as condições experimentais.

4.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE PARA MISTURAS $CH_4/C_3H_8/H_2$.

Os limites de inflamabilidade das misturas ternárias $CH_4/C_3H_8/H_2$, foram definidas inicialmente a partir de composições nominais calculadas para manter o Índice de Wobbe aproximadamente constante. Entretanto, durante a preparação experimental, pequenas variações nas pressões parciais introduzidas na câmara fizeram com que a composição real de cada mistura apresentasse diferenças em relação à composição nominal inicialmente planejada.

Por esse motivo, a comparação entre os limites experimentais e os valores previstos pela Lei de Le Chatelier foi realizada considerando as composições reais obtidas a partir das pressões parciais efetivamente medidas. Esse procedimento permite uma avaliação mais rigorosa do desempenho do modelo teórico, evitando comparar os resultados experimentais com uma composição ideal que não representa exatamente a mistura ensaiada.

Os ensaios foram realizados em condições ambiente, com temperatura inicial de aproximadamente 25 °C e pressão final próxima à pressão atmosférica de 101,3 kPa. Antes de cada ensaio, a câmara de combustão foi evacuada para remover gases residuais e, posteriormente, os componentes da mistura foram introduzidos sequencialmente pelo método das pressões parciais. Após o enchimento, a mistura foi homogeneizada por agitação magnética e mantida em repouso dois minutos antes da ignição. A classificação da mistura como inflamável ou não inflamável foi realizada por inspeção visual da propagação da chama, conforme o critério estabelecido pela norma ASTM E681.

A Figura 24 apresenta registros da propagação de chama obtidos durante os ensaios, permitindo comparar o comportamento da combustão em condições próximas ao LII e ao LSI.



Figura 24: Registro visual da propagação de chama em condições próximas ao LII e ao LSI das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 24, observa-se, à esquerda, a propagação de chama em uma condição próxima ao LII, caracterizada por menor luminosidade e propagação mais limitada. À direita, observa-se uma condição próxima ao LSI, com maior intensidade luminosa e maior preenchimento volumétrico da câmara. Esse comportamento está associado à maior reatividade das misturas enriquecidas com hidrogênio (INTERNATIONAL, 2015). Essas imagens registradas pela câmera de alta velocidade confirmam a propagação autossustentada da frente de chama, conforme o critério visual adotado na norma ASTM E681. Assim, a evidência visual complementa os resultados numéricos e contribui para a identificação da transição entre condições inflamáveis e não inflamáveis.

As composições nominais das misturas estudadas foram previamente definidas na Tabela 5, com base no critério de intercambialidade energética e manutenção do Índice de Wobbe próximo ao valor de referência do gás natural. No entanto, durante a preparação experimental, pequenas diferenças entre as pressões parciais teóricas e as pressões efetivamente introduzidas na câmara podem alterar a composição real da mistura combustível. Por esse motivo, a Tabela 8, apresenta apenas as composições reais obtidas experimentalmente para as condições próximas ao LII e ao LSI.

Tabela 8: Composições reais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$ obtidas experimentalmente por pressões parciais.

Mistura	Limite	H_2(%)	C_3H_8(%)	CH_4(%)
1	LII	30.00	10.00	60.00
1	LSI	28.70	11.30	60.00
2	LII	38,30	14.90	46.80
2	LSI	37.70	14.70	47.50
3	LII	48.80	18.60	32.60
3	LSI	49.10	18.10	32.70
4	LII	57.80	22.20	20.00
4	LSI	58.10	22.00	19.90
5	LII	65.20	23.90	10.90
5	LSI	64.60	25.10	10.30
6	LII	71.10	28.90	0.00
6	LSI	71.80	28.20	0.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os limites teóricos iniciais apresentados na Tabela 6Tabela 6 foram utilizados como referência para o planejamento dos ensaios experimentais. Entretanto, para a análise comparativa dos resultados, os limites teóricos foram recalculados a partir das composições reais apresentadas na Tavbela 8. Esse procedimento permite comparar os valores experimentais com uma estimativa teórica correspondente à mistura efetivamente preparada em laboratório.

Observa-se, a partir da Tabela 9, que a Lei de Le Chatelier apresentou comportamentos distintos para o LII e para o LSI das misturas analisadas.

Tabela 9: Comparação entre os limites de inflamabilidade teóricos recalculados e experimentais das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$.

Mistura	Limite	$L_{teó}$ recalculado (%)	L_{exp} (%)	Desvio Absoluto (%)	Desvio Relativo (%)
1	LII	4.12	4.93	0.81	19.61
1	LSI	17.95	19.25	1.30	7.26
2	LII	3.84	4.87	1.03	26.77
2	LSI	19.17	20.13	0.96	5.01
3	LII	3.63	4.24	0.61	16.93
3	LSI	21.10	22.30	1.20	5.70
4	LII	3.45	4.44	0.99	28.86
4	LSI	22.64	23.29	0.65	2.87
5	LII	3.35	4.54	1.19	35.57
5	LSI	23.87	23.98	0.11	0.48
6	LII	3.17	4.44	1.27	40.02
6	LSI	25.47	26.94	1.47	5.76

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observasse que para o LII, os valores experimentais foram sistematicamente superiores aos valores teóricos recalculados, com desvios relativos entre 16,93% e 40,02%. Isso indica que, nas condições experimentais deste trabalho, o modelo subestimou o limite inferior de inflamabilidade das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$.

Por outro lado, para o LSI, os valores teóricos recalculados apresentaram melhor concordância com os resultados experimentais, com desvios relativos entre 0,48% e 7,26%. Assim, diferentemente da tendência frequentemente discutida na literatura, na qual a Lei de Le Chatelier apresenta melhor desempenho para o LII e maiores dificuldades para o LSI (MENDIBURU et al., 2020). Os resultados deste trabalho mostraram melhor aproximação para o limite superior.

