

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Análise de Combustível Sólido em Motor de Foguete Híbrido Utilizando Processamento de Imagens

Autor: Felipe Hermes Fernandes
Orientador: Prof. Dr. Artur Elias de Moraes Bertoldi

Brasília, DF
2023



Felipe Hermes Fernandes

Análise de Combustível Sólido em Motor de Foguete Híbrido Utilizando Processamento de Imagens

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Artur Elias de Moraes Bertoldi

Brasília, DF

2023

Felipe Hermes Fernandes

Análise de Combustível Sólido em Motor de Foguete Híbrido Utilizando Processamento de Imagens/ Felipe Hermes Fernandes. – Brasília, DF, 2023-
91 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Artur Elias de Moraes Bertoldi

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Foguete híbrido. 2. Taxa de regressão. I. Prof. Dr. Artur Elias de Moraes Bertoldi. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise de Combustível Sólido em Motor de Foguete Híbrido Utilizando Processamento de Imagens

CDU 02:141:005.6

Felipe Hermes Fernandes

Análise de Combustível Sólido em Motor de Foguete Híbrido Utilizando Processamento de Imagens

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 21 de julho de 2023:

**Prof. Dr. Artur Elias de Moraes
Bertoldi**
Orientador

Prof. Dr. Jungpyo Lee
Convidado 1

**Prof. Dr. Marcus Vinícius Chaffim
Costa**
Convidado 2

Brasília, DF
2023

*"Dream big, work hard, stay focused,
and surround yourself with good people."
(Dr. Mae Jemison)*

Resumo

Neste trabalho, focamos em dois aspectos importantes da combustão de combustíveis sólidos em motores de foguete híbrido: a intensidade da chama e a taxa de regressão, que é a velocidade de consumo do combustível. O estudo baseia-se na análise de testes que empregaram oxigênio gasoso como oxidante e parafina como combustível sólido, em um queimador plano. Para analisar o desempenho do motor, foram realizados experimentos com diferentes valores de pressão na câmara de combustão e de vazão de oxidante. Utilizando uma câmera de alta velocidade, capturamos imagens detalhadas do processo de combustão, permitindo uma análise precisa das mudanças na chama e na taxa de regressão do combustível sólido sob estas diferentes condições. Os resultados revelam que a intensidade da chama e a taxa de regressão são sensivelmente afetadas pelas variáveis experimentais, sublinhando a complexidade do processo de queima em motores de foguetes híbridos e destacando a importância de pesquisas detalhadas para uma compreensão aprofundada desses fenômenos.

Palavras-chaves: foguete híbrido, queimador plano, taxa de regressão, escala de intensidade.

Abstract

This paper presents a detailed analysis of two crucial aspects in the combustion of solid fuels in hybrid rocket engines: the intensity of the flame and the rate at which the fuel is consumed, known as the regression rate. The research is based on the observation of tests that used gaseous oxygen as an oxidant and paraffin as solid fuel by the means of a hybrid rocket slab-burner. In these tests, a variety of combustion chamber pressure conditions and different oxidant flows were explored. Using a high-speed camera, detailed images of the combustion were captured, allowing for a meticulous analysis of variations in the flame and the fuel consumption rate under different conditions. It was found that both the intensity of the flame and the regression rate of the fuel are significantly influenced by the experimental conditions, including the pressure in the slab-burner combustion chamber. In summary, this study offers insights into the combustion process in hybrid rocket engines, highlighting the complexity and the importance of deepening the understanding of these phenomena.

Key-words: hybrid rocket, slab burner, regression rate, intensity scale.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema de um foguete híbrido clássico. (HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007) adaptado por (BERTOLDI, 2007)	27
Figura 2 – Modelo do processo de queima da parafina (BERTOLDI, 2007)	31
Figura 3 – Queimador plano MOUETTE com acesso óptico (GELAIN et al., 2022)	33
Figura 4 – CAD 3D do queimador plano MOUETTE (GELAIN et al., 2022).	34
Figura 5 – Grão combustível e molde 3D para o MOUETTE (GELAIN et al., 2022).	36
Figura 6 – Configuração para a captura dos testes. À esquerda, a câmera de alta velocidade e à direita, a bancada de testes móvel (GELAIN et al., 2022).	37
Figura 7 – Comparação das imagens antes e após a aplicação da função cvtColor. Foto: (CARVALHO, 2023).	40
Figura 8 – Comparação da aplicação da função cv2.threshold com diferentes valores de limiar. Foto: (CARVALHO, 2023).	41
Figura 9 – Escala de intensidade para o segundo 2 e comparação entre diferentes instantes do Teste 22 do MOUETTE.	43
Figura 10 – Imagens em escala cinza do contorno de chama do Teste 22 para o primeiro segundo, utilizando o método de média móvel de 100 quadros.	45
Figura 11 – Escala de intensidade para o segundo 4 do Teste 22.	45
Figura 12 – Comparação da imagem do Teste 8 do queimador plano MOUETTE antes e após o corte para focar na parte superior do grão combustível.	46
Figura 13 – Comparação da imagem antes e após a conversão para escala de cinza para o Teste 8 do queimador plano MOUETTE.	47
Figura 14 – Seção transversal do queimador nas fases de teste inicial e posteriores, ressaltando o espaço entre o combustível e a janela. (GELAIN et al., 2023)	47
Figura 15 – Comparação da aplicação da função cv2.threshold para o Teste 8 (baixa pressão) do MOUETTE com diferentes valores de limiar.	48
Figura 16 – Comparação da aplicação da função cv2.contour para o Teste 21 (alta pressão) do MOUETTE com diferentes valores de limiar.	48
Figura 17 – Comparação da aplicação da função cv2.contour para o teste 8 (baixa pressão) com diferentes valores de limiar.	49
Figura 18 – Comparação da aplicação da função cv2.contour para o teste 21 (alta pressão) com diferentes valores de limiar.	50
Figura 19 – Comparação da distância em pixels da chama à base do combustível em diferentes instantes do vídeo para o Teste 8 do MOUETTE.	51
Figura 20 – Comparação da distância em pixels da chama à base do combustível em diferentes instantes do vídeo para o Teste 21 do MOUETTE.	51

Figura 21 – Exemplo de anomalia no modelo exemplificado para os Testes 8 e 21 do MOUETTE.	51
Figura 22 – Comparação da taxa de regressão em diferentes instantes do vídeo para o Teste 8 do MOUETTE.	53
Figura 23 – Comparação da taxa de regressão em diferentes instantes do vídeo para o Teste 21 do MOUETTE.	53
Figura 24 – Teste do MOUETTE em condições de alta pressão (GELAIN et al., 2023).	57
Figura 25 – <i>Frames</i> dos Testes 4 e 22 do motor MOUETTE comparando a chama à pressão baixa e à alta pressão.	58
Figura 26 – Perfil de intensidade da chama no Teste 11 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.	62
Figura 27 – Perfil de intensidade da chama no Teste 12 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.	63
Figura 28 – Comparação dos perfis de intensidade da chama nos Testes 11 e 12 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.	63
Figura 29 – Perfil de intensidade da chama no Teste 21 do motor MOUETTE à alta pressão para os segundos 1, 2 e 4.	65
Figura 30 – Perfil de intensidade da chama no Teste 22 do motor MOUETTE à alta pressão para os segundos 1, 2 e 4.	65
Figura 31 – Comparação dos perfis de intensidade da chama nos Testes 21 e 22 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.	65
Figura 32 – Distância da base da chama para a base do grão combustível dos Testes 11 e 12 do MOUETTE.	67
Figura 33 – Imagem do Teste 5 do MOUETTE, evidenciando a qualidade insatisfatória para análise devido à janela obstruída por resíduos.	68
Figura 34 – Distância da base da chama para a base do grão combustível dos Testes 21 e 22 do MOUETTE.	70
Figura 35 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 4 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	77
Figura 36 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 5 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	78
Figura 37 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 6 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	78
Figura 38 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 7 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	79
Figura 39 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 8 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	79

Figura 40 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 9 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	80
Figura 41 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 10 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	80
Figura 42 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 11 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	81
Figura 43 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 12 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	81
Figura 44 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 13 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	82
Figura 45 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 14 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	82
Figura 46 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 16 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	83
Figura 47 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 19 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	83
Figura 48 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 22 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.	84
Figura 49 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 4 do motor MOUETTE.	85
Figura 50 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 7 do motor MOUETTE.	86
Figura 51 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 10 do motor MOUETTE.	86
Figura 52 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 13 do motor MOUETTE.	87
Figura 53 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 16 do motor MOUETTE.	87
Figura 54 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 19 do motor MOUETTE.	88
Figura 55 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 22 do motor MOUETTE.	88

Lista de tabelas

Tabela 1 – Componentes do queimador plano MOUETTE enumerado de acordo com a Figura 4. (GELAIN et al., 2022)	35
Tabela 2 – Propriedades do queimador plano utilizado nos testes do MOUETTE. .	36
Tabela 3 – Condições de Operação Máxima do MOUETTE, valor de projeto (GELAIN et al., 2023).	37
Tabela 4 – Dados de pressão para a companhia de testes do motor MOUETTE. . .	55
Tabela 5 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE.	56
Tabela 6 – Configurações da câmera de alta velocidade do MOUETTE.	59
Tabela 7 – Dados de pressão para a companhia de testes do motor MOUETTE à pressão atmosférica.	60
Tabela 8 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE à pressão atmosférica.	60
Tabela 9 – Dados de pressão para a companhia de testes do motor MOUETTE à baixa pressão.	61
Tabela 10 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE à baixa pressão.	61
Tabela 11 – Dados de pressão para a companhia de testes do motor MOUETTE à alta pressão.	64
Tabela 12 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE à baixa pressão.	64
Tabela 13 – Relação de configurações de gravação e tempo de queima para os testes à baixa pressão do motor MOUETTE.	66
Tabela 14 – Taxa de regressão média para os testes à baixa pressão do MOUETTE.	68
Tabela 15 – Relação de configurações de gravação e tempo de queima para os testes à alta pressão do motor MOUETTE.	69
Tabela 16 – Taxa de regressão média para os testes à alta pressão do MOUETTE. .	69
Tabela 17 – Dados de configuração do motor MOUETTE para cada teste.	89
Tabela 18 – Dados de pressão do motor MOUETTE para cada teste.	90
Tabela 19 – Dados de massa do motor MOUETTE para cada teste.	90
Tabela 20 – Dados de performance do motor MOUETTE para cada teste.	91

Lista de abreviaturas e siglas

fps	Frames Por Segundo
GOx	<i>Gaseous Oxygen</i> (Oxigênio Gasoso)
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i> (Unidade de Processamento Gráfico)
MFPH	Motores de Foguetes Propelente Híbrido
MOUETTE	<i>Moteur Optique poUr ETudieret Tester Ergols hybrides</i> (Motor Óptico para Estudo e Teste de Propulsores Híbridos)
NBR	<i>Nitrile Butadiene Rubber</i> (Borracha de Nitrila Butadieno)
ULB	<i>Université Libre de Bruxelles</i> (Universidade Livre de Bruxelas)
PIL	<i>Python Imaging Library</i> (Biblioteca de Imagens Python)

Lista de símbolos

a	Coeficiente da taxa de regressão
A_f	Área média da superfície do grão combustível
A_{porta}	Área da porta de combustão
A_t	Área na garganta da tubeira
c_D	Coeficiente de descarga
c_{exp}^*	Velocidade característica experimental
c_{teo}^*	Velocidade característica teórica
G_{ox}	Fluxo mássico do oxidante
g	Aceleração da gravidade
I_{sp}	Impulso específico
M	Número de Mach
m_f	Massa de combustível
\dot{m}_f	Taxa de vazão mássica de propelente
\dot{m}_{ox}	Taxa de vazão mássica de oxidante
N	Número de portas de combustão
n	Expoente da taxa de regressão
O/F	Razão de oxidante para combustível
P_1	Pressão no tanque de oxidante
P_2	Pressão antes do orifício de estrangulamento
P_3	Pressão depois do orifício de estrangulamento
P_4	Pressão na entrada do motor
P_c	Pressão na câmara de combustão
\dot{r}	Taxa de regressão

T	Empuxo
t_b	Tempo de queima
ρ_f	Densidade do grão combustível
η^*	Eficiência da combustão
γ	Razão de calor específico do oxidante

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Contextualização	23
1.2	Motivação do Trabalho	24
1.3	Objetivos	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Propulsão Híbrida	27
2.1.1	Parâmetros de Desempenho	28
2.1.2	Vantagens e Desvantagens	29
2.2	Parâmetros de Chama	30
3	APARATO EXPERIMENTAL	33
3.1	Queimador plano MOUETTE	33
3.2	Grão combustível	35
3.3	Descrição dos testes	36
4	FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA	39
4.1	Bibliotecas Utilizadas	39
4.2	Funções Utilizadas	39
4.2.1	OpenCV.cvtColor	39
4.2.2	OpenCV.threshold	40
4.2.3	OpenCV.findContours	42
4.3	Metodologia para Obtenção da Escala de Intensidade	42
4.3.1	Metodologia de Extração da Escala de Intensidade	42
4.3.1.1	Tratamento do Vídeo	43
4.3.1.2	Pré-processamento da Imagem	43
4.3.2	Metodologia de Cálculo da Escala de Intensidade	44
4.3.2.1	Soma de Quadros para Suavizar o Contorno da Chama	44
4.3.2.2	Cálculo da Escala de Intensidade	44
4.4	Metodologia de Cálculo da Taxa de Regressão	45
4.4.1	Procedimento de Análise da Taxa de Regressão	46
4.4.1.1	Pré-Processamento	46
4.4.1.2	Conversão para Escala de Cinza	46
4.4.1.3	Aplicação de <i>Thresholding</i>	47
4.4.1.4	Deteccção de Contornos	49
4.4.1.5	Medição da Distância da Chama à Base do Combustível	50

4.4.2	Cálculo e Análise da Taxa de Regressão	52
4.4.2.1	Determinação das Mudanças na Distância	52
4.4.2.2	Análise Estatística e Representação Gráfica	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Resultados para Escala de Intensidade	59
5.1.1	Testes à Pressão Atmosférica	59
5.1.2	Testes à Baixa Pressão	61
5.1.3	Testes à Alta Pressão	63
5.2	Resultados para Taxa de Regressão	66
5.2.1	Testes à Pressão Atmosférica	66
5.2.2	Testes à Baixa Pressão	66
5.2.3	Testes à Alta Pressão	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.1	Conclusão	71
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	75
	APÊNDICE A – PERFIS DE INTENSIDADE	77
	APÊNDICE B – DISTANCIA DA CHAMA E TAXA DE REGRES- SÃO	85
	APÊNDICE C – TABELAS DE RESULTADOS DOS TESTES COM O MOTOR MOUETTE	89

1 Introdução

1.1 Contextualização

A propulsão híbrida tem sido objeto de pesquisa e desenvolvimento aeroespacial devido às suas potenciais vantagens sobre outros sistemas de propulsão. Os motores de foguetes híbridos (MFPHs) combinam as propriedades vantajosas dos motores de foguetes sólidos e líquidos, oferecendo maior segurança, flexibilidade de projeto e controle. Os MFPHs apresentam complexidades de sistema notáveis, particularmente na balística interna, onde a interação entre os combustíveis sólido, líquido ou gasoso é complexa, similar à uma chama de difusão turbulenta. A necessidade de um sistema de alimentação de oxidante exige precisão e controle rigorosos para manter a eficiência do motor. Além disso, os MFPHs precisam lidar com as flutuações de combustível, que se referem às variações na taxa de regressão e na mistura de combustíveis sólido e líquido, afetando diretamente a estabilidade e eficiência do motor. Apesar dessas deficiências, MFPHs têm muitas vantagens, tais quais, menor impacto ambiental, versatilidade do propelente e baixo custo, que motivam mais pesquisas essenciais para superar esses desafios e explorar essa tecnologia (JENS; CANTWELL; HUBBARD, 2016) e (KANG et al., 2016).

Compreender e modelar a mecânica de combustão dos MFPHs desempenha um papel importante no projeto e otimização desses motores. Um *slab burner*, traduzindo para o português livremente como queimador plano, pode ser usado para estudar a balística interna. O queimador plano consiste em um motor em escala de laboratório. Esses vídeos são uma ferramenta crucial para o estudo da taxa de regressão em MFPHs, fornecendo informações detalhadas sobre os fenômenos envolvidos no processo de queima.

Dentro deste contexto mais amplo, o presente trabalho busca contribuir especificamente para o entendimento da balística interna de MFPHs utilizando técnicas de processamento de imagem e análise de dados. Este estudo visa preencher lacunas existentes no conhecimento atual, particularmente no que se refere à análise quantitativa da chama e da taxa de regressão do combustível sólido.

A análise de vídeo gravada da câmara de combustão de um queimador plano fornece informações detalhadas sobre a chama de um combustível sólido em um motor híbrido. Por meio desses vídeos, informações importantes como taxa de regressão do combustível, padrão de chama e distribuição de temperatura ao longo do grão combustível podem ser extraídas. Esses parâmetros são importantes para a compreensão do comportamento da chama e contribuir para o desempenho dos MFPHs.

Para processar os dados obtidos nos vídeos, empregamos técnicas de processamento de imagem e análise de dados. Inicialmente, melhoramos a qualidade do vídeo para facilitar a identificação de elementos importantes, como os contornos das chamas. A seguir, realizamos análises quantitativas para extrair parâmetros como a taxa de regressão, a intensidade luminosa e outras características relevantes. Os dados foram comparados com os resultados experimentais e os utilizamos para validar modelos teóricos e simulações computacionais.

1.2 Motivação do Trabalho

A motivação para este estudo decorre da necessidade de uma compreensão detalhada da balística interna de MFPHs, um campo que historicamente teve um desenvolvimento mais lento em comparação com os motores de foguetes sólidos e líquidos. Essa diferença no ritmo de desenvolvimento sublinha a importância de pesquisas focadas na análise de desempenho, otimização de projetos e garantia da segurança operacional dos MFPHs

Usando técnicas de vídeos de alta velocidade, uma grande quantidade de dados pode ser coletada, mas a análise dos quadros não é trivial, e várias técnicas automatizadas foram usadas para tentar identificar algumas características-chave da combustão como taxa de regressão do combustível (GELAIN et al., 2023). Como citado por Gelain et al., agrupamento (*clustering*) foi aplicado para identificar automaticamente diferentes fases do processo de combustão, anomalias como gotículas podem ser detectadas (RÜTTIGERS; PETRAROLO, 2021), algoritmos de análise de imagem foram aplicados para medir a altura e intensidade da chama (KOBALD; VERRI; SCHLECHTRIEM, 2015), e as técnicas de aprendizado de máquina parecem dar resultados promissores também na detecção da forma do grão de combustível e na medição da taxa de regressão (SURINA et al., 2021).

O escopo desse trabalho é fornecer uma avaliação preliminar da taxa de regressão de uma placa de combustível à base de parafina inferida a partir de vídeo de alta velocidade usando técnicas de análise de imagem. A abordagem foi aplicada e os dados coletados no queimador plano foram usados para avaliar os resultados em diferentes condições experimentais.

1.3 Objetivos

O propósito central deste trabalho é conduzir uma investigação quantitativa sobre a dinâmica da combustão em MFPHs utilizando imagens capturadas por uma câmera de alta velocidade. Este estudo objetiva contribuir para o entendimento e otimização dos parâmetros da combustão em MFPHs. Os objetivos específicos que norteiam este trabalho incluem:

- Preparar e processar as imagens capturadas por uma câmera de alta velocidade, realizando uma série de tratamentos como conversão para escala de cinza e fechamento morfológico, a fim de facilitar análises subsequentes.
- Quantificar a distribuição de intensidade luminosa da chama em termos de pixels brancos e correlacioná-la com a distância de pixels do propelente. Esta análise tem o objetivo de associar a intensidade luminosa com parâmetros de desempenho do motor, mais especificamente com a taxa de regressão do grão combustível. Definir esta relação permitirá uma compreensão mais profunda dos mecanismos que influenciam a eficácia da combustão em MFPHs.
- Analisar a evolução do contorno da chama ao longo do tempo para determinar a taxa de regressão do combustível. Este objetivo envolve medir a distância entre a chama e a base do combustível em diferentes momentos, proporcionando uma avaliação de como o propelente é consumido ao longo da combustão. Essa análise é fundamental para entender a taxa de regressão do grão combustível.
- Submeter os dados extraídos a uma comparação com resultados experimentais existentes, mostradas em (GELAIN et al., 2023), visando validar a robustez da metodologia empregada e assegurar a fidedignidade das conclusões obtidas.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Propulsão Híbrida

A propulsão híbrida combina algumas das capacidades dos sistemas de propulsão líquida e sólida. A configuração mais comum de um sistema híbrido utiliza um oxidante em fase líquida ou gasosa armazenado em um tanque externo, enquanto o combustível sólido é mantido separadamente na câmara de combustão.

A operação desse tipo de sistema está demonstrada no esquemático da Figura 1. O sistema começa com a abertura da válvula reguladora de fluxo e o acionamento do sistema de ignição. Devido à diferença de pressão, o oxidante entra na câmara de combustão onde passa pelos produtos de ignição e reage com as partículas do combustível na fase de vapor. A vantagem deste sistema é que ele pode controlar o empuxo, semelhante aos sistemas de propulsão líquida, por meio da válvula de controle de fluxo do oxidante. Os sistemas híbridos também oferecem maior segurança, se comparado com o sistema líquido - já que os propelentes estão separados fisicamente.

Os MFPHs têm muitos recursos exclusivos, mas se beneficia parcialmente do desenvolvimento de foguetes de combustível líquido e sólido. Motores híbridos experimentais com empuxo de 2 a 250000 lbf foram desenvolvidos e testados no solo (SUTTON; BLARZ, 2017). Alguns dos motores híbridos grandes e pequenos voaram em veículos de teste. No entanto, até agora nenhum sistema de grande escala foi escolhido para aplicações de produção.

