

PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SANTANA

Estabilidade de chama de oxi-combustão
turbulenta diluída com CO_2

São Paulo

2023

PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SANTANA

**Estabilidade de chama de oxi-combustão turbulenta
diluída com CO₂**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2023

PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SANTANA

**Estabilidade de chama de oxi-combustão turbulenta
diluída com CO₂**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Mecânica
de Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Guenther Carlos Krie-
ger Filho

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de outubro de 2023

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Santana, Paulo Henrique dos Santos
Estabilidade de chama turbulenta diluída com CO₂ / P. H. S. Santana --
versão corr. -- São Paulo, 2023.
139 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.oxi-combustão 2.estabilidade de chama 3.quimioluminescência
4.regimes de combustão I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SANTANA

**Estabilidade de chama de oxi-combustão turbulenta
diluída com CO₂**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

**Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger
Filho**
Orientador

Prof. Dr. Antônio Garrido Gallego
Convidado

Prof. Dr. Fernando de Souza Costa
Convidado

São Paulo
2023

Dedico este trabalho à Maria de Lourdes dos Santos, minha mãe.

Agradecimentos

À minha mãe, Maria de Lourdes dos Santos, pelo amor, pela oportunidade que me deu para realizar meus sonhos, pelo apoio aos meus estudos e por ser a base da minha vida.

À minha namorada, Kelly de Souza Campos, pelo amor, pelo apoio ao meu trabalho e pela paciência necessária a quem faz pós-graduação.

À minha família que não me deixa esquecer as minhas origens.

Aos meus amigos, Lucas Nascimento, Marcos Moraes, Nacib Barbosa, Rafael Murcela e Thiago Aragão por serem meus irmãos de vida e por fazerem meu cotidiano mais leve e feliz, com risadas e reflexões sobre a vida.

Ao meu orientador, Guenther Carlos Krieger Filho, não somente pela orientação e discussões sobre combustão, mas por me incentivar sempre e por compreender minha situação e ajudar a tornar esse trabalho possível.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Combustão, em especial ao Helio Villanueva pelas discussões e apoio no laboratório, sem o qual não seria possível realizar os experimentos.

À Escola Politécnica, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido que propiciou a realização deste trabalho.

*Uma das tarefas decisivas na difusão do conhecimento
é sermos capazes de explicar, desdobrar aquilo que está intrincado,
aquilo que está fechado, que é hermético, de difícil compreensão.
(Mario Sergio Cortella)*

Resumo

A oxí-combustão é uma via promissora entre as tecnologias de captura e armazenamento de carbono com a finalidade de reduzir as emissões de CO_2 para a atmosfera. A compreensão das mudanças na estabilidade de chama na oxí-combustão em relação à combustão ar-combustível é fundamental para a aplicação desse conceito. Este trabalho teve como objetivo caracterizar o efeito da diluição na estabilidade de chama de oxí-combustão turbulenta diluída com CO_2 . Os experimentos foram realizados em uma câmara de combustão de escala laboratorial com acesso óptico. A oxí-combustão de metano diluída com dióxido de carbono foi avaliada na faixa de razão de equivalência de 0,5 a 1,0 e fração molar de CO_2 de 0% a 71,8%. Os regimes de combustão foram alcançados sempre mantendo a velocidade de escoamento da mistura O_2/CO_2 constante em 30 m/s. A partir da medição das emissões do radical OH^* , por quimioluminescência, estabeleceram-se os regimes de chama ancorada, descolada e de chama não visível. A chama ancorada apresentou macroestrutura de chama na topologia de jato estabilizada no queimador com fração molar de CO_2 de 0% a 44%. A chama descolada exibiu oscilações na topologia e na distância de descolamento produzindo grande ruído sonoro de $X_{\text{CO}_2} = 44\%$ a $X_{\text{CO}_2} = 60\%$. No regime de chama não visível, com fração molar de CO_2 de 60% a 71,8%, a intensidade máxima de emissão do radical OH^* diminuiu 89% em relação ao caso de chama ancorada, as reações ficaram mais distribuídas na câmara e ocorreu redução do ruído sonoro. Os fenômenos de descolamento e de extinção foram analisados no intervalo de razão de equivalência de 0,5 a 1,0. Portanto, a correlação entre a velocidade de chama laminar com o descolamento e a extinção foi estendida para esse intervalo de razão de equivalência.

Palavras-chave: oxí-combustão. estabilidade de chama. quimioluminescência. regimes de combustão.

Abstract

Oxy-combustion is a promising path among carbon capture and storage technologies in order to reduce CO₂ emissions into the atmosphere. Understanding the changes in flame stability in oxy-combustion in relation to air-fuel combustion is fundamental for the application of this concept. This work aimed to characterize the effect of dilution on the stability of turbulent oxy-combustion flames diluted with CO₂. The experiments were carried out in a laboratory scale combustion chamber with optical access. The oxy-combustion of methane diluted with carbon dioxide was evaluated in the range of equivalence ratio from 0.5 to 1.0 and mole fraction of CO₂ from 0% to 71.8%. The combustion regimes were reached always keeping the flow rate of the mixture O₂/CO₂ constant at 30 m/s. From the measurement of the emissions of the radical OH*, by chemiluminescence, the regimes of anchored flame, lifted flame and flameless were established. The anchored flame presented jet flame macrostructure stabilized in burner with CO₂ molar fraction from 0% to 44%. The lifted flame exhibited oscillations in the topology and in the lift-off distance, producing a loud noise from X_{CO₂} = 44% to X_{CO₂} = 60%. In flameless regime, molar fraction of CO₂ from 60% to 71.8%, the maximum emission intensity of the radical OH* decreased 89% in relation to the anchored flame case, the reactions were more distributed in the chamber and there was a reduction in the sound noise. Lift-off and blowoff phenomena were analyzed in the equivalence ratio range of 0.5 to 1.0. Therefore, the correlation between laminar flame speed with lift-off and blowoff was extended to this equivalence ratio range.

Key-words: oxy-combustion. flame stability. chemiluminescence. combustion regimes.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Emissão de CO ₂ em bilhões de toneladas e consumo de energia em exajoules no mundo de 1965 a 2022.	29
Figura 2 – Consumo de energia por fonte em 2022.	30
Figura 3 – Principais tecnologias de captura de carbono.	31
Figura 4 – Ciclos de potência.	33
Figura 5 – Processo criogênico de separação de ar.	34
Figura 6 – Ciclos de potência oxi-combustão.	35
Figura 7 – Ciclo oxi-combustão <i>Clean Energy System</i>	38
Figura 8 – Ciclo oxi-combustão SINTEF.	38
Figura 9 – Calor específico a pressão constante em função da temperatura.	40
Figura 10 – Mapas de temperatura de chama adiabática da oxi-combustão do metano em função da razão de equivalência e da fração molar de diluente com reagentes a 300 K e 1 atm.	42
Figura 11 – Propriedades de transporte dos diluentes em função da temperatura no intervalo de 400 K a 2600 K a 1 atm.	45
Figura 12 – Ilustração do procedimento para extrapolar as condições de <i>blowoff</i> de chamas ar-combustível para chamas oxi-combustível.	50
Figura 13 – Gráficos de dispersão da temperatura de <i>Rayleigh</i> em $z/d = 5$ (posição axial normalizada pelo diâmetro do jato de combustível) para variação de X_{H_2} e em $z/d = 3$ para variação de Re . A temperatura média condicional é plotada com uma linha sólida em preto. A fração de mistura estequiométrica é marcada por uma linha vertical em lilás.	52
Figura 14 – Mapas de macroestruturas de chama estabilizada por <i>swirler</i> para oxi-combustão de metano diluída com CO ₂ (14a) e combustão convencional ar-metano (14b).	52
Figura 15 – Curvas de <i>blowoff</i> de ar e oxi-combustão.	53
Figura 16 – Formato médio de chamas ar e oxi-combustível estabilizadas por <i>swirler</i>	54
Figura 17 – Fronteira de chama instantânea em imagens OH-PLIF de ar e oxi-combustível em chamas estabilizadas por <i>swirler</i> em $\phi = 0,65$ e $Re = 20000$	55
Figura 18 – Distribuições de intensidade média de OH* de chamas de CH ₄ /O ₂ diluídas em CO ₂ e N ₂ com razão de equivalência $\phi = 0,95$ e potência térmica $P_t = 13$ kW. Elementos cinza indicam peças sólidas do queimador com $r_0 = 10$ mm.	56
Figura 19 – Mapas de estabilidade chama.	57

Figura 20 – Evolução da velocidade de chama laminar, macroestrutura média da chama e estabilidade de chama em função da temperatura de chama adiabática e índice de oxigênio para as condições de diluição (H_2O e CO_2). Os círculos preenchidos se referem à oxi-combustão do metano e vazios à combustão convencional com, ambas diluída com CO_2 . Os triângulos preenchidos se referem à oxi-combustão do metano e vazios à combustão convencional com, ambas diluída com H_2O . As linhas tracejadas na horizontal representam as transições e extinção de chama. ($T_e = 373 \text{ K}$, $p = 1 \text{ atm}$, $\phi = 0,91$, $U_b = 30 \text{ m/s}$).	59
Figura 21 – Imagens de luminescência natural mostrando o efeito da razão de equivalência na aparência da combustão de gás natural com O_2/CO_2 em diferentes frações mássicas de CO_2	63
Figura 22 – Câmara de combustão.	66
Figura 23 – Desenho esquemático da bancada experimental.	67
Figura 24 – Massa específica, viscosidade dinâmica e viscosidade cinemática da mistura dos diluentes com O_2 em função das frações molares dos diluentes a 298 K e 1 atm . As linhas sólidas lilás são as propriedades na mistura O_2/N_2 e as linhas sólidas vermelhas as propriedades na mistura O_2/CO_2 . A linha magenta tracejada vertical indica a fração molar de N_2 no ar. O círculo lilás é o valor da propriedade no ar e o círculo em vermelho o correspondente ao mesmo valor de diluição com CO_2	69
Figura 25 – Imagens do alvo calibrado para o pré-processamento. A figura 25a apresenta a imagem distorcida do alvo. A figura 25b apresenta a imagem sem distorção do alvo. A figura 25b indica a correção da distorção da imagem. Os pontos em magenta foram utilizados como referência entre as imagens. A linha vermelha pontilhada representa a linha de centro da câmara.	76
Figura 26 – Aplicação da limiarização em uma imagem instantânea de chama descolada.	78
Figura 27 – Aplicação do filtro de mediana na imagem média.	78
Figura 28 – Aplicação do pós processamento na imagem instantânea de chama não visível.	79
Figura 29 – Sequência de imagens instantâneas de chama ancorada.	81
Figura 30 – Campos de intensidade média e desvio padrão de chamas ancoradas.	82

Figura 31 – Convergência estatística dos erros quadráticos médios da média e da variância de chamas ancoradas em função do tempo. A faixa cinza engloba todos os pixels do campo. As linhas pontilhadas vermelha e azul são os limites máximo e mínimo, respectivamente, do envelope de erros. A linha sólida verde se refere ao pixel da posição radial 0 mm e axial 180 mm, linha a qual o eixo secundário indica o tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel.	83
Figura 32 – Sequência de imagens instantâneas de luminescência natural da transição de chama ancorada para descolada.	84
Figura 33 – Sequência de imagens instantâneas de chama descolada.	85
Figura 34 – Campos de intensidade média e desvio padrão de chamas descoladas.	85
Figura 35 – Convergência estatística dos erros quadráticos médios da média e da variância de chamas descoladas em função do tempo. A faixa cinza engloba todos os pixels do campo. As linhas pontilhadas vermelha e azul são os limites máximo e mínimo, respectivamente, do envelope de erros. A linha sólida verde se refere ao pixel da posição radial 0 mm e axial 180 mm, linha a qual o eixo secundário indica o tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel.	86
Figura 36 – Sequência de imagens instantâneas de chamas não visíveis.	87
Figura 37 – Campos de intensidade média e desvio padrão de chamas não visíveis.	87
Figura 38 – Convergência estatística dos erros quadráticos médios da média e da variância de chamas não visíveis em função do tempo. A faixa cinza engloba todos os pixels do campo. As linhas pontilhadas vermelha e azul são os limites máximo e mínimo, respectivamente, do envelope de erros. A linha sólida verde se refere ao pixel da posição radial 0 mm e axial 180 mm, linha a qual o eixo secundário indica o tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel.	88
Figura 39 – Pontos experimentais de descolamento e de extinção. As barras representam a incerteza combinada de medição.	89
Figura 40 – Pontos experimentais de transição e extinção nos mapas de T_{ad} e S_L^0 no espaço $\phi - X_d$. As linhas magenta são as médias calculadas a partir dos pontos experimentais.	90
Figura 41 – Mapas de temperatura de chama adiabática da oxi-combustão do metano em função da razão de equivalência e da fração molar de diluente com reagentes a 300 K e 1 atm.	91

- Figura 42 – Diagrama de transição de chama ancorada para chama descolada. A velocidade da chama laminar na razão de equivalência 1,0 é mostrada como linha sólida preta, 0,9 como linha pontilhada preta, 0,8 como linha tracejada preta, 0,7 como linha preta tracejada com ponto e 0,6 como linha preta tracejada com ponto duplo. Os quadrados representam os pontos experimentais de transição. A linha horizontal magenta representa a velocidade de chama laminar média dos pontos experimentais. A área sombreada denota o desvio padrão em torno da média. 92
- Figura 43 – Diagrama de extinção de chama. A velocidade da chama laminar na razão de equivalência 1,0 é mostrada como linha sólida preta, 0,9 como linha pontilhada preta, 0,8 como linha tracejada preta, 0,7 como linha preta tracejada com ponto e 0,6 como linha preta tracejada com ponto duplo. Os círculos representam os pontos experimentais de extinção. A linha horizontal magenta representa a velocidade de chama laminar média dos pontos experimentais. A área sombreada denota o desvio padrão em torno da média. 93
- Figura 44 – Evolução da velocidade de chama laminar, macroestrutura média da chama e estabilidade estática em função da temperatura de chama adiabática. $T_e = 298$ K, $\phi = 1,0$ e $U_b = 30$ m/s. A linha tracejada indica a temperatura de chama adiabática do ar na estequiometria ($T_{ad,ar} = 2327$ K). As linhas com velocidade constante em magenta mostram as transições entre regimes e a extinção. Os hexágonos em azul são os pontos de medição por quimioluminescência da chama ancorada ($T_{ad} = 3889$ K; $S_L^0 = 137,4$ cm/s), chama descolada ($T_{ad} = 3243$ K; $S_L^0 = 76,9$ cm/s) e regime de chama não visível ($T_{ad} = 2404$ K; $S_L^0 = 21,9$ cm/s). 94

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades de combustíveis gasosos: entalpia de formação, poder calorífico inferior e temperatura de chama adiabática da combustão com ar e oxigênio estequiométricos e reagentes a 1 atm e 300 K.	43
Tabela 2 – Principais resultados dos trabalhos selecionados na literatura sobre estabilidade estática em oxi-combustão - parte 1.	61
Tabela 3 – Principais resultados dos trabalhos selecionados na literatura sobre estabilidade estática em oxi-combustão - parte 2.	62
Tabela 4 – Parâmetros experimentais de controle.	68
Tabela 5 – Condições experimentais das chamas medidas por quimioluminescência: $T_e = 298$ K, $\phi = 1,0$ e $U_b = 30$ m/s.	70
Tabela 6 – Condições experimentais de descolamento e de extinção: $T_e = 298$ K e $U_b = 30$ m/s. As potências térmicas de cada caso e fenômeno foram selecionadas, as razões de equivalência e frações molares foram calculadas a partir dos resultados para cada caso e fenômeno.	71

Lista de abreviaturas e siglas

CCS	Captura e Armazenamento de Carbono, do inglês <i>Carbon Capture and Storage</i>
ASU	Unidade de Separação de ar, do inglês <i>Air Separation Unit</i>
HRSG	Gerador de Vapor de Recuperação de Calor, do inglês <i>Heat Recovery Steam Generator</i>
PIV	Velocimetria por Imagens de Partículas, do inglês <i>Particle Image Velocimetry</i>
PLIF	Fluorescência Induzida por Laser Planar, do inglês <i>Planar Laser-Induced Fluorescence</i>
ORZ	Zona de Recirculação Externa, do inglês <i>Outer Recirculation Zone</i>
ISL	Camada de Cisalhamento Interna, do inglês <i>Inner Shear Layer</i>
OSL	Camada de Cisalhamento Externa, do inglês <i>Outer Shear Layer</i>
MILD	Diluição de oxigênio moderada e intensa, do inglês <i>Moderate and Intense Low oxygen Dilution</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo

Lista de símbolos

c_p	Calor específico a pressão constante.
$c_{p, \text{massa}}$	Calor específico a pressão constante na base mássica.
$c_{p, \text{mol}}$	Calor específico a pressão constante na base molar.
d	Diâmetro do tubo central de entrada.
Da	Número de <i>Damköhler</i> .
e_{O_2}	Excesso de oxigênio.
E	Valor esperado.
f_s	Frequência de aquisição.
f_{max}	Frequência máxima de medição.
I_{OH^*}	Intensidade da emissão do radical OH^* .
\bar{I}_{OH^*}	Média da intensidade da emissão do radical OH^* .
I_{dp, OH^*}	Desvio padrão da intensidade da emissão do radical OH^* .
$\overline{I_{OH^*}^2}$	Variância da intensidade da emissão do radical OH^* .
$h_{f, \text{mol}}^0$	Entalpia de formação na base molar na pressão padrão.
k	Condutividade térmica.
$\dot{m}_{\text{comb.}}$	Vazão mássica de combustível.
\dot{m}_{CH_4}	Vazão mássica de metano.
\dot{m}_{CO_2}	Vazão mássica de dióxido de carbono.
\dot{m}_{O_2}	Vazão mássica de oxigênio.
N_{ind}	Número de amostras independentes.
N_{ar}	Número de moles do ar.
$N_{\text{comb.}}$	Número de moles do combustível.
N_d	Número de moles de diluente.
N_{O_2}	Número de moles do oxigênio.

OI	Índice de oxigênio.
p	Pressão.
p_{ind}	Pressão indicada.
p_{ref}	Pressão de referência.
PCI	Poder Calorífico Inferior.
PCS	Poder Calorífico Superior.
P_d	Densidade de potência.
P_t	Potência térmica.
Q_{ind}	Vazão volumétrica indicada.
Q_{ref}	Vazão volumétrica de referência.
r	Posição radial.
Re	Número de <i>Reynolds</i> .
SG	Razão entre a massa específica do ar e massa específica nas condições de referência.
S_L^0	Velocidade de chama laminar.
t	Instante de tempo.
t'	Instante de tempo de atraso.
t_0	Escala de tempo integral.
Δt	Intervalo de tempo de medição.
T_{ad}	Temperatura de chama adiabática.
$T_{ad,ar}$	Temperatura de chama adiabática da combustão ar-metano na estequiometria.
T_{ad,O_2}	Temperatura de chama adiabática da oxi-combustão do metano sem diluição na estequiometria.
T_e	Temperatura de entrada.
T_{ind}	Temperatura indicada.
T_{ref}	Temperatura de referência.

u'	Flutuação da velocidade.
U_b	Velocidade de escoamento.
V	Volume.
X_{CH_4}	Fração molar de metano.
X_{CO_2}	Fração molar de dióxido de oxigênio.
X_d	Fração molar de diluente.
X_{H_2}	Fração molar de hidrogênio.
X_{H_2O}	Fração molar de água.
X_{O_2}	Fração molar de oxigênio.
z	Posição axial.

Letras Gregas

α	Coefficiente de difusão térmica.
$\varepsilon_{\Delta t(n)}$	Erro quadrático médio do enésimo momento estatístico.
$\varepsilon_{s(1)}$	Erro quadrático médio da média.
$\varepsilon_{s(2)}$	Erro quadrático médio da variância.
μ	Viscosidade dinâmica.
ν	Viscosidade cinemática.
ρ	Massa específica.
ϱ	Função autocorrelação da média.
$\varrho(n)$	Função autocorrelação do enésimo momento estatístico.
τ	Diferença de tempo entre dois pontos em uma série temporal.
τ_{quim}	Tempo característico químico.
τ_{turb}	Tempo característico integral da turbulência.
ϕ_{ar}	Razão de equivalência caso ar-combustível.
ϕ	Razão de equivalência caso oxi-combustível.
ψ	Variável turbulenta de medição.

$\bar{\psi}$	Média da variável ψ .
$\overline{\psi'^2}$	Variância da variável ψ .
$\overline{\psi^n}$	Enésimo momento estatístico da variável ψ .
$\overline{\psi_{\Delta t}^n}$	Estimador para o enésimo momento estatístico da variável ψ .