Esse comportamento evidencia que a aplicação da Lei de Le Chatelier deve ser interpretada com cautela em misturas multicomponentes ricas em hidrogênio. Conforme discutido por Mendiburu et al., (2020), o modelo considera a contribuição dos componentes combustíveis de forma simplificada, mas não incorpora explicitamente efeitos de cinética química, difusão preferencial, perdas térmicas, energia de ignição e critério visual de propagação da chama. No presente estudo, esses fatores podem ter influenciado principalmente a determinação do LII, região na qual a mistura é pobre em combustível e a sustentação da chama é mais sensível às condições experimentais (INTERNATIONAL, 2015).

Os valores de LII e LSI obtidos representam, respectivamente, a menor e a maior concentração da mistura combustível $CH_4/C_3H_8/H_2$ em ar capaz de sustentar a propagação da chama nas condições experimentais avaliadas (INTERNATIONAL, 2015). Assim, concentrações abaixo do LII são pobres em combustível e não liberam energia suficiente para manter a chama, enquanto concentrações acima do LSI são ricas em combustível e possuem quantidade insuficiente de oxidante para sustentar a combustão (INTERNATIONAL, 2015). A região entre LII e LSI corresponde à faixa inflamável da mistura.

As Figura 25 e 26 apresentam a variação do LII e do LSI em função da fração real média de H_2 nas misturas. Essas figuras permitem visualizar com maior clareza o comportamento de cada limite, uma vez que o LII e o LSI apresentam faixas de valores bastante diferentes.

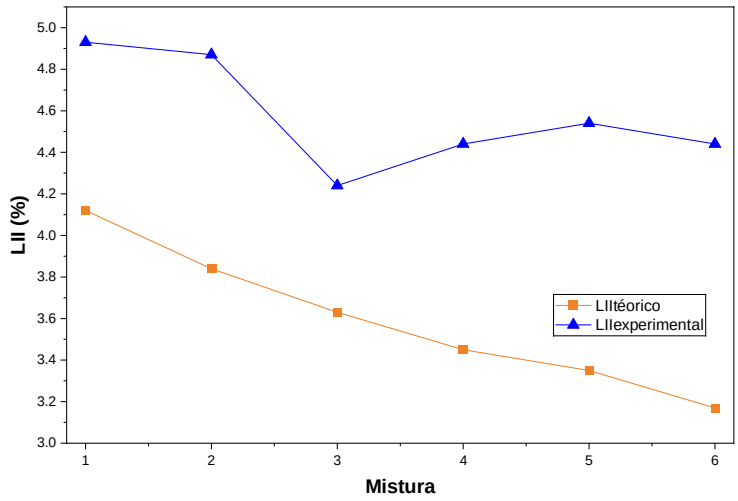


Figura 25: LII teóricos recalculados e experimentais em função da fração real média de H_2.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 25, observa-se que o LII experimental permaneceu em uma faixa, entre 4,24% e 4,93%, enquanto os valores teóricos recalculados apresentaram uma tendência decrescente com o aumento da fração de H_2. Essa diferença mostra que, para as misturas analisadas, a Lei de Le Chatelier subestimou o limite inferior de inflamabilidade, comportamento já discutido a partir dos desvios apresentados na Tabela 9.

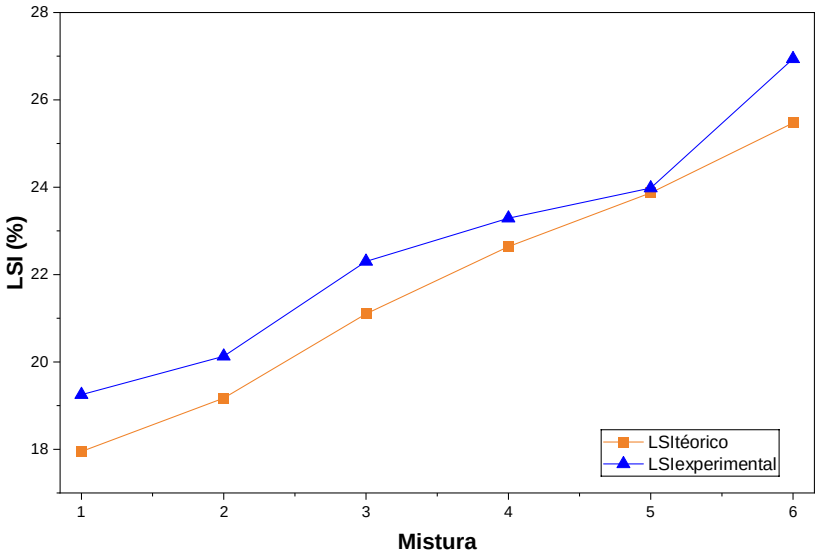


Figura 26: LSI teóricos recalculados e experimentais em função da fração real média de H_2.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 26, observa-se que o LSI experimental aumentou progressivamente com o enriquecimento da mistura em H_2, passando de 19,25% para 26,94%. Diferentemente do LII, os valores teóricos recalculados apresentaram melhor concordância com os resultados experimentais para o limite superior, indicando que, nas condições avaliadas, a Lei de Le Chatelier representou de forma mais adequada a tendência do LSI.

A partir dos limites experimentais, foi calculada a faixa de inflamabilidade das misturas, apresentada na

Tabela 10. Esse parâmetro permite avaliar diretamente a ampliação da região inflamável provocada pela adição de hidrogênio.

Tabela 10: Faixa de inflamabilidade experimental das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$.

Mistura	H_2 real (%)	LII_{exp} (%)	LSI_{exp} (%)	Faixa inflamável (%)
1	29.35	4.93	19.25	14.32
2	38.00	4.87	20.13	15.26
3	48.95	4.24	22.30	18.06
4	57.95	4.44	23.29	18.85
5	64.90	4.54	23.98	19.44
6	71.45	4.44	26.94	22.50

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados mostram que a faixa inflamável aumentou de 14,32% para 22,50% entre as Misturas 1 e 6. Esse aumento ocorre principalmente devido ao deslocamento do LSI para maiores concentrações de combustível, evidenciando que o hidrogênio exerce maior influência sobre o limite superior do que sobre o limite inferior.