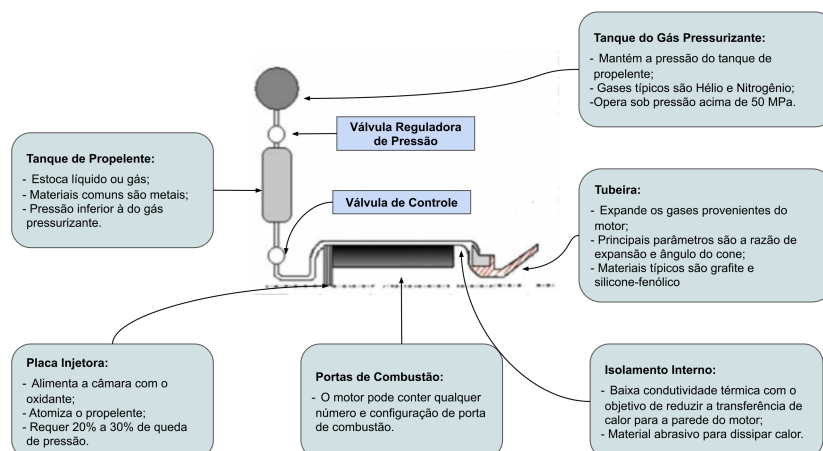


Figura 1 – Esquema de um foguete híbrido clássico. (HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007) adaptado por (BERTOLDI, 2007)

2.1.1 Parâmetros de Desempenho

Segundo (MARXMAN; GILBERT, 1963), a taxa de regressão (\dot{r}) é um parâmetro que mede a rapidez com que a superfície do combustível sólido recua, ou seja, a rapidez com que o combustível é consumido. Para motores movidos a combustíveis híbridos, a taxa de regressão é uma métrica importante, pois está diretamente relacionada à taxa de desgaseificação e, portanto, à taxa de geração de empuxo. A taxa de regressão é influenciada por vários fatores, incluindo: geometria do combustível, temperatura do sistema e propriedades físicas e químicas do combustível.

Segundo (HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007) e (SUTTON; BIBLARZ, 2017), a taxa de regressão do combustível sólido pode ser caracterizada utilizando a Equação 2.1.

$$\dot{r} = aG_{ox}^n \quad (2.1)$$

Aqui, G_{ox} é o fluxo mássico do oxidante através da porta de combustão por unidade de área, a é o coeficiente da taxa de regressão e n é o expoente da taxa de regressão, ambos definidos a partir de dados experimentais para cada propelente.

$$G_{ox} = \frac{\dot{m}_{ox}}{N \cdot A_{porta}} \quad (2.2)$$

Para o queimador plano, a taxa de regressão média pode ser calculada como a taxa média determinada pela área da combustão do combustível durante o tempo total de queima, e é dada pela Equação 2.3:

$$\bar{r} = \frac{\Delta m_f}{A_f t_b \rho_f} \quad (2.3)$$

Em que, m_f é a massa do grão combustível, A_f é a área média da superfície do grão combustível, t_b é o tempo de queima e ρ_f é a densidade do grão combustível.

A análise da pressão e o vídeo gravado ajudaram a visualizar a queima. Em geral, o tempo inicial de queima corresponde de 5 a 10% do valor máximo inicial, e o final do tempo de queima representa 20 a 40% do valor máximo inicial (BERTOLDI; GELAIN; HENDRICK, 2022). Isso varia porque a combustão não é semelhante de um teste para outro, mesmo com o mesmo tempo nominal de teste. A taxa de vazão mássica do oxidante é fixada usando um orifício de estrangulamento. A vazão mássica que passa por ele pode ser calculado de acordo com a Equação 2.4.

$$\dot{m}_{ox} = c_D A_p \sqrt{\gamma \rho_0 P_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.4)$$

Na qual, \dot{m} é a taxa de vazão mássica do oxidante, γ é a razão de calor específico do oxidante e ρ_0 é a densidade a montante do orifício (ambas funções da pressão e temperatura a montante), P_0 é a pressão do fluxo a montante, A é a área do orifício e c_D é o coeficiente

de descarga. A razão média de oxidante para combustível (O/F) é calculada usando a Equação 2.5:

$$\overline{O/F} = \frac{\overline{\dot{m}_{ox}}}{\overline{\dot{m}_f}} \quad (2.5)$$

A eficiência de combustão (η^*) é calculada pela Equação 2.6 e é a razão entre a velocidade característica experimental (c_{exp}^*), calculada pela Equação 2.7, e a velocidade característica teórica (c_{teo}^*), obtida por meio de um software (BERTOLDI; GELAIN; HENDRICK, 2022).

$$\eta^* = \frac{c_{exp}^*}{c_{teo}^*} \quad (2.6)$$

$$c_{exp}^* = \frac{\bar{P}_c \cdot A_t}{\overline{\dot{m}}} \quad (2.7)$$

Conforme explicado em (BERTOLDI; GELAIN; HENDRICK, 2022), para o motor MOUETTE, as equações foram modificadas levando em consideração as características do motor, como a geometria interna do motor e o grão de combustível sólido. Além disso, foram feitas modificações para calcular a taxa de regressão por meio da área de queima e do fluxo de massa do oxidante na entrada. Todos os testes com o motor MOUETTE utilizaram GOx (oxigênio gasoso) como oxidante.

Estes são alguns dos principais parâmetros de desempenho para balística interna em motores movidos a combustíveis híbridos. É importante ressaltar que a otimização desses parâmetros é fundamental para melhorar a eficiência e o desempenho do motor.

2.1.2 Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens e desvantagens dos sistemas de propulsão híbrida, segundo (SUTTON; BIBLARZ, 2017) são:

1. Vantagens da propulsão híbrida

- a) Maior segurança contra explosão ou detonação durante a fabricação, armazenamento e operação;
- b) Capacidades de iniciar, parar ou reiniciar a operação com um controle ativo de empuxo através de uma válvula de controle de fluxo de oxidante;
- c) Relativa simplicidade que pode se traduzir em baixo custo geral do sistema em comparação com líquidos;
- d) Impulso específico mais alto do que os motores de foguetes sólidos;

2. Desvantagens da propulsão híbrida

- a) A variação da razão de mistura (O/F), assim como o impulso específico, podem alterar durante a operação em estado estacionário, devido a mudança de área do grão combustível à medida que é consumido;
- b) Geometrias de combustível relativamente complicadas com resíduos de combustível inevitáveis significativos no final da queima, o que reduz um pouco a fração de massa;
- c) Propenso a flutuações de pressão de grande amplitude e baixa frequência;
- d) Balística interna do motor relativamente complicada, resultando em caracterizações incompletas, tanto das taxas de regressão do combustível quanto dos efeitos de escala do motor, afetando o projeto de grandes sistemas híbridos

2.2 Parâmetros de Chama

A caracterização da chama em foguetes é essencial para compreender o desempenho e o comportamento do motor. Para descrever as características da chama, utilizam-se diversos parâmetros, tais como a taxa de regressão do combustível, padrão de chama e distribuição de temperatura ao longo do grão combustível. Estes fornecem informações importantes sobre o processo de combustão ([SURINA et al., 2021](#)).

A taxa de regressão é um parâmetro fundamental que mede a velocidade com que o combustível é consumido. É uma medida crucial para avaliar o desempenho do motor e determinar a capacidade de propulsão. O conhecimento da taxa de regressão permite otimizar o projeto do motor, ajustando as dimensões e as propriedades do combustível para obter um desempenho ideal. Segundo ([HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007](#)), a principal questão a ser respondida sobre o MFPHs é como o combustível sólido vaporiza e entra na porta a combustão e, mais especificamente, o quão rápido regressa.

A quantidade de oxidante escoando através da câmara de combustão afeta o empuxo produzido ([BERTOLDI, 2007](#)), essa afirmação tem base teórica e comprovação experimental. Logo, a taxa de regressão do grão combustível é também uma função da taxa de escoamento do oxidante.

É importante ressaltar que a balística interna da parafina, um combustível comumente utilizado em motores híbridos, apresenta características diferentes em relação aos combustíveis híbridos tradicionais. A parafina possui uma taxa de regressão alta, se comparada a outros combustíveis de MFPH. Essa diferença na balística interna pode influenciar os parâmetros de chama e requer análises específicas para otimizar o desempenho desses motores.

Segundo (BERTOLDI, 2007), para um bom projeto de um sistema de propulsão híbrida, é fundamental compreender a relação entre a taxa de regressão e os principais parâmetros operacionais, como fluxo de massa, pressão e comprimento do grão. Essa relação funcional é conhecida como "Lei da taxa de regressão" (Equação 2.1) e varia de acordo com as propriedades termofísicas e termoquímicas de cada combinação de propelente. No entanto, o modelo de queima tradicionalmente aplicado aos combustíveis híbridos não pode ser diretamente aplicado à taxa de regressão da parafina.

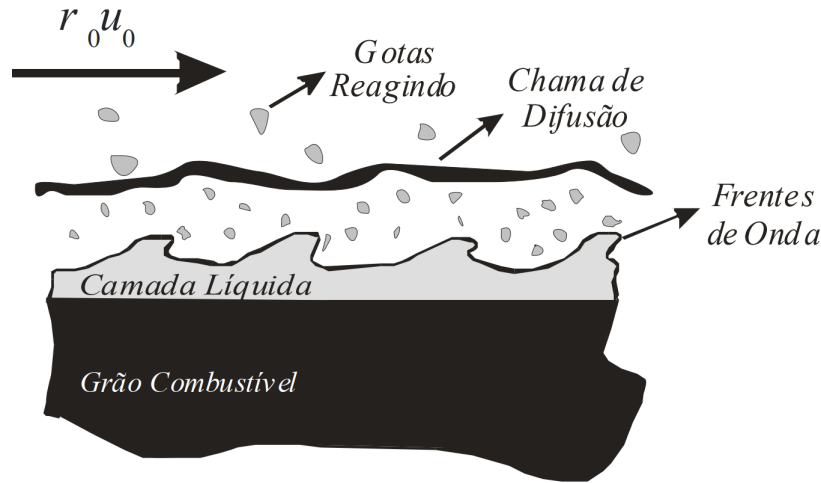


Figura 2 – Modelo do processo de queima da parafina (BERTOLDI, 2007)

O modelo balístico proposto por (KARABEYOGLU et al., 2004) (Figura 2) descreve a queima da parafina de acordo com um processo no qual gotas do combustível se desprendem do filme líquido na superfície do grão e são vaporizadas e reagem no escoamento central. Esse modelo considera os efeitos da chama de difusão, formação das gotas e frentes de onda no filme líquido da superfície do combustível. Como resultado, a taxa de regressão da parafina é geralmente maior do que a dos combustíveis híbridos tradicionais. Estudos realizados por (KARABEYOGLU et al., 2004) demonstraram que esse modelo é eficaz para compreender o fenômeno físico e estabelecer os parâmetros balísticos relacionados à queima da parafina.

Em resumo, os parâmetros de chama desempenham um papel fundamental na compreensão do desempenho e comportamento dos motores de foguetes. A análise e o ajuste desses parâmetros permitem otimizar o projeto, melhorar a eficiência e garantir uma queima estável e segura, sendo fundamental para avançar no campo da propulsão híbrida e ajudar a explorar todo o potencial dessa tecnologia promissora.

3 Aparato Experimental

3.1 Queimador plano MOUETTE

A fim de obter mais informações sobre as características de chama do motor híbrido, temos dados experimentais de um queimador plano, em escala de laboratório, baseado em MFPH, desenvolvido na Université Libre de Bruxelles (ULB). Em (GLASER et al., 2023) é descrito alguns detalhes da bancada de testes utilizada. O queimador plano de foguete híbrido MOUETTE (*Moteur Optique poUr ETudieret Tester Ergols hybrides*), mostrado na Figura 3, foi desenvolvido para investigar a balística interna de foguetes híbridos. O sistema opera com oxigênio gasoso como oxidante e parafina como combustível. A taxa de vazão mássica de oxidante pode ser aumentada até 100 g/s , com uma pressão máxima na câmara de 10 bar. A bancada de testes é equipada com transdutores de pressão e termopares tipo K no sistema de alimentação e no motor. O comportamento da combustão pode ser monitorado com uma câmera de alta velocidade, aproveitando-se de dois acessos ópticos, o que permitem realizar tanto a quimiluminescência quanto para as futuras técnicas de Schlieren.

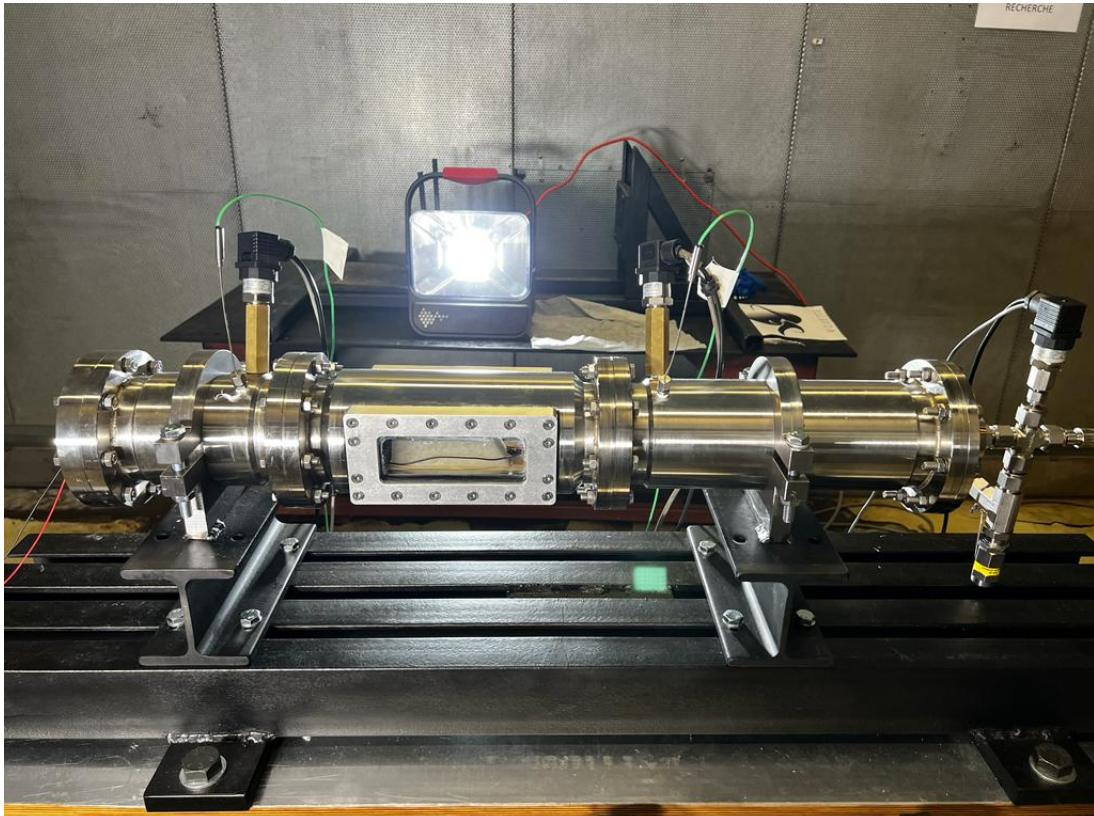
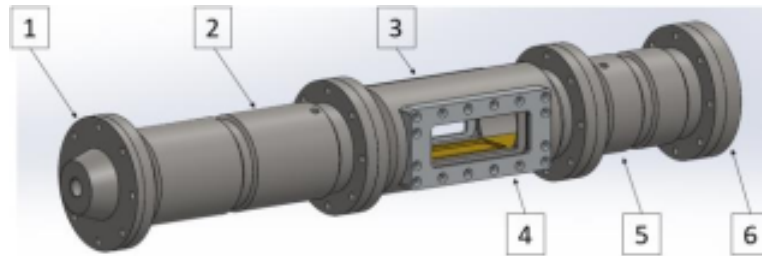


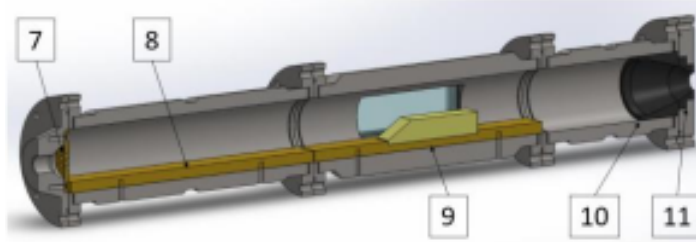
Figura 3 – Queimador plano MOUETTE com acesso óptico (GELAIN et al., 2022)

Uma descrição detalhada de características do motor ULB MOUETTE, o seu processo de desenvolvimento e capacidades são detalhados em (GELAIN et al., 2022). As Figuras 4a e 4b mostram um modelo CAD dos componentes que constituem o queimador plano MFPH MOUETTE. A descrição das partes individuais de acordo com a numeração mostrada nas figuras é dada na Tabela 1. O motor MOUETTE possui um formato cilíndrico, como uma câmara de combustão de MFPH convencional, com duas aberturas para medições ópticas (4). O oxidante é alimentado através da placa injetora (7) e passa pela pré-câmara (2). O fluxo na seção de teste do queimador (3), câmara de combustão, onde o grão combustível é posicionado. Os produtos de combustão então fluem pela pós-câmara (5), para ser ejetado através da tubeira convergente (10 e 11). O espaço disponível para armazenar o grão combustível na câmara tem 113 mm de comprimento, 74 mm de largura e 63 mm de altura.

Para satisfazer os requisitos de acessibilidade óptica, a câmara de combustão do queimador plano apresenta duas janelas paralelas de vidro quartzo. A vedação entre as partes cilíndricas do queimador é feita com o-rings de nitrile (NBR), enquanto a janela veda o acesso óptico com juntas de NBR, que também atuam como interface entre o vidro de quartzo e as partes metálicas, evitando arranhões e danos por dilatação térmica dos componentes (GELAIN et al., 2022).



(a) Vista lateral.



(b) Seção longitudinal.

Figura 4 – CAD 3D do queimador plano MOUETTE (GELAIN et al., 2022).

N.	Componente	Descrição	Material
1	Cabeçote do injetor	Coletor de oxigênio, segura a placa do injetor	Aço inoxidável
2	Pré-câmara	Condiciona o fluxo do oxidante vindo do injetor	Aço inoxidável
3	Câmara principal	Seção de teste de MOUETTE	Aço inoxidável
4	Moldura da janela	Suporte estrutural para a janela de vidro de quartzo	Alumínio
5	Pós-câmara	Parte traseira do queimador	Aço inoxidável
6	Suporte de tubeira	Segura a inserção da tubeira	Aço inoxidável
7	Placa injetora	Injeta oxigênio no queimador plano	Latão
8	Base da pré-câmara	Evita a turbulência induzida pela mudança de seção transversal	Latão
9	Suporte de grão combustível	Mantém o grão de combustível firme	Latão
10	Inserção de tubeira convergente	Primeira parte da tubeira	Grafite
11	Garganta da tubeira	Segunda parte da tubeira, com diferentes diâmetros de garganta	Grafite

Tabela 1 – Componentes do queimador plano MOUETTE enumerado de acordo com a Figura 4. (GELAIN et al., 2022)

3.2 Grão combustível

Para esses testes, uma série de grãos de combustível foi feita, usando parafina Tudamelt 52/54 (GELAIN et al., 2022). O formato do grão escolhido possui bordo de ataque chanfrado, conforme mostrado na Figura 5. Os grãos fabricados possuem comprimento médio de 100 mm, largura de 40 mm e altura de 30 mm.

A parafina é fundida e colocada em um molde, onde solidifica adquirindo a forma pretendida. O molde, impresso 3D em PLA, é composto por três peças com paredes chanfradas, facilitando a remoção do grão solidificado. (GELAIN et al., 2022).

O queimador plano consiste em uma placa com uma seção trapezoidal de ângulo reto, com uma rampa voltada para frente que atua como suporte de chama. O ângulo de inclinação afeta o comportamento da combustão (GELAIN et al., 2023). (PETRAROLO; KOBALD; SCHLECHTRIEM, 2019) observaram que uma rampa muito rasa não ancora a chama, enquanto uma rampa muito íngreme induz um fenômeno de desprendimento de vórtice, que também pode gerar instabilidades de combustão. A placa utilizada nos testes do MOUETTE tem um ângulo de rampa de 60°, comprimento médio de 100 mm, largura de 40 mm e altura de 30 mm, conforme mostrado na Figura 5a. As propriedades estão resumidas na Tabela 2.



(a) Grão combustível de parafina.



(b) Molde do grão combustível impresso em 3D.

Figura 5 – Grão combustível e molde 3D para o MOUETTE (GELAIN et al., 2022).

Ângulo de Rampa	60°
Comprimento	100 mm
Largura	40 mm
Altura	30 mm

Tabela 2 – Propriedades do queimador plano utilizado nos testes do MOUETTE.

3.3 Descrição dos testes

Para os testes, uma câmera Photron FASTCAM SA4 foi utilizada para gravar vídeos de alta velocidade do processo de combustão. A câmera é alinhada a um dos dois acessos ópticos.

O queimador plano e o sistema de alimentação estão dentro de uma instalação a prova de explosões, enquanto uma abertura no teto e um tubo de exaustão de um lado permitem a recirculação e evacuação dos gases de combustão (GELAIN et al., 2023). Uma sala de controle adjacente hospeda o sistema de aquisição de dados, e um vidro balístico permite observar o comportamento do motor durante o teste e garante segurança da instalação.

A configuração final para a captura dos testes é mostrada na Figura 6. Na foto, o MOUETTE pode ser visto montado na bancada de teste, que também armazena o sistema de alimentação e a fonte de energia para as válvulas e sensores. O combustor possui um design modular, permitindo que os componentes sejam modificados de acordo com as diferentes necessidades de pesquisa. O oxidante selecionado é o oxigênio gasoso, com uma taxa de fluxo de massa que pode ser ajustada usando um orifício de estrangulamento nas linhas de alimentação e variando a pressão do gás na saída do cilindro através de uma válvula reguladora de pressão. A ignição da placa de combustível sólido é realizada com um dispositivo de ignição pirotécnica, e a pressão na câmara de combustão é mantida usando um bocal convergente com um inserto de garganta de grafite. O projeto do queimador plano MOUETTE é detalhado em (GELAIN et al., 2022). Medidas de pressão são adquiridas tanto na câmara de combustão quanto nas linhas de alimentação, assim como a temperatura do fluxo de oxigênio.