Caracteres de outra origem

\mathcal{D}	Coefficiente de difusão mássica.
i	Intensidade turbulenta.

Espécies químicas

CH ₄	Metano.
CO	Monóxido de carbono.
CO ₂	Dióxido de carbono.
H	Hidrogênio monoatômico.
H ₂	Hidrogênio.
H ₂ O	Água.
N ₂	Nitrogênio.
NO _x	Óxidos de nitrogênio.
O	Oxigênio monoatômico.
O ₂	Oxigênio.
OH	Radical hidroxila.
SO _x	Óxidos de enxofre.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Oxi-combustão para Captura e Armazenamento de Carbono . .	32
1.2	Objetivos	36
2	REVISÃO DA LITERATURA	37
2.1	Propriedades e Parâmetros Globais	39
2.1.1	Propriedades Térmicas	39
2.1.2	Propriedades de Transporte	44
2.1.3	Número de <i>Reynolds</i>	46
2.2	Instabilidades de chama	48
2.3	Regime de Combustão sem Chama Visível	60
2.4	Síntese e Lacunas de Pesquisa	63
3	METODOLOGIA	65
3.1	Aparato Experimental	65
3.2	Condições Experimentais	67
3.2.1	Condições Experimentais para a Quimioluminescência	67
3.2.2	Procedimento de Transição e Extinção de Chama	70
3.3	Velocidade de Chama Laminar	71
3.4	Quimioluminescência do radical OH*	72
3.4.1	Convergência Estatística	72
3.4.2	Pré Processamento das Imagens	75
3.4.3	Pós Processamento das Imagens	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	Macroestruturas de Chamas e Análise de Convergência	81
4.1.1	Chamas Ancoradas	81
4.1.2	Chamas Descoladas	84
4.1.3	Chamas não Visíveis	86
4.2	Estabilidade de Chama	88
4.2.1	Correlações de Estabilidade de Chama	89
4.2.2	Diagrama de estabilidade	91
5	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS	97

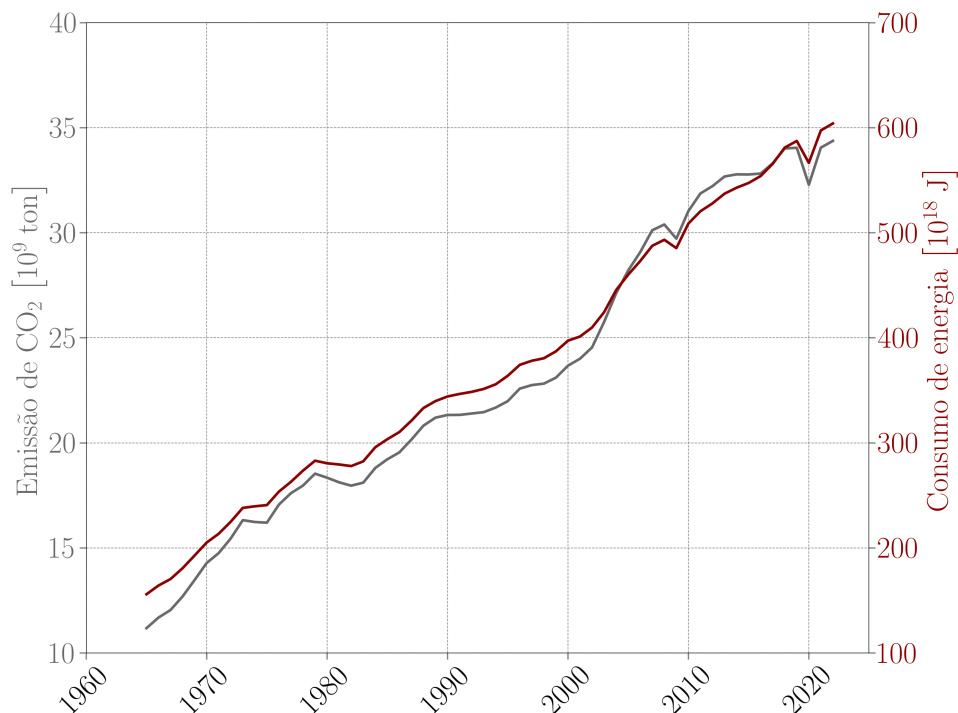
APÊNDICES	105
APÊNDICE A – CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO DA VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR . . .	107
APÊNDICE B – CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO DA CONVERGÊNCIA ESTATÍSTICA	111
APÊNDICE C – CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO DE PÓS PROCESSAMENTO DE IMAGEM	119
ANEXOS	131
ANEXO A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DA CÂMARA DE COMBUSTÃO	133

1 Introdução

A demanda mundial de energia, em diversas formas, aumenta devido ao desenvolvimento industrial e ao consumo moderno de uma população crescente (GHONIEM, 2011; KATLA; BARTELA; SKOREK-OSIKOWSKA, 2020). Para suprir essa demanda, diversas fontes de energia primária são utilizadas, tais como fóssil, nuclear, solar, eólica, geotérmica, biomassa e hidráulica (GHONIEM, 2011; OLIVEIRA; TRINDADE, 2018). A energia transformada a partir de combustíveis fósseis gera preocupação devido, principalmente, à formação de substâncias nocivas, especialmente os óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e o dióxido de carbono (CO_2), o qual aumenta fortemente o efeito estufa (GHONIEM, 2011; CHAKROUN; GHONIEM, 2015; KATLA; BARTELA; SKOREK-OSIKOWSKA, 2020).

A figura 1 apresenta a emissão de dióxido de carbono e o consumo de energia de 1965 a 2022 no mundo. Apesar da queda mais acentuada em 2020, impacto da pandemia de COVID 19, a tendência foi de aumento de emissões com um pico de 34,4 bilhões de toneladas de CO_2 em 2022 (ENERGY-INSTITUTE, 2023). A emissão de CO_2 acompanhou as variações de consumo de energia em virtude, sobretudo, das emissões causadas por combustíveis fósseis.

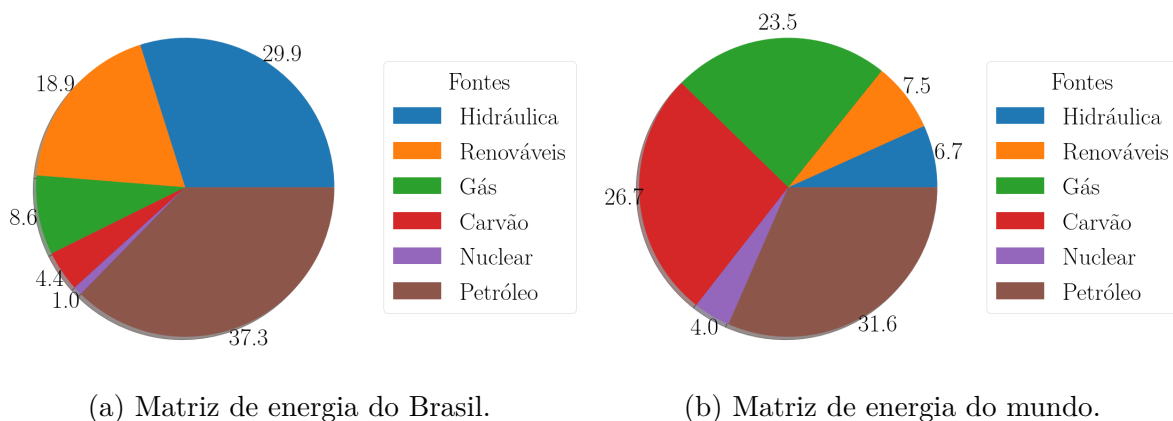
Figura 1 – Emissão de CO_2 em bilhões de toneladas e consumo de energia em exajoules no mundo de 1965 a 2022.



Fonte: Adaptado de Energy-Institute (2023).

A figura 2 mostra os gráficos das fontes de energia primária no Brasil (figura 2a) e no mundo (figura 2b) em 2022. No Brasil, a energia dos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) corresponde a 50,3% da energia consumida no país. Além disso, a fonte de energia fóssil é a principal fonte primária no mundo, com cerca de 81,8% de toda energia consumida em 2022. Esse padrão foi observado entre 2010 e 2022 (ENERGY-INSTITUTE, 2023). Salienta-se que as fontes renováveis, como biomassa, hidráulica, solar, eólica e geotérmica, também produzem CO₂, seja na implementação ou na conversão de energia (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018). No entanto, o carbono nessas aplicações pode ser considerado carbono verde, o qual é armazenado na biosfera, diferente dos carbonos cinzas que são armazenados em combustíveis fósseis na litosfera (MACKEY et al., 2008; HE; SUN; HAN, 2013; HE; SUN; HAN, 2022). Dessa maneira, torna-se cada vez mais urgente a aplicação de medidas para atenuar a emissão de CO₂ em setores energéticos.

Figura 2 – Consumo de energia por fonte em 2022.

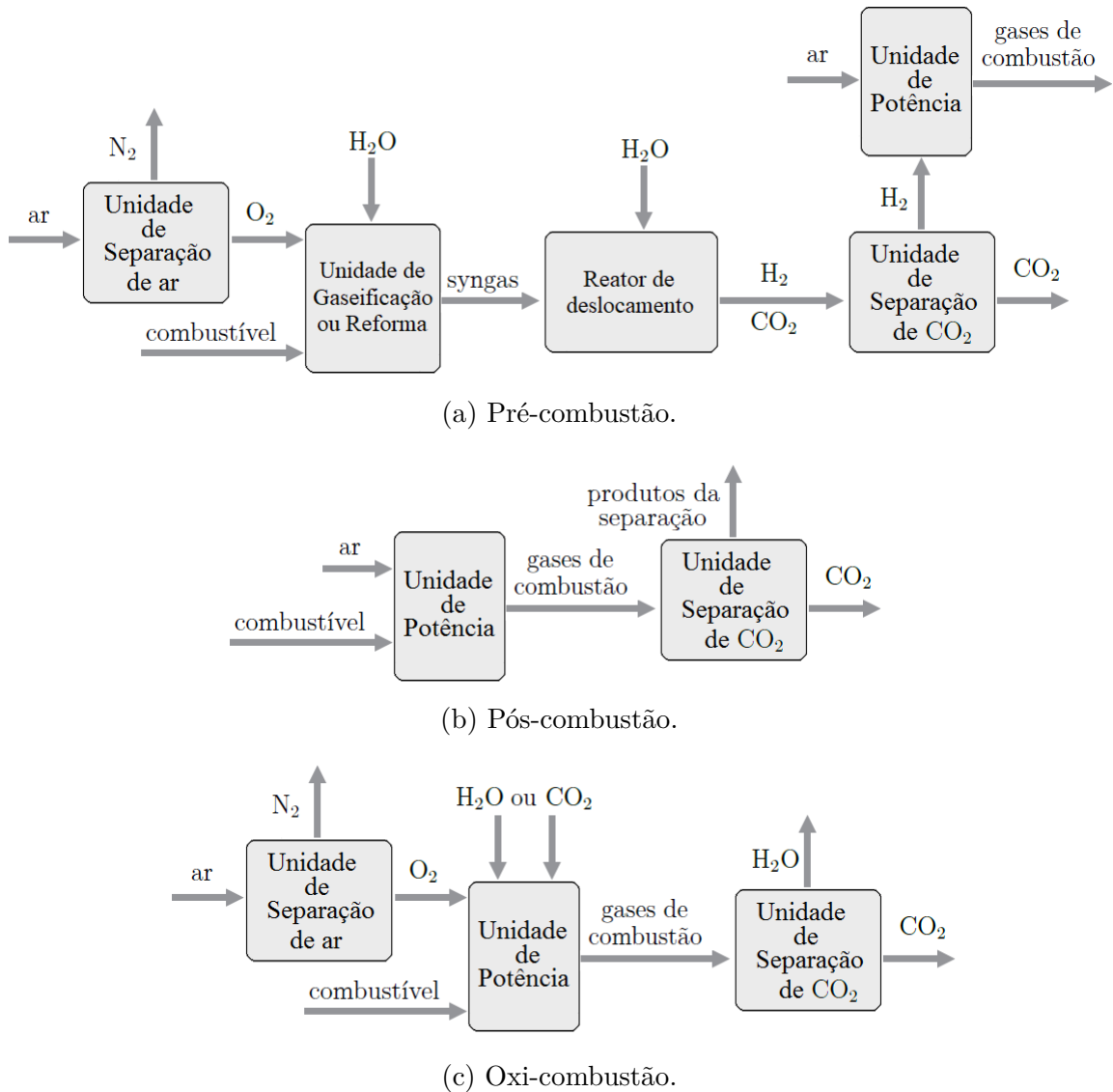


Fonte: Adaptado de Energy-Institute (2023).

O processo de captura e armazenamento de carbono, do inglês *Carbon Capture and Storage* (CCS), é um importante passo para reduções de emissão de CO₂. Novas tecnologias CCS aplicadas em geração de energia e em processos industriais fazem com que o dióxido de carbono não seja emitido para a atmosfera (ANDERSON et al., 2008; STANGER et al., 2015; SAANUM et al., 2016; BANDILLA, 2020). Desse modo, se houver aplicação em escala suficiente para se obter um impacto significativo nas emissões globais, as mudanças climáticas são atenuadas (RACKLEY, 2017; BANDILLA, 2020). A figura 3 ilustra as três grandes tecnologias para a captura de CO₂, as quais são: pré-combustão (figura 3a), pós-combustão (figura 3b) e oxi-combustão (figura 3c). As três técnicas são brevemente comentadas a seguir.

- Pré-combustão: nesse método o dióxido de carbono é removido antes de ocorrer a combustão. Entre as várias tecnologias desenvolvidas destaca-se a que envolve inicialmente a gaseificação do combustível, no caso de combustível sólido, ou reformado,

Figura 3 – Principais tecnologias de captura de carbono.



Fonte: Adaptado de Ghoniem (2011), Jansen et al. (2015), Rackley (2017), Bandilla (2020).

no caso de gás natural, com oxigênio (O_2) formando uma mistura gasosa constituída principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2) (GHONIEM, 2011; BANDILLA, 2020). Em seguida, uma reação de deslocamento é aplicada para converter CO e água (H_2O) em H_2 e CO_2 . Por fim, o CO_2 é separado do H_2 e capturado, já o H_2 é usado como combustível na geração de energia (GHONIEM, 2011; RACKLEY, 2017; BANDILLA, 2020). Nessa abordagem, há introdução de diversos dispositivos na instalação. A unidade de separação de ar introduz um consumo de energia, porém é reduzida, pois o oxigênio é necessário apenas para a oxidação parcial do combustível. Além disso, a gaseificação e compressão de CO_2 exigem energia. (GHONIEM, 2011; RACKLEY, 2017). Dessa forma, a redução de rendimento é estimada no mínimo 4% para gás natural e 7% para carvão (GHONIEM, 2011);

- Pós-combustão: nessa abordagem o dióxido de carbono é capturado após a combustão (GHONIEM, 2011; RACKLEY, 2017). O CO_2 é retirado dos gases de combustão por minerais sólidos ou por solventes químicos, tais como amina e amônia (ZHENG, 2011; RACKLEY, 2017). Trata-se de uma abordagem simples para captura de CO_2 , pois requer pouca modificação na usina termoelétrica ou no processo industrial. Entretanto, a inclusão do processo de separação de dióxido de carbono requer muita energia e complexidade no processo. Dessa forma, o rendimento global da usina diminui. No caso da utilização de gás natural a queda é de no mínimo 5% e de carvão no mínimo 8% (GHONIEM, 2011). Portanto, umas das principais desvantagens dessa opção é o alto consumo energético inerente à separação de CO_2 dos gases de combustão, além de existir também a necessidade da utilização de sistemas de sequestro de CO_2 . Isso ocorre devido a baixa concentração deste gás (variando entre 6 a 12% em base molar) o que requer sistema de grande porte e custo alto para a separação do CO_2 (GHONIEM, 2011; RACKLEY, 2017);
- Oxi-combustão: nessa tecnologia o oxigênio com elevada pureza é usado na combustão, produzindo assim gases de combustão formados principalmente de dióxido de carbono e água (GHONIEM, 2011; BANDILLA, 2020). Para isso, é imprescindível uma unidade de separação de ar a fim de fornecer o O_2 para a combustão. Há, então, uma penalidade de energia para essa separação (GHONIEM, 2011; ZHENG, 2011; ZHENG; LIU, 2017; RACKLEY, 2017). No entanto, os produtos da oxi-combustão são formados majoritariamente por CO_2 e H_2O . Desse modo, o dióxido de carbono é separado da água sem o custo energético das outras alternativas. Por um lado, a redução da eficiência é estimada em no mínimo 5% para carvão e 6% para gás natural devidos aos gastos energéticos da unidade de separação de ar e à reciclagem de carbono. Por outro lado, ciclos combinados integrados com a oxi-combustão foram recentemente propostos, os quais suprem essa redução e tornam essa opção muito promissora (GHONIEM, 2011; ALLAM et al., 2013; HUSSAIN et al., 2020; WIMMER; SANZ, 2020). Essa alternativa será detalhada na próxima seção.

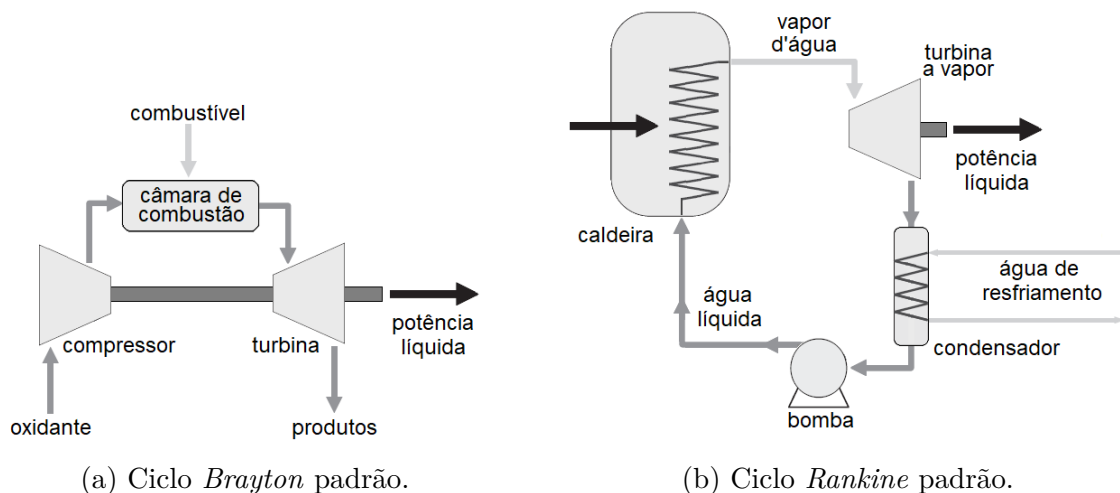
1.1 Oxi-combustão para Captura e Armazenamento de Carbono

A oxi-combustão consiste no processo de combustão com oxigênio quase puro em vez de ar (WALL et al., 2009; MENDIARA; GLARBORG, 2009; SUNDKVIST et al., 2014; STANGER et al., 2015; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Em termos mais precisos, a oxi-combustão ocorre quando se utiliza um oxidante com fração molar de O_2 maior que a existente no ar. Como o nitrogênio (N_2) não está presente, ou está presente em pouca quantidade, a temperatura dos gases de combustão é pouco diluída e

se torna muito maior que no caso ar-combustível. Essa característica é aproveitada pela indústria na soldagem de oxi-acetileno, no refino de metais primários, como cobre e ouro, e na queima em fornos da indústria de vidro (ZHENG, 2011). No entanto, em aplicações em usinas termoeletricas, a temperatura alta na entrada da turbina é um empecilho. Logo, é imprescindível utilizar uma substância para substituir o nitrogênio como diluente da temperatura, os candidatos imediatos são o dióxido de carbono e o vapor d'água, os quais podem ser reciclados dos gases de combustão (SUNDKVIST et al., 2014). Dessa forma, as altas concentrações de CO_2 e H_2O nos gases de combustão facilitam a separação e a captura de dióxido de carbono (GHONIEM, 2011; BANDILLA, 2020).

