

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

PAULL CRISTHIANN ACOSTA MENDOZA

ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DO ATRASO DE IGNIÇÃO DE UMA MISTURA
HIPERGÓLICA DE ETANOL E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO (60%) PROMOVIDA
POR BORO-HIDRETO DE SÓDIO

Joinville
2020

PAULL CRISTHIANN ACOSTA MENDOZA

ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DO ATRASO DE IGNIÇÃO DE UMA MISTURA
HIPERGÓLICA DE ETANOL E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO (60%) PROMOVIDA
POR BORO-HIDRETO DE SÓDIO

Trabalho apresentado como requisito
para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Aeroespacial do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Rafael de Camargo Catapan

Joinville
2020

PAULL CRISTHIANN ACOSTA MENDOZA

ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DO ATRASO DE IGNIÇÃO DE UMA MISTURA
HIPERGÓLICA DE ETANOL E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO (60%) PROMOVIDA
POR BORO-HIDRETO DE SÓDIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 04 de mês de 2020.

Banca Examinadora:

Orientador: Dr. Rafael de Camargo Catapan
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Diogo Nardelli Siebert
Membro(a)
UFSC/Joinville

Prof. Dr. Juan Pablo Salazar
Membro(a)
UFSC/Joinville

Dedico este trabalho ao meus pais. São e sempre serão os maiores pilares da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio e motivação dos meus pais, amigos e professores que tive ao longo da graduação. Agradeço especialmente ao meu orientador Rafael de Camargo Catapan pela oportunidade de trabalhar nesta área de pesquisa, ao LAC pelo carinho, acolhimento e conhecimento e ao professor Jorge Luiz Goes Oliveira por proporcionar a câmera de alta velocidade utilizada no trabalho.

RESUMO

Os combustíveis hipergólicos são amplamente utilizados no setor espacial em sistemas de micropropulsão devido à combustão espontânea dos reagentes após o contato entre si. O seu rendimento é avaliado mediante o impulso específico e o atraso de ignição, este último é usualmente calculado pelo teste de gota. No entanto, a avaliação do atraso de ignição é realizado pela análise visual do teste de gota, podendo ocasionar imprecisões quando utilizada uma câmera com baixa taxa de aquisição. Neste contexto, um algoritmo foi desenvolvido em Python, utilizando a biblioteca de imagem Open CV, o qual retornou um atraso de ignição com erro médio de 8,49 ms. Em adição, realizaram-se testes em um bipropelente etanol/peróxido de hidrogênio (60%) promovido por boro-hidreto de sódio resultando em uma faixa de valores de atraso de ignição de 13,22 ms até 51,09 ms. Estes valores estão dentro do pesquisado para outros pares hipergólicos que utilizam H_2O_2 em alta concentração como oxidante.

Palavras-chave: Atraso de ignição. Teste de gota. Open CV Python.

ABSTRACT

Hypergolic fuels are widely used in the space sector in micropropulsion systems due to the spontaneous combustion of the reagents after contact with each other. Its performance is evaluated by means of the specific impulse and the ignition delay, the latter is usually calculated by the drop test. However, the evaluation of the ignition delay is performed by visual analysis of the drop test, which can cause inaccuracies when using a camera with a low acquisition rate. In this context, an algorithm was developed in Python, using the Open CV image library, which returned an ignition delay with an average error of 8.49 ms. In addition, tests were performed on an ethanol/hydrogen peroxide bipropellant (60%) promoted by sodium borohydride resulting in a range of ignition delay values from 13.22 ms to 51.09 ms. These values are within the research for other hypergolic pairs that use H_2O_2 in high concentration as an oxidizer.

Keywords: Ignition delay. Drop test. Open CV Python.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Sequência de imagens da ignição da mistura 25% NaBH₄ e 75% Polietileno (em estado sólido) com 90% H₂O₂ (gota). Atraso de ignição da sequência de 3 ms definido como o tempo da imagem de impacto até a imagem da ignição. A gravação foi realizada por uma câmera de 1000 fps (imagens de 1 ms) e a contagem das imagens foi realizada visualmente. Média do atraso de ignição para o par de 9,5 ms e desvio padrão de 1,04 ms. 16
- Figura 2 – Sequência de imagens da ignição da mistura combustível e catalisador (definido como *fuel 2*) em estado líquido com 95% H₂O₂ (gota). A gravação foi realizada por uma câmera de 1000 fps (imagens de 1 ms) e a contagem das imagens foi realizada visualmente. Média do atraso de ignição para o par de 92 ms e desvio padrão de 8,5 ms. 17
- Figura 3 – Representação da bancada experimental para realização dos testes de gota. 20
- Figura 4 – Diagrama de elaboração e validação do programa. 24
- Figura 5 – a) Sequência de imagens do teste 14 e b) imagem diferença calculada a partir das imagens do item a). O formato da gota em b) está levemente deformada devido à tentativa de tornar a gota mais perceptível no trabalho. 26
- Figura 6 – Sequência de 3 imagens do teste 13, onde a imagem n+2 será definida como o ponto de ignição pelo critério de cor escolhido. Critério de cor: B<120 e (G e R)>235. 27
- Figura 7 – Imagens em sequência para o teste 14 até o tempo = 0 ms onde há o contato entre reagentes e após um conjunto de imagens temos a autoignição da mistura em t = 40,15 ms. 30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Misturas hipergólicas	18
Quadro 2 – Combinações de critérios avaliados.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erro médio por combinação para cada teste.	31
Tabela 2 – Erro médio para a combinação 3 com filtro de intensidades para o contato entre os reagentes e sem filtro.	32
Tabela 3 – Dados da literatura sobre atraso de ignição em pares hipergólicos .	33
Tabela 4 – Tabela dos testes realizados	39
Tabela 5 – Tabela dos testes realizados (continuação).	40

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2O_2	Peróxido de hidrogênio
$NaBH_4$	Boro-hidreto de sódio
C_2H_5OH	Etanol
H_2O	Água
O_2	Oxigênio
NTO	Tetróxido de nitrogênio
MMH	Mono-metil hidrazina
$NaBO_2$	Metaborato de sódio
CO_2	Dióxido de carbono
AI_m	Atraso de ignição medido
AI_c	Atraso de ignição calculado
N	Número de testes
fps	Imagens/quadros por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Ignição	15
2.2	Par propelente hipergólico	15
2.3	Atraso de ignição	15
2.4	Reagentes	17
2.4.1	Etanol	17
2.4.2	Boro-hidreto de sódio	17
2.4.3	Peróxido de hidrogênio	17
2.4.4	Reação do C_2H_5OH e H_2O_2 promovido por $NaBH_4$	18
3	METODOLOGIA	20
3.1	Aparato experimental	20
3.2	Procedimento experimental	20
3.2.1	Preparação dos propelentes	20
3.2.1.1	Modelo 1	21
3.2.1.2	Modelo 2	21
3.2.2	Configurações de vídeo	21
3.2.3	Teste de gota	22
3.2.4	Gravações	22
4	PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM	23
4.1	Reenquadramento de imagem	24
4.2	Deteção de início de movimento	25
4.3	Deteção do contato entre reagentes	25
4.3.1	Tempo de contato dos reagentes	26
4.4	Deteção da autoignição	27
4.4.1	Critério de cor	27
4.4.2	Critério de máximo global	27
4.4.3	Tempo da ignição	28
4.5	Atraso de ignição e validação	28
5	RESULTADOS	29

6	COMPARAÇÃO COM A LITERATURA	33
7	CONCLUSÕES	35
8	TRABALHOS FUTUROS	36
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICE A	39

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de propulsão química em foguetes utilizaram propelentes hipergólicos, para obterem o empuxo, em missões como Apollo 7 ou Apollo- Soyuz (NUFER, 2009). Tetróxido de nitrogênio (NTO), em conjunto com hidrazina e derivados, são as combinações tradicionais de combustíveis hipergólicos usados para controle de atitude, mudanças de curso, retrocessos de pouso, missões interplanetárias automáticas e propulsão em satélites em geral (MELOF; GRUBELICH, 2001). Porém, recentes requisitos de projeto envolvendo segurança, custo e toxicidade ao meio ambiente impulsionaram novas pesquisas nesse tipo de sistema.