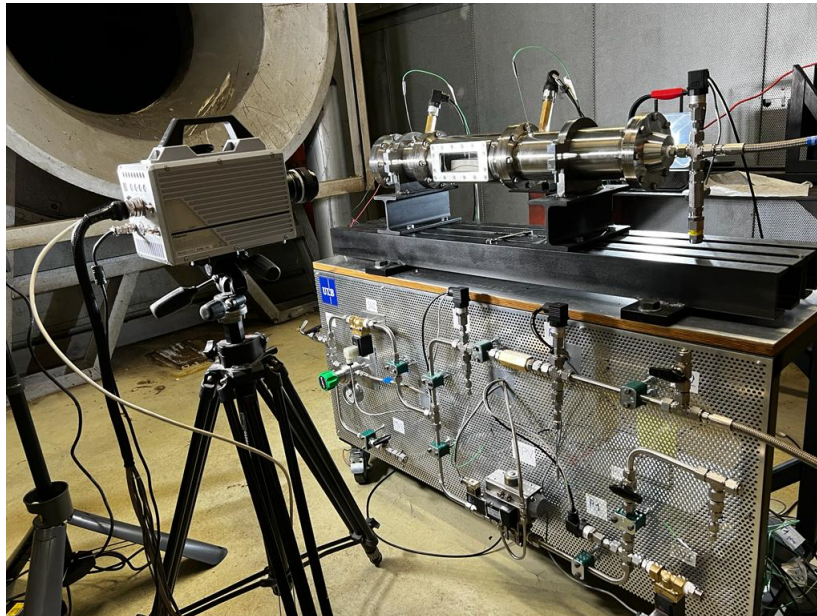


Figura 6 – Configuração para a captura dos testes. À esquerda, a câmera de alta velocidade e à direita, a bancada de testes móvel (GELAIN et al., 2022).

A câmara de combustão possui duas janelas de quartzo paralelas que podem ser utilizadas para aquisições de vídeo em alta velocidade. As condições operacionais máximas do queimador plano MOUETTE estão listadas na Tabela 3.

Pressão na Câmara de Combustão	10 bar
Taxa de Vazão Mássica do Oxidante	100 g/s
Fluxo de Massa do Oxidante	50 kg/m ² s
Tempo de Queima	10 s

Tabela 3 – Condições de Operação Máxima do MOUETTE, valor de projeto (GELAIN et al., 2023).

4 Fundamentação Metodológica

Esta seção do trabalho apresenta a fundamentação metodológica adotada para analisar a dinâmica da combustão em MFPHs, com ênfase nas técnicas de processamento de imagens. O objetivo é detalhar os métodos utilizados para extrair informações críticas como a escala de intensidade da chama e a taxa de regressão do combustível, a partir de imagens de alta velocidade.

4.1 Bibliotecas Utilizadas

Neste trabalho, foi adotada uma abordagem de processamento de imagens utilizando um script Python hospedado e executado no Google Colab. A escolha do Google Colab deve-se à sua capacidade de proporcionar um ambiente de desenvolvimento robusto e flexível, sem a necessidade de configurações complexas de ambiente local. Além disso, o Google Colab oferece acesso a recursos computacionais de alto desempenho, como Unidade de Processamento Gráfico (GPU), essenciais para o processamento eficiente de imagens e análise de dados.

A biblioteca principal utilizada no script é a OpenCV, uma biblioteca de software de visão computacional e *machine learning* altamente otimizada e de uso amplo. No contexto deste trabalho, a OpenCV é empregada para uma série de operações no processamento de imagens, como leitura, escrita, transformação e análise de imagens. Além da OpenCV, outras bibliotecas como NumPy, PIL (Python Imaging Library) e Matplotlib foram utilizadas para manipulação de *arrays*, operações em imagens e visualização de dados, respectivamente.

4.2 Funções Utilizadas

Neste segmento, detalhamos as funções principais empregadas nos scripts de análise da escala de intensidade da chama e da determinação da taxa de regressão do combustível. Essas funções, providas pela biblioteca OpenCV, são essenciais para o processamento e análise das imagens de vídeo.

4.2.1 OpenCV.cvtColor

A função *OpenCV.cvtColor* desempenha um papel fundamental na conversão do espaço de cores de imagens (BRADSKI, 2000). Essa funcionalidade é essencial em muitos processos de visão computacional, onde diferentes representações de cor podem ser ne-

cessárias para diversos tipos de análises. No âmbito deste trabalho, a função é utilizada para transformar imagens coloridas (em formato RGB) em escala de cinza. Este processo não apenas simplifica a análise subsequente das imagens, mas também é crucial para as etapas de limiarização e detecção de contornos.

A conversão de uma imagem colorida para escala de cinza é realizada através da Equação 4.1, onde R , G e B representam os canais de cor vermelho, verde e azul da imagem original. O valor resultante Y é o pixel na escala de cinza, que é uma representação ponderada dos três canais de cor.

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (4.1)$$

A ponderação na equação leva em consideração a sensibilidade variada do olho humano às diferentes cores, dando maior peso ao canal verde, que é mais perceptível ao olho humano.



(a) Imagem antes da aplicação da `cvtColor`.



(b) Imagem após a aplicação da `cvtColor`.

Figura 7 – Comparação das imagens antes e após a aplicação da função `cvtColor`. Foto: (CARVALHO, 2023).

A transformação para escala de cinza é uma etapa preliminar crítica, pois simplifica a estrutura da imagem, reduzindo a complexidade computacional das operações de processamento de imagens que vêm a seguir, a limiarização e a detecção de contornos.

4.2.2 `OpenCV.threshold`

A função `openCV.threshold` é fundamental na segmentação de imagens. No entanto, a eficácia desta função depende fortemente da escolha correta dos seus parâmetros, especialmente o valor de limiar (*threshold*). Nos nossos scripts, percebeu-se a necessidade de adaptar este valor para cada vídeo, considerando as variações nas características de iluminação, contraste e outros fatores específicos de cada captura. Utilizar um valor fixo de limiar poderia resultar em uma segmentação imprecisa, afetando negativamente a análise das chamadas.

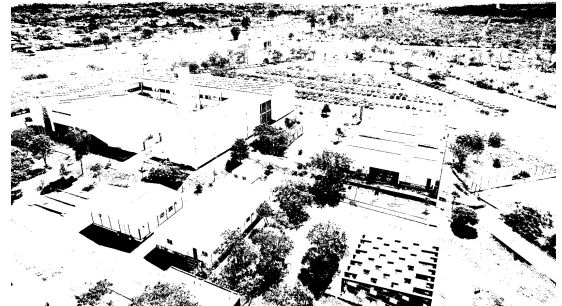
O valor de 60 (*threshold*) utilizado como exemplo é apenas um ponto de partida. Para cada teste, esse valor é ajustado para garantir que a chama seja isolada de forma eficaz do fundo da imagem. Esse ajuste é crucial para a precisão na análise subsequente das características da chama.

O segundo parâmetro importante, 255, refere-se ao valor atribuído aos pixels que atendem à condição do limiar na imagem binarizada. Na prática, isso significa que todos os pixels com intensidade maior que o valor de limiar são marcados com o valor máximo de intensidade (255, ou branco) na imagem resultante.

A escolha do valor de limiar na função *cv2.threshold* é crucial para o sucesso da segmentação da imagem. Como já foi dito, cada vídeo tem suas próprias características e por isso o valor de *threshold* precisa ser ajustado para cada situação. Neste trabalho, esse ajuste foi feito de forma manual, testando diferentes valores de limiar para cada caso. Esse método, no entanto, não é prático nem eficiente, mas foi usado por falta de tempo para desenvolver um método que variasse o limiar de acordo com a quantidade de pixels brancos na imagem. Essa é uma sugestão de melhoria para trabalhos futuros. Para ilustrar o impacto dessa escolha, comparamos os resultados de aplicar diferentes valores de *threshold*: 60, 80 e 125. Essas comparações ajudam a visualizar como diferentes limiares influenciam a segmentação da chama nas imagens.



(a) Imagem Original



(b) Threshold = 60



(c) Threshold = 80



(d) Threshold = 125

Figura 8 – Comparação da aplicação da função *cv2.threshold* com diferentes valores de limiar. Foto: (CARVALHO, 2023).

A Figura 8 apresenta a imagem original e as imagens resultantes após a aplicação da função *cv2.threshold* com os diferentes valores de limiar. É evidente que à medida que o valor do *threshold* aumenta, a segmentação se torna mais restritiva, potencialmente excluindo áreas relevantes. Essa comparação visual reforça a importância de calibrar cuidadosamente o valor de limiar para cada conjunto de dados, de modo a obter a segmentação mais precisa e informativa para a análise subsequente.

4.2.3 OpenCV.findContours

A função *cv2.findContours* é usada para identificar contornos nas imagens. Esta função é crucial para isolar e analisar características específicas (BRADSKI, 2000), como o contorno da chama. A função requer uma imagem binária, onde os contornos a serem detectados estão claramente delineados contra o fundo.

Os parâmetros *cv2.RETR_EXTERNAL* e *cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE* são usados para especificar o modo de recuperação de contorno e o método de aproximação de contorno, respectivamente.

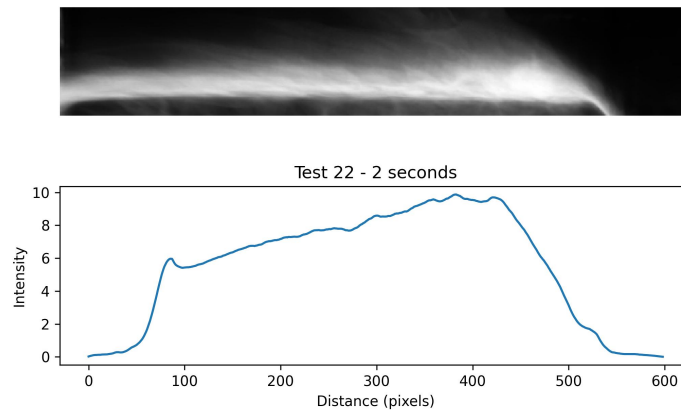
Os exemplos demonstrando resultados obtidos utilizando esse método e trazendo as limitações encontradas serão demonstrados nas seções mais à frente deste trabalho.

4.3 Metodologia para Obtenção da Escala de Intensidade

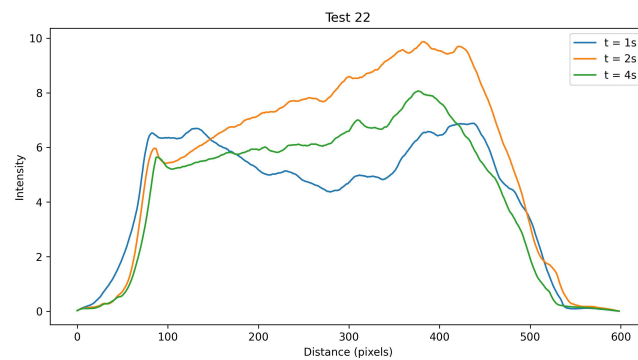
Nesta seção, apresentaremos o método utilizado para extrair a escala de intensidade da chama nas imagens processadas. Os resultados obtidos através dessa metodologia são demonstrados na Figura 9. Na Figura 9a, é demonstrado o resultado obtido para o tempo de 2 segundos do Teste 22 (A lista completa dos testes encontra-se no Apêndice C). Na Figura 9b compara os resultados para os tempos de 1, 2 e 4 segundos. Esses intervalos de tempo foram escolhidos pois assim conseguimos observar a queima do combustível durante todos os estágios da queima, já que o tempo de queima para a maioria dos testes é de 5 segundos. Essas imagens fornecem uma visão mais abrangente das características da chama e permitem uma análise mais detalhada dos resultados.

4.3.1 Metodologia de Extração da Escala de Intensidade

Para realizar a análise da escala de intensidade, é necessário seguir uma metodologia que envolve várias etapas de processamento de imagem. Essa metodologia é semelhante ao método desenvolvido por (KOBALD; VERRI; SCHLECHTRIEM, 2015) e visa obter a escala de intensidade de forma precisa e confiável. As etapas principais dessa metodologia são as seguintes:



(a) Escala de intensidade para o contorno de chama.



(b) Escala de intensidade comparada para diferentes instantes do teste.

Figura 9 – Escala de intensidade para o segundo 2 e comparação entre diferentes instantes do Teste 22 do MOUETTE.

4.3.1.1 Tratamento do Vídeo

Antes de obter a escala de intensidade da chama, é necessário realizar um corte do vídeo original para delimitar a região mais próxima da chama. Esse processo é realizado utilizando o software exclusivo da câmera de alta velocidade PFV4, que permite selecionar a área de interesse e exportar o vídeo recortado. O objetivo é reduzir o tamanho da região de análise e concentrar os esforços de processamento na área relevante.

Isso permite levar em consideração apenas a parte plana do grão e reduzir as fontes de erro na estimativa da posição da chama induzida pelo bordo de ataque e fuga do grão. O corte também remove ruídos induzidos por reflexos nas paredes das câmara, chamas na lateral do grão ou manchas de queima no vidro da janela (GELAIN et al., 2023).

4.3.1.2 Pré-processamento da Imagem

Após o corte do vídeo, é realizado o pré-processamento da imagem para melhorar a qualidade e facilitar a detecção das bordas da chama. Essa etapa envolve a conversão de RGB para escala cinza 8-bit (GELAIN et al., 2023).

4.3.2 Metodologia de Cálculo da Escala de Intensidade

Após o pré-processamento da imagem, são aplicadas técnicas para calcular a escala de intensidade da chama. Essa escala é uma medida da variação da intensidade luminosa ao longo do contorno da chama, permitindo uma análise quantitativa das características da chama. A metodologia utilizada consiste nas seguintes etapas:

4.3.2.1 Soma de Quadros para Suavizar o Contorno da Chama

O primeiro passo é realizar a soma de múltiplos quadros do vídeo processado, com o objetivo de suavizar o contorno da chama. Essa técnica envolve a adição pixel a pixel dos quadros, resultando em uma imagem em que o contorno da chama fica mais definido e as variações de intensidade são suavizadas. O número de quadros a serem somados pode ser ajustado de acordo com as características do vídeo e a resolução desejada.

Como podemos observar na Figura 10a, o contorno da chama tem um perfil de onda, o que pode dificultar no cálculo de altura da chama e de escala de intensidade. Para resolver esse problema, podemos utilizar o método de soma de quadros. Então, o vídeo completo é separado em quadros e a média dos quadros é calculada usando uma média móvel de 100 quadros. Usando esse processo, o comportamento turbulento da combustão pode ser suavizado.

A Figura 10e mostra um exemplo da imagem resultante, onde a chama mostrada nas Figuras 10a, 10b, 10c e 10d é calculada com a média móvel de 100 quadros adquiridos à uma taxa de 3000 fps. Esse método ajuda a reduzir as oscilações induzidas pela rápida mudança na posição da chama ao longo do tempo causada pela turbulência do fluxo.

O número de 100 quadros para a média foi escolhido com base em resultados mostrados em um estudo anterior. Nesse estudo, foram comparados os resultados obtidos ao utilizar 10, 100 e 1000 quadros para a média. Concluiu-se que o resultado obtido com 100 quadros foi satisfatório, uma vez que o custo computacional é reduzido e não há perda significativa de informações nas imagens obtidas.

4.3.2.2 Cálculo da Escala de Intensidade

Após a suavização do contorno, é realizada a extração da escala de intensidade da chama. Isso é feito através da análise dos valores de intensidade luminosa ao longo do contorno da chama. A intensidade luminosa pode ser obtida através da conversão dos valores de intensidade de cor (escala de cinza). A escala de intensidade é calculada como a diferença entre os valores máximos e mínimos de intensidade ao longo do contorno da chama.

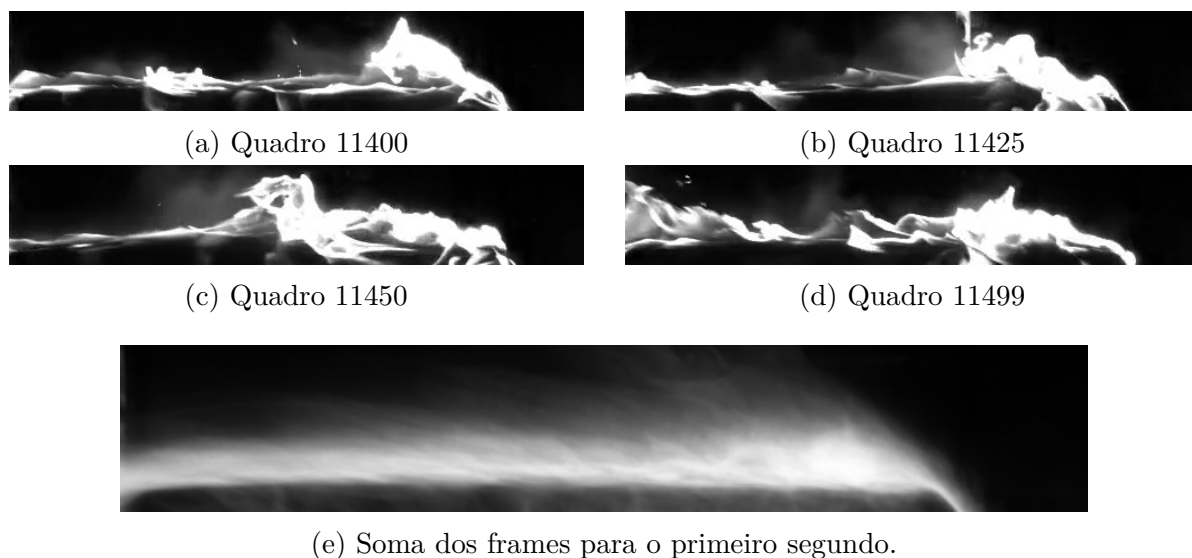


Figura 10 – Imagens em escala cinza do contorno de chama do Teste 22 para o primeiro segundo, utilizando o método de média móvel de 100 quadros.

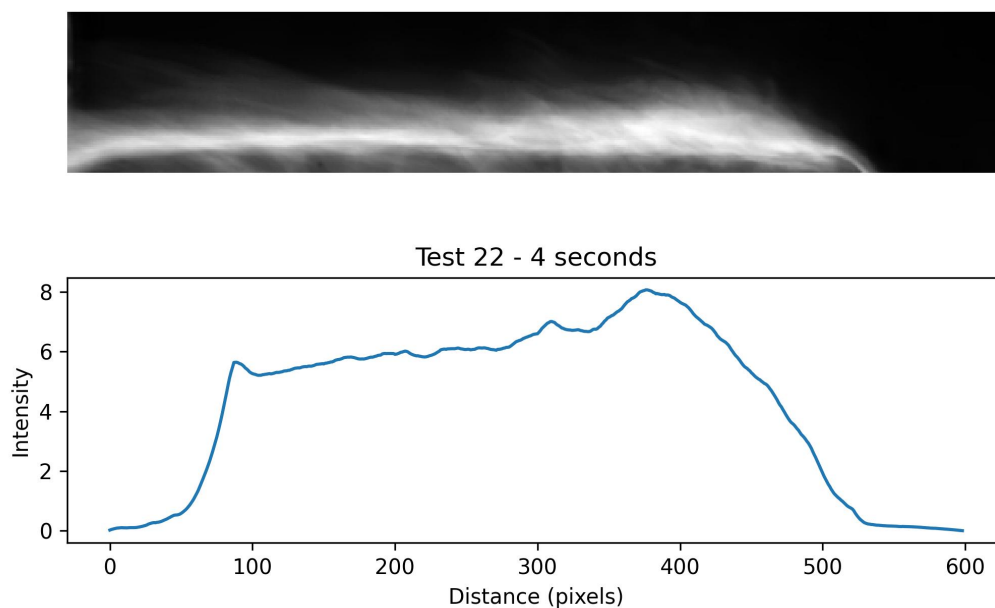


Figura 11 – Escala de intensidade para o segundo 4 do Teste 22.

4.4 Metodologia de Cálculo da Taxa de Regressão

Nesta seção, detalhamos o procedimento adotado para calcular a taxa de regressão do combustível no queimador plano MOUETTE. A taxa de regressão é um parâmetro crucial, pois indica a velocidade com que o combustível é consumido durante a queima. A metodologia aqui apresentada foca na análise desta taxa utilizando as imagens capturadas de alta velocidade.

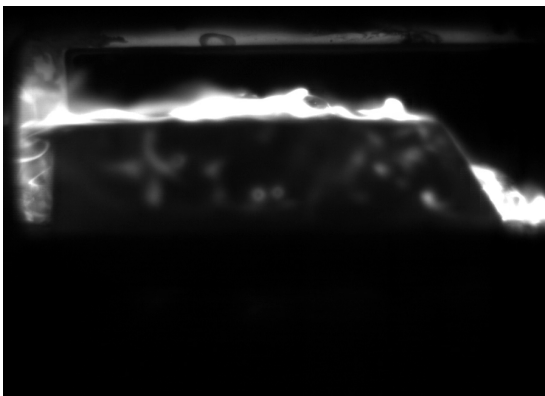
4.4.1 Procedimento de Análise da Taxa de Regressão

O cálculo da taxa de regressão envolve várias etapas metodológicas, desde o processamento inicial do vídeo até a análise detalhada dos dados obtidos.

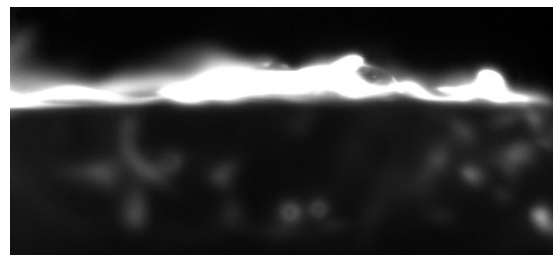
4.4.1.1 Pré-Processamento

Iniciamos com o tratamento do vídeo original, concentrando nossa análise na parte horizontal superior do grão combustível. Esta abordagem inclui cortes específicos no vídeo para excluir a rampa e outras áreas não essenciais, garantindo que nossa atenção esteja focada na região onde a definição do contorno da chama é mais clara.

Esse processo é realizado utilizando o software da câmera PFV4, que permite selecionar a área de interesse e exportar o vídeo recortado. O objetivo é reduzir o tamanho da região de análise e concentrar os esforços de processamento na área relevante.



(a) Imagem original do Teste 8 do queimador plano MOUETTE antes do corte.



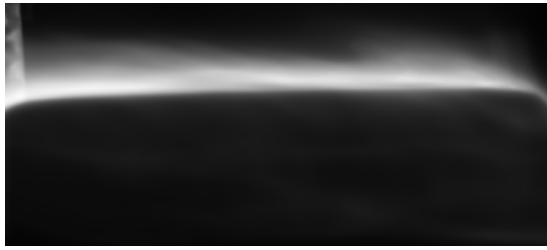
(b) Imagem após o corte do Teste 8 do queimador plano MOUETTE, focando na parte superior do grão.

Figura 12 – Comparação da imagem do Teste 8 do queimador plano MOUETTE antes e após o corte para focar na parte superior do grão combustível.