Os resultados apresentados na Tabela 10 e nas Figura 25 e 26 mostram que o enriquecimento com hidrogênio ampliou a faixa de inflamabilidade das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$, principalmente pelo aumento do Limite Superior de Inflamabilidade. Esse comportamento é compatível com o observado por Miao et al., (2011), que estudaram misturas de gás natural enriquecidas com hidrogênio e verificaram que o aumento da fração de H_2 provoca elevação significativa do limite superior, enquanto o limite inferior apresenta variação relativamente limitada.

A comparação direta com outros trabalhos deve ser feita com cautela, pois os limites de inflamabilidade dependem da composição do gás base, da geometria da câmara, do critério de inflamabilidade, da energia de ignição e das condições iniciais de temperatura e pressão (CARVALHO; MCQUAY, 2007). Além disso, diferentemente de estudos baseados principalmente em misturas CH_4/H_2, este trabalho utilizou uma mistura ternária $CH_4/C_3H_8/H_2$, definida para manter o Índice de Wobbe próximo ao valor de referência do gás natural.

O efeito do hidrogênio sobre os limites de inflamabilidade está associado às suas propriedades físico-químicas particulares. Em comparação com hidrocarbonetos como CH_4 e C_3H_8, o H_2 apresenta menor energia mínima de ignição, maior

difusividade molecular, maior velocidade de propagação de chama e uma faixa de inflamabilidade muito mais ampla (GELFAND et al., 2012; MEDVEDEV et al., 2016). Essas características favorecem a ignição e a manutenção da propagação da chama em condições nas quais misturas puramente hidrocarbonadas tenderiam à extinção.

Do ponto de vista químico, a presença de H_2 favorece a formação e a manutenção de radicais altamente reativos, como H, O e OH, que participam das reações de ramificação em cadeia responsáveis pela sustentação da combustão, conforme discutido por Law e Egolfopoulos, (1991, 1992), os limites de inflamabilidade estão associados ao equilíbrio entre os processos de ramificação e terminação de radicais, além das perdas térmicas. Assim, o aumento da fração de H_2 pode favorecer a manutenção da frente de chama, especialmente em condições próximas aos limites de inflamabilidade (LAW; EGOLFOPOULOS, 1991).

O efeito mais pronunciado foi observado no Limite Superior de Inflamabilidade. Em misturas ricas, a disponibilidade de oxigênio é limitada, e a combustão tende a ocorrer de forma incompleta (LAW; EGOLFOPOULOS, 1992). Nessa condição, a elevada reatividade do H_2 e sua ampla faixa de inflamabilidade permitem que a mistura continue sustentando a propagação da chama em concentrações totais de combustível mais elevadas. Por esse motivo, o LSI aumentou de 19,25% para 26,94% com o enriquecimento da mistura em hidrogênio.

Em misturas pobres, há excesso de ar e a limitação principal está relacionada à quantidade mínima de energia liberada pela combustão para compensar as perdas térmicas e sustentar a frente de chama (GLASSMAN IRVIN, 2014). Como o LII do H_2 é próximo ao do CH_4 e maior que o do C_3H_8, a substituição progressiva entre esses componentes não provocou uma redução acentuada do LII da mistura (COWARD; JONES, 1952). Dessa forma, o principal efeito do hidrogênio nas misturas estudadas foi a ampliação da faixa inflamável pelo aumento do LSI, e não uma alteração significativa do LII.

Portanto, os resultados indicam que o H_2 aumenta a reatividade global da mistura e amplia a região de inflamabilidade, principalmente em condições ricas em combustível. Esse comportamento possui relevância direta para a segurança, pois misturas enriquecidas com hidrogênio podem permanecer inflamáveis em uma faixa mais ampla de concentração combustível-ar (GLASSMAN IRVIN, 2014). Esse comportamento reforça a necessidade de complementar as estimativas teóricas com resultados experimentais, uma vez que a Lei de Le Chatelier não apresentou a mesma

precisão para ambos os limites. No presente estudo, os valores teóricos de LII foram inferiores aos experimentais, resultando em uma estimativa conservadora da região inflamável no lado pobre. Para o LSI, os valores teóricos foram, em geral, ligeiramente inferiores aos experimentais, podendo reduzir a extensão prevista da faixa inflamável em condições ricas.

Conforme descrito na Seção 3.5, a incerteza associada aos limites experimentais foi estimada considerando a resolução do método inflamável/não inflamável e o intervalo entre ensaios consecutivos próximos à transição entre propagação e não propagação da chama. Para os ensaios realizados, a incerteza associada ao LII foi estimada em ±0,17% vol., enquanto para o LSI foi estimada em ±0,18% vol, como o ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11: Limites experimentais de inflamabilidade com incerteza associada.

Mistura	$\mathbf{LII_{exp}}$ **(%)**	$\mathbf{LSI_{exp}}$ **(%)**
1	4.93 ± 0.17	19.25 ± 0.18
2	4.87 ± 0.17	20.13 ± 0.18
3	4.24 ± 0.17	22.30 ± 0.18
4	4.44 ± 0.17	23.29 ± 0.18
5	4.54 ± 0.17	23.98 ± 0.18
6	4.44 ± 0.17	26.94 ± 0.18

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se, na Tabela 11 que a incerteza associada aos limites experimentais é pequena quando comparada à variação observada no LSI. O Limite Superior de Inflamabilidade aumentou de 19,25% para 26,94%. A diferença observada é substancialmente superior à incerteza estimada de ±0,18% vol., indicando que a tendência de aumento do LSI não pode ser atribuída apenas à resolução experimental considerada.

Nesse caso, a incerteza experimental possui maior relevância relativa e deve ser considerada na interpretação dos resultados. Assim, a principal tendência observada para o LII não é uma variação acentuada com a fração de hidrogênio, mas uma relativa estabilidade dentro da faixa experimental avaliada.

A sensibilidade das chamas próximas aos limites de inflamabilidade, especialmente em misturas pobres, torna a determinação experimental sujeita a

variações associadas ao critério visual e às condições de ensaio (MUNTEAN, 2017; CORONADO et al., 2014). Por esse motivo, os valores experimentais foram reportados juntamente com a incerteza associada

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação investigou experimentalmente os Limites Inferior e Superior de Inflamabilidade (LII e LSI) de misturas ternárias $CH_4/C_3H_8/H_2$ com diferentes níveis de enriquecimento por hidrogênio. A análise dos resultados permitiu caracterizar a evolução da faixa de inflamabilidade das misturas, comparar os valores experimentais com as estimativas obtidas pela Lei de Le Chatelier e discutir as implicações dos resultados dentro das condições experimentais adotadas. Os dados obtidos constituem uma base experimental para estudos posteriores e podem contribuir para avaliações de segurança relacionadas ao uso de misturas gasosas multicomponentes enriquecidas com hidrogênio.