Existem muitas vantagens no uso deste par tal como ignição rápida e espontânea ao contato mesmo em baixas temperaturas (NUFER, 2009), permitindo prescindir no projeto de um sistema elétrico de faísca ou adição de calor. Segundo Melof e Grubelich, o uso deste par também possui um bom rendimento, baixo ponto de congelamento e armazenamento. Porém, nos sistemas de propulsão modernos requisitos de toxicidade do par, estocabilidade, densidade, custo, maneabilidade e compatibilidade se tornam cada vez mais uma prioridade. O NTO possui uma alta pressão de vapor e é altamente corrosivo, tanto para o foguete como para o corpo humano. A hidrazina é corrosiva, reativa e muito tóxica, e a maioria dos compostos da hidrazina são também cancerígenos (SR, 2008).

Estudos foram realizados em busca de um sistema menos nocivo, entre os quais se encontram bipropelentes que têm como oxidante o peróxido de hidrogênio altamente concentrado, um líquido de alta densidade que se decompõe exotermicamente em vapor de água e oxigênio. Adicionalmente, tal oxidante apresenta compatibilidade com o meio ambiente (*environmentally safe*) e apresenta uma facilidade maior de trabalhar em relação ao NTO (WERNIMONT; HEISTER, 2000) (SALEM; EL-MAAZAWI; ZAKI, 2000).

Trabalhos como o realizado por Frolik et al. (2000) utilizaram alcoóis como combustíveis para este oxidante devido ao preço acessível, estocabilidade, baixo ponto de congelamento, bom rendimento e não toxicidade em comparação com a hidrazina e derivados (SR, 2008). Porém, a hipergolicidade da reação pode ser alcançada unicamente com a adição de um catalisador ou promotor o qual pode estar em suspensão em algum dos compostos que formam o par ou compor uma cama catalítica.

Neste contexto, sistemas hipergólicos baseados em etanol e peróxido de hidrogênio possuem algumas vantagens em relação às misturas que utilizam derivados da hidrazina como combustível, por possuir alta densidade, baixa pressão de vapor,

menor toxicidade, ser mais amigável com o meio ambiente e, para o Brasil, ter um custo mais acessível por ser um dos países líderes na elaboração de etanol.

O rendimento de um combustível hipergólico é quantificado segundo o impulso específico gerado e o atraso de ignição da mistura. O impulso específico se traduz no empuxo máximo que o propulsor pode gerar e o atraso de ignição consiste no tempo da combustão espontânea de um combustível desde o instante do contato entre os reagentes. Quanto menor o atraso de ignição, menor será a câmara de combustão que garanta a queima adequada, diminuindo o peso da estrutura, um parâmetro importante para veículos espaciais. Em relação a aplicações de controle, é importante manter baixo o atraso de ignição para tempos de resposta rápidos. Manobras que precisam ser realizadas em segundos definem um limite máximo de atraso de ignição, por exemplo, o veículo interceptor exoatmosférico de destruição (EKV) requer atrasos de ignição baixos devido à necessidade de alta manobrabilidade e controle (FROLIK et al., 2000).

Segundo (SLOCUM-WANG et al., 2006) (2000), o atraso na ignição é reconhecido como um critério importante na seleção de bipropelentes. É um dos parâmetros de engenharia mais importantes para o projeto do motor. Arranques difíceis ou *hard starts* são atribuídos a longos atrasos na ignição e podem causar um desmembramento do equipamento do propulsor. Atualmente o principal método utilizado para uma primeira análise do atraso do tempo de ignição em combustíveis hipergólicos é o teste de gota.

Este teste consiste usualmente em gotejar uma única gota de um dos reagentes que forma o par hipergólico sobre o outro. Este método requer bancadas experimentais custosas devido à utilização de câmeras de alta velocidade, além de outros equipamentos que auxiliam na redução de ruído nas gravações ou que garantam a integridade do equipamento. Entretanto, a determinação do instante que os reagentes entram em contato e o momento da autoignição é geralmente realizada de forma visual, podendo ocasionar erros na medida do atraso de ignição quando utilizadas câmeras com baixas taxas de aquisição de imagens.

Portanto, o objetivo deste trabalho será desenvolver um algoritmo de processamento de imagem em Python que permita a detecção automatizada do atraso de ignição em um teste de gota para redução de imprecisões através do estabelecimento de critérios claros.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar um algoritmo de determinação do atraso de ignição do par etanol/peróxido de hidrogênio promovido por boro-hidreto de sódio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter as condições na qual o par reage hipergolicamente com a adição de boro-hidreto de sódio;
- Realizar gravações com uma câmera de alta velocidade do teste de gota da reação;
- Desenvolver um algoritmo de processamento de imagem para a determinação do atraso de ignição da mistura;
- Comparar os resultados obtidos pelo par hipergólico com uma base de dados de atraso de ignição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos necessários para a compreensão de como ocorre a reação de etanol e peróxido de hidrogênio promovida pelo boro-hidreto de sódio.

2.1 IGNIÇÃO

Segundo Turns et al. (1996), a combustão é definida como a oxidação rápida de uma mistura gerando calor, luz, ou ambos. A combustão converte a energia armazenada em ligações químicas em energia térmica.

Este processo pode gerar uma propagação auto-sustentada em velocidades subsônicas de uma zona localizada, denominada de chama. Sendo que a ausência de chama visível não necessariamente significa a ausência de combustão.

Em adição, é necessário estabelecer o significado de autoignição como o ponto onde uma mistura de gases ignita espontaneamente sem uma fonte de energia externa e após alcançar a temperatura de autoignição. Esta última não é uma propriedade intrínseca dos gases mas consiste na menor temperatura, em um sistema, onde o calor gerado pelos gases supera o calor perdido para o ambiente resultando em ignição. Esta temperatura depende da pressão, volume e forma da câmara de combustão, atividade da superfície, contaminantes, fluxo de massa, taxa de reação, homogeneidade da mistura, gravidade e concentrações (MUSGRAVE; LARSEN; SGOBBA, 2009).

2.2 PAR PROPELENTE HIPERGÓLICO

Um par propelente hipergólico é aquele que sofre ignição espontânea quando combustível e oxidante entram em contato a determinada temperatura e pressão. Este par propelente se destaca por não precisar de um agente ignitor externo, como uma resistência ou uma faísca (CATOIRE; CHAUMEIX; PAILLARD, 2004).

A sua utilização facilita o projeto de sistemas de propulsão em foguetes para aplicações onde capacidades de tração variável e/ou intermitente são necessárias. As combinações bipropelentes usualmente utilizadas são derivados de hidrazina com tetróxido de nitrogênio ou com ácido nítrico fumegante branco (GAO et al., 2009).

2.3 ATRASO DE IGNIÇÃO

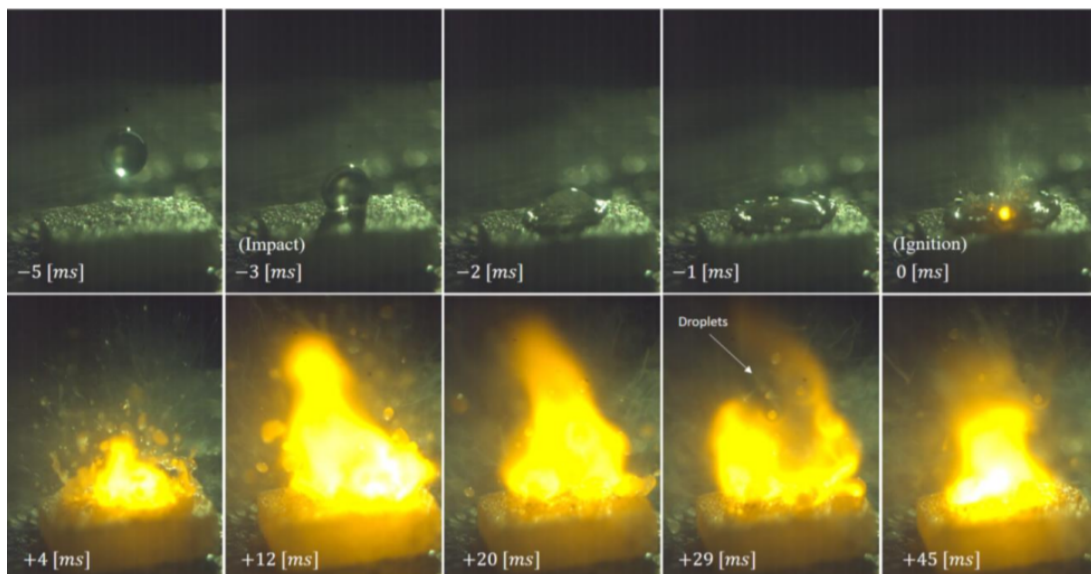
O atraso de ignição em um combustível hipergólico é definido como o tempo desde o contato dos reagentes até a ignição da mistura. Este atraso é controlado pela

formação de espécies químicas intermediárias as quais reagem entre si (TURNNS et al., 1996). É um dos parâmetros de maior importância no desenvolvimento de propelentes hipergólicos e crítico para o projeto do injetor e propulsor, onde o seu valor é um limitante para a aplicação do projeto em uma dada missão (BLEVINS; GOSTOWSKI; CHIANESE, 2004).