Um fator importante na implementação desse conceito é a readequação dos equipamentos utilizados em uma usina termoeletrica. Os elementos da usina devem ser utilizados com a menor alteração possível (STANGER et al., 2015; RACKLEY, 2017; BANDILLA, 2020). Em geral, uma termoeletrica que utiliza oxi-combustão é formada pelas seguintes unidades principais: unidade de separação de ar, do inglês *Air Separation Unit* (ASU), componente da usina que separa o oxigênio do nitrogênio do ar; caldeira ou turbina a gás, a caldeira normalmente está acoplada com uma fornalha que queima carvão e gera vapor para a turbina do ciclo *Rankine* (figura 4b), a chamada turbina a gás é formada por câmaras de combustão em conjunto com compressores e turbinas que compõem o ciclo *Brayton* (figura 4a); a unidade de processamento dos gases de combustão que é utilizada quando o combustível tem muitas impurezas, como o carvão, então é necessária a retirada de cinzas, SO_x e NO_x antes da separação do dióxido de carbono e a unidade de processamento de CO_2 , a qual tem a função de separar, purificar e comprimir o CO_2 para o transporte e armazenamento (LI et al., 2009; STANGER et al., 2015).

Figura 4 – Ciclos de potência.

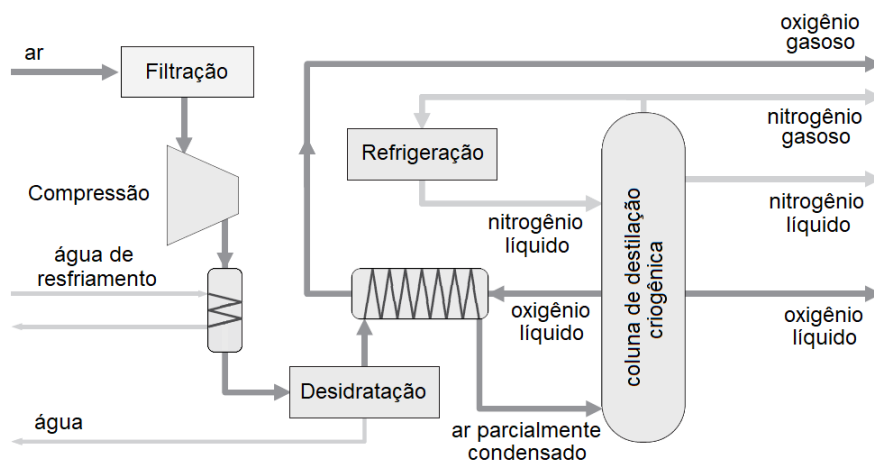


Fonte: Adaptado de Kvamsdal, Jordal e Bolland (2007), Anderson et al. (2008), Rackley (2017).

A tecnologia mais madura para obtenção de oxigênio com alto índice de pureza

é a destilação criogênica (ZHENG, 2011). Na ASU, indicada na figura 5, o ar é filtrado, comprimido, resfriado, a água é removida e traços de CO_2 são retirados. Em seguida a mistura é parcialmente condensada e, finalmente, o N_2 é separado do O_2 na coluna de destilação criogênica em temperaturas entre $-196\text{ }^\circ\text{C}$ e $-183\text{ }^\circ\text{C}$ (RACKLEY, 2017). Existem ASUs que produzem O_2 com 99,5% de pureza para indústria. Porém, esses níveis não são atingidos quando se trata de geração de energia, pois a usina demanda vazões de O_2 da ordem de milhares de toneladas por dia (ZHENG, 2011). Na usina termoelétrica, a pureza do oxigênio varia entre 95% e 99% (ANDERSON et al., 2008; ZHENG, 2011). Além disso, usinas termoelétricas montadas com turbina a gás exigem O_2 com pressões de até 10 MPa (ANDERSON et al., 2008). Assim, usinas termoelétricas sofrem uma queda em torno de 5% a 7% no rendimento global devido à demanda energética da ASU (GHONIEM, 2011).

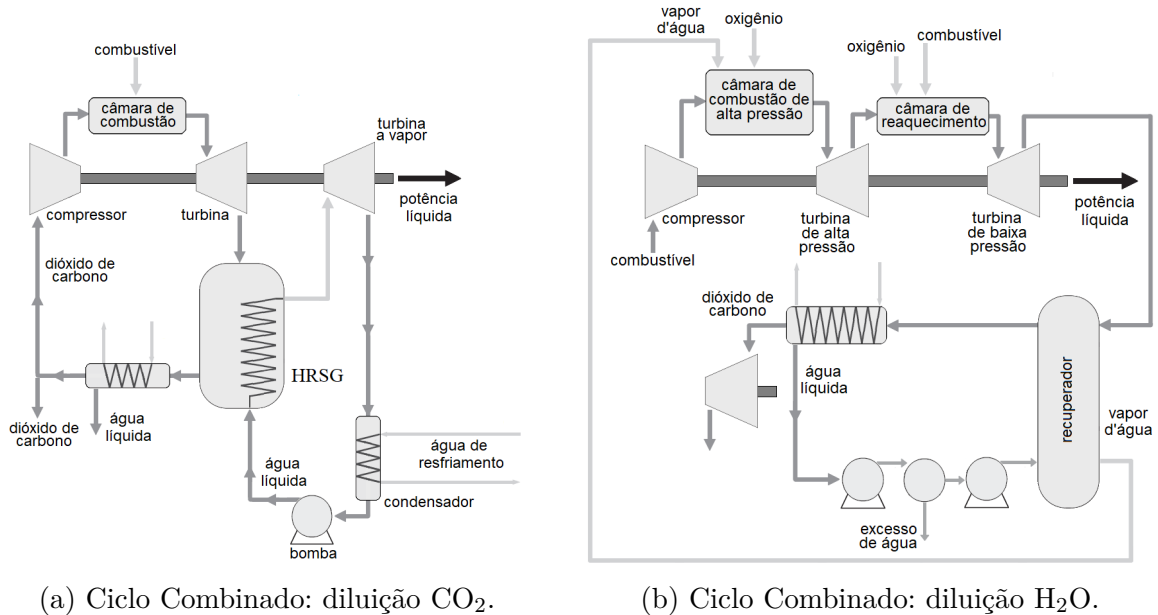
Figura 5 – Processo criogênico de separação de ar.



Fonte: Adaptado de Rackley (2017).

Existem diversas variações de ciclos combinados que utilizam o conceito de oxidação. Esses ciclos associam os ciclos *Brayton* e *Rankine* acrescidos de componentes específicos (KVAMSDAL; JORDAL; BOLLAND, 2007). A figura 6 mostra o ciclo combinado oxidação com recirculação com CO_2 (figura 6a) e H_2O (figura 6b) (MATHIEU; NIHART, 1999; KVAMSDAL; JORDAL; BOLLAND, 2007). No ciclo combinado da figura 6a, os gases da oxidação são fornecidos ao gerador de vapor de recuperação de calor, do inglês *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), onde o vapor é gerado para o ciclo *Rankine*. Cerca de 90% da água é resfriada e condensada, parte do CO_2 é retirado para compressão e o resto dos gases é reciclado de volta à câmara de combustão (KVAMSDAL; JORDAL; BOLLAND, 2007). Note que há uma modificação essencial no ciclo *Brayton*, a troca do fluido de trabalho de ar para CO_2 . Essa modificação implica em alterações nas condições de operação, tais como vazão mássica e rotação na turbina, bem como na razão de pressão (SAANUM et al., 2016).

Figura 6 – Ciclos de potência oxi-combustão.

(a) Ciclo Combinado: diluição CO₂.(b) Ciclo Combinado: diluição H₂O.

Fonte: Adaptado de Kvamsdal, Jordal e Bolland (2007), Anderson et al. (2008), Rackley (2017).

No ciclo combinado da figura 6b utiliza H₂O como diluente, apesar desse tipo de configuração ser capaz de utilizar CO₂ como diluente. No ciclo, os gases de combustão também são fornecidos ao HRSG, porém o CO₂ é retirado para compressão e a H₂O é fornecida para a turbina do ciclo *Rankine*, onde uma parcela é recolhida e outra parte é reciclada para a câmara de combustão, após ser vaporizada novamente. Ademais, um sistema de reaquecimento é aplicado entre as turbinas de alta e de pressão intermediária, afim de aumentar a energia convertida (KVAMSDAL; JORDAL; BOLLAND, 2007; ANDERSON et al., 2008). Nesse caso, a mudança do fluido de trabalho foi de ar para H₂O. Assim, poderiam ser utilizadas tanto turbinas a gás, quanto turbinas a vapor (ANDERSON et al., 2014). Entretanto, dependendo das condições de operação, para maiores eficiências do ciclo as temperaturas nas turbinas podem ficar fora do intervalo de operação de turbinas a vapor (ANDERSON et al., 2008; ANDERSON et al., 2014). Logo, a troca do fluido de trabalho em ciclos de oxi-combustão produz a discussão sobre que tipo de turbina deve ser utilizada, uma vez que essa seleção influencia no rendimento do ciclo.

Além disso, destaca-se o ciclo NET *Power* (ciclo *Allam*), o qual tem melhor perspectiva de aumentar rendimentos (WIMMER; SANZ, 2020). O ciclo *Allam* foi desenvolvido para oxi-combustão, onde CO₂ supercrítico é utilizado como fluido de trabalho em um ciclo *Brayton* (ALLAM et al., 2013; BANDILLA, 2020). Nesse ciclo, o dióxido de carbono é gerado com pressão e pureza suficientes para ser transportado até um local de uso ou que seja armazenado (HUSSAIN et al., 2020). Dessa maneira, não é necessário realizar uma compressão adicional. Isso proporciona um aumento no rendimento global do ciclo,

a qual é estimada em cerca de 59% (ALLAM et al., 2013; BANDILLA, 2020). Logo, espera-se que as usinas termoelétricas baseadas no ciclo *Allam* transformem energia de forma competitiva em comparação com as usinas convencionais (BANDILLA, 2020).

Em câmaras de combustão, as quais fazem parte do escopo deste trabalho, é fundamental entender o comportamento da chama. No caso de sistemas de oxi-combustão, as instabilidades de combustão são as principais preocupações (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Além disso, o custo energético do O_2 obriga a realização de combustão com oxigênio próximo da estequiometria, o que torna essencial executar a combustão de forma cada vez mais eficiente. Somado a isso, as diferentes propriedades termofísicas e termoquímicas do CO_2 e da H_2O , em comparação com o N_2 , alteram as características de estabilidade de chama. Em outras palavras, a inserção de um novo diluente modifica a temperatura, a cinética química, bem como as propriedades de transporte. Desse modo, os regimes de combustão podem se alterar conforme a diluição é realizada. Portanto, é fundamental entender o comportamento de chamas de oxi-combustão em diferentes condições, para que a tecnologia seja aplicável de forma eficiente.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar o efeito da diluição na estabilidade de chama de oxi-combustão turbulenta em câmara de combustão de escala laboratorial com acesso óptico. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram pretendidos:

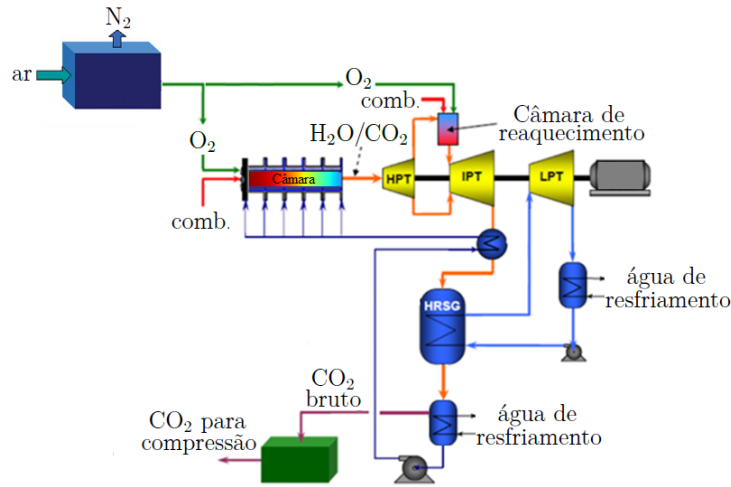
- Encontrar uma faixa de operação da câmara com o intuito de determinar os regimes de combustão;
- Descrever as características das macroestruturas de chamas pelo método da técnica óptica de quimioluminescência;
- Investigar as correlações entre parâmetros globais com as transições entre os regimes de combustão e a extinção de chama.

2 Revisão da Literatura

A pesquisa em oxi-combustão ocorre desde a década de 1980, quando a ideia de combustão de carvão com oxigênio para captura de CO₂ em caldeiras ganhou relevância (FUJIMORI; YAMADA, 2013; SAANUM et al., 2016). Conforme o problema de aquecimento global aumentava, as tecnologias CCS ganhavam interesse e, assim, muitos estudos foram realizados na área de oxi-combustão (FUJIMORI; YAMADA, 2013). O desenvolvimento da oxi-combustão se concentrou em combustíveis sólidos em razão, especialmente, do predomínio do uso de carvão em conversão de energia e de suas maiores emissões de CO₂ para a atmosfera (STANGER et al., 2015; ZHENG; LIU, 2017). Os estudos em oxi-combustão, bem como os projetos de demonstração em grande escala têm aumentado após 2005, uma vez que a viabilidade comercial da tecnologia oxi-combustão depende das observações em instalações em escala laboratorial, bem como em projetos de demonstração em escala piloto e industrial (FUJIMORI; YAMADA, 2013; YADAV; MONDAL, 2022). Desde então, os combustíveis gasosos têm tido destaque na pesquisa e em aplicações em usinas termoelétricas, das quais destacam-se duas realizações: o ciclo desenvolvido pela *Siemens Power Generation, Florida Turbine Technologies e Clean Energy System*, o qual recicla H₂O como diluente e a usina de demonstração aplicada por *SINTEF Energy Research, Siemens Industrial Turbomachinery AB, Siemens AS, Nebb Engineering AS e Lund University*, a qual recicla CO₂ como diluente na oxi-combustão (ANDERSON et al., 2008; ANDERSON et al., 2014; SAANUM et al., 2016).

O ciclo aplicado pela *Siemens Power Generation, Florida Turbine Technologies e Clean Energy System* possui dois sistemas de combustão, sendo um composto pela câmara primária e o outro pelo sistema de reaquecimento montado com oito câmaras de oxi-combustão (ANDERSON et al., 2014). A câmara primária queima gás natural (91,59% em volume de metano) com oxigênio em alta pressão de 5 MPa a 10 MPa e temperatura máxima de 1650 °C a 1760 °C que é controlada pela injeção de vapor d'água reciclado. As câmaras de reaquecimento operam a 1,6 MPa com diluição realizada pelos produtos de combustão da câmara primária após a passagem pela turbina de alta pressão, como indicado na figura 7 (ANDERSON et al., 2008). Os trabalhos sobre esse ciclo foram direcionados para instalação e reutilização das componentes do ciclo, por exemplo as turbinas a vapor, e nas características operacionais da oxi-combustão. Especificamente, com a limitação do excesso de O₂, o uso mínimo de diluição, por um lado, leva a altas temperaturas e grandes níveis de monóxido de carbono, já o aumento excessivo de diluição, por outro lado, leva a extinções de chama e diminui a taxa de oxidação de CO para CO₂ (CHORPENING et al., 2003; RICHARDS; CASLETON; CHORPENING, 2005).

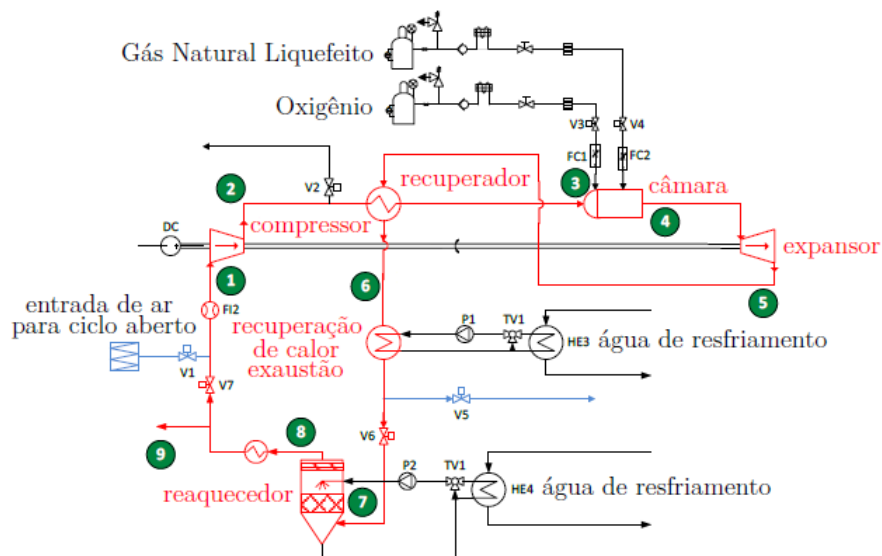
O ciclo aplicado pela SINTEF apresentou uma usina termoelétrica de demonstração

Figura 7 – Ciclo oxidação *Clean Energy System*.

Fonte: Adaptado de Anderson et al. (2008).

oxidação dita semifechada de turbina a gás. A oxidação foi realizada com metano (CH_4) e oxigênio diluída com CO_2 como indicado na figura 8. A câmara foi projetada para ensaios dentro de um vaso de pressão, ambas com acesso óptico, para pressões de até 1 MPa e 125 kW de potência térmica (SAANUM; DITARANTO, 2017). A estabilidade de chama e as emissões de CO foram estudadas em diferentes frações molares e excesso de O_2 . Dessa forma, observou-se que concentrações de CO maiores de 1% são encontradas para valores de excesso de O_2 abaixo de 5% (SAANUM et al., 2016). Essas concentrações, as quais são consideradas altas, revelam o contraponto entre o custo do excesso de O_2 e as altas produções de CO.

Figura 8 – Ciclo oxidação SINTEF.



Fonte: Adaptado de Saanum et al. (2016).

Esses resultados indicam a importância dos estudos em estabilidade de chama na oxi-combustão. As instabilidades de chama podem ser classificadas como estáticas e dinâmicas. A instabilidade estática é caracterizada quando a chama não está ancorada no queimador. Nesse contexto, a chama pode extinguir de forma repentina, referenciada pelo termo inglês *blowout*, ou por um processo transitório, referida na literatura pelo termo em inglês *blowoff*. No caso de chamas pré-misturadas, as chamas podem se propagar a montante da posição de ancoragem e ignitar essa mistura, fenômeno conhecido como retorno, do inglês *flashback*. A instabilidade dinâmica, por sua vez, pode envolver oscilações periódicas na velocidade, bem como acoplar a taxa de liberação de energia por calor com a pressão acústica. Esse acoplamento pode gerar instabilidades termoacústicas, as quais ampliam as oscilações de pressão e ruído (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021).

Nessa linha, a comparação dos diluentes mais comuns na oxi-combustão (N_2 , CO_2 e H_2O) é útil para avaliar a estabilidade de chama oxi-combustão em relação à combustão convencional ar-combustível. A troca de diluente afeta a temperatura da chama, a dinâmica dos gases e a cinética química, impactando assim a estabilidade da combustão (SHROLL; SHANBHOUE; GHONIEM, 2012; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Essa mudança de diluente altera em pelo menos quatro domínios: das propriedades térmicas, pelo calor específico e conseqüentemente a temperatura de chama adiabática; das propriedades de transporte, pela difusividade mássica, viscosidade, entre outras que impactam nos campos de escoamento; das taxas de cinética química e da transferência de energia por radiação (AMATO et al., 2011).

2.1 Propriedades e Parâmetros Globais

Nesta seção, será apresentada uma breve discussão das principais propriedades e dos parâmetros globais essenciais em combustão, os quais são frequentemente revisitados nos trabalhos da literatura em oxi-combustão.

Esta seção foi subdividida a fim de analisar pontos importantes apresentados na literatura, os quais são fundamentais para o entendimento dos resultados encontrados. A primeira subseção mostra a limitação da razão de equivalência e os motivos da ampla adoção da temperatura de chama adiabática como parâmetro global em oxi-combustão. A segunda subseção indica as conseqüências da mudança de diluente nas propriedades de transporte. Por fim, a terceira seção aborda a implicação da alteração de diluente no número de Reynolds e no tratamento desse parâmetro global.