Com base nos objetivos específicos estabelecidos e nos resultados obtidos, apresentam-se as seguintes conclusões:

Validação do Aparato Experimental: Os ensaios preliminares com metano e propano permitiram verificar o funcionamento operacional do sistema de preparação das misturas por pressões parciais, do sistema de ignição e do registro visual da propagação da chama. Para o propano, os limites determinados experimentalmente apresentaram boa concordância com os valores reportados na literatura, reforçando a adequação do procedimento experimental adotado. Para o metano, entretanto, foram observadas diferenças em relação aos valores de referência, indicando a necessidade de cautela na interpretação quantitativa dos resultados obtidos por critério visual.

Comportamento das Misturas Ternárias (CH4/C3H8/H2): Nas composições e condições avaliadas, o enriquecimento com hidrogênio esteve associado à ampliação da faixa de inflamabilidade das misturas. O LSI experimental aumentou de 19,25% para 26,94% vol., enquanto o LII permaneceu em uma faixa relativamente estreita, entre 4,24% e 4,93% vol. Como consequência, a faixa de inflamabilidade aumentou de 14,32% para 22,50% vol. entre as Misturas 1 e 6. Dessa forma, a ampliação observada esteve relacionada principalmente ao deslocamento do LSI para concentrações mais elevadas de combustível.

Avaliação da Lei de Le Chatelier: A comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos recalculados mostrou desempenhos distintos para os dois limites. Para o LSI, a Lei de Le Chatelier apresentou melhor concordância com os resultados experimentais, com desvios relativos entre 0,48% e 7,26%. Para o LII, os valores teóricos foram sistematicamente inferiores aos experimentais, com desvios

relativos entre 16,93% e 40,02%. Esse comportamento indica que, nas condições avaliadas, o modelo não reproduziu adequadamente a relativa estabilidade observada experimentalmente para o LII.

Limitações do modelo para o LII: A diferença observada para o limite inferior pode estar relacionada à natureza aditiva e simplificada da Lei de Le Chatelier, que considera as frações molares e os limites individuais dos combustíveis, mas não incorpora explicitamente fenômenos como cinética química, difusão preferencial do H_2, perdas térmicas, terminação de radicais, energia de ignição, geometria da câmara e sensibilidade do critério visual. Próximo ao LII, a propagação da chama é particularmente sensível ao equilíbrio entre a energia liberada pela combustão e as perdas térmicas, o que pode contribuir para os desvios observados.

Incerteza experimental: As incertezas estimadas foram de ±0,17% vol. para o LII e ±0,18% vol. para o LSI. O aumento do LSI, de 19,25% para 26,94% vol., foi substancialmente superior à incerteza estimada, indicando que essa tendência não pode ser atribuída apenas à resolução experimental considerada. Para o LII, as variações foram comparativamente menores, devendo ser interpretadas juntamente com a incerteza e com a sensibilidade do método visual em condições próximas ao limite inferior.

Implicações para a segurança: A ampliação da faixa de inflamabilidade indica que, nas condições estudadas, as misturas com maiores frações de H_2 permaneceram inflamáveis em uma região mais ampla de concentrações combustível-ar. Em relação à Lei de Le Chatelier, a previsão de valores de LII inferiores aos experimentais representa uma estimativa conservadora para a região pobre, pois amplia teoricamente a faixa considerada inflamável. Para o LSI, os valores teóricos foram, em geral, ligeiramente inferiores aos experimentais, podendo reduzir a extensão prevista da região inflamável em condições ricas. Esses resultados reforçam a importância de complementar as estimativas teóricas com dados experimentais obtidos para as composições e condições de interesse.

De modo geral, os resultados mostraram que a adição de hidrogênio modificou principalmente o Limite Superior de Inflamabilidade das misturas analisadas, enquanto o Limite Inferior apresentou variação mais limitada. A comparação com a Lei de Le Chatelier evidenciou que a precisão do modelo depende do limite considerado, apresentando melhor desempenho para o LSI do que para o LII nas condições experimentais deste estudo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Como continuidade desta investigação, recomenda-se:

1) Ampliar a campanha experimental, incluindo outras composições representativas do gás natural e outros hidrocarbonetos, como etano e butano.
2) Realizar um maior número de repetições e utilizar intervalos menores de concentração nas regiões próximas ao LII e ao LSI, permitindo reduzir a incerteza associada à transição entre propagação e não propagação da chama.
3) Avaliar a influência da temperatura e da pressão inicial sobre os limites de inflamabilidade das misturas $CH_4/C_3H_8/H_2$.
4) Aplicar métodos complementares de detecção da propagação da chama, como o registro da elevação de pressão, a medição de temperatura e técnicas de processamento digital de imagens, para comparação com o critério visual da ASTM E681.
5) Desenvolver simulações cinéticas detalhadas para investigar os mecanismos de reação, formação e terminação de radicais e os efeitos de difusão preferencial em misturas com elevadas frações de H_2.
6) Comparar os resultados experimentais com outros modelos de previsão de limites de inflamabilidade, avaliando alternativas à regra de mistura proposta pela Lei de Le Chatelier.
7) Investigar o efeito da geometria, do volume da câmara e da energia de ignição sobre os limites determinados experimentalmente.

REFERÊNCIAS

ABE, J. O. *et al.* Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 44, n. 29, p. 15072–15086, 2019. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031991931465X. Acesso em: 16 out. 2026.

ALBAHRI, T. A. Flammability characteristics of pure hydrocarbons. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 58, n. 16, p. 3629–3641, 2003. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250903002513. Acesso em: 16 out. 2026.

ANDERSSON, J.; GRÖNKVIST, S. Large-scale storage of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 44, n. 23, p. 11901–11919, 2019. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319919310195. Acesso em: 16 out. 2026.