O método utilizado para determinar este atraso é o teste de gota, o qual consiste usualmente na captura de imagens em um vídeo de uma gota de oxidante em queda livre sobre um combustível, seja sólido (figura 1) ou líquido (figura 2), misturado com um catalisador (CASTANEDA; NATAN, 2019).

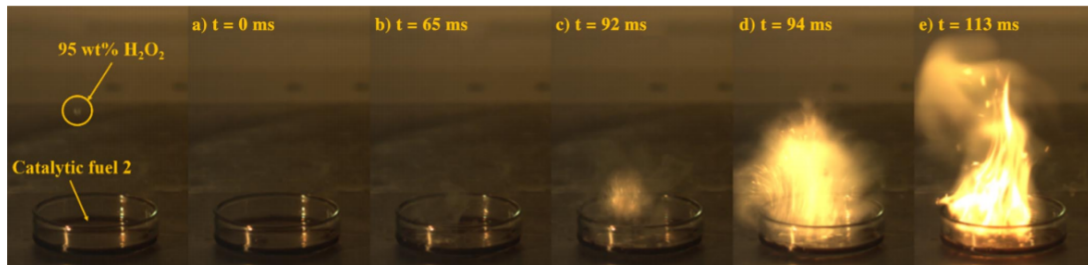
Neste contexto será apresentado na metodologia um tipo de teste de gota, necessário para a presença de chama visível, onde o par não reativo etanol e H_2O_2 formam uma gota em queda livre sobre uma massa sólida de $NaBH_4$.

Figura 1 – Sequência de imagens da ignição da mistura 25% $NaBH_4$ e 75% Polietileno (em estado sólido) com 90% H_2O_2 (gota). Atraso de ignição da sequência de 3 ms definido como o tempo da imagem de impacto até a imagem da ignição. A gravação foi realizada por uma câmera de 1000 fps (imagens de 1 ms) e a contagem das imagens foi realizada visualmente. Média do atraso de ignição para o par de 9,5 ms e desvio padrão de 1,04 ms.



Fonte: Castaneda e Natan (2019)

Figura 2 – Sequência de imagens da ignição da mistura combustível e catalisador (definido como *fuel 2*) em estado líquido com 95% H_2O_2 (gota). A gravação foi realizada por uma câmera de 1000 fps (imagens de 1 ms) e a contagem das imagens foi realizada visualmente. Média do atraso de ignição para o par de 92 ms e desvio padrão de 8,5 ms.



Fonte: Kang, Huh e Kwon (2017)

2.4 REAGENTES

2.4.1 Etanol

O etanol (C_2H_5OH) é um álcool obtido a partir de açúcares cuja produção e exportação no Brasil em 2006 chegou ao número de 3,2 bilhões de litros produzidos, sendo um dos maiores exportadores de etanol do mundo (NOEL, 2007).

A sua utilização em pares hipergólicos apresenta uma vantagem quanto ao preço, estocabilidade, baixo ponto de congelamento, bom rendimento e não toxicidade em comparação com a hidrazina e derivados (SR, 2008).

2.4.2 Boro-hidreto de sódio

O $NaBH_4$ é um metal hidreto que reage espontaneamente com o peróxido de hidrogênio. Para percentuais em massa maiores que 96% possui uma densidade de 1074 kg/m^3 , ponto de ignição de 70°C , ponto de ebulição de 500°C e a sua temperatura de autoignição é de 220°C . É utilizado como catalisador para a promoção de pares hipergólicos utilizando o H_2O_2 em alta pureza como oxidante, seja em conjunto de combustíveis líquidos a base de querosene (NATAN; PERTEGHELLA; SOLOMON, 2010) ou sólidos como o polietileno (CASTANEDA; NATAN, 2019).

2.4.3 Peróxido de hidrogênio

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é um líquido claro, incolor e não inflamável com propriedades similares à água. Foi amplamente utilizado durante o século XX como no torpedo Mk 16, no avião experimental X-15 e empregado no controle de atitude do projeto Mercury. Porém, com a demanda de propelentes com um impulso específico maior, como a hidrazina, o H_2O_2 foi perdendo espaço na área propulsiva.

Na última década, com o crescente interesse em reações não tóxicas e simples de manusear, o H_2O_2 torna-se novamente objeto de pesquisas e investimentos. O peróxido de hidrogênio se decompõe rapidamente com o auxílio de catalisadores ou promotores em vapor de água e oxigênio, segundo a reação demonstrada na Equação 1 (THOMAS, 2000).



2.4.4 Reação do C_2H_5OH e H_2O_2 promovido por $NaBH_4$

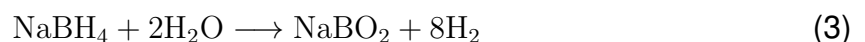
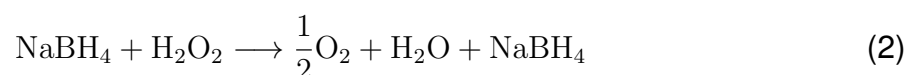
Alguns catalisadores que promovem, com a combinação de um combustível, o par hipergólico são mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Misturas hipergólicas

Combustível	Oxidante	Catalisador	Referência
Etanol	H_2O_2 (90%)	cloreto de cobre hidratado ou Acetil-acetonato de manganês (II)	Jyoti, Naseem e Baek (2017)
Etanol + Etanolamina	H_2O_2 (90%)	Cloreto de cobre ou Nitrato de cobre	Maschio (2018)
Polietileno	H_2O_2 (90%)	Boro-hidreto de sódio e Cloreto de ferro (III)	Castaneda e Natan (2019)
Querosene	H_2O_2 (90%)	Boro-hidreto de sódio	Natan, Perteghella e Solomon (2010)

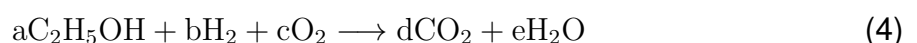
Fonte: autor(2020).

Ao detalhar as reações de decomposição do peróxido de hidrogênio promovido pelo boro-hidreto de sódio Reeve (2012) e Kim (2010) sugerem as seguintes reações.



Na reação 2 acontece a geração de energia para o sistema (processo exotérmico) e na reação 3 o promotor ($NaBH_4$) é consumido para a formação de meta-borato de sódio e hidrogênio.

A reação de combustão pode ser modelada como a reação entre o etanol, o hidrogênio gerado pela reação 2 e o oxigênio em alta temperatura produzindo os produtos básicos de combustão segundo a reação semi-global a seguir.



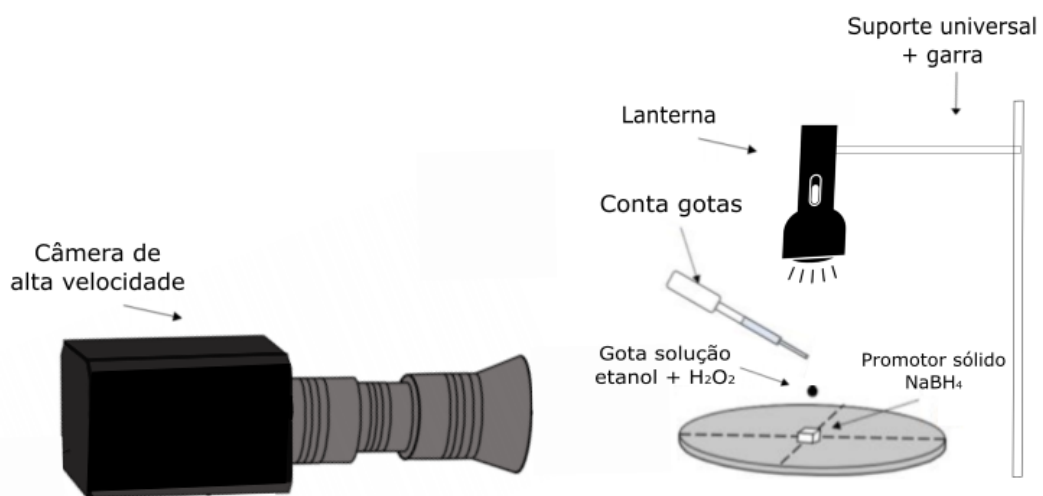
Portanto, o par etanol - peróxido de hidrogênio promovido pelo boro-hidreto de sódio torna-se hipergólico tal como é definido por Nufer (2009), é dizer, um conjunto que ignita rapidamente ao entrar em contato.