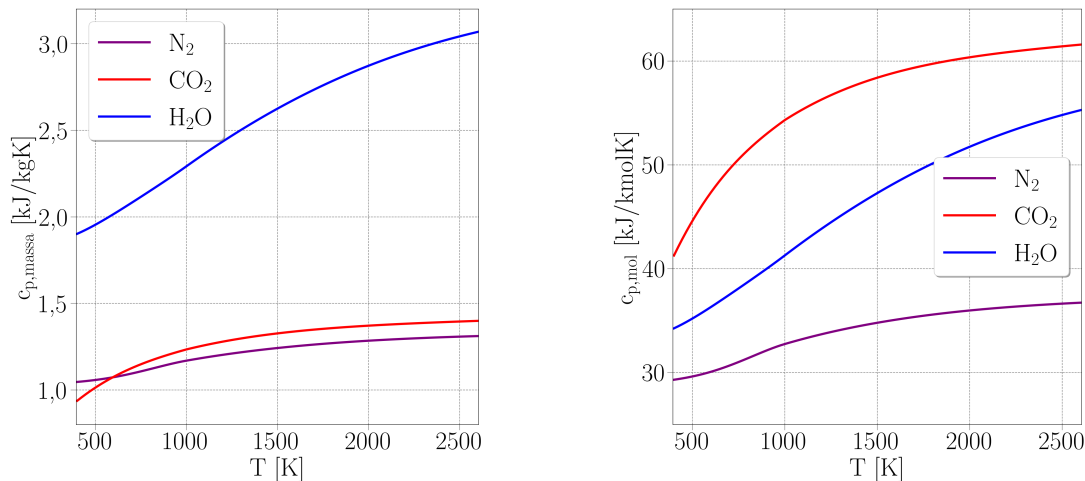
2.1.1 Propriedades Térmicas

A reciclagem de dióxido de carbono ou água é realizada com a intenção de reduzir a temperatura na oxi-combustão. Assim, a quantidade desses diluentes adiciona uma

dimensão em comparação com a combustão convencional ar-combustível. Esse grau de liberdade foi indicado na literatura como fração molar de oxigênio, ou fração molar de diluente (SAANUM; DITARANTO, 2017; KHALIL; GUPTA, 2017; ABDELHAFEZ et al., 2018a). No entanto, a diluição pode ser expressa em termos de um único parâmetro, a temperatura de chama adiabática (T_{ad}). Essa é uma propriedade chave, a qual é função da temperatura de entrada, da razão de equivalência e da fração molar de oxigênio (ou do diluente), além de utilizar propriedades termodinâmicas dos reagentes (ABDELHAFEZ et al., 2018a).

O calor específico a pressão constante (c_p) é uma das propriedades termodinâmicas que influenciam a temperatura de chama adiabática. A figura 9 mostra os calores específicos do CO_2 , da H_2O e do N_2 na base mássica (figura 9a) e na base molar (figura 9b) em função da temperatura. Na base mássica, o c_p da água é cerca de duas vezes maior do que do CO_2 e do N_2 . Nessa mesma base, o calor específico do CO_2 é menor que do N_2 de 400 K a 595 K, acima dessa temperatura até 2600 K, é ligeiramente maior. Na base molar, por sua vez, o calor específico do CO_2 é maior, seguido do c_p da água e do c_p do nitrogênio. Na temperatura de 1500 K, por exemplo, o c_p do CO_2 vale 58,4 kJ/kmolK, da H_2O vale 47,3 kJ/kmolK e do N_2 vale 34,8 kJ/kmolK cerca de 74% do valor da H_2O e de 60% do CO_2 . Dessa maneira, é necessário mais N_2 que H_2O e CO_2 , em mol, para alcançar o efeito térmico esperado, ou seja, diminuir a temperatura (WANG et al., 2013).

Figura 9 – Calor específico a pressão constante em função da temperatura.



(a) Calor específico na base mássica.

(b) Calor específico na base molar.

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2013).

Outro parâmetro que influencia a temperatura de chama adiabática é a razão de equivalência (ϕ). Na combustão convencional, ϕ é um parâmetro útil para operação, já que indica se a razão ar-combustível está acima ou abaixo do estequiometria. Contudo, na oxí-combustão o oxigênio possui o papel de oxidante, no lugar do ar. Dado isso, há na

literatura diferentes definições de razão de equivalência. A definição dita clássica utiliza a quantidade de diluente de modo análogo ao usado com ar, como indicado na equação 2.1.

$$\phi_{ar} = \frac{N_{comb.}/N_{ar}}{(N_{comb.}/N_{ar})_{est.}} \quad (2.1)$$

No caso da oxí-combustão, o diluente entraria no lugar do N_2 do ar, numa quantidade arbitrária, assim ϕ seria influenciado por esse diluente (H_2O ou CO_2). A outra definição, usada na grande maioria dos trabalhos na literatura oxí-combustão, toma apenas o oxigênio no cálculo da razão de equivalência, da forma expressa na equação 2.2. Então, $\phi < 1$ significa excesso de O_2 , ao invés de excesso de ar como é entendido na combustão convencional (VANDEL et al., 2020; VANDEL et al., 2022).

$$\phi = \frac{N_{comb.}/N_{O_2}}{(N_{comb.}/N_{O_2})_{est.}} \quad (2.2)$$

Logo, por essa definição de ϕ , o excesso de oxigênio (e_{O_2}) é dado pela equação 2.3 (VANDEL et al., 2020; VANDEL et al., 2022).

$$e_{O_2} = \frac{1 - \phi}{\phi} \quad (2.3)$$

Além desse parâmetro, é necessário usar um indicativo do diluente. Aqui há uma divergência nas espécies da mistura considerada no cálculo da fração molar, ou fração mássica. Por um lado, o registro da parcela de diluente pode ser considerado na mistura com o oxidante, como indicado nas equações 2.4 e 2.5. Esse modo é costume entre a comunidade de combustão de carvão e também é muito utilizado na literatura de oxí-combustão de combustíveis gasosos. Os pesquisadores, especialmente em trabalhos de chamas pré-misturadas, consideram o combustível no cálculo das frações molares (WATANABE; SHANBHOUE; GHONIEM, 2015).

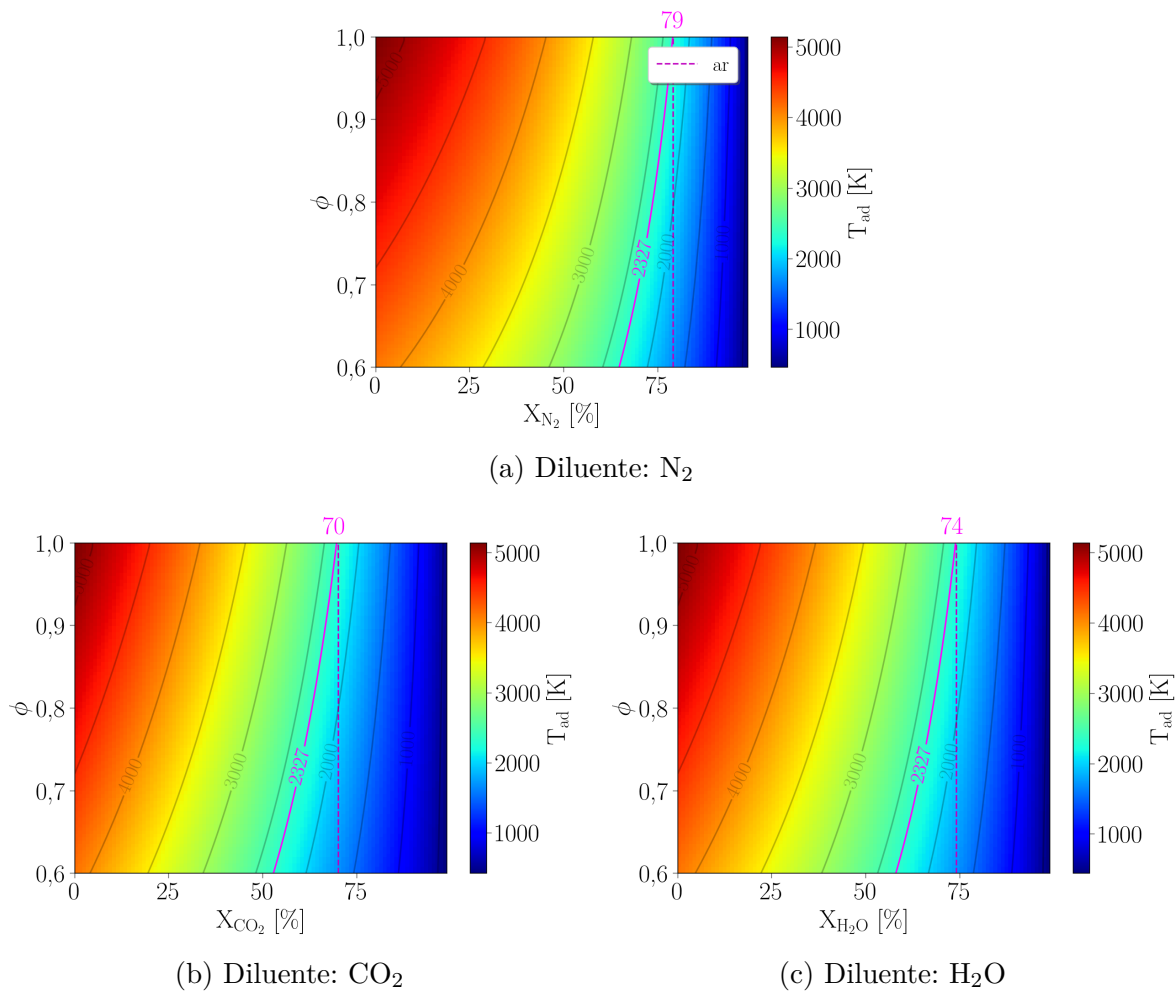
$$X_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{O_2} + N_d} \quad (2.4)$$

$$X_d = \frac{N_d}{N_{O_2} + N_d} \quad (2.5)$$

Independente do método adotado, a temperatura de chama adiabática integra essas definições, além de conter a temperatura dos reagentes e as entalpias de formação. Os mapas da figura 10 mostram a T_{ad} da oxí-combustão do metano, tal como observado em Abdelhafez et al. (2018a). Os reagentes estão a 1 atm e 300 K. A razão de equivalência, calculada pela equação 2.2, está entre 0,6 e 1,0, fração molar de diluente, dada pela equação 2.5, fica entre 0% e 99%, já a escala de T_{ad} está entre 300 K e 5142 K que é a temperatura

de chama adiabática da oxidação estequiométrica do metano sem diluição. Um comportamento comum observado nos gráficos é que conforme aumenta a fração molar de diluente, T_{ad} diminui, como esperado, e conforme diminui a razão de equivalência, T_{ad} também diminui, dado que o O_2 também dilui a temperatura no modelo global. As linhas isotérmicas, em cinza, se tornam mais verticais conforme a diluição aumenta, que indica que a importância da diluição de N_2 , CO_2 ou H_2O diminui conforme a mistura se torna pobre, ou seja, é necessária uma quantidade menor de diluente em misturas mais pobres para alcançar a mesma T_{ad} .

Figura 10 – Mapas de temperatura de chama adiabática da oxidação do metano em função da razão de equivalência e da fração molar de diluente com reagentes a 300 K e 1 atm.



Fonte: Adaptado de Abdelhafez et al. (2018a).

Na figura 10a, a linha tracejada vertical que denota a quantidade de N_2 no ar, 79% de N_2 e 21% de O_2 em mol. As temperaturas nessa linha representam o conhecido gráfico de T_{ad} versus ϕ para a combustão ar-combustível. O ponto com razão de equivalência unitária nesse gráfico tem valor de 2327 K, a temperatura de chama adiabática da combustão estequiométrica do ar com metano, a qual foi indicada em linha contínua isotérmica. As

linhas tracejadas verticais nas figuras 10b e 10c representam as frações molares de CO_2 e H_2O , respectivamente 70% e 74%, as quais são suficientes para igualar a temperatura de chama adiabática do ar em $\phi = 1$. Ademais, os gráficos do N_2 , do CO_2 e da H_2O apresentam maiores regiões com temperaturas mais altas, que evidencia o resultado observado na figura 9b.

Por fim, a potência térmica (P_t) pode ser utilizada como parâmetro representativo da potência de entrada em usinas de geração de energia. Tanto o Poder Calorífico Inferior (PCI), quanto o Poder Calorífico Superior (PCS) são utilizados em cálculos de eficiência em ciclos (GHONIEM, 2011; JANSEN et al., 2015). A escolha do parâmetro depende de quais critérios de comparação que serão utilizados, por exemplo, base seca ou base úmida, ou se os gases de combustão serão resfriados abaixo do ponto de orvalho (RAJA; SRIVASTAVA; DWIVEDI, 2016). Na literatura em oxi-combustão, a potência térmica, dada pela equação 2.6, é amplamente utilizada (SAANUM et al., 2016; JOURDAINE et al., 2017; VANDEL et al., 2020). Dessa forma, este trabalho toma o PCI como parâmetro. Além disso, alguns autores utilizam a densidade de potência da câmara (P_d), geralmente dada em $\text{kW}/(\text{bar} \cdot \text{m}^3)$, a qual inclui a pressão (p) e o volume da câmara (V) no cálculo, como indicado na equação 2.7 (ABDELHAFEZ et al., 2018a; NEMITALLAH et al., 2018; ALI et al., 2021).

$$P_t = \dot{m}_{\text{comb.}} \cdot \text{PCI} \quad (2.6)$$

$$P_d = \frac{\dot{m}_{\text{comb.}} \cdot \text{PCI}}{p \cdot V} \quad (2.7)$$

A tabela 1 mostra a entalpia de formação ($h_{f,\text{mol}}^0$) e o Poder Calorífico Inferior do CH_4 , do C_3H_8 e do H_2 , além de suas temperaturas de chamas adiabáticas na combustão com ar e O_2 , ambos na estequiometria. A notável diferença entre essas temperaturas exemplifica a necessidade de diluição em oxi-combustão. Já as entalpias de formação e o PCI indicam o potencial acentuado do hidrogênio em aplicações de oxi-combustão.

Tabela 1 – Propriedades de combustíveis gasosos: entalpia de formação, poder calorífico inferior e temperatura de chama adiabática da combustão com ar e oxigênio estequiométricos e reagentes a 1 atm e 300 K.

	$h_{f,\text{mol}}^0$ [kJ/kmol]	PCI [kJ/kg]	$T_{\text{ad,ar}}$ [K]	$T_{\text{ad,O}_2}$ [K]
CH_4	-74873	50010	2327	5142
C_3H_8	-103900	46352	2393	5513
H_2	0	119953	2429	3508

Fonte: Adaptado de Borgnakke e Sonntag (2020).

Entretanto, ressalta-se que tanto o conceito de Poder Calorífico Inferior, quanto o conceito de temperatura de chama adiabática são limitados, pois adotam a combustão

completa na sua concepção. Na idealização do cálculo de T_{ad} , toda a energia contida nos reagentes é convertida para os produtos de combustão completa, o que torna a temperatura de chama adiabática o parâmetro representativo da máxima temperatura que os gases de combustão podem alcançar. Isso não ocorre no processo de combustão devido à cinética química, à transferência de energia por calor e a todas as irreversibilidades inerentes ao processo. Desse modo, a temperatura de chama adiabática deve ser enxergada como um parâmetro global de combustão, o qual não é suficientemente capaz de explicar a instabilidade de combustão.

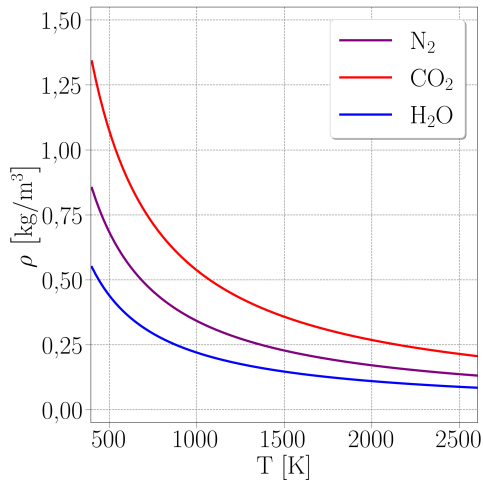
Em resumo, na oxí-combustão a razão de equivalência, sozinha, não é capaz de expressar a diluição. Nesse caso, é imprescindível a indicação de um parâmetro que englobe também essa diluição. Esse indicador é a temperatura de chama adiabática. Abdelhafez et al. (2018b) mostraram que T_{ad} é o melhor parâmetro para representar o mapa de estabilidade de chama pré-misturada com velocidade constante na entrada da câmara. O limite de retorno foi observado em mesma T_{ad} no mapa de X_{O_2} e ϕ . Apesar de diferentes frações molares de oxigênio e razões de equivalência, chamas com formas semelhantes tinham mesma temperatura de chama adiabática (ABDELHAFEZ et al., 2018a). Dado isso, a oxí-combustão em temperaturas de chama semelhantes requer maiores níveis de O_2 nos reagentes, que por sua vez modifica as características cinéticas e de transporte das misturas (AMATO et al., 2011).

2.1.2 Propriedades de Transporte

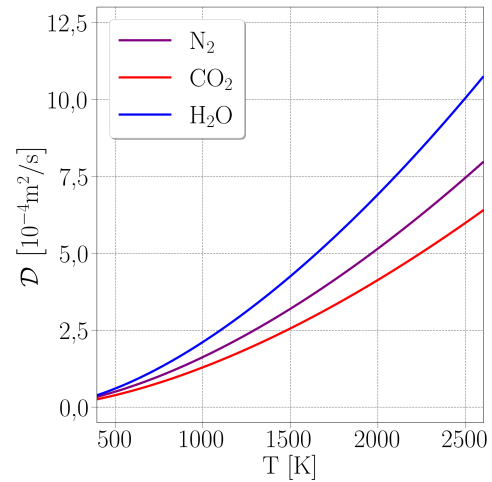
As propriedades de transporte dos diluentes influenciam a chama por meio de quantidades, tal como a velocidade de chama (AMATO et al., 2011). A figura 11 mostra, na primeira coluna, a massa específica (ρ), a viscosidade dinâmica (μ) e a condutividade térmica (k) em função da temperatura. Os gráficos de massa específica (figura 11a) decaem com a temperatura, sendo que o N_2 possui massa específica intermediária entre o CO_2 com os maiores valores e a H_2O o menor na comparação. Na temperatura de 400 K, por exemplo, a massa específica do CO_2 vale $1,34 \text{ kg/m}^3$ que é 1,6 vezes maior que do N_2 e 2,4 vezes maior que o valor da H_2O . Dai et al. (2018) mostraram que essa diferença reduz a zona de reação de uma chama de jato de metano com cofluxo de mistura oxigênio e diluente (N_2 ou H_2O). Isso acontece pois, a fração molar do oxidante arrastado do cofluxo O_2/H_2O é maior do que a do cofluxo O_2/N_2 , esse aumento acelera as reações químicas que diminui a região de reação.

As viscosidades dinâmicas (figura 11c) do N_2 e do CO_2 são muito próximas no intervalo, já a viscosidade dinâmica da H_2O é a menor de 400 K a 1690 K e a maior até 2600 K, alcançando um máximo de $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ em 2600 K. De forma semelhante, a condutividade térmica do N_2 e do CO_2 são próximas, já a condutividade da H_2O é maior e aumenta numa taxa maior, alcançando um valor de $0,36 \text{ W/mK}$ em 2600 K, valor cerca

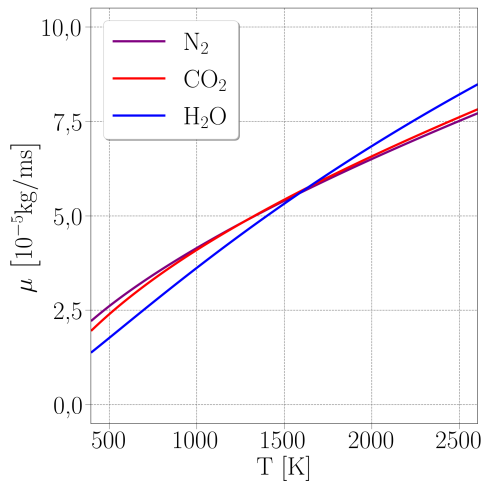
Figura 11 – Propriedades de transporte dos diluentes em função da temperatura no intervalo de 400 K a 2600 K a 1 atm.



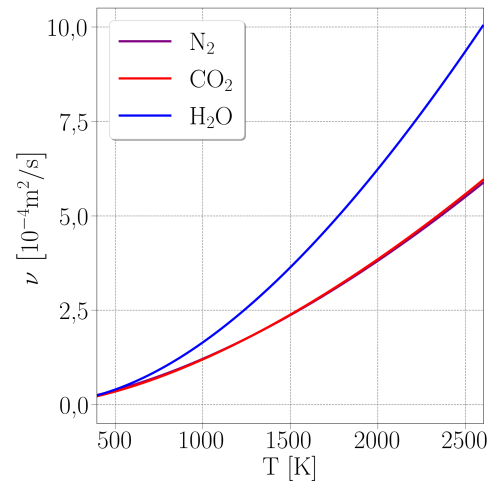
(a) Massa específica.