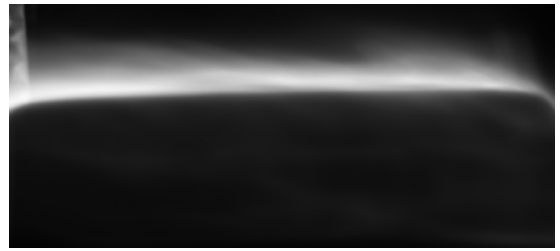
4.4.1.2 Conversão para Escala de Cinza

A conversão das imagens coloridas para escala de cinza é o primeiro passo crucial do nosso processo de análise. Essa transformação simplifica a complexidade dos dados, removendo a informação de cor e destacando as características relevantes da chama. Embora a diferença não seja imediatamente evidente a olho nu, essa etapa é essencial para as transformações seguintes, pois elimina ruídos potenciais associados a variações de cor. Isso é especialmente importante para garantir a eficácia das operações de limiarização e detecção de contornos que se seguem.

Como mostrado na Figura 13, a transição de uma imagem colorida para escala de cinza pode não parecer significativa à primeira vista, mas é um passo fundamental para assegurar uma análise precisa e focada nas características da chama, reduzindo a influência de fatores externos que poderiam afetar a identificação e mensuração da taxa de regressão do combustível.



(a) Imagem original colorida para o Teste 8 do queimador plano MOUETTE.

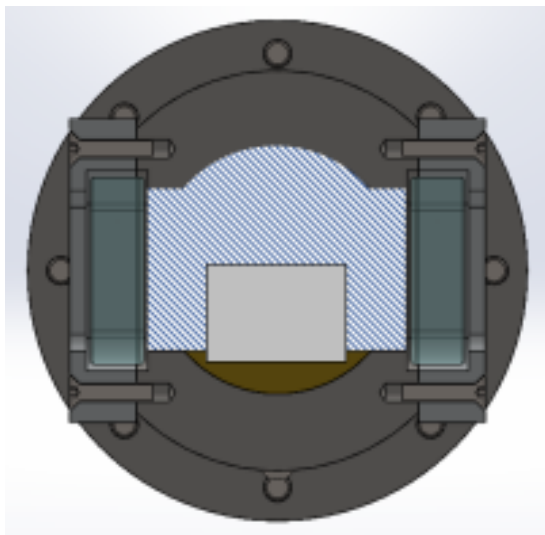


(b) Imagem após conversão para escala de cinza para o Teste 8 do queimador plano MOUETTE.

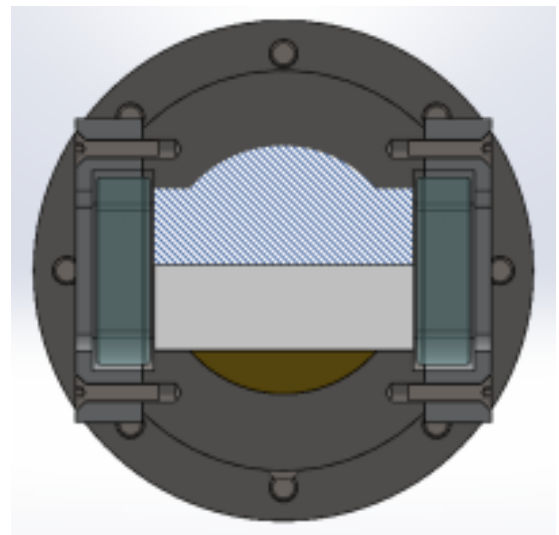
Figura 13 – Comparação da imagem antes e após a conversão para escala de cinza para o Teste 8 do queimador plano MOUETTE.

4.4.1.3 Aplicação de *Thresholding*

A aplicação de um limiar (*threshold*) na imagem em escala de cinza é a próxima etapa do nosso processo. O objetivo dessa técnica é segmentar claramente a chama do restante da imagem. O valor do *threshold* é de suma importância e foi ajustado manualmente para cada teste, a fim de obter o melhor contorno possível da chama. Este passo é particularmente desafiador nos testes de alta pressão, onde a chama pode se espalhar para as laterais do grão combustível. Esse fenômeno é atribuído ao espaço existente entre o combustível e a janela de visualização da câmera, como ilustrado na Figura 14.



(a) Testes de comissionamento da Fase 1 do MOUETTE.



(b) Testes de comissionamento da Fase 2 do MOUETTE.

Figura 14 – Seção transversal do queimador nas fases de teste inicial e posteriores, ressaltando o espaço entre o combustível e a janela. (GELAIN et al., 2023)

Para demonstrar a importância da escolha adequada do valor de *threshold*, apresentamos um grupo de quatro imagens para os Testes 8 (baixa pressão) e 21 (alta pressão), aplicando diferentes níveis de *threshold* (60, 80 e 125). Essas comparações visam ilustrar como cada valor de *threshold* afeta a identificação do contorno da chama e, consequentemente, a precisão na determinação da taxa de regressão.

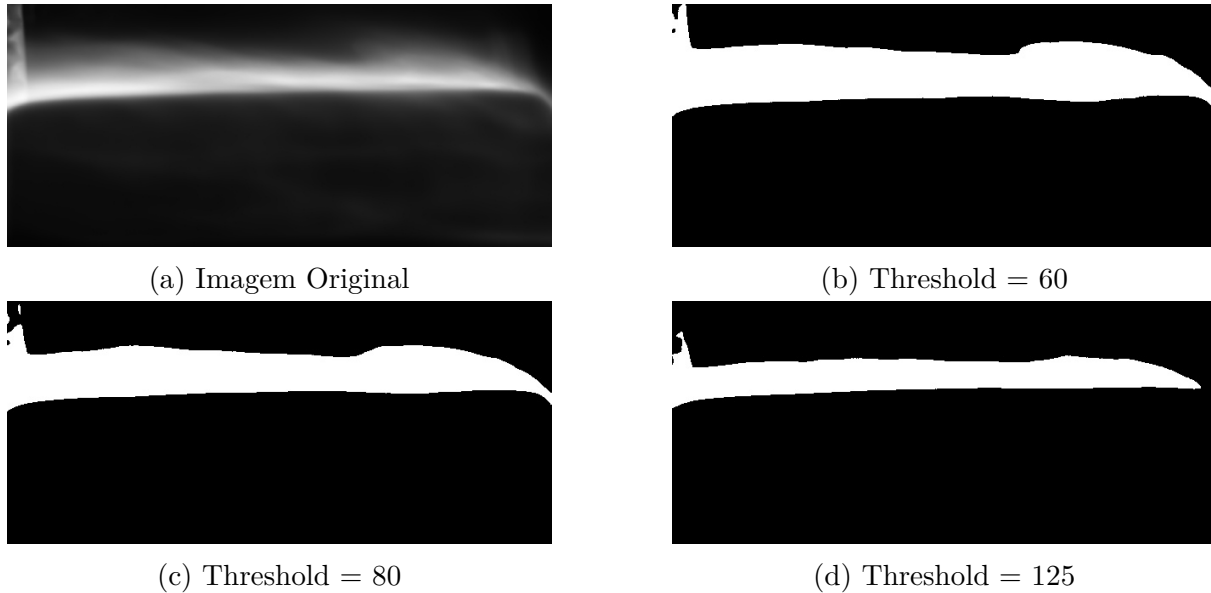


Figura 15 – Comparação da aplicação da função `cv2.threshold` para o Teste 8 (baixa pressão) do MOUETTE com diferentes valores de limiar.

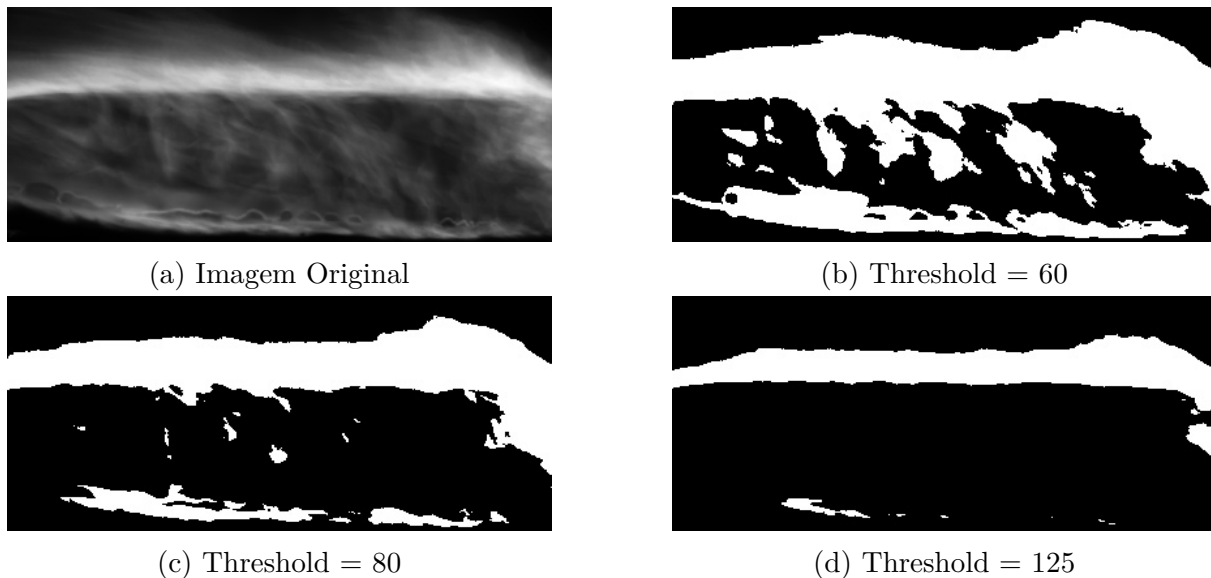


Figura 16 – Comparação da aplicação da função `cv2.contour` para o Teste 21 (alta pressão) do MOUETTE com diferentes valores de limiar.

As Figuras 15 e 16 destacam a importância de ajustar cuidadosamente o *threshold* para cada teste específico. A seleção adequada desse parâmetro é fundamental para garantir que os contornos da chama sejam capturados com a maior precisão possível, espe-

cialmente em condições de alta pressão (Figura 16), onde a segmentação se torna mais complexa devido à propagação lateral da chama.

4.4.1.4 Detecção de Contornos

Com a imagem segmentada, avançamos para a detecção de contornos. Esta etapa identifica as bordas da chama, que são essenciais para calcular a taxa de regressão. Nos testes de alta pressão, a identificação precisa dos contornos se torna mais complicada devido à queima lateral do combustível, como mencionado anteriormente.

Ao analisar o comportamento da chama em diferentes condições de pressão na câmara de combustão, é possível observar diferenças significativas na definição do contorno da chama. Para ilustrar isso, apresentamos dois grupos de imagens, comparando os Testes 8 e 21, que representam condições de baixa e alta pressão na câmara, respectivamente. No Teste 8, com uma pressão de 2,75 bar, observa-se que a delimitação do contorno da chama é mais nítida e menos complexa, devido à menor propensão da chama em se espalhar para os lados do grão. Já no Teste 21, com uma pressão mais elevada de 6,23 bar, a identificação dos contornos pode ser mais desafiadora devido ao comportamento mais turbulento e expansivo da chama.

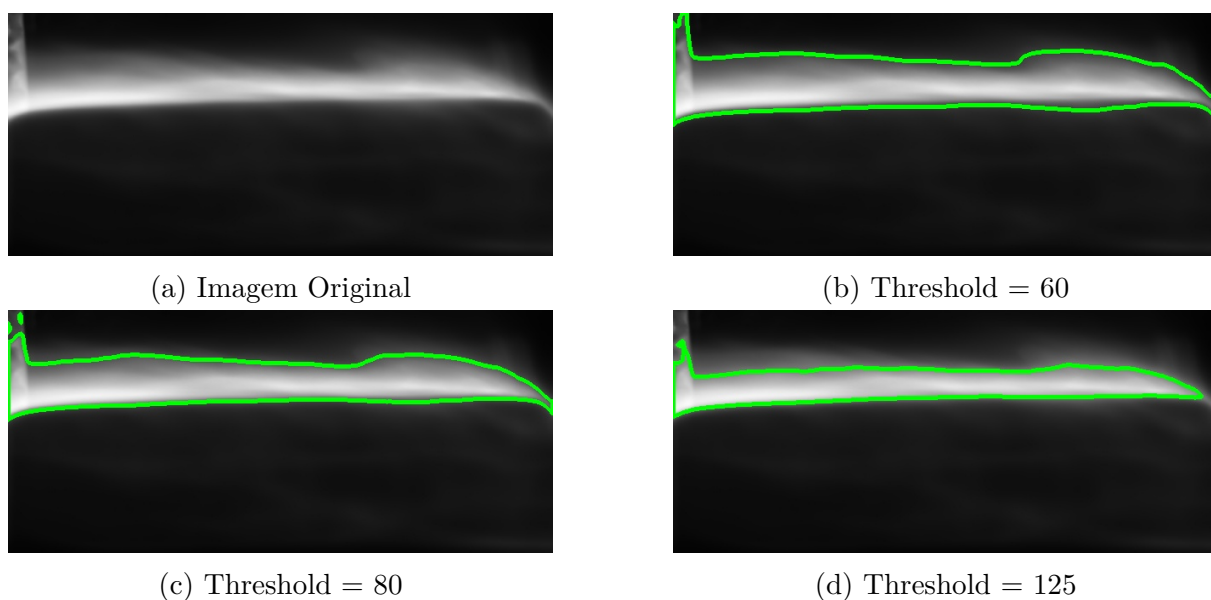


Figura 17 – Comparação da aplicação da função `cv2.contour` para o teste 8 (baixa pressão) com diferentes valores de limiar.

Como podemos observar nas Figuras 17 e 18, a facilidade de definição do contorno da chama no Teste 8 contrasta com as complexidades observadas no Teste 21. Essas diferenças, destacam como a pressão na câmara de combustão influencia diretamente a morfologia da chama, afetando aspectos como a propagação lateral da queima e a clareza do contorno da chama, para as condições dos testes analisados.

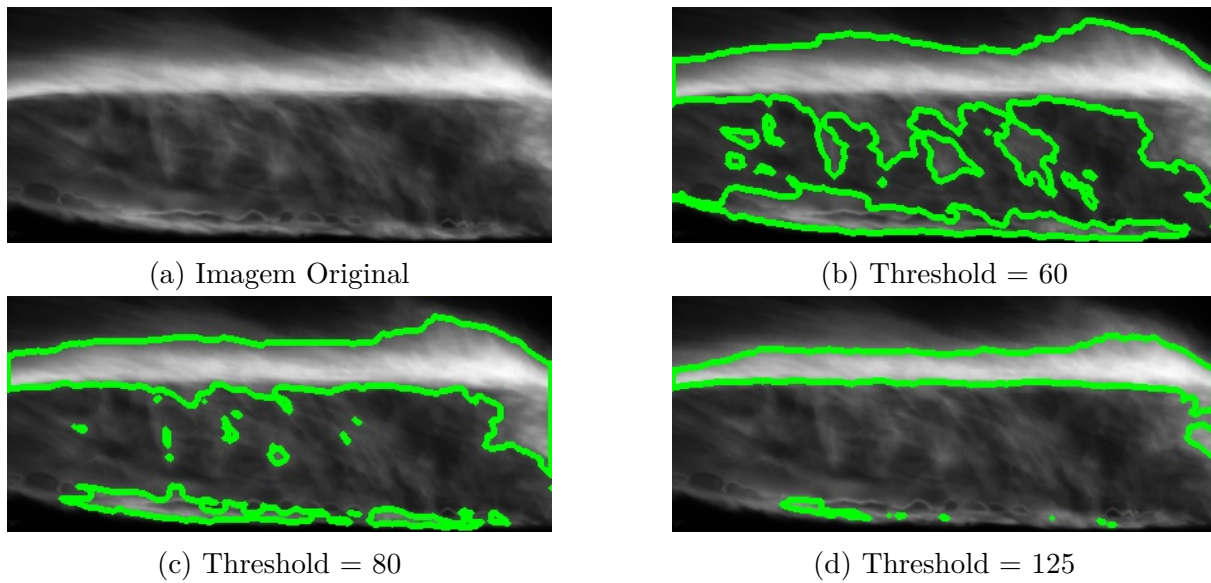


Figura 18 – Comparação da aplicação da função `cv2.contour` para o teste 21 (alta pressão) com diferentes valores de limiar.

4.4.1.5 Medição da Distância da Chama à Base do Combustível

A etapa de medir a distância entre a chama e a base do combustível em cada quadro processado é essencial para o cálculo da taxa de regressão do combustível. Para realizar essa medição com precisão, focamos em identificar o ponto mais central, tanto horizontal quanto verticalmente, dentro do contorno da chama. Essa abordagem visa aproximar o local mais ativo da queima.

No entanto, é importante destacar as limitações deste método. Em alguns casos, principalmente em testes de alta pressão, onde a chama pode se espalhar lateralmente ou apresentar um comportamento mais turbulento, a identificação do ponto central pode ser desafiadora. Isso pode levar a algumas anomalias nos dados, onde o ponto identificado pode não representar com precisão a posição real da frente de chama.

Abaixo, apresentamos imagens representando a variação da distância em pixels entre a chama e a base do combustível em diferentes momentos do teste. Estas imagens ilustram a evolução da chama ao longo do tempo e demonstram a eficácia do método de medição adotado.

Além disso, destacamos um caso onde o modelo apresenta uma anomalia, com o ponto identificado localizado significativamente mais abaixo do que o esperado. Esta situação, representada nas Figuras 21a e 21b, é um exemplo de um *outlier* que pode ocorrer, principalmente em condições de alta pressão. Essas anomalias são importantes para entender as limitações do modelo e necessitam de atenção especial durante a análise dos dados, especialmente quando se trata de resultados obtidos em condições extremas, como em testes de alta pressão.

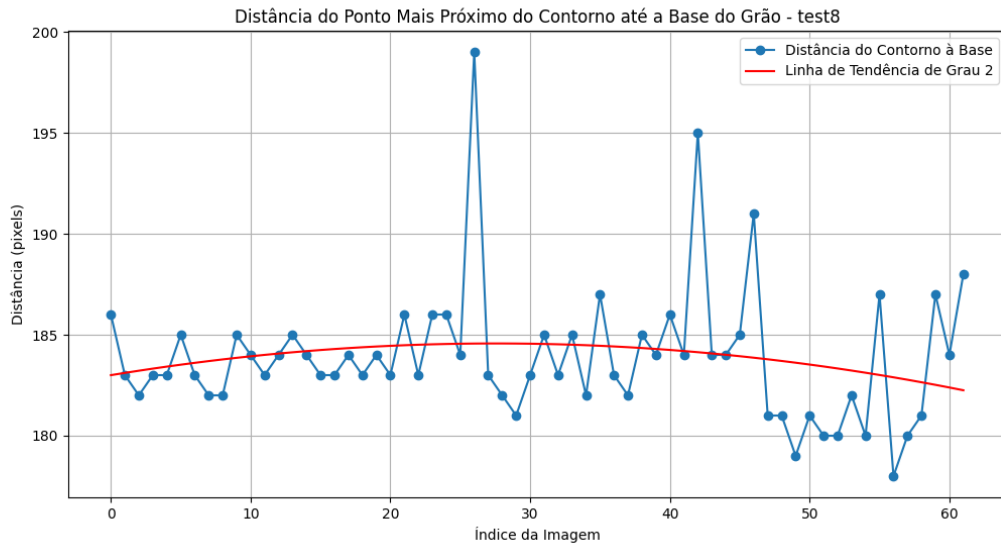


Figura 19 – Comparação da distância em pixels da chama à base do combustível em diferentes instantes do vídeo para o Teste 8 do MOUETTE.

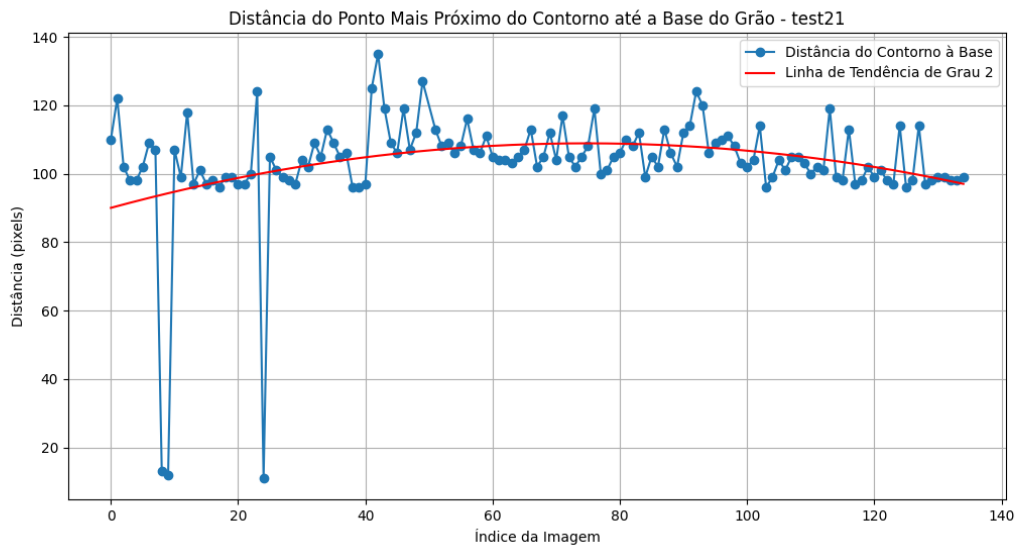
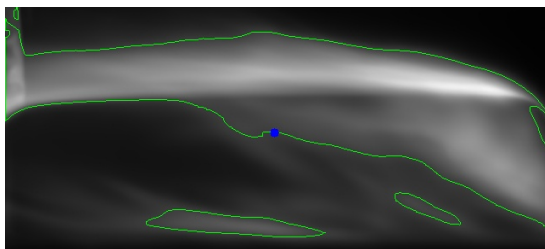
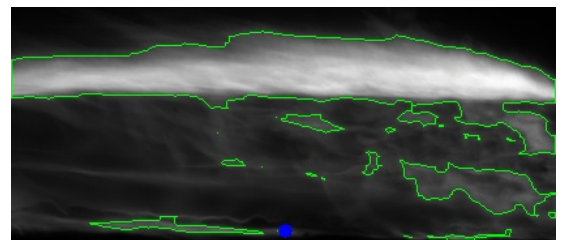


Figura 20 – Comparação da distância em pixels da chama à base do combustível em diferentes instantes do vídeo para o Teste 21 do MOUETTE.