3 METODOLOGIA

Este capítulo abordará a metodologia experimental utilizada para determinar o atraso de ignição da reação proposta na introdução.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

Figura 3 – Representação da bancada experimental para realização dos testes de gota.



Fonte: autor(2020)

A bancada criada para a realização dos testes é representada na figura 3 (para o modelo 1) onde a câmera de alta velocidade (PCO Dimax HD) se encontra afastada da área experimental por motivos de segurança e o restante da bancada se encontra dentro de uma capela de exaustão de gases.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O atraso de ignição da mistura será avaliado através do teste de gota gravado pela câmera de alta velocidade. A seguir, as etapas do procedimento experimental são descritas.

3.2.1 Preparação dos propelentes

O procedimento de preparação dos propelentes dependerá do tipo de teste de gota, sendo este dividido em 2 modelos: gota de etanol mais H₂O₂(60%) gotejado sobre o promotor sólido ou o promotor diluído (sem sedimentação) em etanol e

gotejado no peróxido de hidrogênio, os quais definiremos como modelo 1 e modelo 2 respectivamente.

3.2.1.1 *Modelo 1*

No modelo 1, uma mistura combustível e oxidante (par líquido não reativo) em uma dada proporção em volume foi elaborada e a massa de boro-hidreto de sódio sólido foi medida. Os dados das medições e proporções estão no apêndice A. Após o preparo e medição, a solução foi depositada em um béquer, o promotor sólido foi depositado sobre um béquer ou placa de vidro e ambos foram levados para a capela de exaustão de gases para realização dos testes.

3.2.1.2 *Modelo 2*

Para o modelo 2 uma solução de etanol e boro-hidreto de sódio foi elaborada, garantindo que não haja sedimentação do promotor no combustível, e armazenada a baixas temperaturas em um béquer ou balão volumétrico com o objetivo de reduzir o meio reativo da solução. Em um béquer separado foi depositado uma certa quantidade de H_2O_2 e ambos foram levados para a capela de exaustão de gases para realização dos testes.

3.2.2 **Configurações de video**

A continuação e antes de começar o teste de gota serão realizadas as configurações de video como o a ampliação da imagem, as correções de posição da câmera, o grau de fechamento do diafragma da câmera e a velocidade do obturador.

A ampliação digital da imagem consiste em um processamento da imagem em um software interno, que simula a aproximação. Portanto, é uma ampliação da imagem e não uma aproximação, podendo resultar em uma perda da definição da imagem.

O diafragma é a pupila da câmera, é quem controla a profundidade de campo e também a quantidade de luz que vai passar pelo obturador. Com o diafragma mais fechado, menos luz entra e a imagem fica mais escura e vice-versa.

O velocidade do obturador é o período de exposição ou intervalo de tempo que o sensor de uma câmera digital é exposto à luz para registrar uma imagem. No caso de um curto tempo de exposição inferior a $1/5000$ s, fala-se em fotografia de curta duração. Por tempos superiores a 5 s, refere-se à exposição de longa duração. Tempos de exposição mais longos são necessários especialmente para gravações noturnas e gravações de objetos microscópicos. No entanto, no caso de objetos em movimento, tempos de exposição muito longos podem levar a imagens difusas.

O conjunto destas configurações define a taxa de aquisição de imagens da câmera utilizada. Devido à limitação de intensidade máxima da câmera, definida

como o limite de intensidade luminosa ao qual pode estar submetido o sensor da câmera, as taxas de aquisição não foram superiores a 378 fps, limitando a precisão do equipamento utilizado neste trabalho.

Durante a gravação do teste de gota foi utilizada unicamente uma iluminação vertical de corrente contínua (lanterna) para minimizar os ruídos (figura 3). Posições horizontais da lanterna em direção à câmera resultaram em intensidades máximas na imagem, sendo descartadas como opção experimental.

3.2.3 Teste de gota

O experimento consistiu em retirar uma quantidade de líquido da solução elaborada com uma pipeta de Pasteur e soltar uma gota sobre o promotor sólido no modelo 1 ou sobre o H_2O_2 líquido, no modelo 2. O gotejamento foi realizado a 12 cm de altura do recipiente e definido de forma visual.

O surgimento de chama como resultado do teste de gota varia dependendo das proporções de combustível e oxidante compondo a gota e do modelo de teste de gota realizado. Aqueles testes onde não foi comprovada visualmente a presença de chama foram descartados.

Apenas aqueles testes que seguiram o modelo 1 (gota etanol mais H_2O_2 (60%) sobre o promotor sólido) apresentaram presença de chama após contato, logo, apenas estes testes serão analisados e definiram os critérios de elaboração do algoritmo discutido na capítulo seguinte.

3.2.4 Gravações

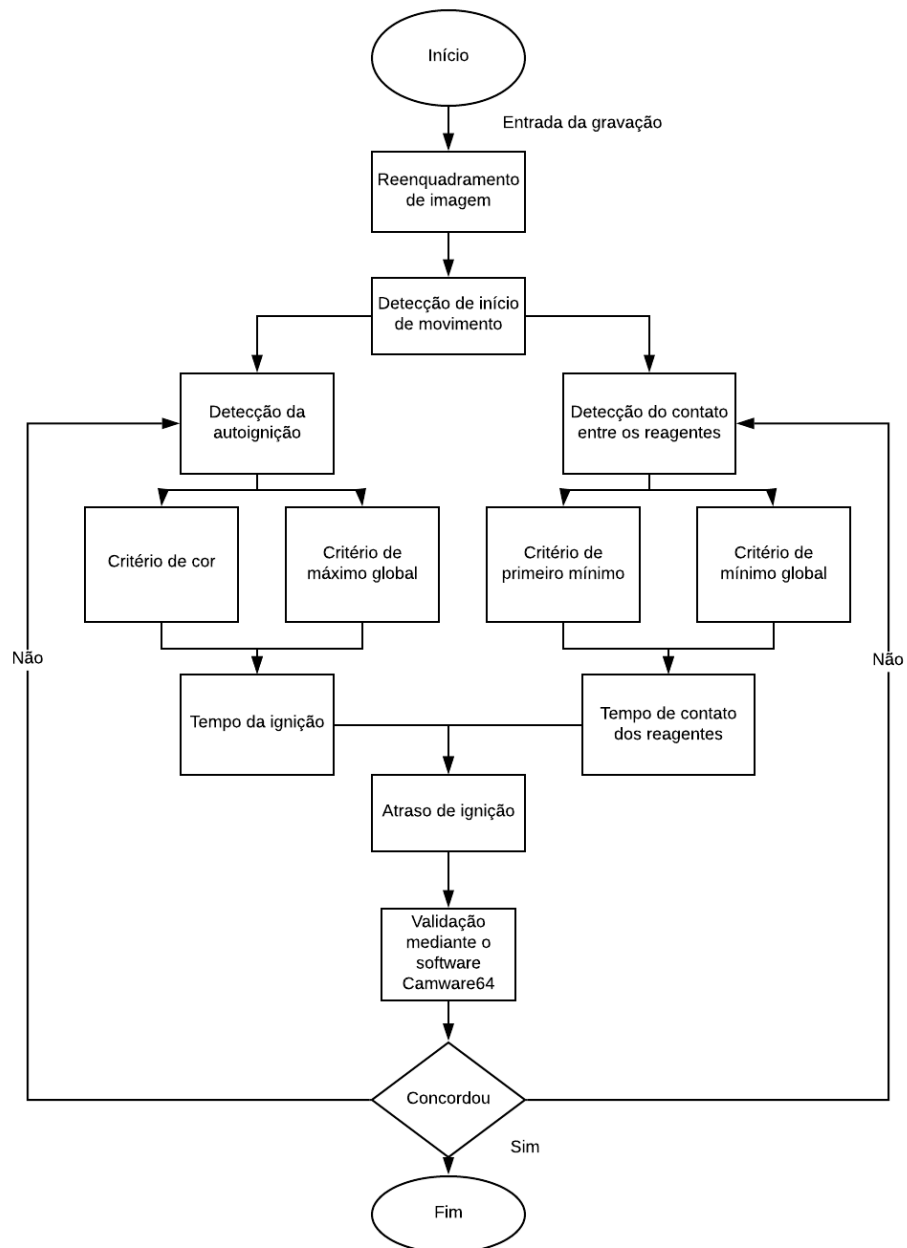
Um total de 22 gravações foram realizadas, 9 foram gravações preliminares e 13 gravações experimentais. Destas últimas apenas 6 deram resultados aceitáveis no programa desenvolvido devido a uma primeira parte do projeto que consistiu em realizar testes de gravação variando o tipo de iluminação ambiente, grau de fechamento do diafragma da câmera e tempo de exposição de cada imagem com o intuito de aumentar a taxa de aquisição de imagens por segundo sem que prejudicasse a câmera utilizada. Logo, houve uma grande maioria das gravações onde o ruído ou as condições de filmagem não permitiram a sua análise pelo código proposto (ver Apêndice A).