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

ASIF, M. *et al.* Recent advances in green hydrogen production, storage and commercial-scale use via catalytic ammonia cracking. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 473, p. 145381, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E681-09(2015)**: standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases). West Conshohocken: ASTM International, 2015. Disponível em: https://store.astm.org/e0681-09r15.html. Acesso em: 16 out. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E681-09(2023)**: standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases). West Conshohocken: ASTM International, 2023. Disponível em: https://store.astm.org/standards/e681. Acesso em: 16 out. 2026.

BRANDES, E.; URAL, E. A. Toward a global standard for flammability determination. *In***:** LOSS PREVENTION SYMPOSIUM, 42., 2008, New Orleans. **Proceedings** [...] New Orleans: American Institute of Chemical Engineers, 2008. p. 135.

CAO, L. *et al*. Susceptibility of vintage pipe to embrittlement in hydrogen-natural gas blends. *In*: AMPP ANNUAL CONFERENCE + EXPO, 2025, Nashville. **Proceedings** [...]. Houston: AMPP, 2025. p. 1-10. Disponível em: https://doi.org/10.5006/C2025-00575. Acesso em: 16 out. 2026.

CARDELLA, U.; DECKER, L.; KLEIN, H. Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 42, n. 19, p. 13329–13338, 2017. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319917302355. Acesso em: 16 out. 2026.

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

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

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.

CORONADO, C. J. R. *et al.* Flammability limits of hydrated and anhydrous ethanol at reduced pressures in aeronautical applications. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 280, p. 174–184, 2014.

COWARD, H. F.; JONES, G. W. **Limits of flammability of gases and vapors**. 4th ed. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1952. (Bureau of Mines Bulletin, 503). Disponível em: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12662/. Acesso em: 16 out. 2026.

CUI, G. *et al.* 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**, Oxford, v. 41, p. 252–258, 2016.

DE 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, n. 3, p. 105–113, 1999. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389499001636. Acesso em: 16 out. 2026.

DJUKIC, M. B. *et al.* The synergistic action and interplay of hydrogen embrittlement mechanisms in steels and iron: Localized plasticity and decohesion. **Engineering Fracture Mechanics**, Oxford, v. 216, p. 106528, 2019.

DOS SANTOS PUGA, M.; OLORTIGA ASENCIOS, Y. J. Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde. **Latin American Journal of Energy Research**, Vitória, v. 10, n. 2, p. 74–93, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio azul:** produção a partir do gás natural com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/notas-tecnicas-dedicadas-ao-hidrogenio-cinza-e-ao-hidrogenio-azul. Acesso em: 16 out. 2026.

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. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389416305738. Acesso em: 16 out. 2026.

GELFAND, B. E. *et al.* **Thermo-gas dynamics of hydrogen combustion and explosion**. Berlin: Springer, 2012.

GERBONI, R. Introduction to hydrogen transportation. *In:* GUPTA, R. B.; BASILE, A.; VEZIROĞLU, T. N. (ed.). **Compendium of hydrogen energy**: hydrogen storage, distribution and infrastructure. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. v. 2, p. 283–299. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782423621000110. Acesso em: 16 out. 2026.

GLASSMAN, I.; YETTER, R. A.; GLUMAC, N. G. **Combustion**. 5th ed. Amsterdam: Academic Press, 2014.

HERTZBERG, M.; CASHDOLLAR, K. L.; ZLOCHOWER, I. A. Flammability limit measurements for dusts and gases: ignition energy requirements and pressure dependences. **Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, v. 21, n. 1, p. 303–313, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80258-3. Acesso em: 16 out. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2027 IPCC methodology report on carbon dioxide removal technologies, carbon capture, utilization, and storage for national greenhouse gas inventories (additional guidance)**. Genebra: IPCC, [2026?]. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/2027-ipcc-methodology-report-on-carbon-dioxide-removal-technologies-carbon-capture-utilization-and-storage-for-national-greenhouse-gas-inventories-additional-guidance/. Acesso em: 1 out. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2023**: CO_2 emissions in 2022. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2022. Acesso em: 23 abr. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World energy transitions outlook**: 1.5°C pathway. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook. Acesso em: 10 abr. 2025.

JONES, G. W. *et al*. **Research on the flammability characteristics of aircraft fuels**. Washington, DC: Wright Air Development Center, 1952. (WADC Technical Report 52-35). Disponível em: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/005805.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

KOMODA, R. *et al.* The inhibitory effect of carbon monoxide contained in hydrogen gas environment on hydrogen-accelerated fatigue crack growth and its loading frequency dependency. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 44, n. 54, p. 29007-29016, 2019.

KOO, B.; HA, Y.; KWON, H. Preliminary evaluation of hydrogen blending into high-pressure natural gas pipelines through hydraulic analysis. **Energy**, Oxford, v. 268, p. 126639, 2023.

LAUREYS, A. *et al.* Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Amsterdam, v. 101, p. 104534, 2022.

LAW, C. K.; EGOLFOPOULOS, F. N. A kinetic criterion of flammability limits: The C-H-O-inert system. **Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, v. 23, n. 1, p. 413–421, 1991. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0082078406802869. Acesso em: 15 nov. 2025.

LAW, C. K.; EGOLFOPOULOS, F. N. A unified chain-thermal theory of fundamental flammability limits. **Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, v. 24, n. 1, p. 137–144, 1992. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0082078406800214. Acesso em: 15 nov. 2025.

LEE, W.-J. *et al.* Assessment of energy performance and air pollutant emissions in a diesel engine generator fueled with water-containing ethanol–biodiesel–diesel blend of fuels. **Energy**, Oxford, v. 36, n. 9, p. 5591–5599, 2011. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544211004609. Acesso em: 16 out. 2026.

LOVACHEV, L. A.; KUZNETSOV, G. V.; MAKHVILADZE, G. M. Flammability limits: an invited review. **Combustion and Flame**, New York, v. 20, p. 259–289, 1973.

LOWESMITH, B. J. *et al.* An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards. **Process Safety and Environmental Protection**, Oxford, v. 85, n. 3, p. 207–220, 2007.