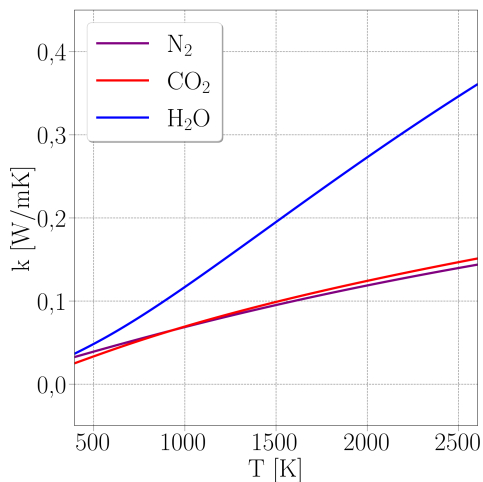
(b) Coeficiente de difusão mássica.



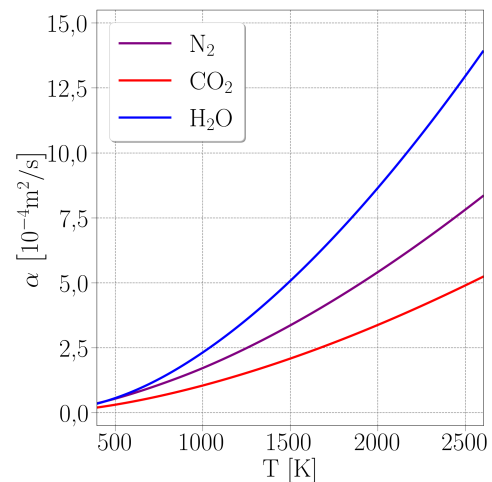
(c) Viscosidade dinâmica.



(d) Viscosidade cinemática.



(e) Condutividade térmica.



(f) Difusividade térmica.

Fonte: Adaptado de Amato et al. (2011), Wang et al. (2013), Dai et al. (2018).

de 2,5 vezes maior que a condutividade do N_2 nessa temperatura.

Essas grandezas estão diretamente ligadas às difusividades das substâncias. As diferentes difusividades dos diluentes em altas temperaturas afetam os transportes de quantidades como massa, energia e quantidade de movimento, transportes os quais causam efeitos térmicos e químicos no processo de combustão (DAI et al., 2018). Assim, a figura 11 indica, na segunda coluna, a viscosidade cinemática (ν) (figura 11d) e os coeficientes de difusão mássica (\mathcal{D}) (figura 11b) do diluente no oxigênio e de difusão térmica (α) (figura 11f) em função da temperatura. Nota-se que os gráficos têm comportamento parecidos, com a H_2O sendo a substância mais difusiva nos três parâmetros apresentados. A H_2O possui ν até 60% maior que o N_2 , já o CO_2 e o N_2 têm viscosidade cinemática praticamente iguais no intervalo. As difusividades mássica e térmica do N_2 são maiores que do CO_2 . Além disso, a H_2O possui α até 60% e \mathcal{D} até 35% maior que o N_2 . O N_2 tem difusividade mássica cerca de 1,3 maior e difusividade térmica até 1,8 maior que os valores obtidos para o CO_2 .

Wang et al. (2013) investigaram os efeitos térmicos, químicos e de difusão do CO_2 e da H_2O em chamas de difusão em contra fluxo de $CH_4 - O_2/N_2/CO_2/H_2O$. No quesito difusão mássica, a menor difusividade do CO_2 em relação ao N_2 , observada na figura 11b, torna mais lento o consumo de O_2 na oxi-combustão diluída com CO_2 , assim a região de maior temperatura é deslocada para o lado do combustível.

De forma sucinta, as propriedades de transporte geram efeitos na estabilidade de chama devido ao seu papel no processo de mistura. Dessa maneira, a alteração do diluente em oxi-combustão influencia esse fenômeno nos diversos níveis de temperatura apresentados.

2.1.3 Número de *Reynolds*

O número de *Reynolds* (Re) é um parâmetro muito utilizado para atender a semelhança na dinâmica de fluidos, tanto em câmaras de combustão em chamas confinadas, como no campo de estudo em chamas livres. Entretanto, quando se trata de oxi-combustão, a mudança da composição da mistura oxidante e diluente proporciona uma discussão adicional sobre qual parâmetro deve ser mantido constante com a intenção de manter a dinâmica similar na comparação de chamas. A equação 2.8 expressa o número de *Reynolds* para escoamento interno em um tubo circular, o qual é típico de jato de reagentes.

$$Re = \frac{\rho U_b d}{\mu} = \frac{U_b d}{\nu} \quad (2.8)$$

Nota-se que no caso de um jato de ar, manter o número de *Reynolds* constante significa manter a velocidade de escoamento (U_b), do inglês *bulk velocity*, pois o diâmetro (d) é mantido fixo e a viscosidade cinemática (ν) não é alterada. Contudo, no caso da

oxi-combustão, a viscosidade cinemática pode mudar em consequência da mudança da fração molar de diluente. Os pesquisadores lidam com isso utilizando ambos parâmetros na abordagem em estudos de estabilidade de chama oxi-combustão.

Taamallah et al. (2017) verificaram qual desses parâmetros deve ser mantido constante para obter um escoamento semelhante na zona de recirculação externa, do inglês *Outer Recirculation Zone* (ORZ). Dessa maneira, observou-se que a frequência azimutal da chama na ORZ convergia para os mesmos valores quando U_b era considerada. Fato que não acontecia quando Re era adotado, tanto em chamas ar-combustível como em oxi-combustível. Ademais, Nemitallah et al. (2018) observaram que para cada U_b existe uma razão de equivalência na transição de chama no modo de estabilização de chama da camada de cisalhamento interna, do inglês *Inner Shear Layer* (ISL), para o ORZ. Então, foi observado que a transição ocorria em velocidades mais altas para Re maiores, porém havia pouca alteração nos valores de ϕ de transição. Para Re fixo, o aumento de U_b desloca muito a transição para ϕ menores. Logo, a velocidade de escoamento é fator dominante, em detrimento de Re , nessa transição de chama (TAAMALLAH et al., 2017; NEMITALLAH et al., 2018).

Em Khalil e Gupta (2017) os experimentos de oxi-combustão de metano diluída com CO_2 foram realizados variando tanto o número de *Reynolds*, como a velocidade de escoamento. Dessa forma, não foi encontrada relação entre essas transições e a temperatura de chama adiabática, porém houve aderência em relação à velocidade de chama laminar (S_L). De maneira semelhante, Jourdaine et al. (2017) sugeriram uma relação na estabilização de chama em termos de T_{ad} e da razão entre U_b e S_L . Assim, mostrou-se que a velocidade de escoamento tem mais relevância que o número de *Reynolds*, o qual ficou em segundo plano nas relações do comportamento das transições de estabilidade de chama.

Em contrapartida, Nemitallah et al. (2018) avaliaram o efeito de Re na estabilidade de chama de $CH_4/O_2/CO_2$ pré-misturada. Os resultados indicaram que aumentar Re desloca o limite de extinção da chama para razões de equivalência menores, isto é, o limite de operabilidade da câmara aumenta. Além disso, para um mesmo Re , o limite de operação é ampliado com o aumento de U_b . Esses resultados foram atribuídos à ancoragem de chama devida à maior taxa de recirculação na ORZ. Isso evidencia o papel fundamental da dinâmica do escoamento, principalmente por U_b , nesse fenômeno (NEMITALLAH et al., 2018). No limite de retorno, por sua vez, os experimentos indicaram que Re tem pouca influência. Novamente, tal como em Jourdaine et al. (2017), U_b foi citado em comparação com S_L , pois quando a velocidade de chama supera a velocidade de escoamento o retorno ocorre. Isso indica que as taxas da cinética química têm papel fundamental no controle do fenômeno de retorno (NEMITALLAH et al., 2018).

Finalmente, em Vandiel et al. (2020) estudaram o efeito da diluição com H_2O e CO_2 na estrutura e estabilidade de uma chama de pré-mistura de metano/ar enriquecido

mantendo a velocidade de escoamento fixa. Independente do diluente, foi demonstrado que, ambas, estrutura e estabilidade de chama estão principalmente relacionadas à velocidade de chama laminar, a qual depende apenas das condições e propriedades dos reagentes.

Em suma, os estudos de instabilidade sugerem que manter a velocidade de escoamento fixa em detrimento do número de *Reynolds* é a abordagem mais adequada nos estudos de estabilidade. Na maioria dos casos é suposto que esse parâmetro mantém as condições de escoamento não reativo semelhantes (AMATO et al., 2011; ABDELHAFEZ et al., 2018a). Amato et al. (2011) ressaltam que a validação desta hipótese depende também das diferentes condições de campo encontradas em chamas ar e oxi-combustível. Dessa forma, em escoamento reativos essa hipótese deve ser confirmada, a qual não foi executada por medição direta nos trabalhos, tampouco foi generalizada para qualquer queimador ou câmara. Como os resultados são escritos em função ou em comparação com velocidade de chama laminar, essa confirmação não foi necessária, pois as relações encontradas foram suficientes para explicar os fenômenos estudados. A rigor, considerando ainda a turbulência, os campos de escoamento devem ser avaliados para confirmar as diferenças que os escoamentos reativos impõem sobre essa hipótese.

2.2 Instabilidades de chama

A instabilidade estática ocorre do resultado da disputa entre as taxas das reações químicas e das taxas de difusão turbulenta de espécies e energia (NOBLE et al., 2006; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Por um lado, em chamas pré-misturadas, a extinção ocorre quando a taxa de reação é menor que a taxa de transporte de massa por convecção. Por outro lado, em chamas não pré-misturadas, a extinção ocorre quando o tempo disponível para a mistura do oxidante com o combustível é superado pelo tempo químico característico, de tal maneira que a combustão não se sustenta (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Além da extinção, as chamas podem recuar a montante da ancoragem em chamas pré-misturas. Esse retorno acontece pois, principalmente, a velocidade de chama supera a velocidade do escoamento (NOBLE et al., 2006; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Desse modo, as instabilidades estáticas estão ligadas, em última análise, aos tempos de reação e de turbulência, então condições que alteram esses tempos geram essas instabilidades. Dessas condições citam-se (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021):

- Chamas pobres são suscetíveis à instabilidade estática devido ao excesso de ar ou O_2 no caso oxi-combustível;
- Alteração do combustível e/ou do oxidante, os quais alteram as taxas de reação;

- Aumento da vazão mássica, pois o tempo de residência diminui, assim há maior propensão ao *blowout*;
- Utilização de diferentes diluentes, os quais modificam a cinética química;
- Geometria do queimador e da câmara, pois entradas de reagentes alteram a mistura local.

O número de *Damköhler* (Da), dado pela equação 2.9, é utilizado para prever o intervalo de estabilidade estática para uma faixa de condições de entrada (NOBLE et al., 2006; AMATO et al., 2011; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021).

$$Da = \frac{\tau_{\text{turb}}}{\tau_{\text{quim}}} \quad (2.9)$$

Onde, τ_{turb} é a escala de tempo integral da turbulência e τ_{quim} é a escala de tempo química. Essas escalas são calculadas de diversas maneiras, dependendo do comportamento e regime de combustão.

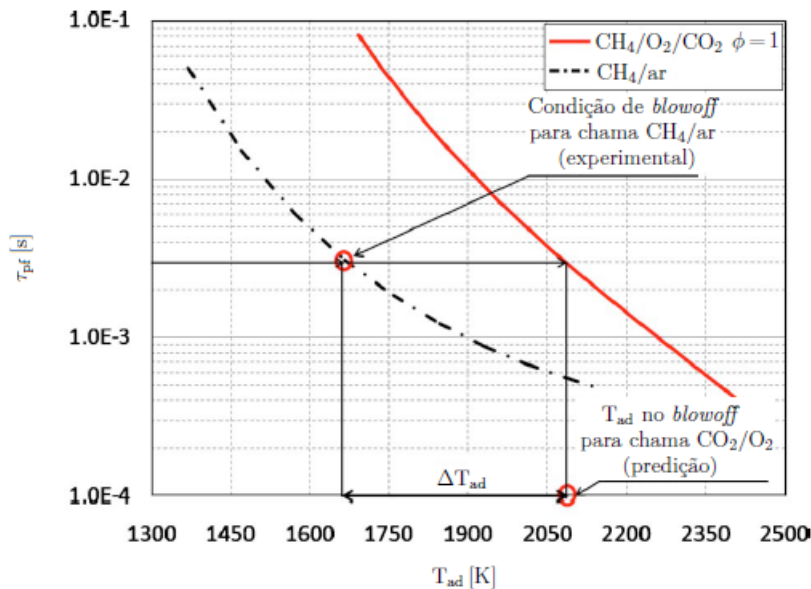
A partir da definição de número de *Damköhler* percebe-se que para grandes valores ($Da \gg 1$), o tempo químico é menor que o tempo da turbulência. Dessa forma, a turbulência não afeta a estrutura interna da chama, a qual se torna semelhante a uma chama laminar, porém enrugada por movimentos de turbulência, conhecido pelo termo limite *flamelet* (POINSOT; VEYNANTE, 2012; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). No caso de pequenos valores do número de *Damköhler* ($Da \ll 1$) o tempo químico é maior que o tempo da turbulência. Logo, a taxa de reação global é controlada pela química, enquanto os reagentes e produtos são misturados pela turbulência. Esse regime de combustão é conhecido pelo modelo de reator perfeitamente misturado (POINSOT; VEYNANTE, 2012; ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021).

Os estudos de instabilidade estática em oxi-combustão focaram no efeito da fração molar CO_2 nas características de extinção (*blowoff* ou *blowout*). As escalas de tempo de residência e química são modificadas, pois o CO_2 afeta a cinética química e nas propriedades de transporte da mistura (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021).

Amato et al. (2011) realizaram a modelagem, bem como a medição de *blowoff* em chamas CH_4/ar , $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ e $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$. Na modelagem, a escala de tempo química foi calculada de duas formas diferentes: pelo inverso da taxa de deformação de extinção de chamas opostas pré-misturadas e pela razão entre a espessura e a velocidade de chama laminar de chama de propagação livre, ambas utilizando o mecanismo *GRI3.0*. O resultado de previsão de *blowoff* indica que em chamas oxi-combustível a extinção ocorre a uma temperatura de chama adiabática mais alta do que em chamas ar-combustível, como mostrado na figura 12. Isso ocorre devido ao atraso entre as escalas de tempo química

ar e oxi-combustível (AMATO et al., 2011). Além disso, essa diferença de ΔT_{ad} é de no máximo 80 K comparando as duas escalas de tempo modeladas, assim os autores consideraram a escala de tempo calculada de chama de propagação livre para extrapolar tendências de *blowoff*, devido ao menor custo computacional. Os resultados experimentais confirmam essa diferença de T_{ad} entre as chamas para uma mesma velocidade de *blowoff*. Isso indica que a oxi-combustão diluída com CO_2 é mais suscetível ao *blowoff* cerca de 250 K de T_{ad} . Por fim, o modelo de previsão de *blowoff* mostrou bons resultados qualitativos, indicando tendências. Todavia, os valores calculados subestimaram ou superestimaram os medidos em diversos casos, logo previsão quantitativa deve ser realizada com mais cautela, revisitando a cinética com outros modelos (AMATO et al., 2011).

Figura 12 – Ilustração do procedimento para extrapolar as condições de *blowoff* de chamas ar-combustível para chamas oxi-combustível.



Fonte: Adaptado de Amato et al. (2011).

A estabilidade de chamas parcialmente pré-misturadas de oxi-metano diluídas com CO_2 foi avaliada por Kutne et al. (2011). A influência da fração molar de oxigênio na estabilidade de chama foi estudada por imagens de quimioluminescência do radical OH^* utilizando para chamas com $P_t = 21,4$ kW e $\phi = 0,71$. Os resultados mostraram que as chamas com 34% e 38% de O_2 exibiram pulsações termoacústicas periódicas. Conforme a fração molar de oxigênio diminuía a zona de chama se distribuía pela câmara de combustão e a intensidade de OH^* diminuía, até alcançar o *blowout* em valores menores que 22%. A temperatura, por sua vez, foi avaliada por experimentos de espalhamento *Raman* a laser, os quais indicaram que na região de intensidade média máxima do radical OH^* a temperatura varia entre 300 K e 2100 K, para fração molar de O_2 de 30%. Isso mostra que nessa região há misturas gasosas acabaram de reagir, como esperado, porém há também misturas de gases que ainda não reagiram devido ao atraso de ignição. Já na região de

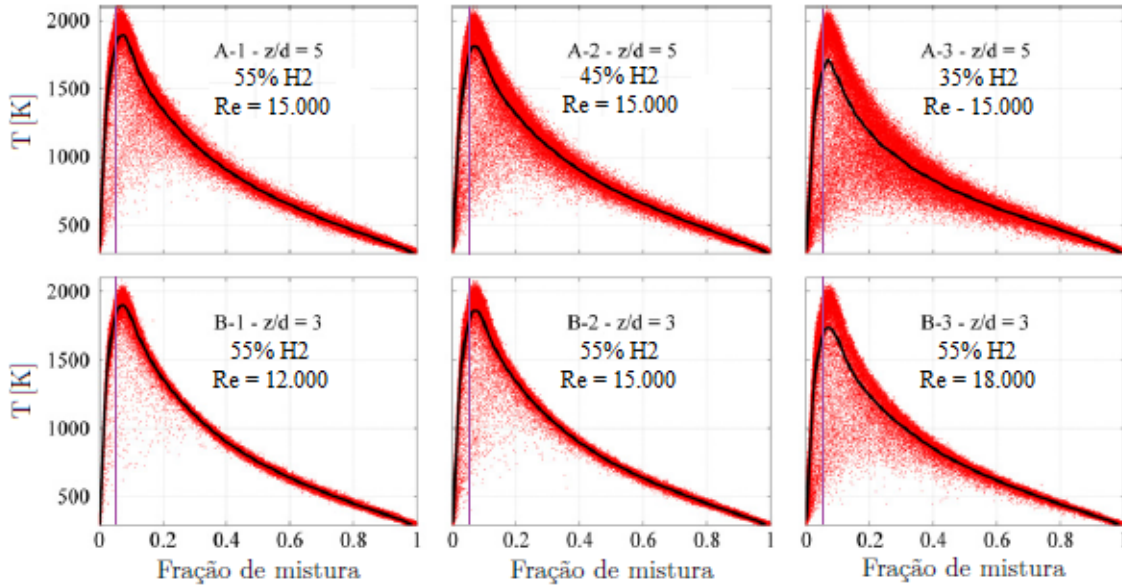
intensidade média mínima de OH^* , a fração de mistura média ficou próxima da fração de mistura estequiométrica e a temperatura em torno 1500 K, o que sugere que a composição é formada principalmente por gases queimados (KUTNE et al., 2011).

Essa queda de temperatura local também foi observada por Sevault et al. (2012) em uma chama de jato de CH_4/H_2 com cofluxo de O_2/CO_2 . No entanto, tal queda foi causada pela extinção localizada de chama, a qual ocorre quando as taxas de mistura turbulentas se tornam competitivas em relação às taxas de reações químicas (SEVAULT et al., 2012). A figura 13 mostra a temperatura *versus* a fração de mistura medidos por espalhamento *Raman/Rayleigh*. A extinção localizada foi avaliada pela variação da fração molar de H_2 no jato de combustível, primeira linha da figura 13, e pela variação do número de *Reynolds* do jato, segunda linha da figura 13. A temperatura foi utilizada, pois na extinção ocorre uma diminuição de temperatura. A linha preta no gráfico é a média condicional da temperatura e os pontos espalhados abaixo da faixa estreita e densa indicam extinção localizada. De forma simplificada, a temperatura abaixo da temperatura faixa densa de temperatura indica a extinção, pois a temperatura está abaixo da temperatura esperada. Dessa forma, conforme a quantidade de H_2 diminuiu ou *Re* aumentou, a probabilidade de extinção localizada aumentou. Ambos resultados eram esperados, pois a redução de H_2 no combustível diminui a taxa de reação química e a elevação de *Re* aumenta a taxa de dissipação escalar média, taxas as quais são fundamentais no mecanismo de extinção localizada (SEVAULT et al., 2012).