4 PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Neste capítulo será apresentada a abordagem utilizada na elaboração do algoritmo para determinar o atraso de ignição do par propelente proposto. O programa foi desenvolvido em Python 3.7, utilizando as bibliotecas Open CV, Numpy e Matplotlib.

A figura 4 apresenta um fluxograma de operação do algoritmo desenvolvido, evidenciando as principais etapas. Onde a entrada da gravação consiste em um conjunto de 85 ± 40 imagens em formato JPG, com resolução de 1920 X 1080.

Figura 4 – Diagrama de elaboração e validação do programa.



Fonte: autor(2020)

4.1 REENQUADRAMENTO DE IMAGEM

A etapa inicial de recorte consiste em eliminar as regiões da captura onde não há interesse como áreas adjacentes ao próprio experimento ou legendas impostas no vídeo pelo próprio software de gravação da câmera.

4.2 DETECÇÃO DE INÍCIO DE MOVIMENTO

A seguir é realizada a detecção de início de movimento que consiste na análise da movimentação da gota em queda livre, indicando a partir de qual imagem o programa iniciará a avaliação dos critérios de chama e reconhecimento da gota.

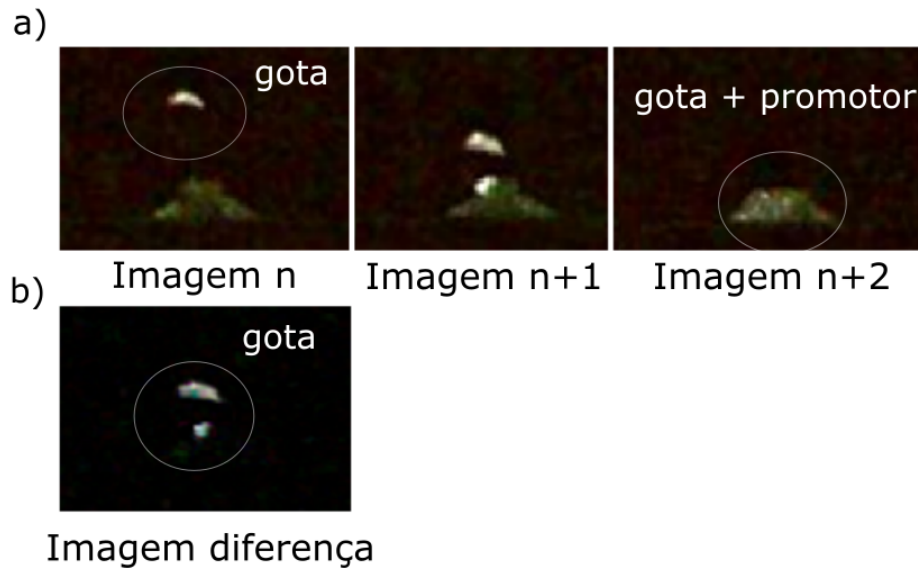
Ambos procedimentos influenciam os resultados obtidos e foram escolhidos com precaução. Exemplos da influência do reenquadramento e detecção de início de movimento serão discutidos nas seções seguintes.

4.3 DETECÇÃO DO CONTATO ENTRE REAGENTES

Esta etapa consiste em determinar a imagem de contato entre os reagentes. Para tanto, foi utilizado o conceito de diferença entre imagens ou imagem das diferenças. A diferença entre imagens consiste na subtração dos valores entre 3 imagens sucessivas, destacando portanto as alterações que ocorrem em relação à imagem anterior. A figura 5 a) mostra 3 imagens em sequência do teste 14 onde uma gota está em queda livre e a figura 5 b) a sua diferença calculada, onde o ruído é atenuado e apenas obtém-se a gota em movimento como resultado. O objetivo é obter a imagem onde a gota finaliza o movimento de queda livre caracterizando o instante de contato entre os reagentes. Em geral, a imagem das diferenças não possui um valor nulo devido ao ruído nas gravações, dificultando a detecção da imagem de contato entre reagentes.

Desta forma, foram propostos dois critérios para a identificação da imagem de contato entre os reagentes, os critérios de primeiro mínimo e de mínimo global.

Figura 5 – a) Sequência de imagens do teste 14 e b) imagem diferença calculada a partir das imagens do item a). O formato da gota em b) está levemente deformada devido à tentativa de tornar a gota mais perceptível no trabalho.



Fonte: autor(2020)

O critério de primeiro mínimo consiste no primeiro mínimo da intensidade média das diferenças, é dizer, qual é a imagem onde a intensidade média das diferenças alcança um mínimo local. Já o mínimo global é obtido pela imagem onde a intensidade média das diferenças alcança o seu valor mínimo para toda a gravação.

4.3.1 Tempo de contato dos reagentes

Ambos critérios mencionados anteriormente são influenciados pela definição inicial do movimento, devido a que nas imagens iniciais de todos os testes existe uma ausência de movimento pelo fato da gota ainda não ter começado a se movimentar.

De forma complementar para a utilização de ambos critérios pode ser utilizado um filtro de intensidades na diferença com o objetivo de aproximar o instante de ausência de movimento para um valor nulo. Este filtro de intensidades resume-se em definir uma intensidade limite, por tanto, todo pixel que possuir uma intensidade menor a este limite será definido como 0 e todo pixel que possuir uma intensidade maior que este limite será definido para um valor máximo.

O tempo de contato dos reagentes pode variar dependendo do critério utilizado. Na seção de resultados foram criadas combinações dos critérios e foi avaliado o erro médio resultante.

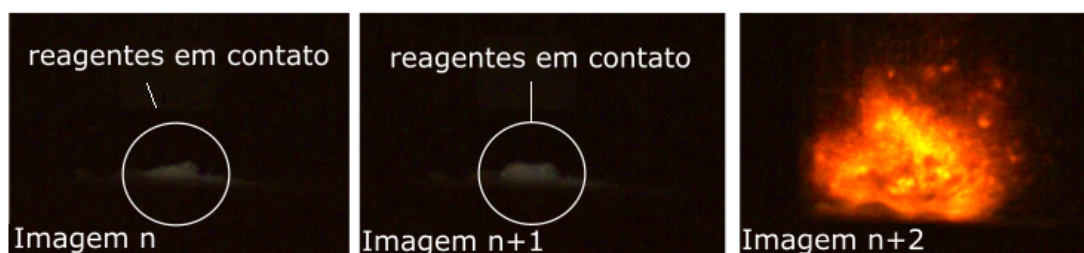
4.4 DETECÇÃO DA AUTOIGNIÇÃO

Esta etapa consiste em determinar qual imagem define o momento da autoignição da mistura. Para isso, o critério de cor e o critério de máximo global são avaliados conforme a descrição a seguir.

4.4.1 Critério de cor

Em uma imagem composta por uma matriz de pixels, definidos como a menor unidade que compõe uma imagem, pode-se representar qualquer coloração existente em uma dada região pela combinação das tonalidades de vermelho (R), verde (G) e azul (B) associadas a cada pixel. Na biblioteca Open CV, cada uma delas pode possuir valores entre 0 e 255, definindo assim a coloração de um pixel. Segundo Conkling e Mocella (1985) a coloração da luz emitida durante a ignição da mistura depende dos elementos que compõem as chamas de difusão, típicas das encontradas em combustão de líquidos tendem a ter coloração alaranjada devido a formação de fuligem. Logo, para determinar o início do processo de combustão, foi proposto um critério de cor alaranjada dentro de um intervalo de valores RGB ($B < 120$, $G > 235$ e $R > 235$). A execução deste critério consiste na análise de uma sequência de imagens onde pelo menos 1 pixel que compõe a imagem atinja este critério. Na figura 5, as imagens n e $n+1$ apresentam a união dos reagentes participantes e formam parte das imagens do atraso de ignição e a imagem $n+2$ é o instante da autoignição da mistura.