(a) Exemplo de anomalia no modelo, mostrando o ponto identificado significativamente abaixo da chama para o Teste 8 do MOUETTE no índice de imagem 28.



(b) Exemplo de anomalia no modelo, mostrando o ponto identificado significativamente abaixo da chama para o Teste 21 do MOUETTE no índice de imagem 25.

Figura 21 – Exemplo de anomalia no modelo exemplificado para os Testes 8 e 21 do MOUETTE.

4.4.2 Cálculo e Análise da Taxa de Regressão

O cálculo da taxa de regressão do combustível é uma etapa fundamental em nossa análise, envolvendo técnicas matemáticas precisas e uma representação gráfica detalhada.

4.4.2.1 Determinação das Mudanças na Distância

A taxa de regressão é calculada observando as mudanças na distância da base da chama à base do combustível entre os conjuntos de 100 quadros das imagens. Utilizamos a técnica de soma de 100 quadros para estabilizar a visualização da chama e obter medidas mais consistentes. A taxa de regressão (\dot{r}) em um determinado intervalo de tempo é dada pela Equação 4.2, onde Δd é a mudança na distância da chama à base do combustível e Δt é o intervalo de tempo correspondente a 100 quadros.

$$\dot{r} = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (4.2)$$

4.4.2.2 Análise Estatística e Representação Gráfica

Realizamos uma análise estatística dos dados coletados para determinar a taxa média de regressão do combustível. Os dados são então representados graficamente, incluindo a aplicação de uma linha de tendência de segundo grau para modelar o comportamento da regressão ao longo do tempo. Esta representação gráfica é crucial para identificar padrões, tendências e possíveis *outliers*. A equação da linha de tendência de segundo grau é

$$y = ax^2 + bx + c$$

onde a , b , e c são coeficientes determinados através do ajuste da curva aos dados de regressão.

É importante observar que, em alguns casos, podem ocorrer *outliers* que desviam significativamente dos valores esperados. Estes *outliers* precisam ser considerados e analisados cuidadosamente para garantir a precisão da análise.

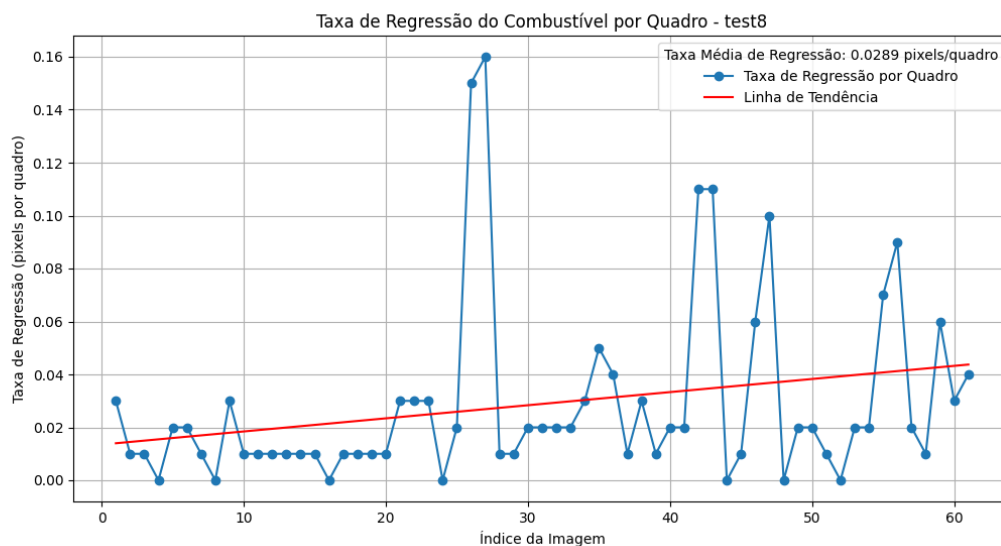


Figura 22 – Comparação da taxa de regressão em diferentes instantes do vídeo para o Teste 8 do MOUETTE.

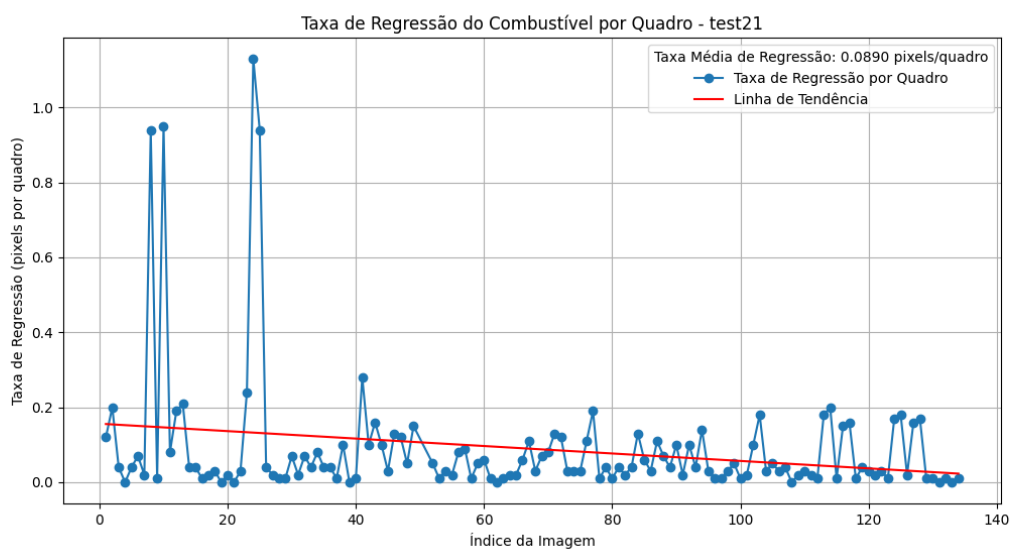


Figura 23 – Comparação da taxa de regressão em diferentes instantes do vídeo para o Teste 21 do MOUETTE.

5 Resultados e Discussões

Os testes com o queimador plano MOUETTE analisados neste trabalho foram selecionados a partir da campanha de testes realizada entre abril e maio de 2022. Esses testes fazem parte de uma extensa pesquisa que visa investigar a taxa de regressão da parafina em diferentes taxas de vazão mássica e pressões. As Tabelas 4 e 5 mostra os valores experimentais médios para as condições operacionais dos testes, que diferem na taxa de vazão mássica do oxidante e/ou na pressão da câmara de combustão.

Os dados utilizados nesta análise foram fornecidos por uma equipe, com a devida autorização para seu uso. Estes dados, oriundos dos testes com o motor MOUETTE, foram analisados para permitir uma comparação efetiva dos resultados e condições operacionais do motor. É importante salientar que, embora os experimentos não tenham sido conduzidos pelo autor, os dados brutos fornecidos foram analisados e tratados no âmbito desse trabalho de conclusão de curso. O foco principal da minha análise recai sobre o processamento de sinais dos vídeos capturados durante os testes, abrangendo tanto a escala de intensidade da chama quanto as taxas de regressão.

Teste #	Pressão no Tanque P_1 [bar]	Pressão Antes do Orifício P_2 [bar]	Pressão Depois do Orifício P_3 [bar]	Pressão na Entrada do Motor P_4 [bar]	Pressão na Câmara P_c [bar]
1	37,46	37,43	1,68	1,77	0,11
2	36,54	36,42	1,59	1,70	0,09
3	36,65	36,62	1,61	1,71	0,34
4	36,64	36,61	2,33	2,31	1,91
5	36,54	36,51	3,95	3,69	3,05
6	36,50	36,48	4,14	3,82	3,20
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	36,84	36,83	3,66	3,42	2,75
9	37,22	37,22	3,67	3,42	2,88
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	34,92	34,83	3,79	2,18	2,23
12	34,86	34,71	3,73	2,35	2,28
13	34,62	34,53	3,96	2,42	2,52
14	34,58	34,46	3,40	1,73	1,78
15	34,45	34,36	3,91	2,38	2,48
16	35,87	35,77	4,03	3,75	2,49
17	35,15	35,04	4,01	2,46	2,57
18	35,00	34,90	2,08	2,00	2,04
19	33,67	33,42	4,98	4,53	2,96
20	33,46	33,21	6,52	5,84	4,76
21	33,12	32,89	7,94	7,03	6,23
22	32,89	32,67	8,32	7,36	6,58

Tabela 4 – Dados de pressão para a campanha de testes do motor MOUETTE.

Teste #	Tempo de Queima t_b [s]	Taxa de Vazão Mássica \dot{m}_{ox} [kg/s]	Eficiência η^*	Taxa de Regressão \dot{r} [mm/s]
1	5,32	0,05	0,09	0,57
2	5,31	0,05	0,07	0,29
3	5,22	0,05	0,15	0,40
4	5,18	0,05	0,83	0,61
5	5,38	0,05	0,38	0,46
6	5,28	0,05	0,41	0,28
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	5,56	0,05	0,34	0,36
9	5,25	0,05	0,35	0,67
10	0,00	0,00	0,00	0,00
11	5,52	0,08	0,19	0,30
12	5,61	0,08	0,19	0,43
13	5,41	0,05	0,35	0,26
14	5,64	0,08	0,15	0,00
15	5,46	0,01	0,74	4,30
16	5,58	0,08	0,20	0,31
17	5,64	0,08	0,21	0,39
18	5,54	0,08	0,17	0,25
19	5,46	0,10	0,23	-
20	5,56	0,10	0,36	-
21	7,30	0,10	0,49	-
22	7,24	0,10	0,51	-

Tabela 5 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE.

A partir da Tabela 4, podemos observar os resultados em diferentes pressões e taxas de vazão mássica, assim é possível obter uma visão completa das capacidades do queimador. Os testes foram implementados para avaliar o desempenho do queimador em diferentes pontos de operação e para aprimorar os procedimentos adotados durante a preparação e execução dos testes. Em particular, os dois principais parâmetros que foram modificados entre os testes foram a taxa de vazão mássica, por meio do orifício de estrangulamento, e a pressão da câmara de combustão (GELAIN et al., 2023).

No total foram realizados 22 testes bem-sucedidos. No entanto, para alguns testes, não foi possível obter determinadas informações.

- Para os testes 7 e 10, não temos registros de nenhum dado;
- Para os testes 14 e 15, encontramos problemas na medição da massa final do combustível;
- Para os testes 19 a 22, tivemos dificuldades na medição da massa inicial do combustível.

Essas limitações podem ser atribuídas a questões técnicas específicas durante a execução dos testes. Apesar disso, os testes bem-sucedidos proporcionaram uma base sólida para a análise das características de desempenho do queimador e forneceram informações relevantes para a compreensão do comportamento do sistema de propulsão híbrida em diferentes condições operacionais. A análise e interpretação dos dados coletados permitirão uma avaliação mais aprofundada do desempenho do motor e contribuirão para futuras melhorias no projeto e operação do sistema.

Os testes foram inicialmente divididos de acordo com a taxa de vazão mássica de oxigênio controlada pelo orifício de estrangulamento. A partir da menor taxa de vazão mássica, fornecida pelo menor orifício, o desempenho do queimador foi avaliado antes de aumentar o diâmetro do orifício e, portanto, a taxa de vazão mássica (GELAIN et al., 2022).

Para esta campanha de testes, foram utilizados três tamanhos de orifício. A mesma abordagem foi adotada para a pressão da câmara de combustão, aumentando-a através da redução do diâmetro da garganta da tubeira de grafite (GELAIN et al., 2023). Na Figura 24, podemos observar o teste 24, em alta pressão, e a chama de exaustão dos gases.

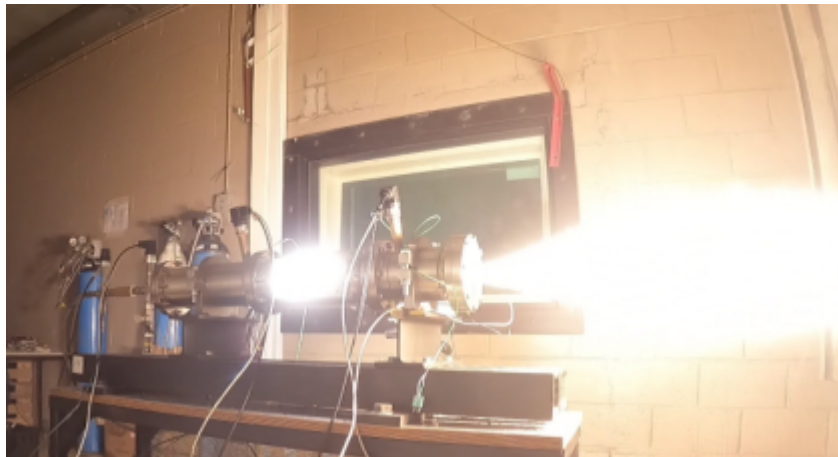


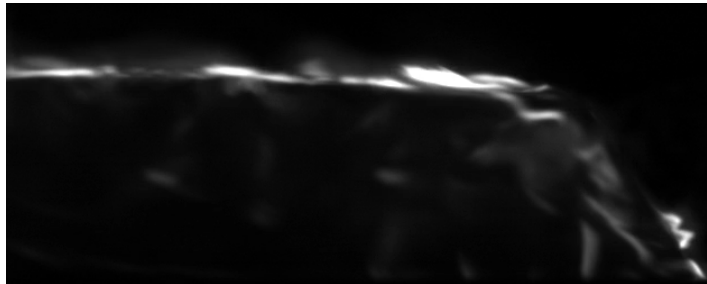
Figura 24 – Teste do MOUETTE em condições de alta pressão (GELAIN et al., 2023).

Todos os testes discutidos nesta seção foram realizados com o grão de combustível de parafina descrito na Seção 3.2. No entanto, tanto a geometria quanto a formulação química do combustível foram modificadas em alguns testes.

- Os testes 13, 14 e 16 a 18 foram realizados com grãos de combustível dopados com partículas metálicas em diferentes frações de massa, conforme descrito por (BERTOLDI; GELAIN; HENDRICK, 2022);
- Os testes 15 e 23 investigaram preliminarmente o efeito de diferentes geometrias do grão de combustível em suas características de taxa de regressão (GLASER et al., 2023).

Nessa seção, é importante ressaltar que não apresentaremos todos os resultados obtidos, mas sim uma comparação selecionada entre eles. Para uma visualização mais abrangente dos resultados da escala de intensidade, é possível consultar o Apêndice A, onde estão disponíveis todos os dados. Além disso, para uma visão mais completa e detalhada da tabela de dados, recomendamos consultar o Apêndice C, que contém a tabela com informações mais extensas.

As imagens de vídeo em alta velocidade mostradas na Figura 25a e Figura 25b demonstram a diferença entre dois testes. O teste 4 sendo realizado à uma pressão baixa na câmara, de aproximadamente 1,91 bar e o teste 22 sendo realizado à uma pressão alta na câmara, de aproximadamente 6,23 bar. Podemos observar a chama do teste 22 sendo mais intensa e uma chama se desenvolvendo ao lado da placa, juntamente com a erosão da junta que protege o acesso óptico no fundo (GELAIN et al., 2023).



(a) *Frame* do Teste 4 à baixa pressão na câmara.



(b) *Frame* do Teste 22 à alta pressão na câmara.

Figura 25 – *Frames* dos Testes 4 e 22 do motor MOUETTE comparando a chama à pressão baixa e à alta pressão.

A intensidade da chama deve ser considerada ao configurar a câmera de alta velocidade, portanto, os parâmetros foram ajustados de forma diferente entre os testes, conforme resumido na Tabela 6. Os vídeos foram adquiridos sem o uso de nenhum filtro óptico (GELAIN et al., 2023).

Teste #	Taxa de Quadros [fps]	Resolução de Imagem [pixel x pixel]	Taxa de Zoom [%]
1	-	-	-
2	1000	896 x 640	118,4
3	-	-	-
4	1000	896 x 640	118,4
5	1000	896 x 640	118,4
6	1000	896 x 640	118,4
7	2000	896 x 640	118,4
8	2000	896 x 640	118,4
9	2000	896 x 640	118,4
10	2000	896 x 640	118,4
11	3000	768 x 512	148
12	3000	768 x 512	148
13	3000	768 x 512	148
14	3000	768 x 512	103,3
15	-	-	-
16	3000	768 x 512	103,3
17	3000	768 x 512	70,7
18	-	-	-
19	6000	512 x 352	102,3
20	6000	512 x 352	102,3
21	3000	512 x 352	102,3
22	3000	512 x 352	215,5

Tabela 6 – Configurações da câmera de alta velocidade do MOUETTE.

5.1 Resultados para Escala de Intensidade

5.1.1 Testes à Pressão Atmosférica

Os testes 1, 2 e 3 foram executados usando uma tubeira com maior diâmetro da seção crítica disponível (20 mm para testes 1 e 2, e 15 mm para o teste 3 - ver Tabela 17), que proporciona uma contrapressão leve, mas não chega à condição de entupimento da tubeira ($M = 1$), e com o orifício mais estreito para o sistema de alimentação de oxidante, garantindo assim uma pequena taxa de vazão mássica (GELAIN et al., 2022). A pressão resultante na câmara é próxima à pressão atmosférica, ligeiramente mais alta no teste 3 devido à maior pressão de alimentação, o que se traduz em uma maior taxa de vazão mássica de oxidante. Não temos vídeo dos testes 1 e 3 e devido ao baixo brilho do vídeo gravado, para o teste 2 não foi possível obter imagens de gráficos de escala de intensidade, mas podemos comparar os dados.

A análise dos resultados para os testes à pressão atmosférica é apresentada nas Tabelas 7 e 8 abaixo, que mostra um recorte das Tabelas 4 e 5:

Teste #	Pressão no Tanque P_1 [bar]	Pressão Antes do Orifício P_2 [bar]	Pressão Depois do Orifício P_3 [bar]	Pressão na Entrada do Motor P_4 [bar]	Pressão na Câmara P_c [bar]
1	37,46	37,43	1,68	1,77	0,11
2	36,54	36,42	1,59	1,70	0,09
3	36,65	36,62	1,61	1,71	0,34

Tabela 7 – Dados de pressão para a companhia de testes do motor MOUETTE à pressão atmosférica.

Teste #	Tempo de Queima t_b [s]	Taxa de Vazão Mássica \dot{m}_{ox} [kg/s]	Eficiência η^*	Taxa de Regressão \dot{r} [mm/s]
1	5,32	0,05	0,09	0,57
2	5,31	0,05	0,07	0,29
3	5,22	0,05	0,15	0,40

Tabela 8 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE à pressão atmosférica.

Ao analisar os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8, podemos observar que o tempo de queima (t_b) para os testes 1, 2 e 3 é semelhante, com valores em torno de 5 segundos. A pressão do tanque (P_1) também é bastante próxima entre esses testes, variando apenas ligeiramente, assim como a pressão na câmara (P_c).

A taxa de vazão mássica de oxidante (\dot{m}_{ox}) é baixa para todos os testes, com valores na faixa de 0,05 kg/s. A velocidade característica (c^*) também varia entre os testes, indicando diferentes níveis de eficiência de queima (η^*). Já a taxa de regressão do combustível (\dot{r}) varia entre 0,29 mm/s e 0,57 mm/s, mostrando diferenças na taxa de consumo do combustível.

Ao analisar os testes à pressão atmosférica mencionados na Tabela 7, podemos observar uma relação interessante entre a pressão na câmara de combustão, a taxa de regressão do combustível e a eficiência de queima (η^*).

A relação entre a pressão na câmara, a taxa de regressão e a eficiência nos testes (η^*) à pressão atmosférica pode ser analisada com base nos resultados apresentados na Tabela 7.

Observamos que o teste 3 possui a maior pressão na câmara em comparação com os testes 1 e 2. Essa pressão mais elevada pode influenciar na eficiência da queima (η^*), pois proporciona uma maior compressão do combustível e do oxidante, resultando em uma combustão mais completa (HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007).

No entanto, ao analisar a taxa de regressão do combustível \dot{r} na tabela, observamos que o teste 1 possui uma taxa de regressão maior em comparação com os testes 2 e 3. Isso indica que o combustível está sendo consumido em uma taxa mais rápida no teste 1.

A diferença na eficiência (η^*) entre os testes pode ser atribuída a outros fatores além da taxa de regressão. Outros parâmetros, como as flutuações da taxa de vazão mássica do oxidante, a mistura do combustível e oxidante, a geometria do sistema e a configuração do queimador, também podem influenciar a eficiência (η^*) de combustão.

Portanto, é importante considerar que a eficiência (η^*) da queima é um resultado complexo, influenciado por vários fatores inter-relacionados. A taxa de regressão é apenas um dos aspectos a serem considerados, e sua influência pode ser afetada pela interação com outros parâmetros do sistema.

5.1.2 Testes à Baixa Pressão

O segundo conjunto de testes investigados faz parte da campanha de teste, em particular os testes 5, 6 e 19 com uma pressão na câmara em torno de 3 bar, e os testes 11 e 12 com uma pressão na câmara em torno de 2,2 bar. Esses testes diferem na taxa de vazão mássica do oxidante, variando de 0,05 kg/s nos testes 5 e 6 a 0,08 kg/s nos testes 11 e 12, e 0,10 kg/s no teste 19.

A análise dos resultados para os testes à baixa pressão é apresentada nas Tabelas 9 e 10 abaixo, que mostra um recorte das Tabelas 4 e 5:

Teste #	Pressão no Tanque P_1 [bar]	Pressão Antes do Orifício P_2 [bar]	Pressão Depois do Orifício P_3 [bar]	Pressão na Entrada do Motor P_4 [bar]	Pressão na Câmara P_c [bar]
5	36,54	36,51	3,95	3,69	3,05
6	36,50	36,48	4,14	3,82	3,20
19	33,67	33,42	4,98	4,53	2,96

Tabela 9 – Dados de pressão para a campanha de testes do motor MOUETTE à baixa pressão.

Teste #	Tempo de Queima t_b [s]	Taxa de Vazão Mássica \dot{m}_{ox} [kg/s]	Eficiência η^*	Taxa de Regressão \dot{r} [mm/s]
5	5,38	0,05	0,38	0,46
6	5,28	0,05	0,41	0,28
19	5,46	0,10	0,23	-

Tabela 10 – Dados de performance para a campanha de testes do motor MOUETTE à baixa pressão.

Desta vez, foi utilizado um diâmetro de garganta da tubeira menor para alcançar uma pressão na câmara de combustão mais alta. Nos testes em pressão ambiente, o diâmetro da garganta da tubeira foi de 0,02 m para os testes 1 e 2, e 0,015 m para o teste 3. Para alcançar uma pressão na câmara de combustão mais alta, os testes desta seção possuem um diâmetro de garganta na tubeira de 0,008 m (veja a Tabela 17).