Shroll (2011) e Shroll, Shanbhogue e Ghoniem (2012) avaliaram as macroestruturas de chamas $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ e CH_4/ar confinadas e estabilizadas por *swirler*. As macroestruturas de chama encontradas foram, as nomeadas: chama tubular colunar; uma chama colunar bolha; chama cônica (chama V) estabilizada ao longo da ISL; e uma chama cônica dupla (chama M) com uma frente de chama adicional estabilizada na ORZ e ao longo da camada de cisalhamento externa, do inglês *Outer Shear Layer* (OSL) (SHROLL, 2011; SHROLL; SHANBHOGUE; GHONIEM, 2012; TAAMALLAH; SHANBHOGUE; GHONIEM, 2016). A figura 14 mostra os mapas das macroestruturas de chama de oxi-combustão (figura 14a) e combustão convencional ar-combustível (figura 14b) incluindo o *blowoff* em diversos números de *Reynolds*. Nota-se que a diminuição de T_{ad} nas transições de chama é uma tendência geral, ou seja, os limites de operabilidade aumentam com o número de *Reynolds*. Contudo, a partir de $\text{Re} = 25000$ a temperatura de *blowoff* aumenta em chamas oxi-combustão.

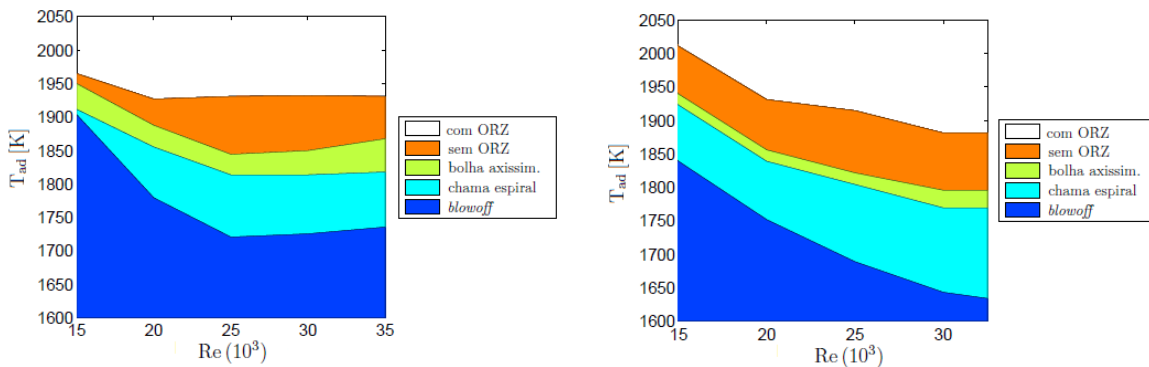
Esse resultado também foi observado em medições da velocidade de *blowoff* indicado na figura 15. Na figura 15a observa-se que o *blowoff* em oxi-combustão ocorre a temperatura de chama adiabática mais alta do que em chamas ar-combustível para um mesmo número de *Reynolds*, tal como apontado por Amato et al. (2011). Entretanto, para $\text{Re} \geq 25000$ a temperatura de chama adiabática no *blowoff* não diminui, como visto em chamas ar-

Figura 13 – Gráficos de dispersão da temperatura de *Rayleigh* em $z/d = 5$ (posição axial normalizada pelo diâmetro do jato de combustível) para variação de X_{H_2} e em $z/d = 3$ para variação de Re . A temperatura média condicional é plotada com uma linha sólida em preto. A fração de mistura estequiométrica é marcada por uma linha vertical em lilás.



Fonte: Adaptado de Sevault et al. (2012).

Figura 14 – Mapas de macroestruturas de chama estabilizada por *swirler* para oxidação de metano diluída com CO_2 (14a) e combustão convencional ar-metano (14b).



(a) Oxi-combustão.

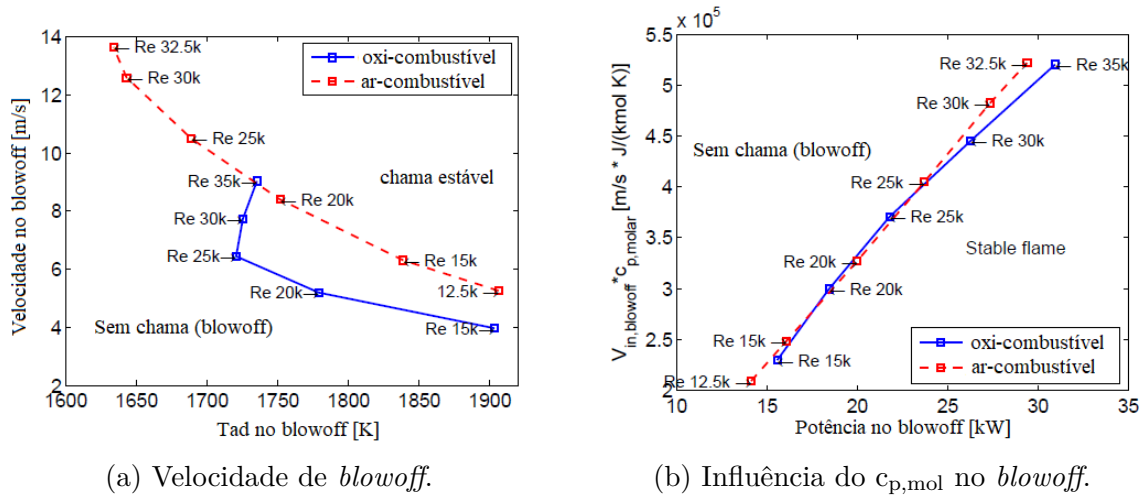
(b) Combustão ar-metano.

Fonte: Adaptado de Shroll (2011).

combustível. Os autores atribuíram esse comportamento à transição turbulenta, porém essa hipótese não pode ser verificada devido à faixa limitada do número de *Reynolds*, a qual poderiam ser alcançadas nos experimentos. Com o intuito de verificar a influência do calor específico no limite de *blowoff* foi feito um gráfico (figura 15b) do produto da velocidade de *blowoff* com o calor específico na base molar *versus* a potência térmica.

Nota-se que o comportamento em $Re \geq 25000$ é observado apenas como uma pequena mudança na inclinação.

Figura 15 – Curvas de *blowoff* de ar e oxí-combustível.



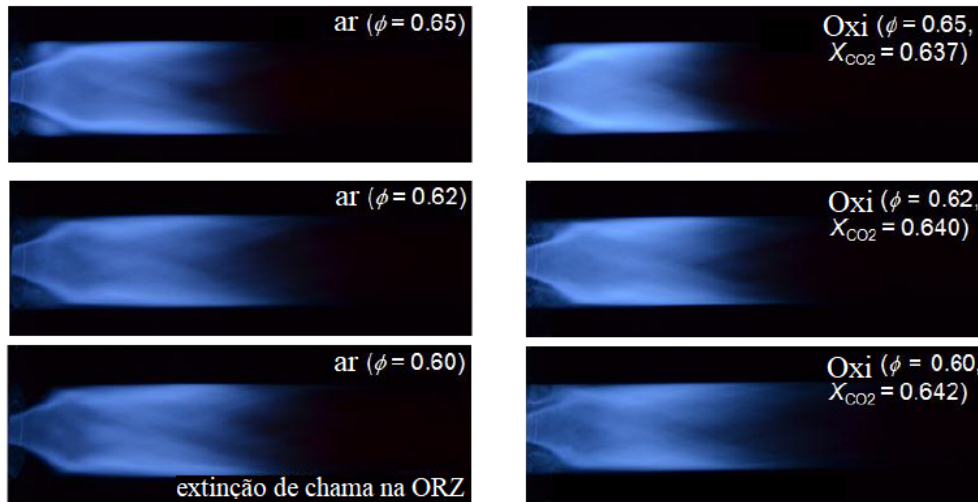
Fonte: Adaptado de Shroll (2011).

Watanabe, Shanbhogue e Ghoniem (2015) avaliaram o impacto da razão de equivalência nessas chamas. Ambas as chamas aumentam o comprimento à medida que a razão de equivalência diminui. Entretanto, quando a razão de equivalência atinge 0,60, a chama na OSL extingue nas chamas ar-combustível enquanto em chamas oxí-combustível persiste, como indicado na figura 16. Essa extinção foi atribuída a dois fatores: ao campo de taxa de deformação e à taxa de deformação de extinção. Os experimentos por PIV mostraram que as deformações ao longo da OSL são maiores do que ao longo da ISL. Os autores fizeram os cálculos para taxa de deformação de extinção em chamas opostas pré-misturas variando a razão de equivalência. Nesses cálculos, nas chamas CH_4 /ar foi utilizado o mecanismo *GRI3.0* e nas chamas $CH_4/O_2/CO_2$ o mecanismo proposto por Mendiara e Glarborg (2009). Os resultados mostraram que para razões de equivalência acima de 0,64 até 1,0 a taxa de deformação de extinção é maior em chamas ar-combustível do que em oxí-combustível, como visto para $\phi = 1,0$ em Amato et al. (2011). Isso acontece, pois a competição por radicais H entre O_2 e CO_2 mostrada nas equações 2.10 e 2.11 torna-se importante (WATANABE; SHANBHOGUE; GHONIEM, 2015).



Em Watanabe et al. (2016) essas chamas foram comparadas para um número de *Reynolds* 20000, razão de equivalência 0,65 e temperatura de chama adiabática de 1752

Figura 16 – Formato médio de chamas ar e oxi-combustível estabilizadas por *swirler*.

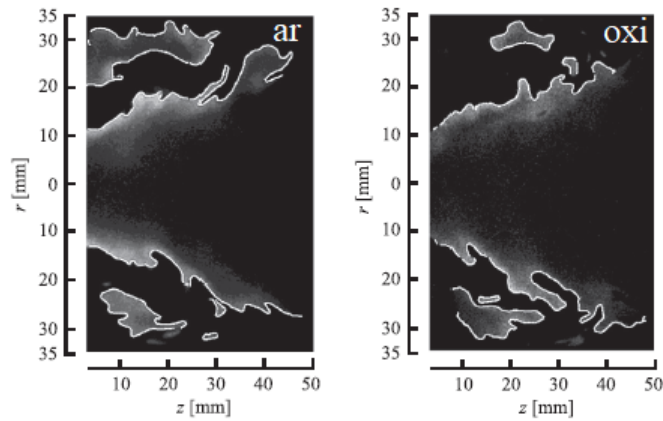


Fonte: Adaptado de Watanabe, Shanbhogue e Ghoniem (2015).

K na combustão ar-combustível e 1754 K na combustão oxi-combustível. Com foco na topologia da chama, os resultados mostraram que o comprimento médio total de penetração da chama de oxi-combustível é menor do que o observado para a chama ar-combustível. O estudo capturou o enrugamento da superfície da chama por medições de OH-PLIF, como mostrado na figura 17. Os resultados mostram que a taxa de queima das chamas de oxi-combustível é mais intensa, devido à maior densidade superficial da chama a jusante da expansão. Isto é observado por meio da formação de segmentos de chama com raio de pequena curvatura. Em contrapartida, cálculos realizados com química detalhada mostraram que a velocidade de consumo em oxi-combustível é menor do que em chamas ar-combustível devido à influência do CO_2 . De acordo com as observações apresentadas pode-se notar que, a taxa de queima calculada para chamas laminares não é suficiente para justificar as diferenças observadas em casos turbulentos, devendo-se levar em conta o enrugamento da superfície da chama.

O mecanismo de transição de chamas V para M na oxi-combustão de $CH_4/O_2/CO_2$ observado por Watanabe, Shanbhogue e Ghoniem (2015) foi estudado por Taamallah et al. (2017) com base no estudo anterior realizado para combustão ar-combustível realizado por Taamallah, Shanbhogue e Ghoniem (2016). Taamallah, Shanbhogue e Ghoniem (2016) encontraram uma razão de equivalência crítica na qual esta transição ocorre. Precisamente, os autores notaram que a escala de tempo de chama característica deve ser da mesma ordem de grandeza que a escala de tempo de fluxo característica dentro da ORZ para permitir tal transição. A escala de tempo química característica foi calculada pelo inverso da taxa de extinção da deformação, assim como feito em Watanabe, Shanbhogue e Ghoniem (2015). A escala de tempo característica da fluidodinâmica foi calculada a partir do inverso da frequência de rotação na ORZ, a qual reflete as características de escoamento na ORZ

Figura 17 – Fronteira de chama instantânea em imagens OH-PLIF de ar e oxi-combustível em chamas estabilizadas por *swirler* em $\phi = 0,65$ e $Re = 20000$.



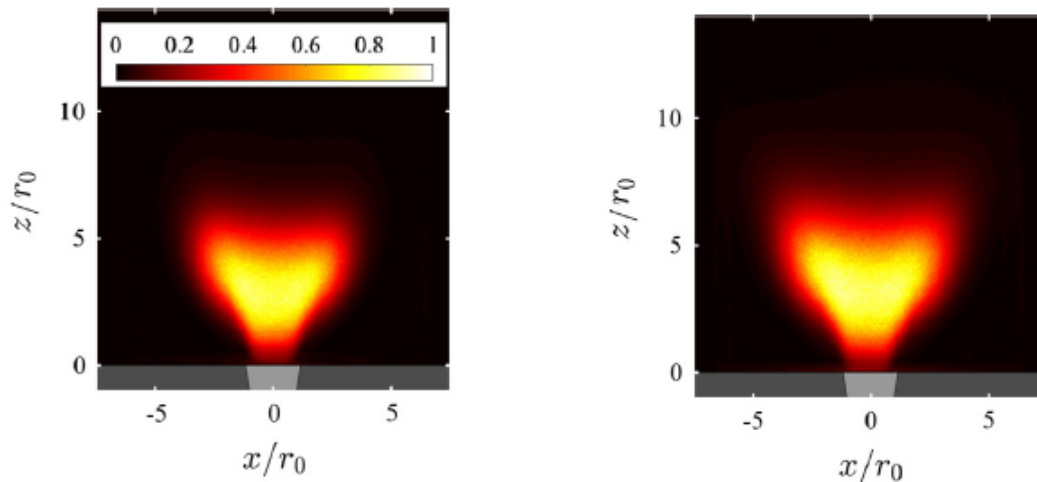
Fonte: Adaptado de Watanabe et al. (2016).

e também captura os efeitos do número de *Reynolds* e do número de *swirler*. Assim, foi proposto um modelo para capturar a transição das chamas V para M causada pelo desprendimento do núcleo da chama para qualquer combinação de combustível, número de *swirler* e número de *Reynolds* para uma câmara com a mesma geometria. No entanto, não foi possível afirmar que o modelo pudesse de fato explicar essa transição na oxi-combustão. Dessa forma, Taamallah et al. (2017) encontraram a razão de equivalência crítica para a combustão oxi-combustível, na qual ocorre o início da estabilização da chama na zona de recirculação externa. Esta transição acontece para a mesma velocidade de escoamento de entrada em ambos os casos de ar e oxi-combustível, a qual determina características de escoamento semelhantes na ORZ. Isso ocorre porque a frequência de rotação da chama na ORZ é um fenômeno exclusivamente fluidodinâmico. Portanto, os efeitos termoquímicos puderam ser isolados comparando a combustão ar e oxi-combustível. Finalmente, os autores usaram o inverso da frequência de rotação ORZ como a escala de tempo característica da dinâmica dos fluidos e o inverso da taxa de deformação de extinção como a escala de tempo química. Como resultado, os autores validaram o modelo de transição para a combustão ar-combustível, como para oxi-combustão diluída com CO_2 .

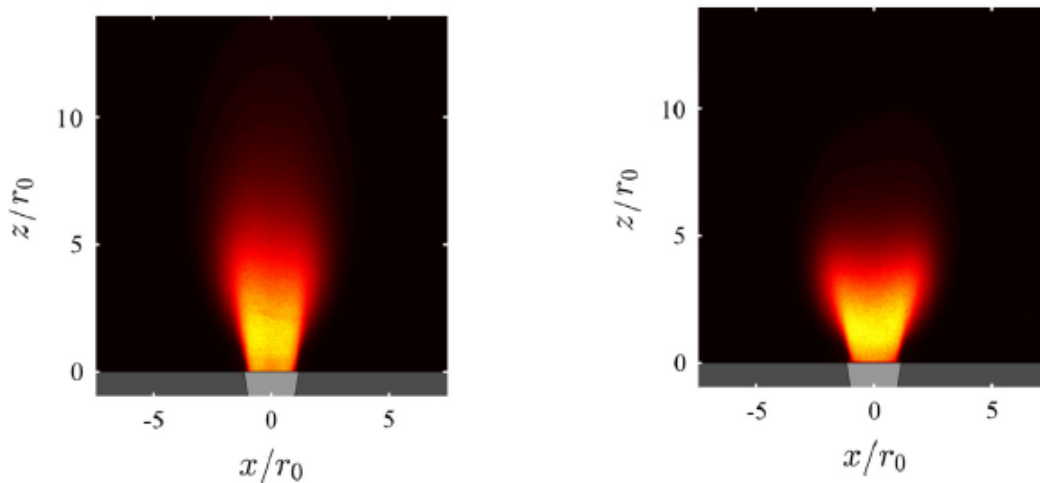
Jourdaine et al. (2017) seguiram essa linha comparando as macroestruturas de chamas pré-misturadas de $CH_4/O_2/CO_2$ e $CH_4/O_2/N_2$, porém variando a quantidade dos diluentes. Os experimentos mostraram que, mantidas a razão de equivalência ($\phi = 0,95$) e a potência ($P_t = 13$ kW) fixas, chamas com mesma T_{ad} tinham formas semelhantes e que a estabilização da chama em relação ao bocal depende da razão U_b/S_L . A figura 18 mostra as medições por quimioluminescência do radical OH^* em quatro chamas estudadas. As figuras 18a e 18b mostram, respectivamente, as chamas diluídas com N_2 e CO_2 com $T_{ad} = 2200$ K. Nota-se que as duas chamas assumem formas semelhantes com posição estabilizada acima da saída do queimador, embora com U_b maior na chama diluída com

N_2 . As figuras 18c (CO_2) e 18d (N_2) indicam as chamas com $T_{ad} = 2350$ K posicionadas dentro do bocal de saída do queimador. Além das chamas apresentarem a mesma topologia, as temperaturas medidas ao longo da parede da câmara e dos gases de combustão na saída foram aproximadamente iguais. Isso indica a viabilidade da oxi-combustão em aplicações, pois macroestruturas semelhantes foram alcançadas para chamas ar e oxi-combustível em uma câmara específica e em temperaturas similares.

Figura 18 – Distribuições de intensidade média de OH^* de chamas de CH_4/O_2 diluídas em CO_2 e N_2 com razão de equivalência $\phi = 0,95$ e potência térmica $P_t = 13$ kW. Elementos cinza indicam peças sólidas do queimador com $r_0 = 10$ mm.



(a) $CH_4/O_2/N_2$: $T_{ad} = 2200$ K; $X_{N_2} = 0,79$; $U_b = 14,3$ m/s; $S_L = 37$ cm/s. (b) $CH_4/O_2/CO_2$: $T_{ad} = 2200$ K; $X_{CO_2} = 0,68$; $U_b = 9,7$ m/s; $S_L = 21$ cm/s.



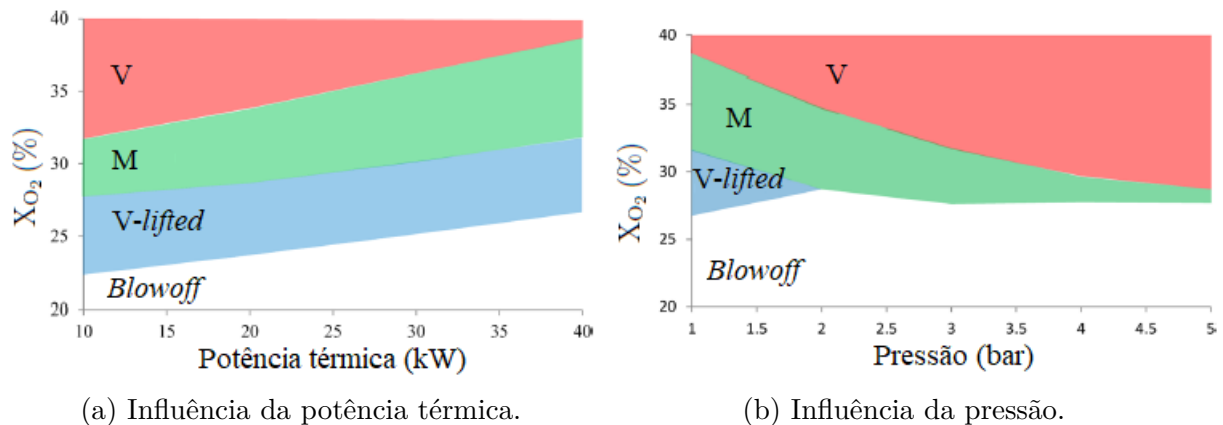
(c) $CH_4/O_2/CO_2$: $T_{ad} = 2350$ K; $X_{CO_2} = 0,62$; $U_b = 8,5$ m/s; $S_L = 36$ cm/s. (d) $CH_4/O_2/N_2$: $T_{ad} = 2350$ K; $X_{N_2} = 0,75$; $U_b = 12,2$ m/s; $S_L = 57$ cm/s.