Figura 6 – Sequência de 3 imagens do teste 13, onde a imagem $n+2$ será definida como o ponto de ignição pelo critério de cor escolhido. Critério de cor: $B < 120$ e $(G \text{ e } R) > 235$.



Fonte: autor(2020)

4.4.2 Critério de máximo global

A intensidade média de cada imagem consiste na realização de duas médias aritméticas, uma primeira realizada sobre os valores da escala RGB de um único pixel e uma segunda média calculada sobre a primeira para todos os pixels que constituem o imagem.

Neste contexto, o critério de máximo global consiste na imagem da gravação onde a intensidade média alcança o valor máximo. O resultado do critério de máximo global pode gerar erros significativos dependendo do reenquadramento realizado na gravação, na qual pode existir pontos de máxima intensidade média devido a reflexão da iluminação vertical no conta gotas ou mesmo devido à existência de legendas impostas ao vídeo pelo software de gravação da câmera. Porém, em algumas gravações, a sua utilização resultou em um tempo para a imagem de autoignição mais próximo do observado visualmente em comparação com o critério de cor e para um mesmo reenquadramento.

4.4.3 Tempo da ignição

Ambos critérios podem resultar em um mesmo tempo de ignição ou podem diferir. Na seção de resultados foram criadas combinações dos critérios e foi avaliado o erro médio resultante.

4.5 ATRASO DE IGNIÇÃO E VALIDAÇÃO

O valor do atraso de ignição é calculado pela diferença entre a imagem de ignição da mistura e a imagem do contato entre os reagentes, em função da taxa de aquisição de imagens de cada gravação.

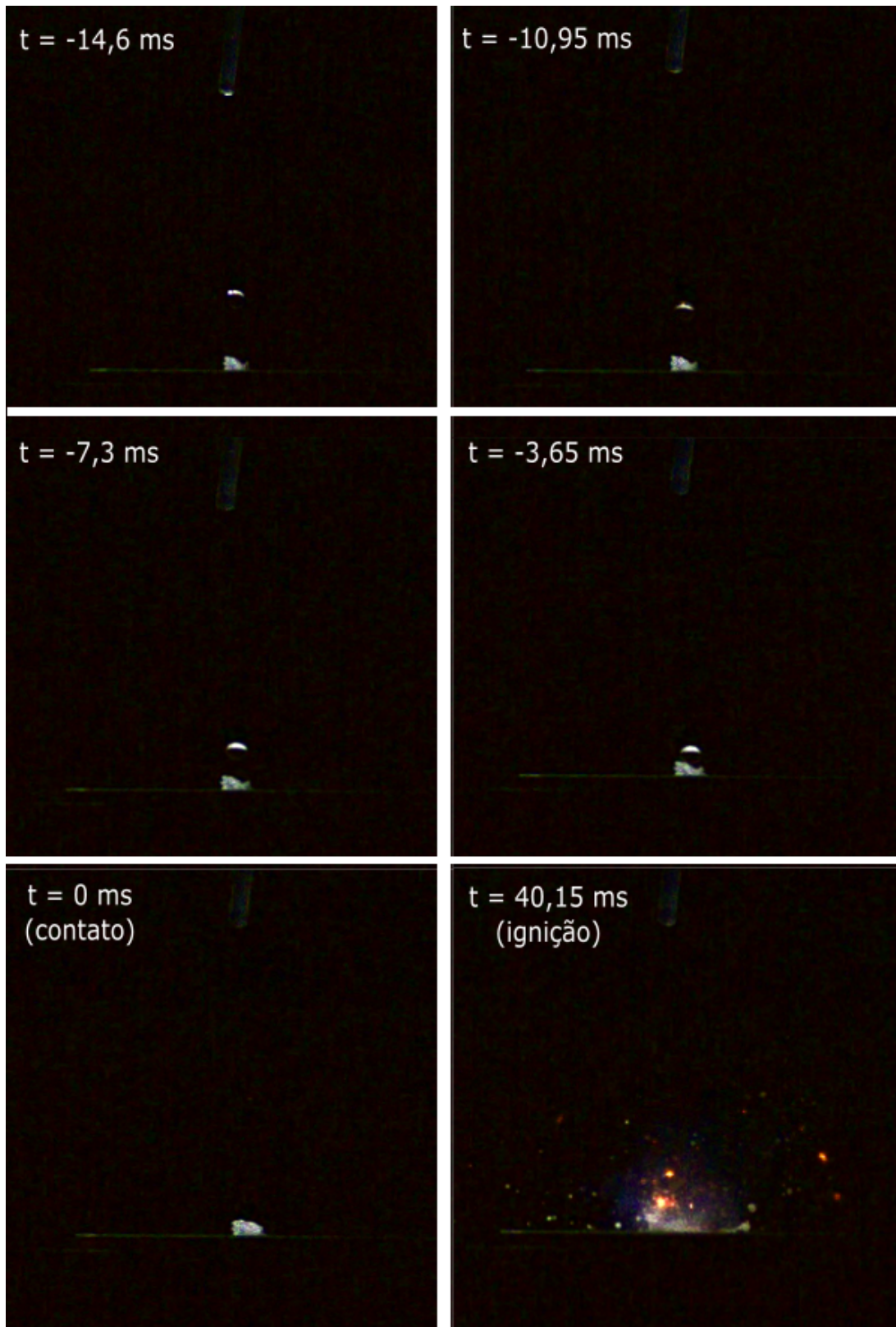
A validação do resultado obtido pelo código é realizado mediante o software Camware64, software da empresa PCO AG, o qual permite a análise visual do experimento e utiliza uma série de conversores de cor para facilitar a observação do tempo de contato dos reagentes e da autoignição da mistura.

O algoritmo desenvolvido pode ser consultado em: <https://github.com/lac-ufsc>

5 RESULTADOS

A figura 7 mostra uma sequência resumida do teste 14, a partir do qual observa-se a queda livre da gota até o instante de contato definido na figura como tempo = 0 ms e a imagem do momento de autoignição da mistura, definido visualmente pelo software.

Figura 7 – Imagens em sequência para o teste 14 até o tempo = 0 ms onde há o contato entre reagentes e após um conjunto de imagens temos a autoignição da mistura em $t = 40,15$ ms.



Fonte: autor(2020)

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados de 6 gravações de teste de gota da reação de etanol e peróxido de hidrogênio promovida pelo boro-hidreto de sódio. Para analisar a influência dos critérios propostos, tanto de detecção de contato entre os reagentes quanto de autoignição do par foram realizadas 4 combinações entre os critérios, conforme descrito no quadro 2.

Quadro 2 – Combinações de critérios avaliados.

Combinação	Detecção do contato entre os reagentes	Detecção da autoignição
1	Critério de primeiro mínimo	Critério de cor
2	Critério de mínimo global	Critério de cor
3	Critério de primeiro mínimo	Critério de máximo global
4	Critério de mínimo global	Critério de máximo global

Fonte: autor(2020).

Na tabela 1, para cada uma das combinações criadas, foi calculado o atraso de ignição resultante (AI_c) e avaliado o erro médio em função do atraso de ignição medido visualmente pelo software (AI_m). A equação 5 descreve o cálculo do erro médio, onde N representa o número de testes nos quais foi obtido um valor para o atraso de ignição.

$$\text{Erro médio} = \sum_{i=1}^N \frac{|AI_m - AI_c|}{N} \quad (5)$$

Tabela 1 – Erro médio por combinação para cada teste.

Teste	AI_m [ms]	AI_c para a Comb. 1 [ms]	AI_c para a Comb. 2 [ms]	AI_c para a Comb. 3 [ms]	AI_c para a Comb. 4 [ms]
13	36,49	-	-	43,8	270,07
14	40,15	36,5	36,5	36,5	36,5
15	32,85	65,70	47,44	54,74	36,5
16	13,22	23,81	23,81	15,87	15,87
18	51,09	32,85	-	43,8	-
21	40,65	32,52	32,52	32,52	32,52
Erro Médio		14,70	9,24	8,49	50,33

Fonte: autor(2020).