O Teste 11 é agrupado junto com o Teste 12, pois as configurações da câmera usadas entre os testes são as mesmas, com um aumento na taxa de quadros (veja a Tabela 6). As somas de quadros para os segundos 1, 2 e 4 são mostradas nas Figuras 26 e 27. Os dois testes possuem a mesma taxa de vazão mássica de oxidante, de cerca de 0,08 kg/s, maior do que nos testes anteriores.

Novamente, o que pode ser observado é o efeito de uma pressão mais alta na câmara de combustão (de 2,96 bar no teste 19 até 3,20 bar no teste 6), pois a chama nesses testes parece estar mais espessa e brilhante. Além disso, a chama que se desenvolve nas laterais e na camada de parafina derretida entre a placa e a janela é mais acentuada, uma vez que a fusão da camada superficial é intensificada pela maior transferência de calor proporcionada pela pressão mais alta na câmara.

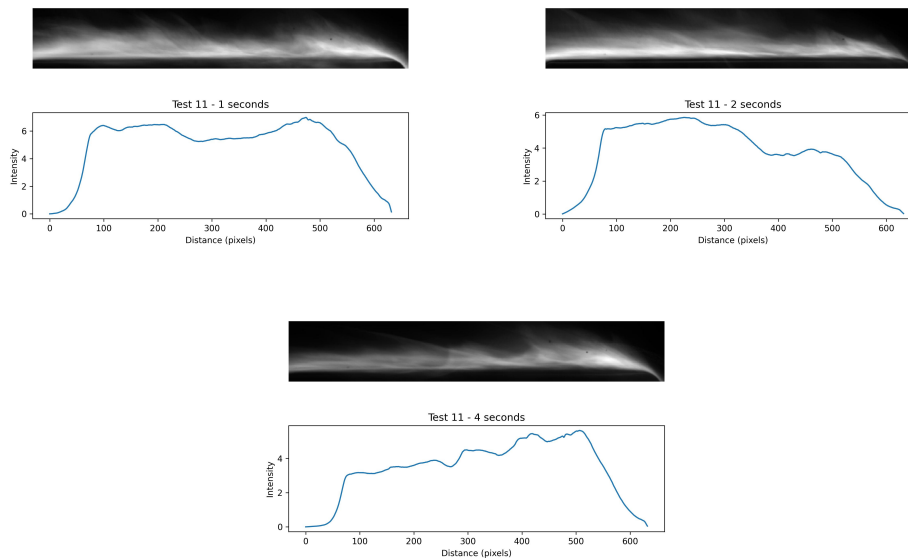


Figura 26 – Perfil de intensidade da chama no Teste 11 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.

Em resumo, o pequeno aumento na pressão na câmara, de atmosférica para uma condição de estrangulamento, promoveu uma transição no comportamento observado da combustão, à medida que a chama passou de um núcleo de chama fina, típico da fase transitória de ignição, para um perfil mais desenvolvido e turbulento. Além disso, as condições de pressão investigadas parecem ser muito baixas para serem negligenciadas na taxa de queima do combustível sólido, um resultado que está de acordo com (HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007). Portanto, as condições de pressão investigadas ainda são muito baixas para serem representativas de uma câmara de combustão típica de um MFPH.

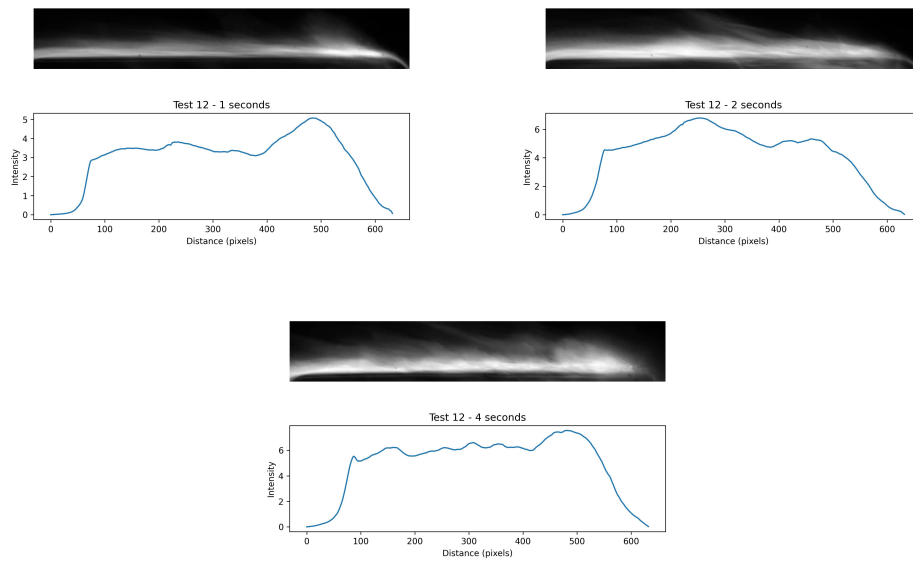


Figura 27 – Perfil de intensidade da chama no Teste 12 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.

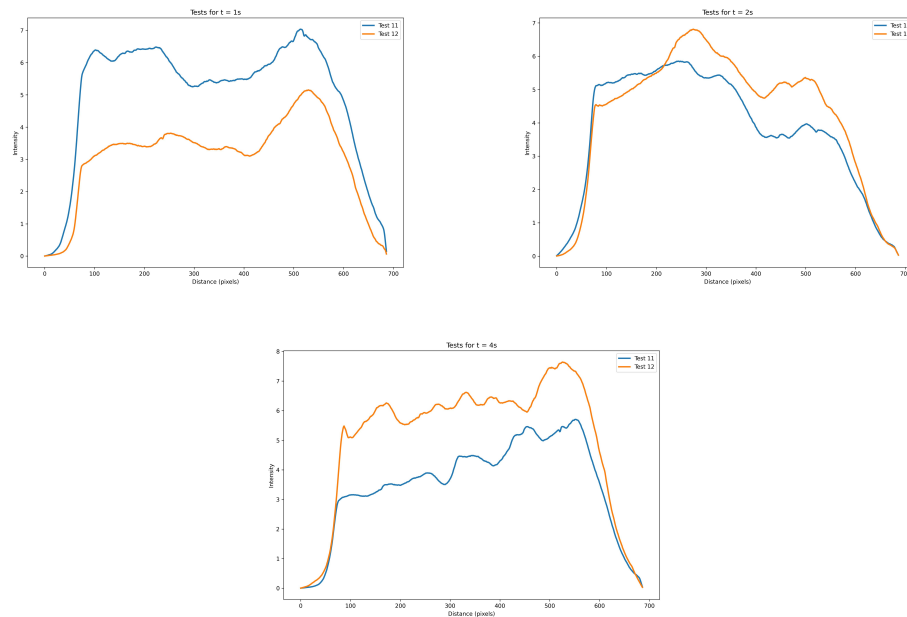


Figura 28 – Comparação dos perfis de intensidade da chama nos Testes 11 e 12 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.

5.1.3 Testes à Alta Pressão

Os testes 21 e 22 são discutidos como o terceiro par de testes, nos quais ambos possuem uma taxa de vazão mássica mais elevada em relação aos experimentos anteriores, de aproximadamente 0,10 kg/s, além de uma pressão média na câmara de combustão mais alta, em torno de 6 bar (ver Tabelas 11 e 12, um recorte das Tabelas 4 e 5), aproximando-se das condições experimentadas em um MFPH.

Teste #	Pressão no Tanque P_1 [bar]	Pressão Antes do Orifício P_2 [bar]	Pressão Depois do Orifício P_3 [bar]	Pressão na Entrada do Motor P_4 [bar]	Pressão na Câmara P_c [bar]
21	33,12	32,89	7,94	7,03	6,23
22	32,89	32,67	8,32	7,36	6,58

Tabela 11 – Dados de pressão para a companhia de testes do motor MOUETTE à alta pressão.

Teste #	Tempo de Queima t_b [s]	Taxa de Vazão Mássica \dot{m}_{ox} [kg/s]	Eficiência η^*	Taxa de Regressão \dot{r} [mm/s]
21	7,30	0,10	0,49	-
22	7,24	0,10	0,51	-

Tabela 12 – Dados de performance para a companhia de testes do motor MOUETTE à baixa pressão.

A soma dos quadros para os segundos 1, 2 e 4 é mostrada nas Figuras 29 e 30. Algumas características da combustão observadas em pressões de câmara e taxa de vazão mássica mais elevadas são uma chama muito mais desenvolvida, que tende a ser mais espessa e brilhante em comparação com os testes anteriores, devido à maior quantidade de parafina arrastada no fluxo de oxidante. A chama se desenvolve facilmente também nas laterais da placa e apresenta estruturas ondulatórias que se acoplam com algumas oscilações de pressão, gerando uma chama altamente turbulenta (BERTOLDI; GELAIN; HENDRICK, 2022).

Infelizmente, para os testes realizados em alta pressão, não conseguimos obter os valores da taxa de regressão devido a um problema na medição da massa inicial do combustível. Essa limitação nos impediu de realizar uma análise completa da taxa de regressão nessas condições específicas. No entanto, os demais resultados e observações relacionadas à combustão nessas condições foram registrados.

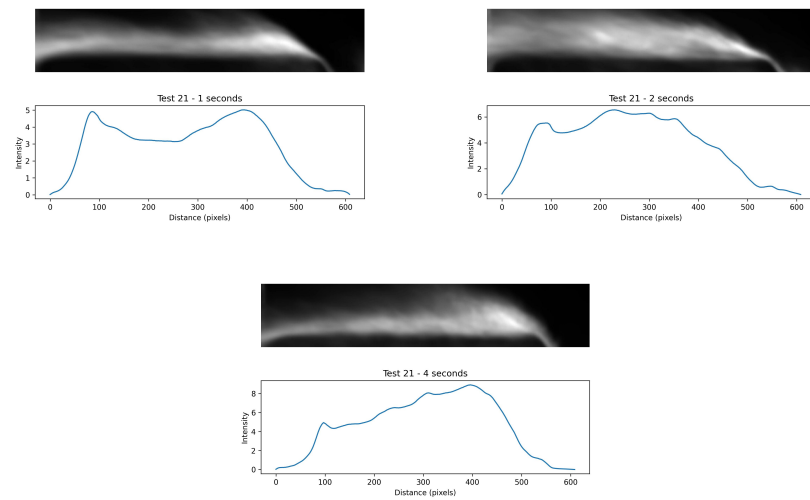


Figura 29 – Perfil de intensidade da chama no Teste 21 do motor MOUETTE à alta pressão para os segundos 1, 2 e 4.

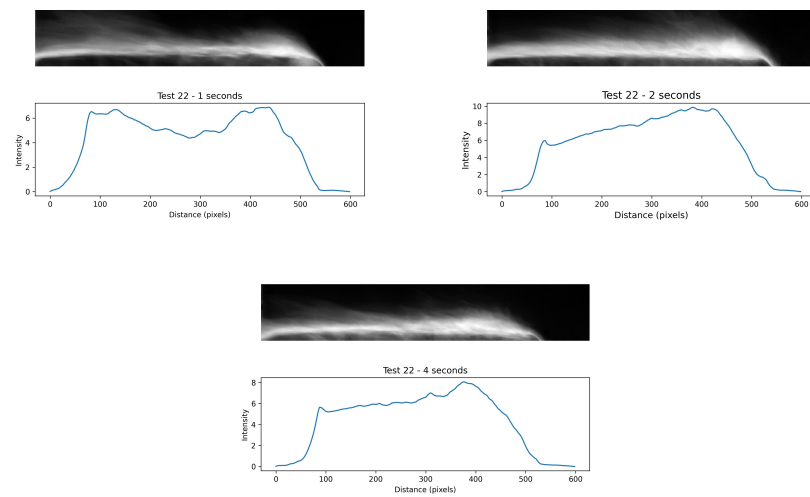


Figura 30 – Perfil de intensidade da chama no Teste 22 do motor MOUETTE à alta pressão para os segundos 1, 2 e 4.

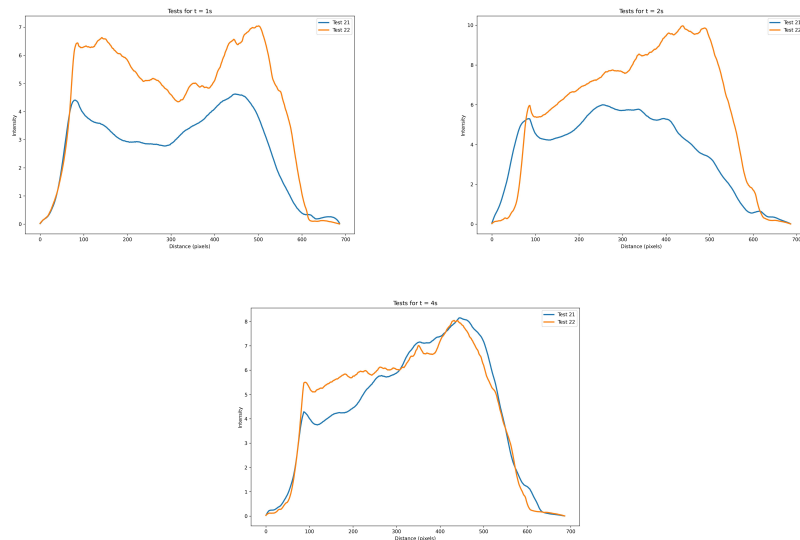


Figura 31 – Comparação dos perfis de intensidade da chama nos Testes 21 e 22 do motor MOUETTE à baixa pressão para os segundos 1, 2 e 4.

5.2 Resultados para Taxa de Regressão

5.2.1 Testes à Pressão Atmosférica

Os Testes 1, 2 e 3 do motor MOUETTE foram conduzidos sob condições onde a pressão na câmara de combustão aproximava-se da atmosférica. A falta de registros visuais para os Testes 1 e 2, juntamente com a qualidade insuficiente do vídeo do Teste 2, que apresentou baixo brilho, impediu a obtenção de imagens claras e a consequente análise gráfica da taxa de regressão. As implicações desses resultados e suas comparações foram anteriormente abordadas e discutidas com detalhes na Seção 5.1.1

5.2.2 Testes à Baixa Pressão

Nesta seção, analisamos um segundo conjunto de testes realizados com o motor MOUETTE, especificamente os testes 5, 6 e 19, nos quais a pressão na câmara girou em torno de 3 bar, e os testes 11 e 12, com a pressão aproximada de 2,2 bar. Utilizou-se o método de contorno de chama para obter os quadros agrupados, excluindo as fases de ignição e desligamento do queimador plano. Nessas fases, a taxa de vazão mássica do oxidante muda rapidamente e a placa de combustível queima a uma taxa menor do que na fase nominal (GELAIN et al., 2023).

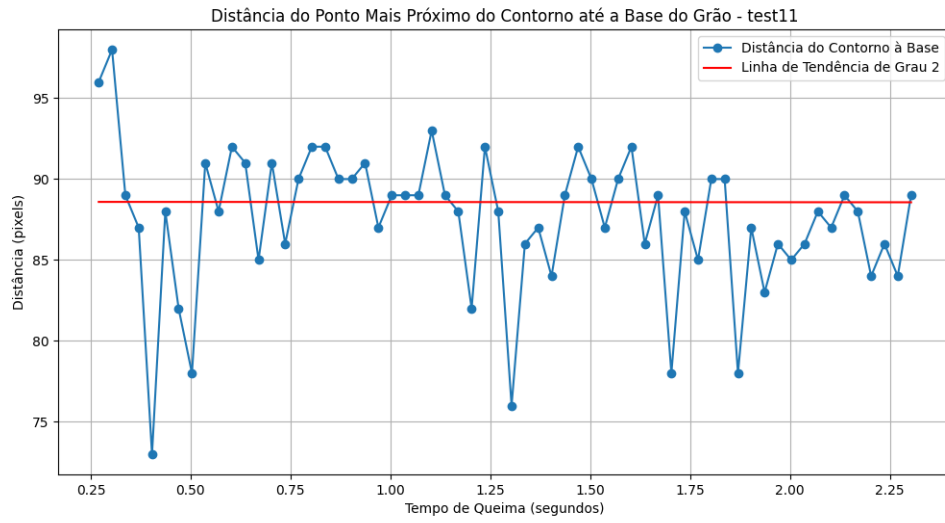
A Tabela 13 apresenta os dados de configuração da câmara de alta velocidade e o tempo de queima para cada teste sob baixa pressão. O tempo de queima corresponde ao total de quadros dividido pela taxa de quadros, conforme a Equação 5.1:

$$t_b = \frac{\text{Total de Quadros}}{\text{Taxa de Quadros}} \quad (5.1)$$

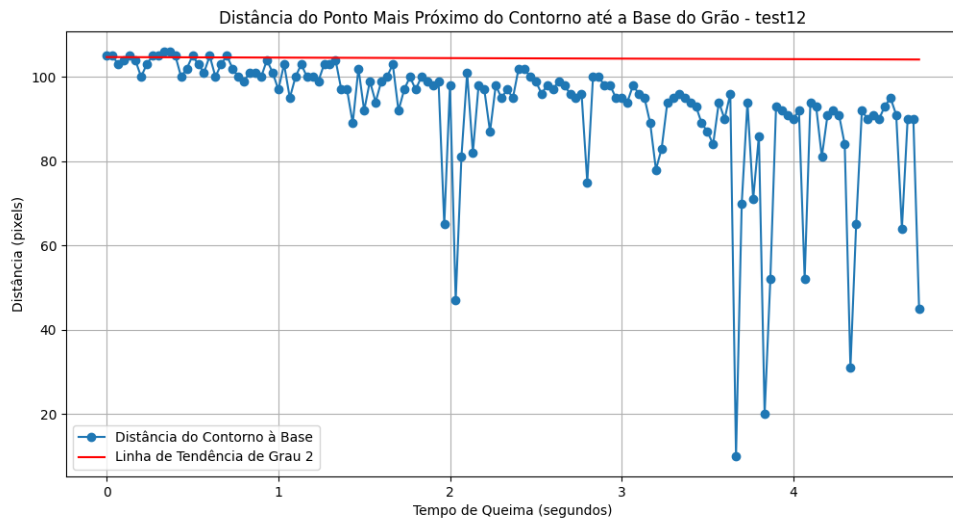
Teste	Total de quadros	Taxa de Quadros [quadros/s]	Tempo de Queima t_b [s]	Limiar (<i>Threshold</i>)
5	6224	1000	6,22	60
6	6224	1000	6,22	60
11	6224	3000	2,07	60
12	14337	3000	4,78	60
19	31751	6000	5,29	70

Tabela 13 – Relação de configurações de gravação e tempo de queima para os testes à baixa pressão do motor MOUETTE.

As Figuras 32a e 32b ilustram a altura da placa do grão combustível calculada pela metodologia de cálculo da taxa de regressão (Seção 4.4) para os Testes 11 e 12. A altura média do grão, estimada a partir do limite inferior da chama em cada quadro, exhibe uma tendência decrescente, apesar do ruído nas medições devido à flutuação da chama. Essa tendência é consistente com os resultados experimentais (GELAIN et al., 2023).



(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível do Teste 11 do MOUETTE.



(b) Distância da base da chama para a base do grão combustível do Teste 12 do MOUETTE.

Figura 32 – Distância da base da chama para a base do grão combustível dos Testes 11 e 12 do MOUETTE.

A taxa de regressão (\dot{r}), estimada entre dois conjuntos de quadros médios com o método de média móvel, é calculada usando a Equação 4.2 e convertida de pixel/quadro para pixel/segundo, considerando a taxa de quadros do vídeo. A Tabela 14 lista a média das taxas de regressão obtidas a partir da variação da altura medida.

Teste	Taxa de Regressão Média [pixels/quadro]	Taxa de Regressão Média [pixels/s]	Taxa de Regressão Média Experimental [mm/s]
5	-	-	0,46
6	0,0398	3,98	0,28
11	0,0424	1,27	0,30
12	0,1016	3,04	0,43
19	0,0731	4,38	-

Tabela 14 – Taxa de regressão média para os testes à baixa pressão do MOUETTE.

No Teste 6, a taxa foi de 3,98 pixels/s, enquanto a taxa de regressão experimental registrada foi de 0,28 mm/s. No Teste 12, uma taxa mais baixa de 3,04 pixels/s foi observada, com uma taxa experimental de 0,43 mm/s. Isso pode indicar que a taxa de regressão capturada pelo algoritmo, que reflete mudanças no contorno da chama, é sensível a nuances que não são diretamente traduzidas para a medida experimental em milímetros por segundo.

Para os Testes 5 e 19, enfrentamos desafios distintos que impactaram a análise dos dados. No Teste 5, a qualidade da imagem não foi suficiente para permitir uma análise precisa pelo algoritmo, como pode ser observado na Figura 33, o que nos impede de realizar uma análise da taxa de regressão. Já no Teste 19, ocorreu uma falha na captura dos dados de medição do grão combustível, impedindo a obtenção da taxa de regressão experimental.



Figura 33 – Imagem do Teste 5 do MOUETTE, evidenciando a qualidade insatisfatória para análise devido à janela obstruída por resíduos.

5.2.3 Testes à Alta Pressão

Nesta seção, analisamos um terceiro conjunto de testes realizados com o motor MOUETTE, especificamente os testes 21 e 22, nos quais a pressão na câmara girou em torno de 6 bar. Utilizou-se o método de contorno de chama para obter os quadros agrupados, excluindo as fases de ignição e desligamento do queimador plano. Nessas fases, a taxa de vazão mássica do oxidante muda rapidamente e a placa de combustível queima a uma taxa menor do que na fase nominal (GELAIN et al., 2023).

A Tabela 15 apresenta os dados de configuração da câmera de alta velocidade e o tempo de queima para cada teste sob alta pressão. O tempo de queima corresponde ao total de quadros dividido pela taxa de quadros, conforme a Equação 5.1.

Teste	Total de quadros	Taxa de Quadros [quadros/s]	Tempo de Queima t_b [s]	Limiar (<i>Threshold</i>)
21	31751	3000	10,58	100
22	31751	3000	10,58	100

Tabela 15 – Relação de configurações de gravação e tempo de queima para os testes à alta pressão do motor MOUETTE.