MA, N. *et al.* Large scale of green hydrogen storage: opportunities and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 50, p. 379–396, 2024. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319923045883. Acesso em: 16 out. 2026.

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

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.

MA, Y. *et al.* Hydrogen and ethanol: production, storage, and transportation. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 46, n. 54, p. 27330–27348, 2021. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319921021777. Acesso em: 16 out. 2026.

MEDVEDEV, S. P. *et al.* Hydrogen–air turbulent flame propagation in the presence of microdroplets. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 774, n. 1, p. 012091, 2016. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012091. Acesso em: 27 mar. 2025.

MENDIBURU, A. Z.; CARVALHO, J. A.; JU, Y. Flammability limits: a comprehensive review of theory, experiments, and estimation methods. **Energy & Fuels**, Washington, DC, v. 37, n. 6, p. 4151–4197, 2023. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.2c03598. Acesso em: 16 out. 2026.

MENDIBURU, A. Z.; CORONADO, C. R.; DE CARVALHO, J. A. Difficulties on the determination of the flammability limits of fuel mixtures by the Law of Le Chatelier. **Process Safety and Environmental Protection**, Oxford, v. 142, p. 45–55, 2020.

MENDIBURU, A. Z.; DE 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. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389415302089. Acesso em: 16 out. 2026.

MENDIBURU, A. Z.; DE CARVALHO JR, J. A.; CORONADO, C. R. Estimation of lower flammability limits of CH compounds in air at atmospheric pressure, evaluation of temperature dependence and diluent effect. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 285, p. 409–418, 2015. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438941400973X. Acesso em: 16 out. 2026.

MENDIBURU, A. Z. *et al.* Flammability limits temperature dependence of pure compounds in air at atmospheric pressure. **Energy**, Oxford, v. 118, p. 414–424, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.036. Acesso em: 16 out. 2026.

MIAO, H.; LU, L.; HUANG, Z. Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 36, n. 11, p. 6937–6947, 2011.

PRABHUKHOT, P. R.; WAGH, M. M.; GANGAL, A. C. A review on solid state hydrogen storage material. **Advances in Energy and Power**, Alhambra, v. 4, n. 2, p. 11–22, 2016.

QUINTINO, F. M.; FERNANDES, E. C. Numerical investigation of the impact of H_2 enrichment on lean biogas/air flames: an analytical modelling approach. **Energies**, Basel, v. 14, n. 2, art. 369, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/2/369. Acesso em: 10 abr. 2025.

QUINTINO, F. M.; NASCIMENTO, N.; FERNANDES, E. C. Aspects of hydrogen and biomethane introduction in natural gas infrastructure and equipment. **Hydrogen**, Basel, v. 2, n. 3, p. 301–318, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2673-4141/2/3/16. Acesso em: 10 abr. 2025.

REMACHA, P. *et al.* Impact of hydrogen blending on the formation of flammable atmospheres in enclosed spaces due to gas leaks. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 142, p. 685–696, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925002745?via%3Dihub. Acesso em: 16 nov. 2025.

SADEQ, A. M. *et al.* Hydrogen energy systems: technologies, trends, and future prospects. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 939, 2024.

SOFIAN, M. *et al.* A review on hydrogen blending in gas network: insight into safety, corrosion, embrittlement, coatings and liners, and bibliometric analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 60, p. 867–889, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319924005810. Acesso em: 16 nov. 2025.

SPALDING, D. B. A theory of inflammability limits and flame-quenching. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 240, p. 83–100, 1957.

TIAN, H. *et al.* Experimental and theoretical study of flammability limits of hydrocarbon–CO2 mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 42, n. 49, p. 29597–29605, 2017.

TOGUN, H. *et al.* A review on recent advances on improving fuel economy and performance of a fuel cell hybrid electric vehicle. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 89, p. 22–47, 2024.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Emissions gap report 2022**. Nairobi: UNEP, 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Emissions gap report 2023**: broken record – temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/43922. Acesso em: 10 abr. 2025.

VALENTI, G. Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. *In:* GUPTA, R. B.; BASILE, A.; VEZIROĞLU, T. N. (ed.). **Compendium of hydrogen energy**: hydrogen storage, distribution and infrastructure. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. v. 2, p. 27–51. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978178242362100002X. Acesso em: 16 out. 2026.

WANG, J. *et al.* Effect of N2 and CO2 on the flammability limit parameters and kinetic characteristics of hydrogen-blended natural gas mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 158, p. 150497, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319925034962. Acesso em: 16 nov. 2025.

ZABETAKIS, M. G. **Flammability characteristics of combustible gases and vapors**. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1965. (Bureau of Mines Bulletin, 627). Disponível em: https://www.osti.gov/servlets/purl/7328370/. Acesso em: 16 out. 2026.

ANEXO A – REGISTRO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS MISTURAS $CH_4/C_3H_8/H_2$.

As tabelas a seguir organizam, em português e em sequência, os registros das seis folhas individuais da planilha experimental. Os campos de propagação de chama que estavam vazios na planilha original foram identificados como “Não registrado”, sem inferência adicional. Os valores finais adotados para LII e LSI são apresentados ao final de cada tabela e correspondem aos valores utilizados na dissertação.

Tabela A1 – Registro experimental da Mistura 1

Composições reais utilizadas na comparação final: LII: H_2 30,00%; C_3H_8 10,00%; CH_4 60,00% | LSI: H_2 28,70%; C_3H_8 11,30%; CH_4 60,00%

Limite	Registro	C_3H_8 (kPa)	CH_4 (kPa)	H_2 (kPa)	Ar (kPa)	Propagação de chama	Concentração de combustível (%)
LII	1	0,5	2,9	1,3	91,60	Não	4,60
LII	2	0,5	2,8	1,3	91,70	Não	4,54
LII	3	0,5	2,6	1,2	90,70	Não	4,24
LII	**4**	**0,5**	**3,0**	**1,5**	**90,00**	**Sim**	**4,93**
LII	5	0,4	2,4	1,1	93,00	Não	3,85
LSI	**1**	**2,2**	**11,7**	**5,6**	**77,70**	**Sim**	**19,25**
LSI	2	2,3	12,4	6,0	71,90	Não	20,43
LSI	3	2,3	12,2	5,9	77,40	Não	20,13
LSI	4	2,3	12,0	5,8	77,90	Não	19,84
LSI	5	2,1	6,3	12,6	74,70	Não	20,77