Como a combinação 3 possui o menor erro médio, será escolhida para continuar com a avaliação do algoritmo. Por tanto, o algoritmo final utilizará na detecção do contato entre reagentes o critério de primeiro mínimo e na detecção de chama o critério de máximo global.

Em adição, os resultados obtidos pelo combinação 3 foram recalculados

na tabela 2 aplicando um filtro de intensidades para o cálculo das diferenças na detecção do contato entre os reagentes. O filtro utilizado atribui o valor de 0 para aqueles pixels que possuem uma intensidade média menor que 35 e 255 caso contrário. Ao realizar o teste com filtro, o erro percentual do atraso de ignição em relação ao medido visualmente pelo software para o teste 15 foi menor. Porém, a sua aplicação levou a maiores erros percentuais nos resultados obtidos nas outras gravações. Logo, avaliando o erro médio do atraso de ignição, para a combinação 3 com filtro e sem filtro, a combinação 3 sem aplicação de filtro torna-se a melhor opção.

Tabela 2 – Erro médio para a combinação 3 com filtro de intensidades para o contato entre os reagentes e sem filtro.

Teste	AI_m [ms]	AI_c para a Comb. 3 sem filtro [ms]	Erro percentual para a Comb. 3 sem filtro [%]	AI_c para a Comb. 3 com filtro [ms]	Erro percentual para a Comb. 3 com filtro [%]
13	36,49	43,8	20,03	54,74	50,01
14	40,15	36,5	9,10	65,69	63,61
15	32,85	54,74	66,64	47,44	44,41
16	13,22	15,87	20,04	34,39	160,14
18	51,09	43,80	14,27	65,69	28,60
21	40,65	32,52	20,00	28,46	30,00
Erro Médio		8,49		17,72	

Fonte: autor(2020).

6 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Neste trabalho foi utilizado como oxidante o H_2O_2 (60%) devido à impossibilidade de utilizar um concentrador de H_2O_2 no laboratório. Neste contexto, foi um desafio encontrar literatura científica sobre pares hipergólicos que se aproximasse em questão de pureza e conjunto aos testes realizados, etanol em mistura com H_2O_2 (60%) e $NaBH_4$. Portanto, a comparação foi realizada em função dos estudos de atraso de ignição por teste de gota de misturas hipergólicas que utilizam como oxidante o H_2O_2 concentrado, onde a faixa de valores de atraso de ignição medidos visualmente pelo software de 13,22 ms até 51,09 ms se encontra dentro da faixa de valores observada pelos autores mencionados na tabela 3, cuja faixa de valores de atraso de ignição varia de 8 μs até 307 ms. A continuação é realizado um breve resumo do trabalho realizado por cada autor.

Tabela 3 – Dados da literatura sobre atraso de ignição em pares hipergólicos

Combustível	Oxidante	Catalisador/Promotor	Atraso de ignição	Referência
Polietileno	H_2O_2 (92%)	$NaBH_4$	<10 [ms]	Castaneda e Natan (2019)
Querosene + Nano-sílica pirogênica	H_2O_2 (92%)	$NaBH_4$	<8 [μs]	Natan et al. (2010)
Monoetanolamina	H_2O_2 (92%)	Nitrato de cobre	36,11 [ms]	Maschio (2017)
Monoetanolamina + Etanol	H_2O_2 (92%)	Nitrato de cobre	22,398 \pm 2,947[ms]	Maschio (2017)
Etanol em gel	H_2O_2 (92%)	Cloreto de Cobre Hidratado e Acetilacetato de Manganês (II)	1 [ms] - 30 [ms]	Jyoti, Naseem e Baek (2017)
Etanol solidificado	H_2O_2 (92%)	Acetilacetato de manganês (III)	49 [ms] - 307 [ms]	John et al. (2020)

Fonte: autor(2020).

Castaneda e Natan (2019) mediram o atraso de ignição do par, mostrado na tabela 3, mediante a gravação do teste de gota em condições atmosféricas e de pressões acima de 0,5 MPa, utilizando uma câmera de 1000 fps. Em condições atmosféricas foram observados atrasos de ignição menores que 10 ms e sobre condições de pressão menores que 5 ms.

No trabalho realizado por Natan, Perteghella e Solomon (2010), foi estudado o par de querosene em gel e peróxido de hidrogênio (92%) promovido por $NaBH_4$. O atraso de ignição foi medido por uma câmera de 500 fps mediante o teste de gota. Este teste foi realizado dentro de uma câmara selada, onde foi possível controlar a temperatura e a pressão. O teste consistiu em soltar uma gota do oxidante sobre o combustível em gel com as partículas do promotor dispersas nele. Os valores de atraso de ignição obtidos foram inferiores a 8 μs .

Na pesquisa realizada por Maschio (2017) a hipergolicidade dos pares testados

foi avaliada através do teste da gota. Este teste consistiu em gotejar uma única gota de $H_2O_2(92\%)$ sobre uma pequena quantidade de cada um dos combustíveis testados. O teste foi monitorado com o auxílio de uma câmera de alta velocidade da marca FASTEC, modelo S3, com velocidade de 3000 fps. Este procedimento permitiu a avaliação da hipergolicidade de cada par testado e o resultado do atraso de ignição é mostrado na tabela 3.

Jyoti, Naseem e Baek (2017) estudaram o atraso de ignição do par etanol em gel e peróxido de hidrogênio concentrado promovido por catalisadores metálicos (tabela 3) mediante o teste de gota. O experimento foi filmado por uma câmera de 5000 fps e a altura do gotejamento do oxidante sobre o combustível mais catalisador foi de 17,3 cm.

O par hipergólico de etanol solidificado e peróxido de hidrogênio (92%) promovido por acetilacetato de manganês (III) foi estudado por John et al. (2020). O atraso de ignição foi medido mediante o teste de gota, avaliado por uma câmera de alta velocidade de 5000 fps, por um fotodiodo e um microfone. Estes 3 equipamentos foram utilizados para determinar o instante de impacto e a autoignição, os resultados de atraso de ignição são mostrados na tabela 3 .

7 CONCLUSÕES

Por meio da metodologia desenvolvida foi criado um algoritmo em Python capaz de calcular o atraso de ignição de qualquer par propelente, devido à utilização do critério de mínimo local e máximo global. No algoritmo desenvolvido deve ser escolhida a imagem que define o início do movimento da gravação e realizar um reenquadramento da imagem. Após estas duas entradas e a gravação do teste, ele retorna um valor para o atraso de ignição que resultou em um erro médio de 8,49 ms em relação ao medido visualmente para cada teste. As limitações experimentais resultaram em valores amostrais baixos para submeter o algoritmo, sendo necessário mais testes para certifica-lo. Em adição, foi realizada a comparação do atraso de ignição medido para o par propelente estudado com o atraso de ignição de pares hipergólicos nos quais utiliza-se H_2O_2 em alta concentração como oxidante, calculado por diversos autores mediante o teste de gota, onde a faixa de valores de 13,22 ms até 51,09 ms obtido visualmente se encontra no intervalo de 8 μ s até 307 ms apresentado na tabela 3.

8 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um concentrador de H_2O_2 , com o objetivo de comparar a sua influência no atraso de ignição e empuxo gerado.
- Realizar experimentos para determinar o impulso específico do par hipergólico.
- Seguir uma padronização do teste de gota.
- A partir da padronização do teste de gota criar critérios físicos que sejam mais confiáveis para a determinação do contato entre os reagentes e a autoignição da mistura.
- Realizar estudos aprofundados da influência da quantidade dos reagentes no atraso de ignição.
- Realizar testes de injeção para avaliar o atraso de ignição em micro-propulsores em diferentes faixas de temperatura e pressão.

REFERÊNCIAS

BLEVINS, J.; GOSTOWSKI, R.; CHIANESE, S. An experimental investigation of hypergolic ignition delay of hydrogen peroxide with fuel mixtures. In: 42ND AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT. Reston: **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 2004. p. 1335.

CASTANEDA, D. A.; NATAN, B. Experimental investigation of the hydrogen peroxide–solid hydrocarbon hypergolic ignition. **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 158, p. 286–295, 2019.

CATOIRE, L.; CHAUMEIX, N.; PAILLARD, C. Chemical kinetic model for monomethylhydrazine/nitrogen tetroxide gas phase combustion and hypergolic ignition. **Journal of propulsion and power**, v. 20, n. 1, p. 87–92, 2004.