Fonte: Adaptado de Jourdain et al. (2017).

Saanum e Ditaranto (2017) investigaram a estabilidade da chama em oxi-combustão do metano tomando a fração molar de oxigênio, a potência térmica e a pressão na câmara. O estudo visou sistemas de combustão para ciclos de potência oxi-combustível de altas

concentrações de CO_2 e pressões, como o apresentado por Saanum et al. (2016). A fração molar de O_2 foi ajustada para obter as macroestruturas da chama: chamas V, M e V descolada, do inglês *lifted*, além de *blowoff*. Como resultado, foram construídos dois mapas de estabilidade de chama mostrados na figura 19. Na figura 19a o mapa foi produzido com base em X_{O_2} e P_t . Esse mapa mostra que diminuindo a fração molar de O_2 , a chama torna-se cada vez menos estável até atingir o *blowoff*, como esperado. Além disso, à pressão atmosférica, uma concentração de oxigênio de cerca de 31,7% demonstra ser suficiente para obter uma chama estável, dentro da faixa de potência térmica de 10 kW a 40 kW. O outro mapa, apresentado na figura 19b, mostra regiões de estabilidade para diferentes valores de fração molar de O_2 e de pressão. O resultado indica que acima de 2 bar a chama V descolada não ocorre e a região correspondente à chama M diminui com pressões mais altas. Especificamente, quando a pressão é de cerca de 5 bar, a ocorrência de chamas M é fortemente reduzida. Em contrapartida, o desenvolvimento da chama V cresce com a pressão e prevalece nas maiores pressões investigadas. Portanto, quanto maior a pressão, mais estável se torna a chama.

Figura 19 – Mapas de estabilidade chama.



Fonte: Adaptado de Saanum e Ditaranto (2017).

Seguindo o método de comparação, Abdelhafez et al. (2018a) realizaram experimentos com o intuito de encontrar correlações entre os modos de estabilização de chama $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ e $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ e os parâmetros globais de entrada. Os autores variaram a razão de equivalência (0,2 - 1,0) e a fração molar de oxigênio (21% - 70%) e testaram a correspondência das macroestruturas, retorno e *blowout* com T_{ad} , P_d e Re . Os resultados mostraram que, mantendo a velocidade de escoamento de entrada fixa, a temperatura de chama adiabática sozinha é suficiente para determinar as macroestruturas e o retorno. Não foram encontradas correlações entre os parâmetros globais com o *blowout* mantendo U_b constante.

Ali et al. (2021) efetuaram os mesmos experimentos com propano. Ambos os conjuntos de chamas possuem mapas T_{ad} distintos, tais como os apresentados na figura 10,

porém suas zonas de estabilização são caracterizadas apenas por T_{ad} . Os limites de *blowout* e retorno das diluições de CO_2 e N_2 seguiram aproximadamente curvas de temperaturas de chama adiabáticas constantes, com T_{ad} de 1580 K para *blowout* e 2350 K para retorno.

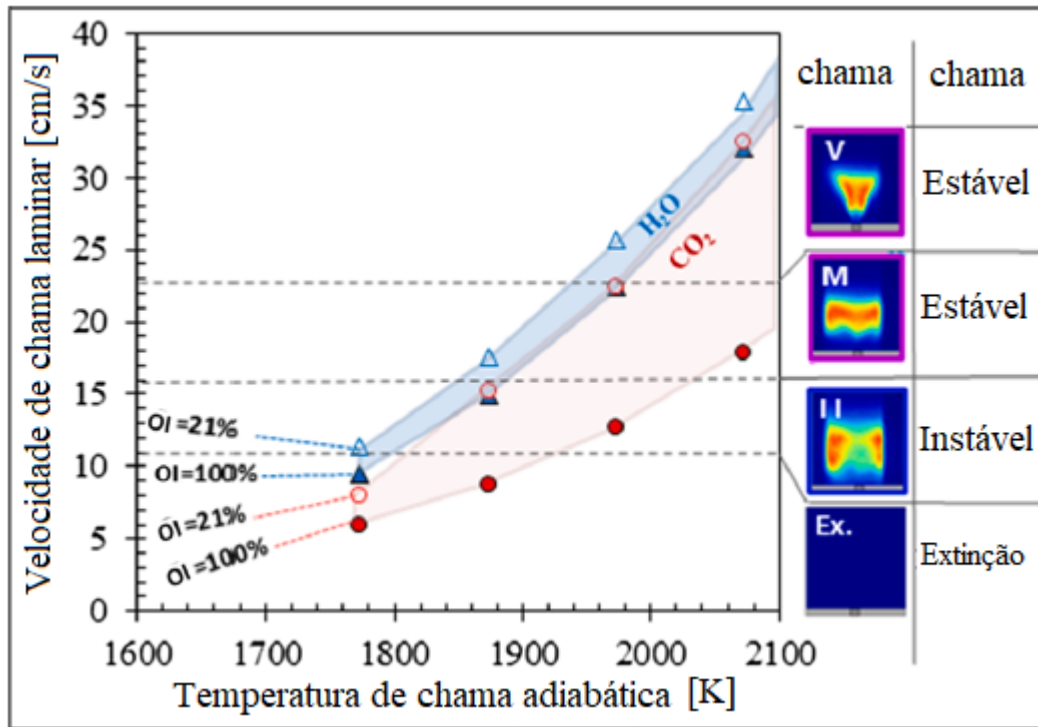
Nemitallah et al. (2018) realizaram esses experimentos variando o número de *Reynolds* (7000, 9000 e 11000) de entrada para combustão de $CH_4/O_2/CO_2$. Os resultados mostraram que *blowout* acontece com densidade de potência constante para todos os valores de Re , o que indica o papel importante do limite de estabilidade em chamas pobres oxi-combustível. Abdelwahid et al. (2018) avaliaram os limites de estabilidade de chamas oxi-metano enriquecidas com hidrogênio e diluídas com CO_2 . Os resultados mostraram que o aumento da fração molar de H_2 estreita a faixa da razão de equivalência para chamas estáveis, livres do retorno. Isso foi atribuído às velocidades de chama mais altas alcançadas com hidrogênio, uma vez que as taxas de reação controlam a velocidade da chama no retorno (NEMITALLAH et al., 2018; ABDELWAHID et al., 2018). Além disso, a topologia das chamas mudaram com o aumento da fração molar de hidrogênio. Chamas com uma fração molar de H_2 mais alta tendem a ser mais curtas e mais compactas devido ao aumento da taxa de reação e da velocidade da chama. Essas chamas também são mais ruidosas devido à liberação instável de calor na chama turbulenta e às flutuações da taxa de liberação de calor na zona de reação.

Vandel et al. (2020) avaliaram o efeito da diluição de vapor d'água e de dióxido de carbono na estrutura e estabilidade de chamas de metano/ar enriquecido. A variação da velocidade de chama laminar foi observada conforme o índice de oxigênio (IO), indicado na equação 2.12, foi variado de 21% a 100%. Isso foi feito mantendo a temperatura de chama adiabática, a razão de equivalência e a velocidade de escoamento de entrada fixas, como mostrado na figura 20. A correlação entre a estabilidade e as estruturas de chama com a velocidade de chama laminar foi estabelecida. A transição de chama ocorre a S_L constante, de ar a oxi-combustível, tanto para diluição com CO_2 como H_2O (VANDEL et al., 2020). Para uma mesma T_{ad} a oxi-combustão do metano diluída com H_2O tem S_L maior que a diluída com CO_2 , proporcionando assim, chamas mais estáveis. Além disso, uma dada macroestrutura é alcançada em menores níveis de T_{ad} quando a diluição acontece com água. Os autores sugeriram que esses fenômenos são vantagens da diluição com água em comparação com dióxido de carbono.

$$IO = \frac{X_{O_2}}{X_{O_2} + X_{N_2}} \quad (2.12)$$

Vandel et al. (2022) mostraram que a taxa de conversão de N_2 em NO depende apenas da T_{ad} e do excesso de oxigênio. Isso implica que o uso de CO_2 ou H_2O , em vez de N_2 em temperatura de chama adiabática constante, reduz as emissões de NO_x . Em relação ao CO , foi demonstrado que a taxa de conversão de CO_2 em CO depende do T_{ad} , do excesso de O_2 e da espécie do diluente. O uso de vapor como diluente reduz essa conversão,

Figura 20 – Evolução da velocidade de chama laminar, macroestrutura média da chama e estabilidade de chama em função da temperatura de chama adiabática e índice de oxigênio para as condições de diluição (H_2O e CO_2). Os círculos preenchidos se referem à oxi-combustão do metano e vazios à combustão convencional com, ambas diluída com CO_2 . Os triângulos preenchidos se referem à oxi-combustão do metano e vazios à combustão convencional com, ambas diluída com H_2O . As linhas tracejadas na horizontal representam as transições e extinção de chama. ($T_e = 373 \text{ K}$, $p = 1 \text{ atm}$, $\phi = 0,91$, $U_b = 30 \text{ m/s}$).



Fonte: Adaptado de Vandell et al. (2020).

a qual pode ser atribuída à oxidação de CO a CO_2 com a presença do radical hidroxila. Nesse sentido, os autores indicaram que a diluição com H_2O é mais atrativa que com CO_2 , pois as emissões de NO_x e CO são reduzidas. Além disso, os autores também apontam as vantagens do uso do vapor como diluente, pois reduz o risco de desestabilização da chama.

Abubakar, Mokheimer e Kamal (2021) realizaram uma revisão da literatura sobre instabilidades estáticas e dinâmicas em oxi-combustão usando uma abordagem teórica, numérica e experimental. A pesquisa destacou o CO_2 como o diluente mais utilizado para avaliar as características de estabilidade de chama com sua forte influência tanto na macro, como na microestrutura. Os estudos sobre instabilidades estáticas sobrepõem os trabalhos realizados sobre instabilidades dinâmicas, as quais não possuem nenhum mecanismo universal que vincule o uso do diluente (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021). Os pesquisadores evidenciaram a escassez de estudos de estabilidade em altas pressões, a grande lacuna de estudos sobre a diluição com H_2O , bem como a utilização de H_2 como combustível com a finalidade de reduzir a pegada de carbono. Dessa maneira, novas frentes

de oportunidades se abriam para futuras pesquisas em oxi-combustão.

As tabelas 2 e 3 mostram os principais resultados desses trabalhos em ordem para entendimento do desenvolvimento da estabilidade estática em oxi-combustão.

2.3 Regime de Combustão sem Chama Visível

Outra tecnologia com crescente notabilidade nas últimas décadas é a combustão sem chama visível, a qual é conhecida na literatura como *Flameless Oxidation* (FLOX), combustão distribuída incolor ou, a mais reconhecida pela comunidade internacional de combustão, *Moderate and Intense Low oxygen Dilution* (MILD) (VERÍSSIMO; ROCHA; COSTA, 2011; LI et al., 2013; VILLANUEVA, 2021). Nesse regime de combustão ocorrem reduções de oscilações, ruídos, as emissões de NO_x extremamente baixas e operação estável de combustão (WÜNNING; WÜNNING, 1997; LI et al., 2013). Uma técnica bastante utilizada com o intuito de alcançar esse regime é a recirculação de gases de combustão, a qual pode ser feita no interior da câmara de combustão pela fluidodinâmica do escoamento (WÜNNING; WÜNNING, 1997; VILLANUEVA, 2021).

O desenvolvimento dessa tecnologia foi realizado principalmente utilizando a combustão ar-combustível. Wüning e Wüning (1997) apresentaram as características gerais de um projeto para um queimador funcionar nesse regime de combustão (VILLANUEVA, 2021). A partir disso, de modo similar à literatura de oxi-combustão, a influência de parâmetros globais foi analisada em função de limites de estabilidade de combustão (VERÍSSIMO; ROCHA; COSTA, 2013; VILLANUEVA, 2021). Em teoria, a combinação da oxi-combustão com a tecnologia MILD pode melhorar a eficiência térmica, bem como as emissões de NO_x , assim oxi-combustão MILD tem potencial para oferecer mais vantagens sobre a oxi-combustão padrão (CHEN; YONG; GHONIEM, 2012; LI et al., 2013).

Na literatura, poucos estudos observaram o regime sem chama visível em oxi-combustão. Li et al. (2013) investigaram as características da oxi-combustão MILD em um forno em escala laboratorial. Os experimentos foram realizados com gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP) e etileno (C_2H_4) queimados com ar ou O_2/CO_2 . Os resultados mostraram que a razão de equivalência influencia consideravelmente a combustão MILD, como indicado na figura 21. Para fração mássica de CO_2 fixa a combustão sem chama visível é alcançada para ϕ próximo de 1,0. Além disso, conforme ϕ aumenta até a unidade, a temperatura aumenta, porém a emissão de NO_x diminui, independente combustível e do diluente. O mecanismo térmico tradicional de NO_x não explicou esse fenômeno.

Villanueva (2021) investigou a influência da turbulência no regime sem chama visível da combustão do metano com ar. Os resultados TR-PIV indicaram que o caso convencional apresentou maiores flutuações e gradientes de velocidade, resultando maiores valores das componentes do tensor de Reynolds e da taxa de dissipação da turbulência.

Tabela 2 – Principais resultados dos trabalhos selecionados na literatura sobre estabilidade estática em oxí-combustão - parte 1.

Referências e comentários	Reagentes	Parâmetros globais
Amato et al. (2011) - Experimentos e cálculos de escala de tempo química mostraram que o <i>blowoff</i> acontece em T_{ad} maiores para oxí-combustão diluída com CO_2 .	$CH_4/O_2/CO_2$, $CH_4/O_2/N_2$ e CH_4/ar	fixos: p e ϕ ; variados: U_b , P_t e T_{ad}
Kutne et al. (2011) - Quimioluminescência de OH^* indicaram que a topologia da chama se altera conforme a fração molar de oxigênio é variada.	$CH_4/O_2/CO_2$	fixos: p , ϕ e P_t ; variados: U_b e X_{O_2}
Sevault et al. (2012) - A probabilidade de extinção localizada aumenta com o aumento de Re e com a diminuição de X_{H_2} .	jato: CH_4/H_2 e cofluxo: O_2/CO_2	fixos: p , Re , X_{H_2} e T_{ad} ; variados: Re e X_{H_2}
Shroll (2011) e Shroll, Shanbhogue e Ghoniem (2012) - As Macroestruturas de chama encontradas na combustão ar-metano são observadas na oxí-combustão e são função de T_{ad} . As regiões de combustão são maiores em ar-metano.	$CH_4/O_2/CO_2$ e CH_4/ar	fixos: p e ϕ ; variados: Re e T_{ad}
Watanabe, Shanbhogue e Ghoniem (2015) - As chamas aumentam o comprimento com a diminuição de ϕ . A transição de chama V para M ocorre em ϕ de diferentes valores. As taxas de deformação são importantes na transição.	$CH_4/O_2/CO_2$ e CH_4/ar	fixos: p , Re e X_{O_2} ; variados: ϕ e X_{CH_4}
Watanabe et al. (2016) - O comprimento médio total da chama oxí-combustível é menor do que para chama ar-combustível. Medições por OH-PLIF mostraram que a taxa de queima das chamas de oxí-combustível é mais intensa. A velocidade de consumo de chama em oxí-combustível é menor do que em chamas ar-combustível.	$CH_4/O_2/CO_2$ e CH_4/ar	fixos: p , Re e ϕ .
Taamallah et al. (2017) - Validação do modelo de transição de chama V para M para oxí-combustão diluída com CO_2 .	$CH_4/O_2/CO_2$	fixos: p e U_b ; variados: ϕ , Re e T_{ad}
Jourdaine et al. (2017) - Experimentos mostraram que a estabilização da chama em relação ao bocal depende da razão U_b/S_L e chamas de mesma topologia tinham mesma T_{ad} e mesmos níveis de temperatura.	$CH_4/O_2/CO_2$ e $CH_4/O_2/N_2$	fixos: p , ϕ , T_{ad} e P_t ; variados: U_b e X_d

Fonte: Adaptado de Abubakar, Mokheimer e Kamal (2021).

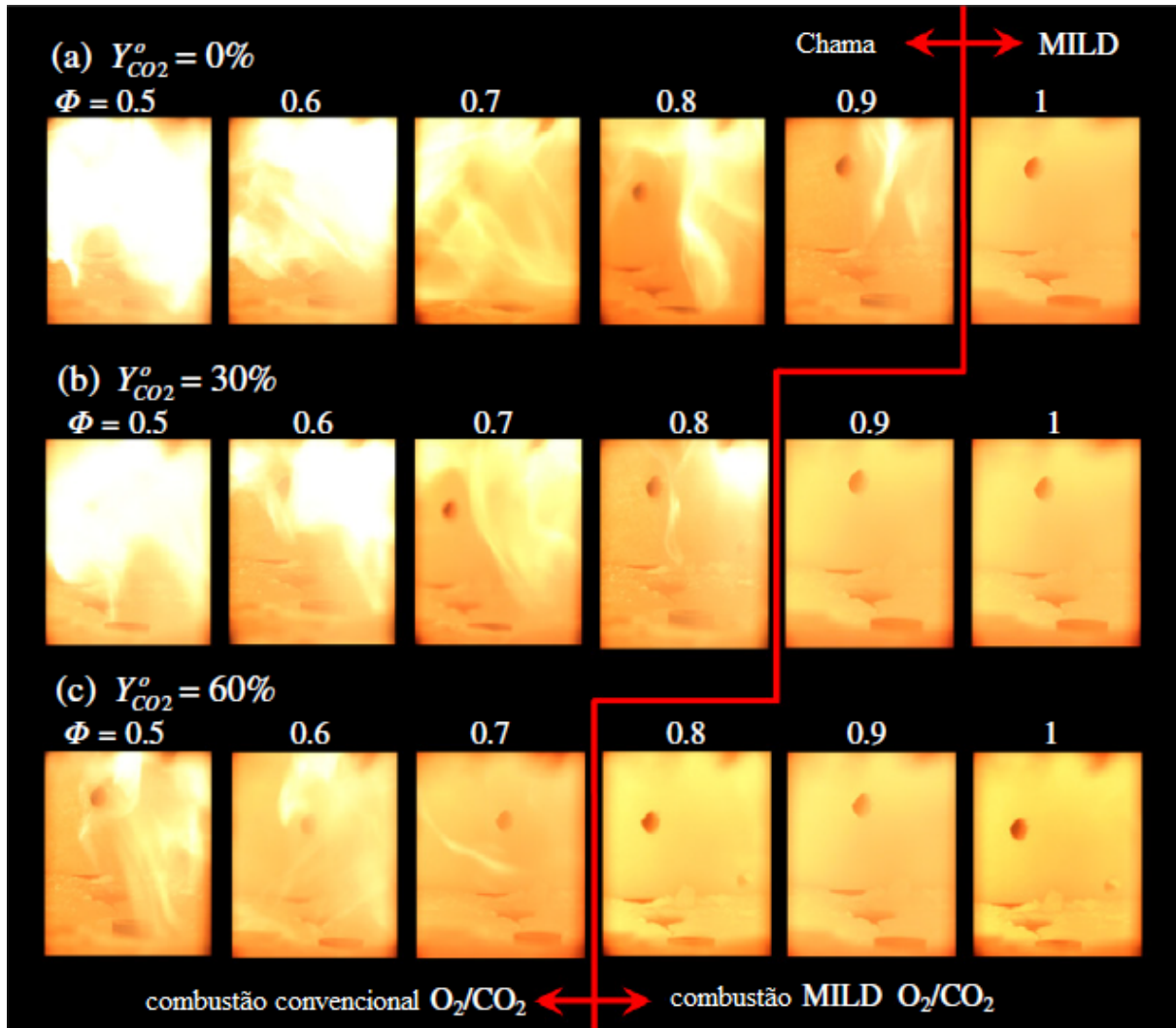
Tabela 3 – Principais resultados dos trabalhos selecionados na literatura sobre estabilidade estática em oxi-combustão - parte 2.