As Figuras 34a e 34b ilustram a altura da placa do grão combustível calculada pela metodologia de cálculo da taxa de regressão (Seção 4.4) para os Testes 21 e 22. A altura média do grão, estimada a partir do limite inferior da chama em cada quadro, exibe uma tendência decrescente, apesar do ruído nas medições devido à flutuação da chama. Essa tendência é consistente com os resultados experimentais (GELAIN et al., 2022).

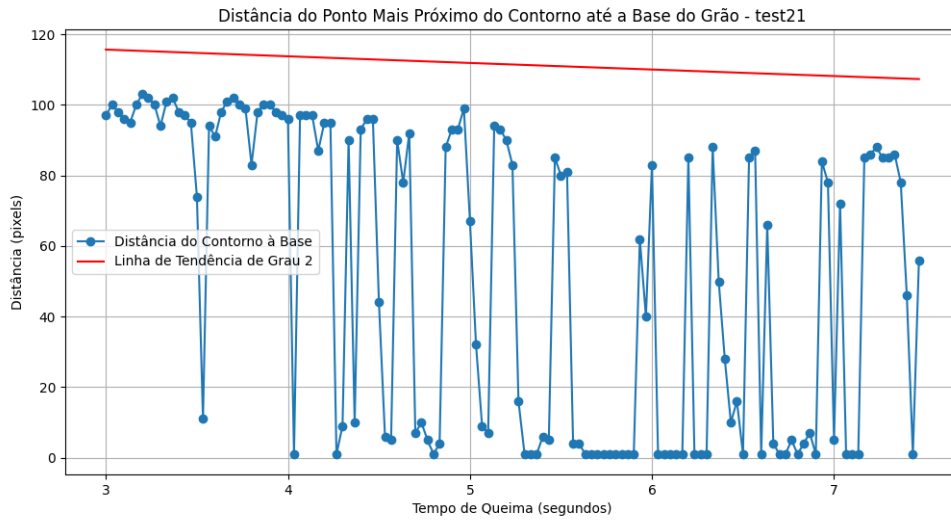
A taxa de regressão (\dot{r}), estimada entre dois conjuntos de quadros médios com o método de média móvel, é calculada usando a Equação 4.2 e convertida de pixel/quadro para pixel/segundo, considerando a taxa de quadros do vídeo. A Tabela 16 lista a média das taxas de regressão obtidas a partir da variação da altura medida.

Teste	Taxa de Regressão Média [pixels/quadro]	Taxa de Regressão Média [pixels/s]	Taxa de Regressão Média Experimental [mm/s]
21	0,2941	8,82	-
22	0,1777	5,33	-

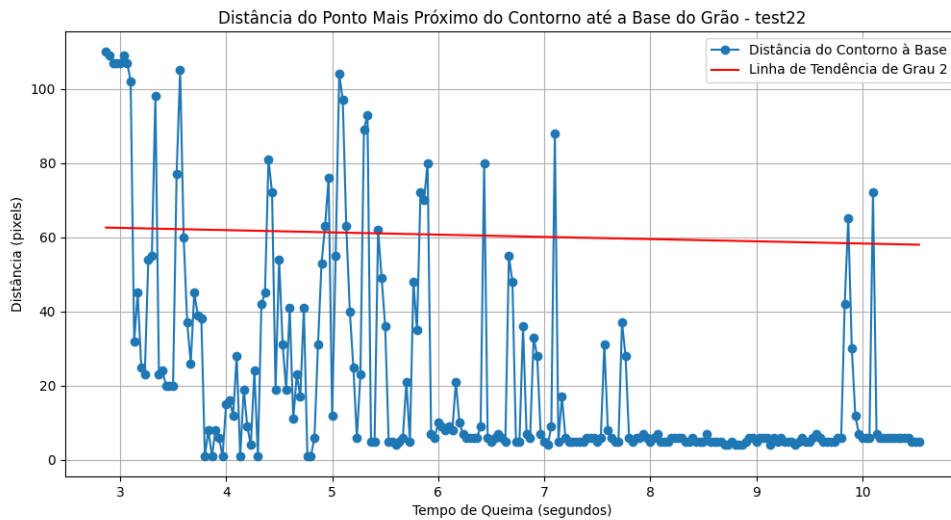
Tabela 16 – Taxa de regressão média para os testes à alta pressão do MOUETTE.

A análise dos testes à alta pressão no motor MOUETTE, especificamente para os Testes 21 e 22, revela taxas de regressão de 8,82 pixels/s e 5,33 pixels/s, respectivamente. Estas taxas, obtidas através de algoritmos de análise de imagem, refletem a rápida mudança da posição da chama em relação ao grão combustível, indicando um processo de combustão intensa.

A ausência de dados experimentais para validar essas taxas de regressão significa que as conclusões devem ser consideradas como indicativas, sujeitas a confirmação por meio de medições experimentais.



(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível do Teste 21 do MOUETTE.



(b) Distância da base da chama para a base do grão combustível do Teste 22 do MOUETTE.

Figura 34 – Distância da base da chama para a base do grão combustível dos Testes 21 e 22 do MOUETTE.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusão

A análise de sinais e vídeos desempenha um papel fundamental na compreensão dos fenômenos de combustão em motores de foguetes, e foi o foco central deste trabalho. Foi desenvolvida uma metodologia utilizando programação com um código em Python para analisar a intensidade da chama e a taxa de regressão em motores híbridos, baseada em técnicas de processamento de imagem e análise de vídeo. Esta abordagem permitiu uma avaliação desses parâmetros críticos, que são desafiadores de medir diretamente em condições reais em motores de foguete híbrido.

A metodologia aplicada utilizou uma escala de intensidade derivada do processamento de vídeos de alta velocidade, que foi fundamental para avaliar as variações na queima do combustível. Esta técnica mostrou-se eficaz em correlacionar os dados visuais com as características físicas da combustão, proporcionando uma maneira mais direta e menos invasiva de medir a taxa de regressão em comparação com métodos tradicionais.

Comparando os resultados desse trabalho com os publicados por (GELAIN et al., 2023), observamos que os dados estão em conformidade com as expectativas teóricas: à medida que a pressão na câmara de combustão aumenta, a taxa de regressão também aumenta, para os baixos níveis de fluxo mássico de oxidante utilizados no motor MOUETTE. Para motores em escala comercial a taxa de regressão é relativamente independente da pressão, sendo mais impactada pelo fluxo mássico de oxidante e composição do combustível. Entretanto, câmaras de combustão de MPFH com alto fluxo mássico ou baixa pressão (segundo sendo o caso do motor MOUETTE que trabalha abaixo da pressão crítica da parafina). Nesse casos limites de operação, é esperado que a taxa de queima do combustível seja limitada pela cinética da combustão e se torne dependente da pressão (HUMBLE; HENRY; LARSON, 2007).

Apesar dos motores *slab-burner* operarem em condições diferentes dos motores de foguetes comerciais eles são uma importante ferramenta para pesquisa dos processos de combustão e desenvolvimento de novas matrizes combustíveis. Isso valida a precisão e relevância de nossa metodologia de análise de vídeo.

No entanto, enfrentamos desafios, como a qualidade variável do vídeo, que impactou a precisão do contorno da chama e a falta de dados de medição para alguns testes. Estes desafios destacam a necessidade de um protocolo experimental robusto e a importância de aperfeiçoar o algoritmo de análise para obter resultados mais precisos.

Em conclusão, este trabalho representa um avanço significativo na análise de vídeo

e sinais para a avaliação de motores de foguetes híbridos. Futuras melhorias no algoritmo e na metodologia de análise poderão aumentar a precisão e a aplicabilidade desta técnica, expandindo seu uso para uma gama mais ampla de testes e configurações de motores. A contribuição deste estudo reside principalmente na inovação do processo de análise, abrindo caminho para pesquisas mais profundas e precisas no campo da propulsão de foguetes híbridos.

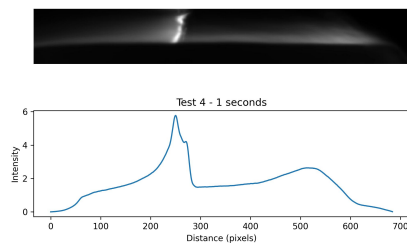
Referências

- BERTOLDI, A. D. M.; GELAIN, R.; HENDRICK, P. Characterization of magnesium diboride as an additive for paraffin-based fuel hybrid rockets. Proceedings of the 9th European Conference for Aerospace Sciences. Lille, France, 27 June - 1 July, 2022, 2022. Disponível em: <<https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2022-6109.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 64.
- BERTOLDI, A. E. de M. *Avaliação experimental da queima de parafina e óxido nitroso em motores híbridos*. Tese (Doutorado), 12 2007. Citado 4 vezes nas páginas 11, 27, 30 e 31.
- BERTOLDI, A. E. de M.; GELAIN, R.; HENDRICK, P. Characterization of hybrid rocket paraffin-based fuels. 09 2022. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 57.
- BRADSKI, G. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 42.
- CARVALHO, V. *Campus da Faculdade do Gama (FGA)*. 2023. Online. Disponível em: <<http://unbimagens.unb.br/index.php/espacos-unb/campus-gama-fga/category/20-fga-campus-gama?start=24#&gid=1&pid=1>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 40 e 41.
- GELAIN, R. et al. Design and commissioning of the mouette hybrid rocket slab burner. In: . [S.l.: s.n.], 2022. Citado 3 vezes nas páginas 37, 57 e 59.
- GELAIN, R. et al. Optical investigation of paraffin-based fuel combustion in a hybrid rocket slab burner. *Aerospace Europe Conference 2023 - 10th EUCASS - 9th CEAS*, 2023. Citado 11 vezes nas páginas 11, 12, 15, 35, 36, 37, 44, 47, 57, 58 e 66.
- GELAIN, R. et al. Design and commissioning of the mouette hybrid rocket slab burner. Proceedings of the 9th European Conference for Aerospace Sciences. Lille, France, 27 June - 1 July, 2022, 2022. Disponível em: <<https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2022-6055.pdf>>. Citado 8 vezes nas páginas 11, 15, 33, 34, 35, 36, 37 e 69.
- GELAIN, R. et al. Estimation of regression rate from image analysis in hybrid rocket slab burners. In: . [S.l.: s.n.], 2023. Citado 9 vezes nas páginas 24, 25, 43, 56, 57, 58, 66, 68 e 71.
- GLASER, C. et al. Experimental regression rate profiles of stepped fuel grains in hybrid rocket engines. *Acta Astronautica*, Elsevier BV, v. 204, p. 186–198, mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.12.045>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 57.
- HUMBLE, R.; HENRY, G.; LARSON, W. *Space Propulsion Analysis and design*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007. Citado 7 vezes nas páginas 11, 27, 28, 30, 60, 62 e 71.
- JENS, E. T.; CANTWELL, B. J.; HUBBARD, G. S. Hybrid rocket propulsion systems for outer planet exploration missions. *Acta Astronautica*, Elsevier BV, v. 128, p. 119–130, nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.06.036>>. Citado na página 23.

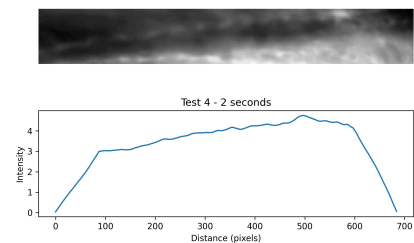
- KANG, S. et al. Design and performance evaluation of hybrid rocket using 95 wt.% h₂o₂. In: *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/6.2016-4864>>. Citado na página 23.
- KARABEYOGLU, A. et al. Scale-up tests of high regression rate paraffin-based hybrid rocket fuels. *Journal of Propulsion and Power - J PROPUL POWER*, v. 20, p. 1037–1045, 11 2004. Citado na página 31.
- KOBALD, M.; VERRI, I.; SCHLECHTRIEM, S. Theoretical and experimental analysis of liquid layer instability in hybrid rocket engines. *CEAS Space Journal*, Springer Science and Business Media LLC, v. 7, n. 1, p. 11–22, jan. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12567-015-0076-2>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 42.
- MARXMAN, G. A.; GILBERT, M. Turbulent boundary layer combustion in the hybrid rocket. In: . [S.l.: s.n.], 1963. Citado na página 28.
- PETRAROLO, A.; KOBALD, M.; SCHLECHTRIEM, S. Optical analysis of the liquid layer combustion of paraffin-based hybrid rocket fuels. *Acta Astronautica*, v. 158, p. 313–322, 2019. ISSN 0094-5765. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576518301309>>. Citado na página 35.
- RÜTTGERS, A.; PETRAROLO, A. Local anomaly detection in hybrid rocket combustion tests. *Experiments in Fluids*, Springer Science and Business Media LLC, v. 62, n. 7, jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00348-021-03236-1>>. Citado na página 24.
- SURINA, G. et al. Measurement of hybrid rocket solid fuel regression rate for a slab burner using deep learning. 08 2021. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 30.
- SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. *Rocket Propulsion Elements*. 8. ed. [S.l.]: John Wiley; Sons, Inc, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.

Apêndices

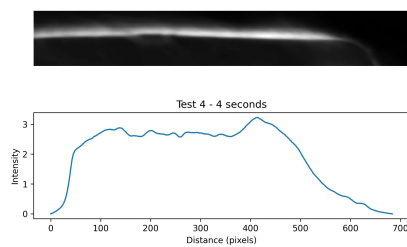
APÊNDICE A – Perfis de Intensidade



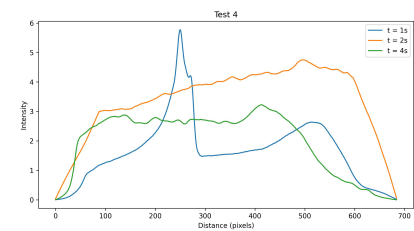
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

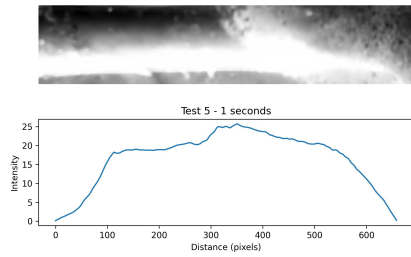


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

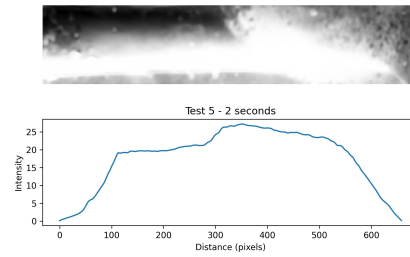


(d) Perfis de intensidade - Comparação

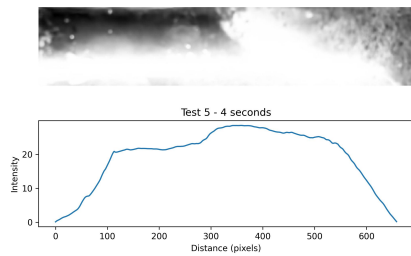
Figura 35 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 4 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



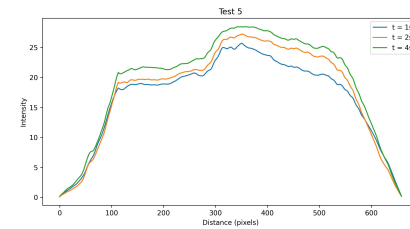
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

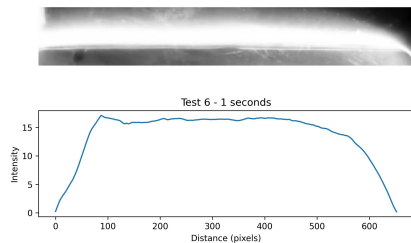


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

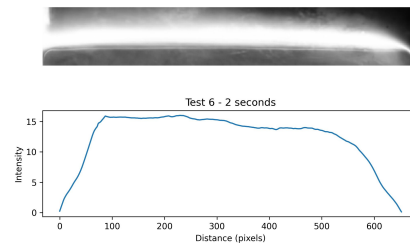


(d) Perfis de intensidade - Comparação

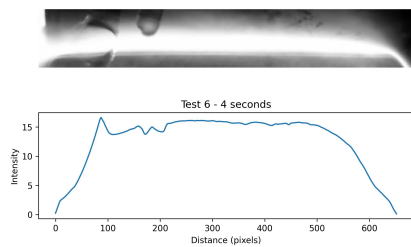
Figura 36 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 5 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



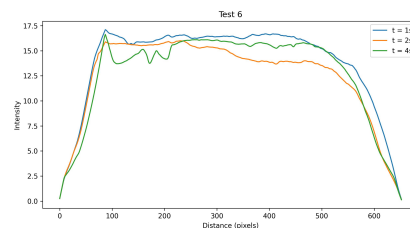
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

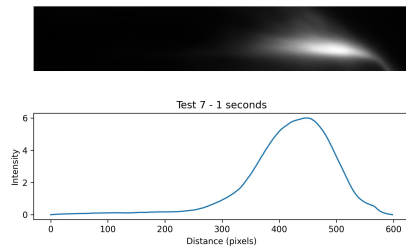


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

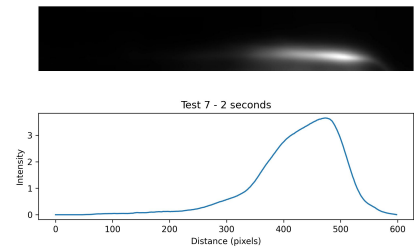


(d) Perfis de intensidade - Comparação

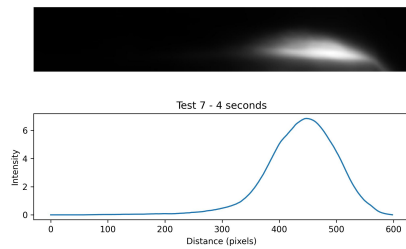
Figura 37 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 6 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



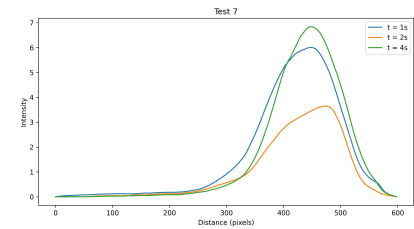
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

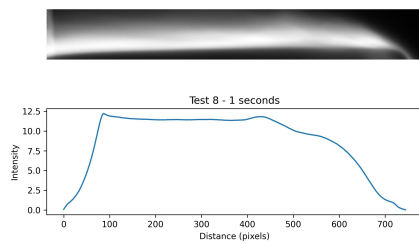


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

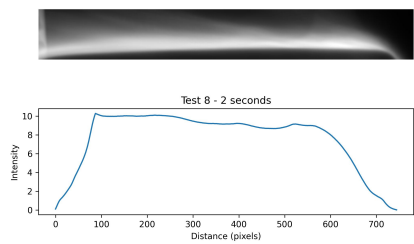


(d) Perfis de intensidade - Comparação

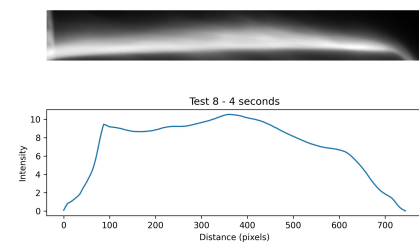
Figura 38 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 7 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



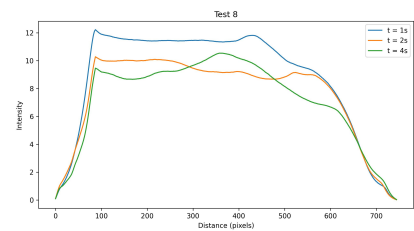
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

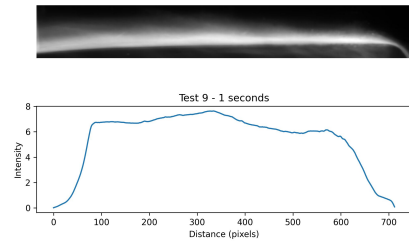


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

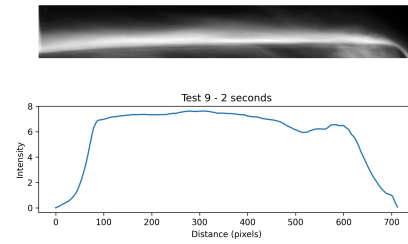


(d) Perfis de intensidade - Comparação

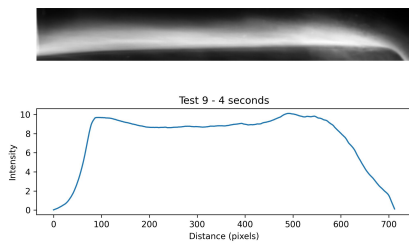
Figura 39 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 8 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



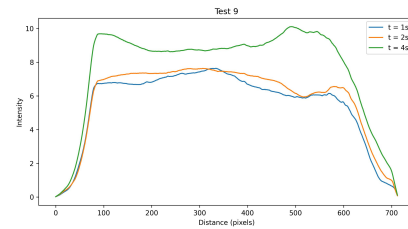
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

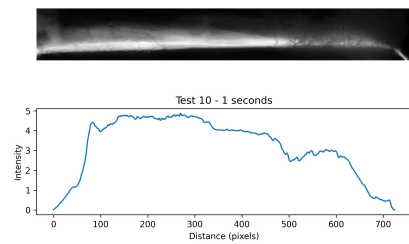


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

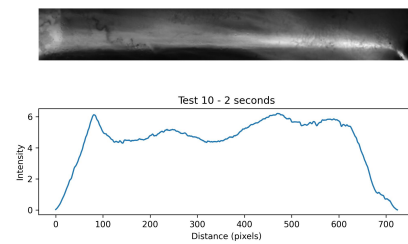


(d) Perfis de intensidade - Comparação

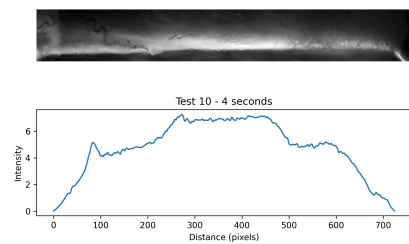
Figura 40 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 9 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



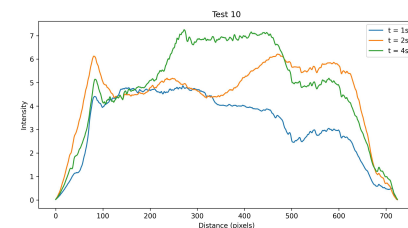
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