CONKLING, J. A.; MOCELLA, C. **Chemistry of pyrotechnics**: basic principles and theory. Florida: CRC press, 1985.

FROLIK, S. et al. Development of hypergolic liquid fuels for use with hydrogen peroxide. In: 36TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE & EXHIBIT. Reston: **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 2000. p. 3684.

GAO, H. et al. Hypergolic ionic liquids with the 2, 2-dialkyltriazanium cation. **Angewandte Chemie International Edition**, Wiley Online Library, v. 48, n. 15, p. 2792–2795, 2009.

JOHN, J. et al. Hypergolic ignition delay studies of solidified ethanol fuel with hydrogen peroxide for hybrid rockets. **Combustion and Flame**, Elsevier, v. 212, p. 205–215, 2020.

JYOTI, B. V. S.; NASEEM, M. S.; BAEK, S. W. Hypergolicity and ignition delay study of pure and energized ethanol gel fuel with hydrogen peroxide. **Combustion and Flame**, Elsevier, v. 176, p. 318–325, 2017.

KANG, H.; HUH, J.; KWON, S. Measuring the reaction rate of hypergolic propellants with a microelectromechanical systems reactor. **Journal of Spacecraft and Rockets**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 54, n. 2, p. 337–342, 2017.

KIM, T. Hydrogen production from solid sodium borohydride with hydrogen peroxide decomposition reaction. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 35, n. 23, p. 12870–12877, 2010.

MASCHIO, L. J. **Desenvolvimento e otimização de materiais hipergólicos para aplicação em motores foguete**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

MASCHIO, L. J. et al. A doe study on the hypergolicity of hydrogen peroxide with a rocket liquid fuel based on monoethanolamine and ethanol. **International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion**, Begel House Inc., v. 17, n. 2, 2018.

MELOF, B.; GRUBELICH, M. Investigation of hypergolic fuels with hydrogen peroxide. In: 37TH JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT. Reston: **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 2001. p. 3837.

MUSGRAVE, G. E.; LARSEN, A.; SGOBBA, T. **Safety design for space systems**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.

NATAN, B.; PERTEGHELLA, V.; SOLOMON, Y. Hypergolic ignition of oxidizers and fuels by fuel gelation and suspension of reactive or catalyst particles. In: 46TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE & EXHIBIT. Reston: **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 2010. p. 7144.

NOEL, F. L. Etanol: o desafio do combustível verde. **Problemas brasileiros**, v. 382, 2007.

NUFER, B. A summary of nasa and usaf hypergolic propellant related spills and fires. 2009.

REEVE, R. W. A sodium borohydride-hydrogen peroxide fuel cell employing a bipolar membrane electrolyte. **ECS Transactions**, The Electrochemical Society, v. 42, n. 1, p. 117–129, 2012.

SALEM, I. A.; EL-MAAZAWI, M.; ZAKI, A. B. Kinetics and mechanisms of decomposition reaction of hydrogen peroxide in presence of metal complexes. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF CHEMICAL KINETICS. [S.I.]: **Wiley Online Library**, 2000. v. 32, n. 11, p. 643–666.

SLOCUM-WANG, Z. et al. Ignition delay screening techniques: drop testing vs. engine testing. In: 42ND AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE & EXHIBIT. Reston: **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 2006. p. 4543.

LEWIS SR, R. J. **Hazardous chemicals desk reference**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

THOMAS, M. A. **Design and testing of a hydrogen peroxide microelectromechanical systems thruster**. Ohio, 2000.

URNS, S. R. et al. **An introduction to combustion**. New York: McGraw-hill, 1996. v. 499.

WERNIMONT, E.; HEISTER, S. Combustion experiments in hydrogen peroxide/polyethylene hybrid rocket with catalytic ignition. **Journal of Propulsion and Power**, v. 16, n. 2, p. 318–326, 2000.

APÊNDICE A - GRAVAÇÕES

Tabela 4 – Tabela dos testes realizados

Teste	10	11	12	13	14	15
Volume de etanol [ml]	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Volume de H ₂ O ₂ [ml]	1	1	1	1	1	1
Massa de NaBH ₄ [g]	0,00199	0,0021	0,0781	0,0140	0,0434	0,0162
Modelo de teste de gota	1	1	1	1	1	1
Presença de chama	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Tipo de recipiente experimental	béquer de 5ml	béquer de 5 ml	béquer de 5 ml	béquer de 5 ml	placa de vidro	placa de vidro
Imagens por segundo	378	378	378	274	274	274
Tempo de exposição da imagem [μ s]	100	100	100	100	100	100
Fechamento do diafragma. De 1 (mais claro) até 14 (mais escuro).	10	11	11	4	8	4
Atraso de captura (minimizar o peso das gravações) [μ s]	2000	2000	3000	3000	3000	3000
Tipo de iluminação contínua (800 lumens)	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Utiliza iluminação de corrente alternada?	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Tamanho da imagem horizontal/vertical	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080
Recorte aplicado anterior ao processamento das imagens horizontal/vertical	-	-	-	[900:1040]/ [320:490]	[970:1070]/ [350:500]	[950:1040]/ [200:350]
Imagem do início do movimento	-	-	-	45	45	13
Imagem da autoignição pelo Software Camware64	90	86	92	60	67	27
Imagem do contato dos reagentes pelo Software Camware64	67	68	77	50	56	18
Atraso de ignição pelo Software Camware64 [ms]	60,85	47,62	39,68	36,49	40,15	32,85
Imagem da autoignição pelo algoritmo desenvolvido	-	-	-	63	67	31
Imagem do contato dos reagentes pelo algoritmo desenvolvido	-	-	-	51	57	16
Atraso de ignição pelo algoritmo desenvolvido sem filtro de intensidades[ms]	-	-	-	43,80	36,50	54,74
Atraso de ignição pelo algoritmo desenvolvido com filtro de intensidades [ms]	-	-	-	54,74	65,69	47,44
Erro no procedimento experimental ?	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Qual foi o erro?	A gota não caiu exatamente no promotor, senão ao lado.	-	-	-	-	-

Fonte: autor(2020).

Tabela 5 – Tabela dos testes realizados (continuação).

Teste	16	17	18	19	20	21	22
Volume de etanol [ml]	0,4	1	1	0,4	0,4	0,4	0,4
Volume de H ₂ O ₂ [ml]	1	0,16	0,64	0,4	1	1	1
Massa de NaBH ₄ [g]	0,0153	0,0067	0,0393	0,0710	0,0408	0,0098	0,0125
Modelo de teste de gota	1	1	1	2	1	1	1
Presença de chama	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Tipo de recipiente experimental	placa de vidro	placa de vidro	placa de vidro	béquer de 5 ml	placa de vidro	béquer de 5ml	béquer de 5 ml
Imagens por segundo	378	274	274	274	274	246	246
Tempo de exposição da imagem [μ s]	100	100	100	10	100	1000	1000
Fechamento do diafragma. De 1 (mais claro) até 14 (mais escuro).	6	3	3	4	4	6	8
Atraso de captura (minimizar o peso das gravações) [μ s]	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Tipo de iluminação contínua (800 lumens)	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Utiliza iluminação de corrente alternada?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Tamanho da imagem horizontal/vertical	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080	1920/1080
Recorte aplicado anterior ao processamento das imagens horizontal/vertical	[844:1172]/ [200:340]	-	[1046:1145]/ [279:332]	-	-	[600:850]/ [0:230]	-
Imagem do início do movimento	25	-	25	-	-	15	-
Imagem da autoignição pelo Software Camware64	40	-	41	-	10	28	19
Imagem do contato dos reagentes pelo Software Camware64	35	-	29	-	9	18	8
Atraso de ignição pelo Software Camware64 [ms]	13,22	-	51,09	-	3,65	40,65	44,72
Imagem da autoignição pelo algoritmo desenvolvido	40	-	45	-	-	27	-
Imagem do contato dos reagentes pelo algoritmo desenvolvido	34	-	33	-	-	19	-
Atraso de ignição pelo algoritmo desenvolvido sem filtro de intensidades[ms]	15,87	-	43,8	-	-	32,52	-
Atraso de ignição pelo algoritmo desenvolvido com filtro de intensidades [ms]	34,39	-	65,69	-	-	28,46	-
Erro no procedimento experimental ?	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Qual foi o erro?	-	-	-	-	Possível gotejamento de mais de uma gota anterior ao início da gravação	-	-

Fonte: autor(2020).