Resultado adotado na dissertação: LII = 4,93% vol. e LSI = 19,25% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela A2 – Registro experimental da Mistura 2

Composições reais utilizadas na comparação final: LII: H_2 38,30%; C_3H_8 14,90%; CH_4 46,80% | LSI: H_2 37,70%; C_3H_8 14,70%; CH_4 47,50%

Limite	Registro	C_3H_8 (kPa)	CH_4 (kPa)	H_2 (kPa)	Ar (kPa)	Propagação de chama	Concentração de combustível (%)
LII	1	0,6	2,1	1,6	91,50	Não	4,24
LII	2	0,7	2,1	1,7	82,60	Não	4,44
LII	3	0,7	1,8	2,2	93,80	Sim	4,77
LII	**4**	**0,7**	**2,2**	**1,8**	**91,80**	**Sim**	**4,87**
LII	5	0,7	2,3	1,8	90,70	Não	5,03
LSI	1	3,0	9,6	7,6	70,70	Sim	19,94
LSI	**2**	**3,0**	**9,7**	**7,7**	**70,20**	**Sim**	**20,13**
LSI	3	3,0	9,8	7,8	74,50	Não	20,33
LSI	4	3,1	10,0	7,9	80,33	Não	20,72

Resultado adotado na dissertação: LII = 4,87% vol. e LSI = 20,13% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela A3 – Registro experimental da Mistura 3

Composições reais utilizadas na comparação final: LII: H_2 48,80%; C_3H_8 18,60%; CH_4 32,60% | LSI: H_2 49,10%; C_3H_8 18,10%; CH_4 32,70%

Limite	Registro	C_3H_8 (kPa)	CH_4 (kPa)	H_2 (kPa)	Ar (kPa)	Propagação de chama	Concentração de combustível (%)
LII	1	0,9	1,5	2,2	94,40	Não	4,54
LII	2	0,9	1,5	2,2	93,10	Sim	4,54
LII	3	0,8	1,5	2,2	92,80	Sim	4,44
LII	**4**	**0,8**	**1,4**	**2,1**	**93,30**	**Sim**	**4,24**
LII	5	0,8	1,3	2,0	91,10	Não	4,11
LSI	1	4,3	7,3	11,0	76,40	Sim	21,24
LSI	**2**	**4,1**	**7,4**	**11,1**	**73,30**	**Sim**	**22,30**
LSI	3	4,4	7,5	11,3	72,40	Não	22,90
LSI	4	4,4	7,5	11,4	69,20	Não	23,00
LSI	5	4,4	7,6	11,4	72,10	Não	23,70

Resultado adotado na dissertação: LII = 4,24% vol. e LSI = 22,30% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela A4 – Registro experimental da Mistura 4

Composições reais utilizadas na comparação final: LII: H_2 57,80%; C_3H_8 22,20%; CH_4 20,00% | LSI: H_2 58,10%; C_3H_8 22,00%; CH_4 19,90%

Limite	Registro	C_3H_8 (kPa)	CH_4 (kPa)	H_2 (kPa)	Ar (kPa)	Propagação de chama	Concentração de combustível (%)
LII	1	1,0	0,8	2,5	92,80	Não	4,24
LII	**2**	**1,0**	**0,9**	**2,6**	**91,80**	**Sim**	**4,44**
LII	3	1,1	0,9	2,7	89,30	Sim	4,64
LII	4	0,8	2,4	0,8	92,30	Não	3,94
LSI	1	4,8	4,3	12,3	76,10	Sim	20,36
LSI	2	5,0	4,5	12,9	75,10	Não	22,11
LSI	3	5,1	4,6	13,1	73,30	Sim	22,50
LSI	4	5,2	4,6	13,3	74,40	Não	22,80
LSI	5	5,2	4,7	13,4	71,10	Sim	23,00
LSI	6	5,3	4,7	13,5	74,00	Não	23,19
LSI	**7**	**5,2**	**4,7**	**13,7**	**69,50**	**Sim**	**23,29**

Resultado adotado na dissertação: LII = 4,44% vol. e LSI = 23,29% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela A5 – Registro experimental da Mistura 5

Composições reais utilizadas na comparação final: LII: H_2 65,20%; C_3H_8 23,90%; CH_4 10,90% | LSI: H_2 64,60%; C_3H_8 25,10%; CH_4 10,30%

Limite	Registro	C_3H_8 (kPa)	CH_4 (kPa)	H_2 (kPa)	Ar (kPa)	Propagação de chama	Concentração de combustível (%)
LII	1	1,1	0,4	2,9	90,50	Sim	4,34
LII	2	1,2	0,4	2,9	93,50	Não	4,44
LII	**3**	**1,1**	**0,5**	**3,0**	**94,40**	**Sim**	**4,54**
LII	4	1,2	0,5	3,0	93,30	Não	4,64
LSI	1	5,9	2,4	15,2	71,70	Sim	23,19
LSI	2	6,0	2,4	15,5	72,50	Não	23,59
LSI	**3**	**6,1**	**2,5**	**15,7**	**74,70**	**Sim**	**23,98**
LSI	4	6,2	2,5	15,9	74,40	Não	24,28

Resultado adotado na dissertação: LII = 4,54% vol. e LSI = 23,98% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela A6 – Registro experimental da Mistura 6

Composições reais utilizadas na comparação final: LII: H_2 71,10%; C_3H_8 28,90%; CH_4 0,00% | LSI: H_2 71,80%; C_3H_8 28,20%; CH_4 0,00%