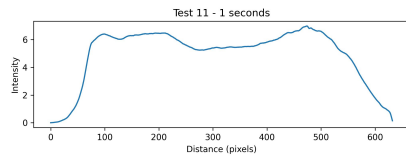


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

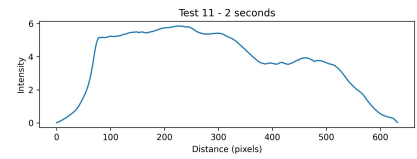


(d) Perfis de intensidade - Comparação

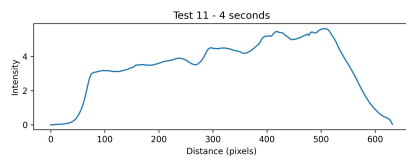
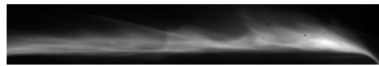
Figura 41 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 10 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



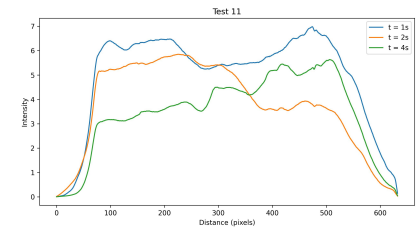
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

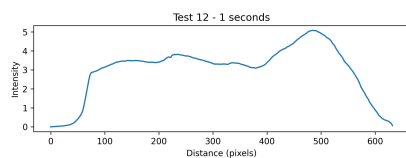


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

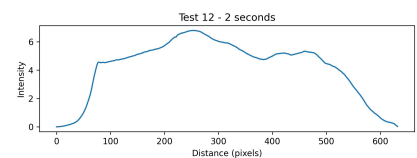


(d) Perfis de intensidade - Comparação

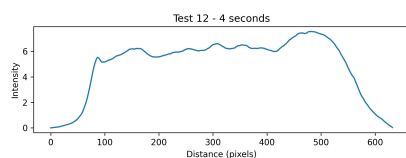
Figura 42 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 11 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



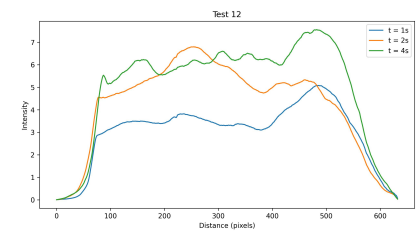
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

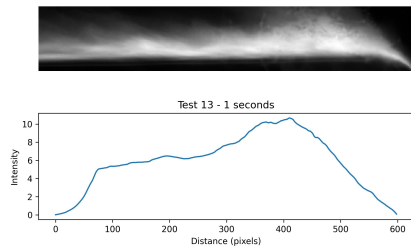


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

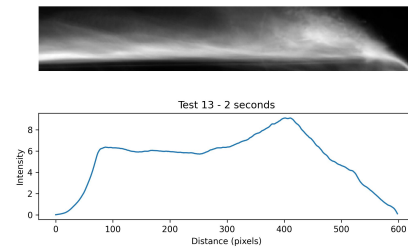


(d) Perfis de intensidade - Comparação

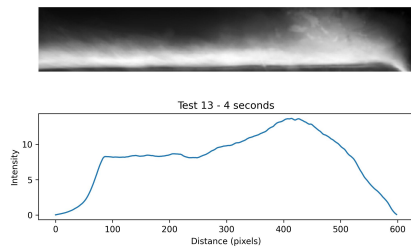
Figura 43 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 12 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



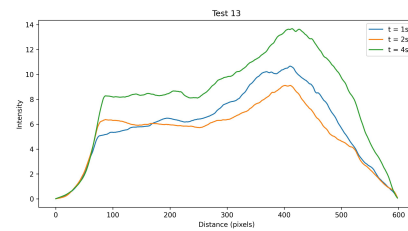
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

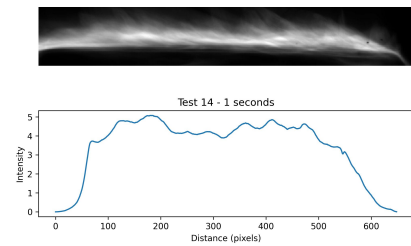


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

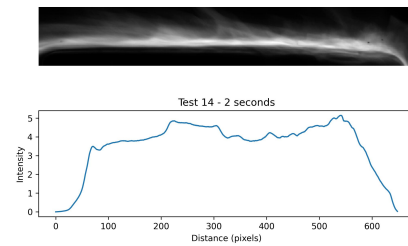


(d) Perfis de intensidade - Comparação

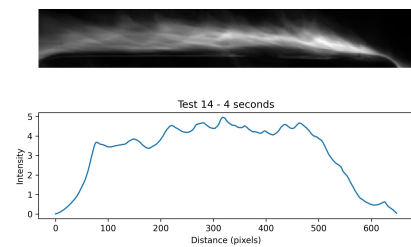
Figura 44 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 13 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



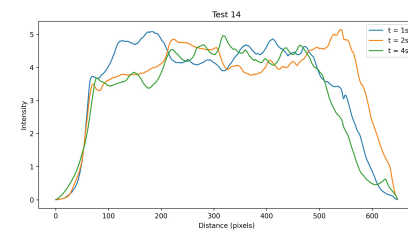
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

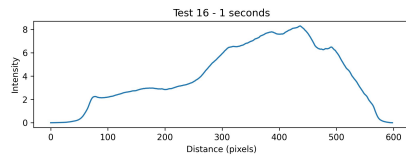


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

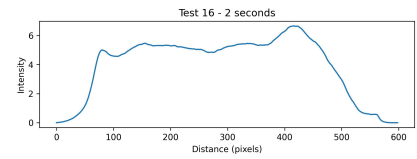


(d) Perfis de intensidade - Comparação

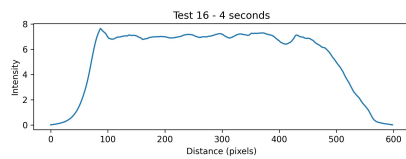
Figura 45 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 14 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



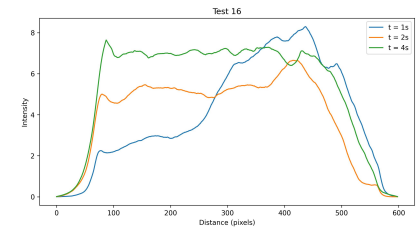
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

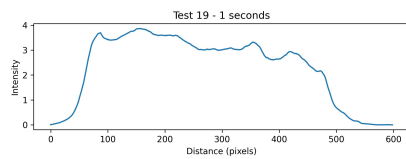
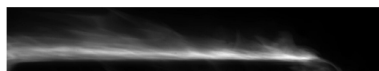


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

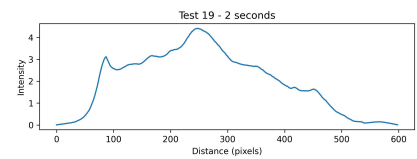
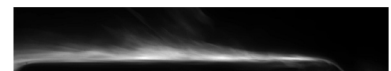


(d) Perfis de intensidade - Comparação

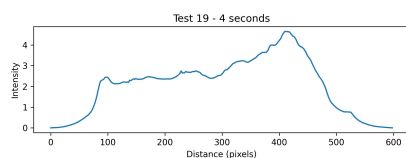
Figura 46 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 16 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



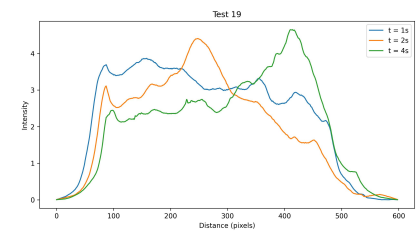
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos

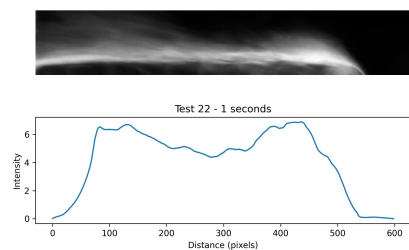


(c) Perfil de intensidade - 4 segundos

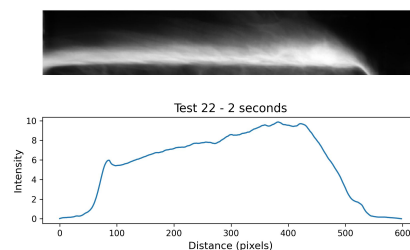


(d) Perfis de intensidade - Comparação

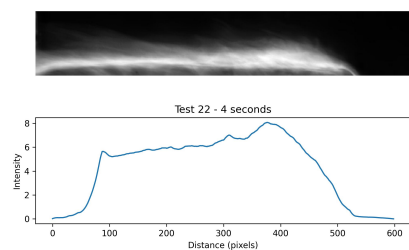
Figura 47 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 19 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.



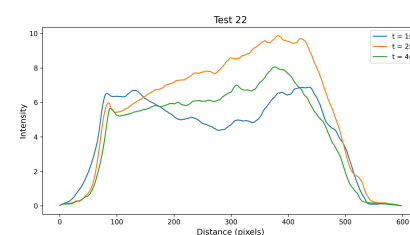
(a) Perfil de intensidade - 1 segundo



(b) Perfil de intensidade - 2 segundos



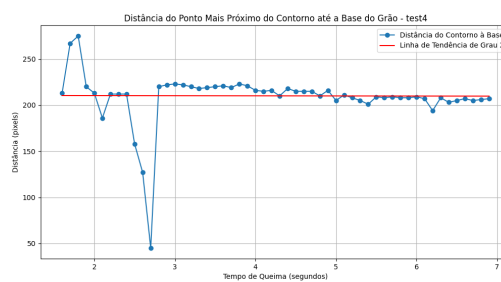
(c) Perfil de intensidade - 4 segundos



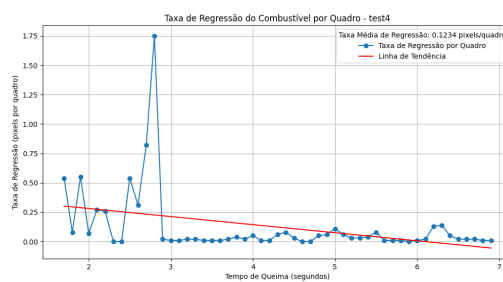
(d) Perfis de intensidade - Comparação

Figura 48 – Perfis de intensidade de chama para o Teste 22 do motor MOUETTE para os segundos 1, 2 e 4 e comparação.

APÊNDICE B – Distancia da Chama e Taxa de Regressão

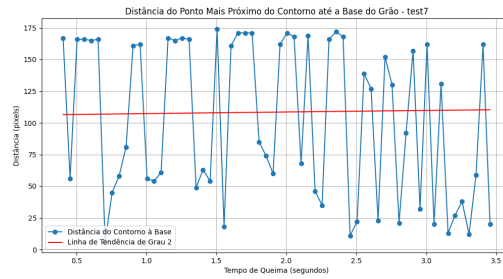


(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível

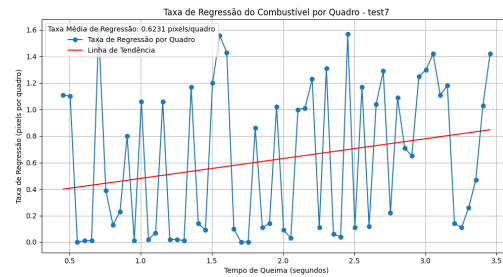


(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 49 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 4 do motor MOU-ETTE.

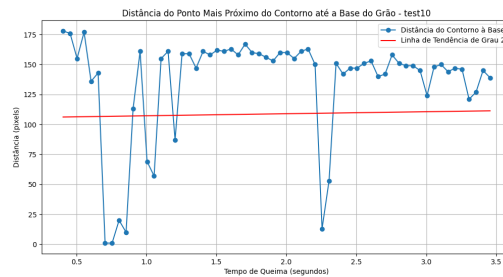


(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível

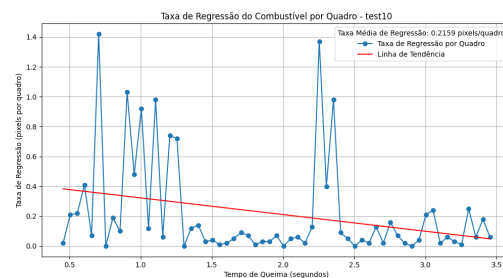


(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 50 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 7 do motor MOUETTE.

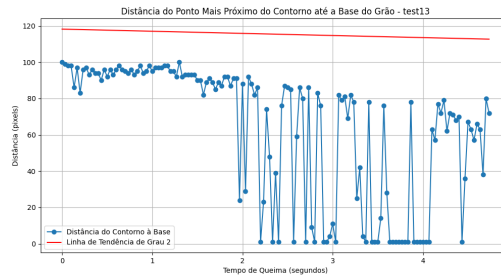


(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível

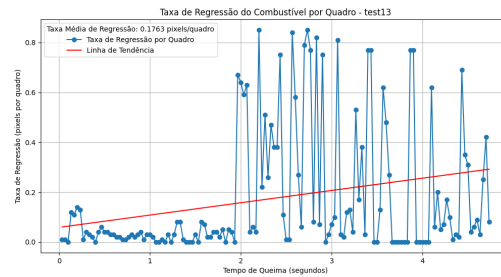


(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 51 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 10 do motor MOUETTE.

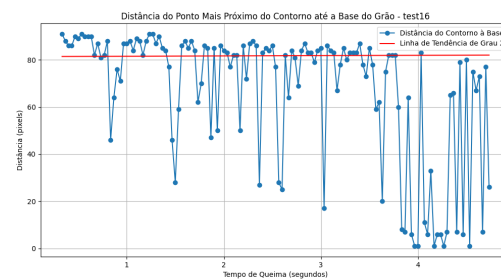


(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível

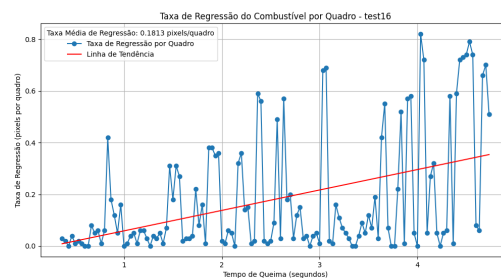


(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 52 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 13 do motor MOUETTE.

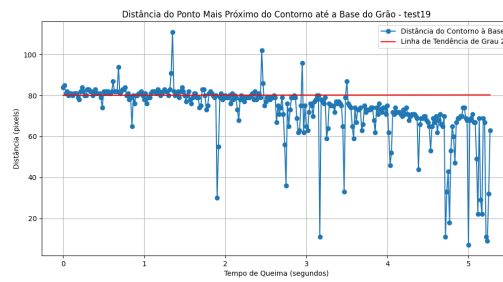


(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível

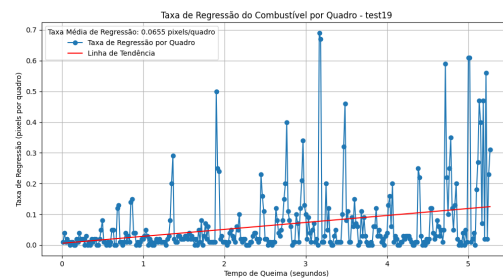


(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 53 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 16 do motor MOUETTE.

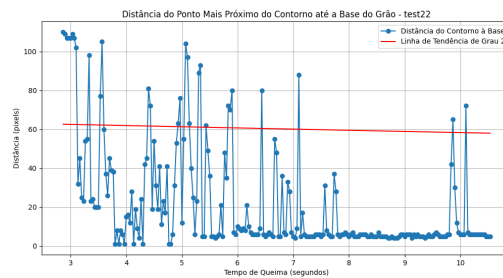


(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível

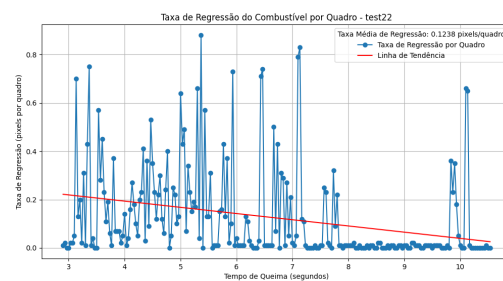


(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 54 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 19 do motor MOUETTE.



(a) Distância da base da chama para a base do grão combustível



(b) Taxa de regressão do combustível

Figura 55 – Distância da base da chama e taxa de regressão para Teste 22 do motor MOUETTE.

APÊNDICE C – Tabelas de Resultados dos Testes com o Motor MOUETTE

Tabela 17 – Dados de configuração do motor MOUETTE para cada teste.

Test #	Configuração do Propelente	Tempo de Queima t_b [s]	Densidade do Combustível [kg/m ³]	Densidade do Oxidante [kg/m ³]	Diâmetro da Garganta da Tubeira [m]	Orifício do GOx [mm]
1	GOx + Parafina pura	5,32	887,5	49,05	0,02	1,9
2	GOx + Parafina pura	5,31	887,5	48,22	0,02	1,9
3	GOx + Parafina pura	5,22	887,5	48,06	0,015	1,9
4	GOx + Parafina pura	5,18	887,5	48,01	0,015	1,9
5	GOx + Parafina pura	5,38	887,5	47,87	0,008	1,9
6	GOx + Parafina pura	5,28	887,5	47,83	0,008	1,9
7	GOx + Parafina pura	0,00	887,5	0,00	0,008	1,9
8	GOx + Parafina pura	5,56	887,5	48,30	0,008	1,9
9	GOx + Parafina pura	5,25	887,5	48,82	0,008	1,9
10	GOx + Parafina pura	0,00	887,5	0,00	0,008	1,9
11	GOx + Parafina pura	5,52	887,5	45,76	0,008	2,4
12	GOx + Parafina pura	5,61	887,5	45,86	0,008	2,4
13	GOx + Parafina - 10 % MgB2 (chem.)	5,41	948,3	45,32	0,008	2,4
14	GOx + Parafina - 10% MgB2 (ATM)	5,64	948,3	45,13	0,008	2,4
15	GOx + Parafina pura - step grain	5,46	887,5	45,00	0,008	2,4
16	GOx + Parafina - 10% MgB2 (chem.)	5,58	948,3	46,88	0,008	2,4
17	GOx + Parafina - 5% MgB2 (chem.)	5,64	918,4	45,91	0,008	2,4
18	GOx + Parafina pura - 5% MgB2 (chem.)	5,54	918,4	45,73	0,008	2,4
19	GOx + Parafina pura	5,46	887,5	44,79	0,008	2,7
20	GOx + Parafina pura	5,56	887,5	42,12	0,008	2,7
21	GOx + Parafina pura	7,30	887,5	43,04	0,008	2,7
22	GOx + Parafina pura	7,24	887,5	42,74	0,008	2,7

Tabela 18 – Dados de pressão do motor MOUETTE para cada teste.

Test #	Pressão no Tanque P_1 [bar]	Pressão Antes do Orifício P_2 [bar]	Pressão Depois do Orifício P_3 [bar]	Pressão na Entrada do Motor P_4 [bar]	Pressão na Câmara P_c [bar]
1	37,46	37,43	1,68	1,77	0,11
2	36,54	36,42	1,59	1,70	0,09
3	36,65	36,62	1,61	1,71	0,34
4	36,64	36,61	2,33	2,31	1,91
5	36,54	36,51	3,95	3,69	3,05
6	36,50	36,48	4,14	3,82	3,20
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	36,84	36,83	3,66	3,42	2,75
9	37,22	37,22	3,67	3,42	2,88
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	34,92	34,83	3,79	2,18	2,23
12	34,86	34,71	3,73	2,35	2,28
13	34,62	34,53	3,96	2,42	2,52
14	34,58	34,46	3,40	1,73	1,78
15	34,45	34,36	3,91	2,38	2,48
16	35,87	35,77	4,03	3,75	2,49
17	35,15	35,04	4,01	2,46	2,57
18	35,00	34,90	2,08	2,00	2,04
19	33,67	33,42	4,98	4,53	2,96
20	33,46	33,21	6,52	5,84	4,76
21	33,12	32,89	7,94	7,03	6,23
22	32,89	32,67	8,32	7,36	6,58

Tabela 19 – Dados de massa do motor MOUETTE para cada teste.

Test #	Taxa de Vazão Mássica do Oxidante \dot{m}_{ox} [kg/s]	Massa Inicial Propelente [g]	Massa Final Propelente [g]	Taxa de Vazão Mássica do Propelente \dot{m}_f [g/s]	Razão Oxidante- Propelente O/F
1	0,05	102,91	92,44	1,97	27,7
2	0,05	93,59	88,22	1,01	52,5
3	0,05	99,56	92,28	1,40	38,3
4	0,05	98,03	86,95	2,14	25,0
5	0,05	102,70	94,10	1,60	33,3
6	0,05	107,50	102,41	0,96	55,3
7	0,00	105,91	97,04	0,00	0,00
8	0,05	91,76	84,74	1,26	42,6
9	0,05	109,15	96,99	2,32	23,5
10	0,00	106,68	98,42	0,00	0,00
11	0,08	63,36	57,60	1,04	77,8
12	0,08	70,55	62,25	1,48	54,7
13	0,05	72,93	67,61	0,98	49,1
14	0,08	39,57	39,59	0,00	0,00
15	0,01	82,67	1,00	14,96	0,5
16	0,08	74,26	67,90	1,14	73,2
17	0,08	76,78	68,80	1,42	57,7
18	0,08	53,93	48,90	0,91	89,6
19	0,10	0,00	58,70	0,00	0,00
20	0,10	0,00	42,00	0,00	0,00
21	0,10	0,00	70,10	0,00	0,00
22	0,10	0,00	65,40	0,00	0,00

Tabela 20 – Dados de performance do motor MOUETTE para cada teste.

Test #	Velocidade Característica Teórica c_{teo}^*	Velocidade Característica Experimental c_{exp}^*	Eficiência η^*	Taxa de Regressão \dot{r} [mm/s]
1	732,63	62,94	0,09	0,57
2	732,84	51,63	0,07	0,29
3	732,88	108,53	0,15	0,40
4	732,90	607,40	0,83	0,61
5	732,93	279,47	0,38	0,46
6	732,94	297,05	0,41	0,28
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	732,82	250,81	0,34	0,36
9	732,69	255,91	0,35	0,67
10	0,00	0,00	0,00	0,00
11	733,45	136,46	0,19	0,30
12	733,44	139,19	0,19	0,43
13	733,57	256,69	0,35	0,26
14	733,62	111,28	0,15	0,00
15	733,66	544,77	0,74	4,30
16	733,17	148,16	0,20	0,31
17	733,42	155,74	0,21	0,39
18	733,47	124,71	0,17	0,25
19	733,71	169,13	0,23	0,00
20	734,40	264,36	0,36	0,00
21	734,16	357,69	0,49	0,00
22	734,24	377,96	0,51	0,00