Limite	Registro	C_3H_8 (kPa)	CH_4 (kPa)	H_2 (kPa)	Ar (kPa)	Propagação de chama	Concentração de combustível (%)
LII	**1**	**1,3**	**0,0**	**3,2**	**93,60**	**Sim**	**4,44**
LII	2	1,3	0,0	3,3	94,40	Não	4,54
LII	3	1,2	0,0	3,2	92,20	Não	4,35
LII	4	1,2	0,0	3,1	94,70	Não	4,24
LSI	1	7,2	0,0	18,6	72,00	Não	25,46
LSI	2	7,4	0,0	19,0	72,20	Não	26,05
LSI	3	7,5	0,0	19,4	72,10	Não	26,55
LSI	**4**	**7,7**	**0,0**	**19,6**	**71,70**	**Sim**	**26,94**
LSI	5	7,7	0,0	20,0	71,30	Não	27,34

Resultado adotado na dissertação: LII = 4,44% vol. e LSI = 26,94% vol.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	Javier Alejandro Rodríguez Travieso 01-11-1995
Nacionalidade	Cubana
Nome em citações bibliográficas:	TRAVIESO, J. A. R.; TRAVIESO, JAVIER ALEJANDRO RODRÍGUEZ;Travieso;Javier Alejandro Rodriguez Travieso;TRAVIESO, JAVIER A. RODRIGUEZ
Currículo Lattes	**https://lattes.cnpq.br/1124381466509280**
ORCID	https://orcid.org/0009-0007-0205-3594
outro identificador	1124381466509280
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
0000/9999	Formação acadêmica **2026 – Atual** Doutorado em Engenharia Mecânica (em andamento). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil. Título da pesquisa: Estudo da viabilidade técnico econômica da gaseificação melhorada por sorção de resíduos têxteis para a geração de um gás rico em hidrogênio. Orientador: Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez. Coorientadora: Profa. Dra. Einara Blanco Machin. **2024 – 2026** Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil. Título da dissertação: Determinação Experimental dos Limites de Inflamabilidade de misturas de gás natural e hidrogênio (GN-H2-ar) ricas em hidrogênio. Orientador: Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez. Coorientadora: Profa. Dra. Einara Blanco Machin. Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). **2016 – 2021** Graduação em Engenharia Mecânica. Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. Título do trabalho de conclusão: Estudio del comportamiento fluido-dinámico en lecho fluidizado de residuos agroindustriales torrefactados. Orientador: David Carballea Cabrera. **2009 – 2013** Formação Técnica em Contabilidade e Finanças.

	Instituto Politécnico de Contabilidad y Finanzas Cándido González Morales, Cuba.
0000/9999	**Formação complementar** **2025** Curso de curta duração em Engenharia em Evolução: Inovação e Sustentabilidade em Movimento. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil. **2025** Curso de curta duração em Uso de Combustíveis Gasosos Renováveis em Substituição ao Gás Natural. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil. **2025** Curso de curta duração em Letramento Científico. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil. **2022** Curso de curta duração em Fundamentos de Didáctica y Pedagogía. Carga horária: 48 horas. Universidad de Camagüey, Cuba. **2022** Curso de curta duração em Impresoras Flexográficas, Laminadoras, Cortadoras y Máquinas Bolseadoras. Carga horária: 48 horas. ENFLEX, Cuba.

PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Artigos publicados em periódicos

ANDRADE, J. C.; PEREZ, N. P.; CORONADO, C. J. R.; COSTA, F. S.; TRAVIESO, J. A. R. Metodologia e validação experimental de uma bancada para determinação dos limites de inflamabilidade do HVO. SODEBRÁS, v. 20, 2025.

PÉREZ, N. P.; TRAVIESO, J. A. R.; SHELTON, E. D.; PEDROSO, D. T.; MACHIN, E. B.; TUNA, C. E.; SILVEIRA, J. L. Unlocking the potential of sugarcane bagasse: a comprehensive analysis for advanced energy conversion. Bioresources and Bioprocessing, v. 12, 2025.

Trabalhos publicados em anais de eventos

TRAVIESO, J. A. R.; ANDRADE, J. C.; MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; PEREZ, N. P. Methodology for the experimental determination of the flammability limits of ternary $CH_4/C_3H_8/H_2$ mixtures with high concentrations of H_2. In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON MECHANICAL ENGINEERING (COLIM 2026), 10., 2026, Equador. Proceedings [...]. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology (IET), 2026.

ANDRADE, J. C.; TRAVIESO, J. A. R.; CORONADO, C. J. R.; COSTA, F. S.; PEREZ, N. P. Metodologia e validação experimental de uma bancada para determinação dos limites de inflamabilidade do HVO. In: INTERNATIONAL SODEBRAS CONGRESS, 48., 2026, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: SODEBRAS, 2026.

Apresentação de trabalho e palestra

Travieso. METHODOLOGY FOR THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FLAMMABILITY LIMITS OF TERNARY $\boldsymbol{CH_4/C_3H_8/H_2}$ MIXTURES WITH HIGH CONCENTRATIONS OF $\boldsymbol{H2}$., 2026.

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

Bancas de trabalhos de conclusão

SAMPAIO, D. J. B. S.; BIMESTRE, T. A.; TRAVIESO, J. A. R. Participação em banca de Giovana Komada Prado. Estudo sobre influência da vibração randômica na durabilidade de componentes estruturais em aço para veículos comerciais. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2025.

SAMPAIO, D. J. B. S.; BIMESTRE, T. A.; TRAVIESO, J. A. R. Participação em banca de Renan Augusto Sigaud Ferraz. Monitoramento preditivo de motores de braços robóticos utilizando inteligência artificial. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2025.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

2026 10th Latin American Congress on Mechanical Engineering (COLIM 2026), Equador. Apresentação do trabalho: Methodology for the experimental determination of the flammability limits of ternary $CH_4/C_3H_8/H_2$ mixtures with high concentrations of H_2. 2025 IX Workshop da Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, Brasil. Trabalho apresentado: Estudo Experimental dos Limites de Inflamabilidade de Misturas de Gás Natural e Hidrogênio, enriquecidas com Hidrogênio. 2025 II Workshop de Biocombustíveis. Tema: Hidrogênio e Etanol – Aplicações de Tecnologias Avançadas. 2025 II Edição da Feira Multicultural e IX Workshop da Pós-Graduação em Engenharia. Participação e organização do evento. 2024 Feira Multicultural e VIII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia. Participação e organização do evento.