Referências e comentários	Reagentes	Parâmetros globais
Saanum e Ditaranto (2017) - O aumento de pressão produz regiões de chama mais estáveis.	CH ₄ /O ₂ /CO ₂	fixo: ϕ ; variáveis: p, X _{O₂} e U _b
Abdelhafez et al. (2018a) - Para uma dada U _b fixa, a temperatura de chama adiabática é suficiente para determinar as macroestruturas e o <i>flashback</i> .	CH ₄ /O ₂ /CO ₂ e CH ₄ /O ₂ /N ₂	fixos: p e U _b ; variáveis: ϕ , X _{O₂} e T _{ad}
Ali et al. (2021) - Na oxi-combustão do propano, os limites de <i>blowout</i> e <i>flashback</i> em ambas diluições seguiram curvas de T _{ad} aproximadamente constantes.	C ₃ H ₈ /O ₂ /CO ₂ e C ₃ H ₈ /O ₂ /N ₂	fixos: p e U _b ; variáveis: ϕ , X _{O₂} e T _{ad}
Nemitallah et al. (2018) - O <i>blowout</i> acontece com densidade de potência constante para Re fixo.	CH ₄ /O ₂ /CO ₂	fixos: p e Re; variáveis: ϕ , X _{O₂} , T _{ad} e U _b
Abdelwahid et al. (2018) - O aumento de X _{H₂} diminui a faixa de ϕ para chamas estáveis, porém são livres de <i>flashback</i> . As chamas com X _{H₂} maiores tendem a ser mais compactas e ruidosas.	CH ₄ /H ₂ /O ₂ /CO ₂	fixos: p e U _b ; variáveis: X _{H₂} e X _{O₂}
Vandel et al. (2020) - Uma correlação entre as macroestruturas de chama com S _L foi realizada, de tal forma que as transições de chama ocorreram a S _L constante, de ar a oxi-combustível, tanto para diluição com CO ₂ como H ₂ O.	CH ₄ /O ₂ /N ₂ /CO ₂ e CH ₄ /O ₂ /N ₂ /H ₂ O	fixos: p, ϕ e U _b ; variáveis: T _e , T _{ad} e OI
Vandel et al. (2022) - A oxi-combustão do metano diluída com H ₂ O produz menos NO _x e CO, a temperatura de chama adiabática constante, que a diluição utilizando CO ₂ ou N ₂ .	CH ₄ /O ₂ /N ₂ /CO ₂ e CH ₄ /O ₂ /N ₂ /H ₂ O	fixos: p e U _b ; variáveis: ϕ , T _e , T _{ad} e OI

Fonte: Adaptado de Abubakar, Mokheimer e Kamal (2021).

Os resultados de quimioluminescência do radical OH* mostraram que o caso convencional possui maior intensidade média do que na transição e no regime sem chama visível. Por fim, os resultados da interação entre a cinética química e a turbulência indicaram que, no caso sem chama visível, o processo de mistura é maior nas zonas de reação, pois as pequenas escalas turbulentas exercem maior influência nas reações químicas (VILLANUEVA, 2021).

Figura 21 – Imagens de luminescência natural mostrando o efeito da razão de equivalência na aparência da combustão de gás natural com O_2/CO_2 em diferentes frações mássicas de CO_2 .



Fonte: Adaptado de Li et al. (2013).

2.4 Síntese e Lacunas de Pesquisa

A estabilidade em oxi-combustão foi, com o passar dos anos, caracterizada em função de variáveis de entrada da câmara, como fração molar, razão de equivalência, mas principalmente pela temperatura de chama adiabática. As macroestruturas de chamas, retorno, extinção localizada, *blowout* e *blowoff* foram alvos dos autores para caracterização das chamas. As chamas V e M, ancoradas e/ou descoladas dominam a literatura, sendo explicitadas por experimentos, tais como quimioluminescência, PLIF, PIV, entre outros. Os resultados indicam transições entre chamas em T_{ad} constante, porém não único para diferentes combustíveis e diluentes. O fato de T_{ad} ser essa grandeza unificada, além de ser parâmetro de comparação entre chamas, não explica a estabilidade, as transições, tampouco o formato das macroestruturas. Nesse sentido, recentemente os autores buscaram

na velocidade de chama laminar uma correlação melhor entre a estabilidade e uma grandeza global. O resultado que generaliza essas tentativas é apresentado em Vandel et al. (2020), o qual engloba as diluições usando CO_2 e H_2O de ar a oxi-combustão. Os trabalhos que apresentam discussões de grandezas locais em chamas são escassos devido à dificuldade de se realizar uma medição local da chama e de suas espécies.

Além dos trabalhos apresentados neste capítulo, outros autores avaliaram questões importantes na literatura em oxi-combustão, além das instabilidades de chama, tais como a emissão de CO e a difusão diferencial. A fração mássica média condicional de CO atingiu valores de até 18% nas chamas estudadas. Esse alto nível acontece uma vez que o CO_2 compete com o O_2 pelo hidrogênio atômico levando à formação de CO através da reação da equação 2.10. Desse modo, espera-se que os níveis de CO em oxi-combustão diluída com CO_2 sejam maiores que na combustão ar-combustível, visto que o aumento da concentração de CO_2 induz a formação de CO. De outra forma, se o CO_2 for diminuído, as temperaturas aumentam, o que leva a formação de CO pela dissociação do CO_2 . Níveis de CO de até 30% foram encontrados em chamas de oxigênio puro (DITARANTO; SAUTET; SAMANIEGO, 2001; SEVAULT et al., 2012). Logo, investigações de emissões de CO em função da relação O_2/CO_2 são de grande interesse da literatura em oxi-combustão.

A difusão diferencial, por sua vez, consiste no processo físico de observar o transporte específico da espécie em misturas não homogêneas de multicomponentes (HANSINGER; PFITZNER; SABELNIKOV, 2021). Em Sevault et al. (2012) esse fenômeno foi estudado por medições das frações mássicas de CO, O_2 , H_2O e CO_2 , as quais concordaram com os cálculos do modelo de difusão multicomponente laminar próximo ao bocal, porém não houve aderência dos resultados em todo espaço de fração de mistura. Do ponto de vista da modelagem da combustão, a difusão diferencial é uma tarefa trabalhosa, devido à interação desse fenômeno com a turbulência e a química. Garmory e Mastorakos (2015), Gierth et al. (2018) e Hansinger, Pfitzner e Sabelnikov (2021) realizaram modelagens dessas chamas, porém não encontraram um modelo que realizasse completamente a difusão diferencial. Dessa maneira, a modelagem deste fenômeno em chamas de oxi-combustível continua sendo um desafio.

Finalmente, a oxi-combustão MILD é pouco explorada na literatura em comparação com os estudos sobre instabilidades. Essa alternativa tem potencial para redução de emissões de NO_x e CO operando em regime estável de combustão. Os estudos de oxi-combustão pré-misturada diluída com CO_2 dominam a literatura, porém a avaliação das instabilidades em altas pressões permanece em aberto. Por fim, é notória a escassez de trabalhos de oxi-combustão diluída com H_2O . Desse modo, uma grande lacuna na pesquisa em oxi-combustão são os estudos com diluição utilizando H_2O (ABUBAKAR; MOKHEIMER; KAMAL, 2021).

3 Metodologia

Neste capítulo, a bancada experimental será descrita e os detalhes da câmara de combustão serão apresentados na seção 3.1. Na seção 3.2, as condições de entrada selecionadas para os experimentos são explicadas, juntamente com os critérios utilizados, tendo em vista os resultados de estabilidade e regime de combustão não visível apresentados no capítulo 2. Na seção 3.3, o cálculo da velocidade de chama laminar será apresentado, bem como as condições de contorno. Por fim, na seção 3.4 a medição por quimioluminescência será apresentada, além do método de convergência estatística e a sequência de técnicas de pré e pós processamento de imagens aplicados nos dados.

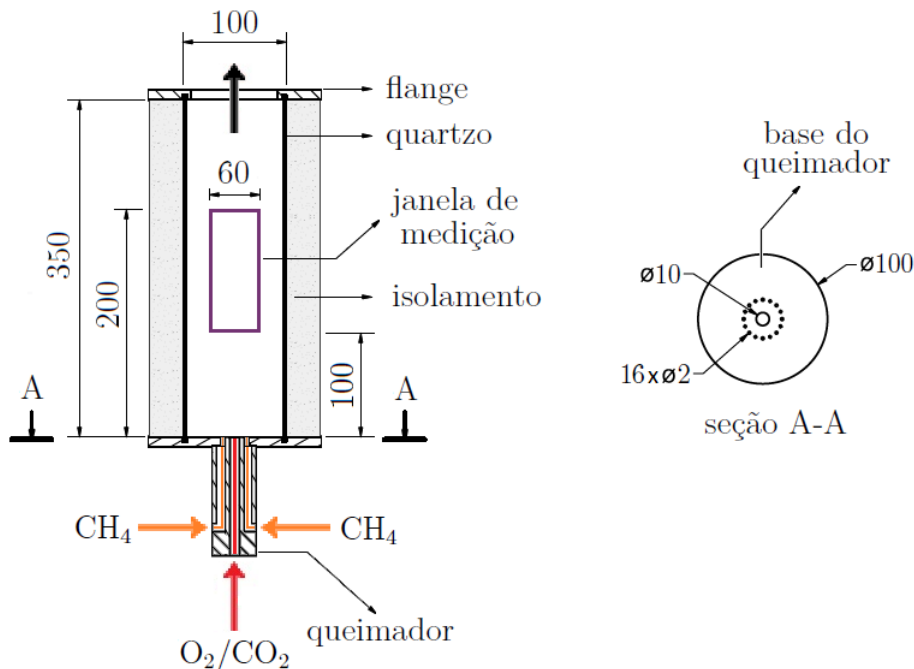
Este trabalho está inserido no projeto *Chemical Looping Combustion (CLC) and Oxy-fuel combustion with Natural Gas and Biogas*. O projeto está em fase inicial, assim este estudo investiga os fundamentos em oxi-combustão turbulenta, tendo em vista os resultados de estabilidade e oxi-combustão MILD apresentados no capítulo 2. Desse modo, esse trabalho utiliza a oxi-combustão utilizando CO₂ como diluente, apesar dos resultados apresentados na revisão de literatura mostrarem as vantagens de realizar a oxi-combustão diluída com H₂O.

3.1 Aparato Experimental

A câmara de combustão mostrada na figura 22 foi desenvolvida por Villanueva (2021) para operar de forma estável no regime de chama não visível (MILD/*flameless*) na combustão ar-combustível com base na pesquisa de Veríssimo, Rocha e Costa (2011). No anexo A, os desenhos de fabricação realizados em Villanueva (2021) são apresentados. A câmara é formada por um tubo de quartzo de 100 mm de diâmetro e 350 mm de comprimento apoiado no queimador e preso por um flange superior. O quartzo foi envolto em três camadas de manta cerâmica de alumina, cada camada com 20 mm, a fim de obter isolamento térmico com o ambiente do laboratório. O oxidante (O₂) e o diluente (CO₂) são pré misturados antes de serem inseridos no queimador, essa mistura entra na câmara por um furo de 10 mm centralizado no queimador. Já o combustível (CH₄) é inserido no queimador por quatro entradas laterais e entra na câmara por 16 furos de 2 mm a 15 mm do centro do queimador, como indicado na figura 22. Assim, o metano e a mistura O₂/CO₂ se misturam dentro da câmara de combustão, constituindo uma configuração não pré-misturada de um jato confinado de oxidante e diluente.

Os reagentes são fornecidos por cilindros industriais com pureza de 99,5% para o metano e 99,8% para o O₂ e para o CO₂. A vazão é medida e regulada separadamente por rotâmetros da fabricante *Dwyer*, modelos RMA-22-SSV para o metano e RMA-25-SSV

Figura 22 – Câmara de combustão.



Fonte: Adaptado de Villanueva (2021).

para o oxigênio e para o dióxido de carbono. Esses modelos indicam a vazão em l/min num intervalo de 5 l/min a 25 l/min com resolução de 1 l/min para o metano e um intervalo de 10 l/min a 100 l/min com resolução 5 l/min para o modelo RMA-25-SSV.

As pressões na entrada dos rotômetros foram reguladas em 3,0 kgf/cm² em manômetros da GAVIN série P400 de 6 kgf/cm² de fundo de escala e resolução de 0,2 kgf/cm². A regulagem foi realizada de tal maneira que as vazões medidas fiquem no intervalo mensurável dos rotômetros e, posteriormente, serem corrigidas com as massas específicas dos reagentes usando a correlação para rotômetro de corpo flutuante mostrada na equação 3.1 (DWYER, 2015).

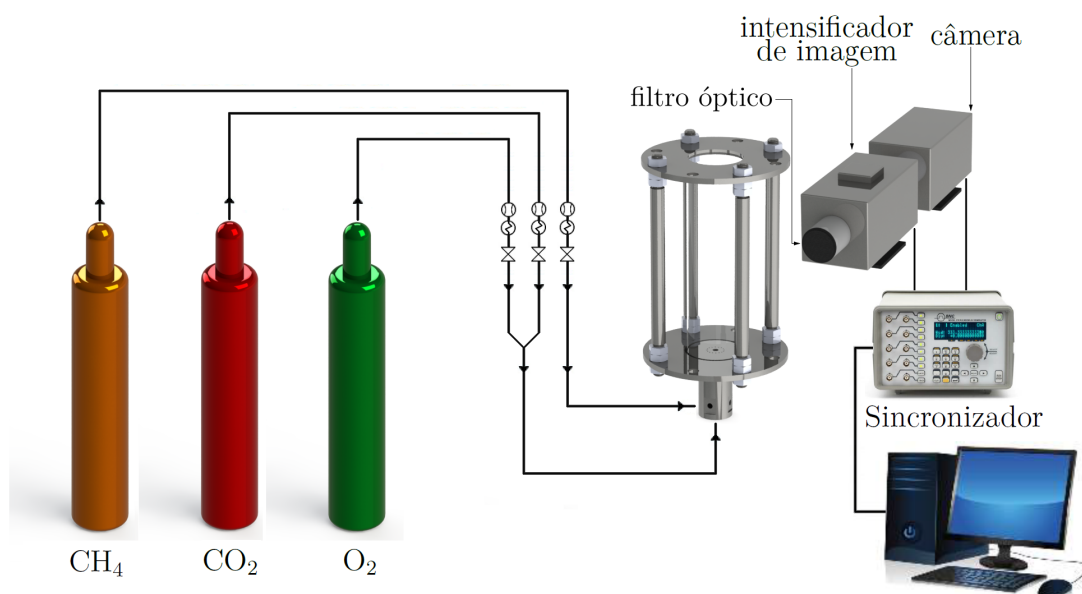
$$Q_{\text{ref}} = \left[\left(\frac{1}{\text{SG}} \right) \left(\frac{P_{\text{ind}}}{P_{\text{ref}}} \right) \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T_{\text{ind}}} \right) \right]^{0,5} Q_{\text{ind}} \quad (3.1)$$

onde SG é a razão entre a massa específica da substância medida e do ar nas condições de referência, sendo que os valores de referência são $p_{\text{ref}} = 1 \text{ atm}$ e $T_{\text{ref}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$. A pressão (p_{ind}), a temperatura (T_{ind}) e a vazão volumétrica (Q_{ind}) são os valores indicados nos medidores. A vazão calculada (Q_{ref}) é a vazão no estado de referência. As temperaturas foram medidas por termopares tipo K e indicaram 25 °C.

O sistema de medição por quimioluminescência do radical OH* foi montado com um filtro óptico passa banda de $311,45 \pm 4,88 \text{ nm}$ conectado a uma lente objetiva com limites UV entre 250 nm e 410 nm, de distância focal 100 mm f/2.8 da CERCOS modelo

2073. Esse conjunto foi acoplado em um intensificador de imagem C10880 da *Hamamatsu Photonics K.K.* e uma câmera do tipo CMOS da fabricante *Vision Research Inc.* do modelo V311 de sensor de 12-bit e com capacidade máxima de 1280×800 *pixels* com distância entre *pixels* de $20 \mu\text{m}$. Esses dispositivos foram conectados a um gerador de pulsos 575-8C da *Berkeley Nucleonics Corporation* que realizava a sincronização da aquisição pela câmera e do intensificador de imagens, o qual era controlado pelo *software Dynamic Studio* desenvolvido pela *Dantec Dynamics A/S*. Esse sistema é indicado na figura 23.

Figura 23 – Desenho esquemático da bancada experimental.



Fonte: Autor.

3.2 Condições Experimentais

Neste trabalho foram realizados três conjuntos de experimentos: três casos para a quimioluminescência do radical OH^* ; cinco casos de transição entre chama ancorada e chama descolada e cinco casos de extinção de chama. As condições experimentais desses conjuntos serão detalhadas nas próximas seções.

3.2.1 Condições Experimentais para a Quimioluminescência

As condições experimentais para a quimioluminescência foram determinadas após uma série de testes preliminares. Nos primeiros testes, as vazões de metano e oxigênio foram mantidas fixas com $\phi = 1$ e a vazão de CO_2 foi variada, analogamente ao realizado em Khalil e Gupta (2017). Contudo, o *blowout* ocorria imediatamente após a chama descolar da borda do queimador. Dessa maneira, não foi observada qualquer chama descolada, tampouco o regime de chama não visível.

Dado isso, todas as medições foram realizadas com uma mesma velocidade de entrada, mantendo assim as chamadas condições de escoamento frio semelhantes, a fim de serem obtidas intensidades turbulentas próximas na comparação entre chamas (ABDELHAFEZ et al., 2018a; ABDELHAFEZ et al., 2018b; ABDELWAHID et al., 2018; NEMITALLAH et al., 2018; ALI et al., 2021). As vazões de O₂ e CO₂ foram ajustadas para manter a velocidade em 30 m/s no jato central do queimador. A vazão de metano, por sua vez, foi controlada de forma que a razão de equivalência fosse unitária, no caso das medições por quimioluminescência, ou pobre nas medições de transição e extinção de chama. Logo, as vazões mássicas dos reagentes nos experimentos de quimioluminescência estão indicadas na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros experimentais de controle.

Chama	\dot{m}_{CH_4} [kg/s]	\dot{m}_{O_2} [kg/s]	\dot{m}_{CO_2} [kg/s]
ancorada	$(5,03 \pm 0,13) \cdot 10^{-4}$	$(2,049 \pm 0,051) \cdot 10^{-3}$	$(1,520 \pm 0,012) \cdot 10^{-3}$
descolada	$(3,85 \pm 0,12) \cdot 10^{-4}$	$(1,589 \pm 0,048) \cdot 10^{-3}$	$(2,158 \pm 0,012) \cdot 10^{-3}$
não visível	$(2,66 \pm 0,12) \cdot 10^{-4}$	$(1,003 \pm 0,046) \cdot 10^{-3}$	$(2,983 \pm 0,013) \cdot 10^{-3}$

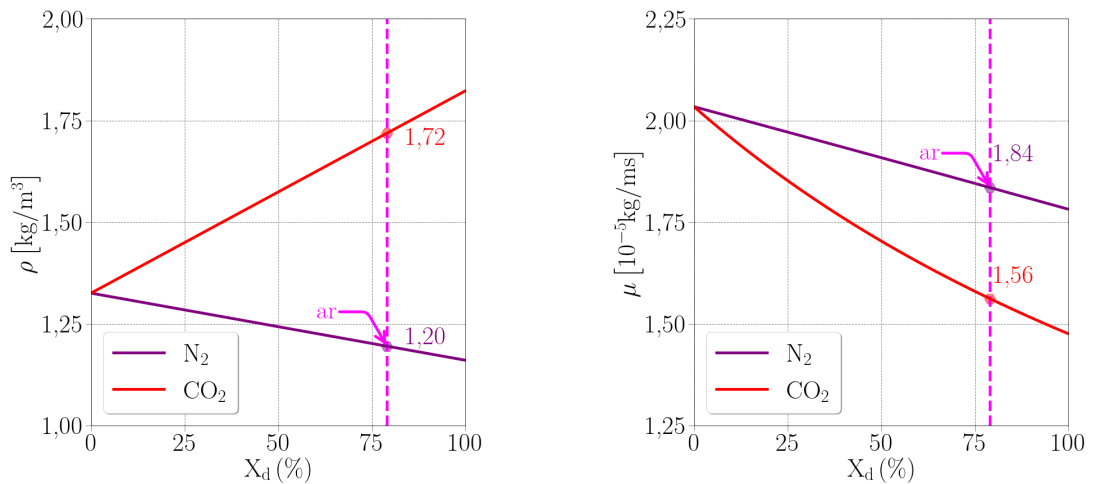
Fonte: Autor.

Operando dessa forma, foram estudadas as chamas ancoradas e descoladas e o regime de chama não visível. A chama ancorada ficou com a conhecida forma de jato, modificando a coloração de azul para amarela e aumentando o ruído conforme a diluição era aumentada. Após o descolamento, a chama se tornou descolada com aumento considerável de ruído. A chama descolada oscilava sua topologia e posição no centro da câmara. O regime sem chama visível, por seu lado, se mostrou muito sensível ao isolamento térmico da câmara. Logo, foi imprescindível utilizar o isolamento de manta cerâmica de alumina, além de operar por um tempo necessário para que as temperaturas se uniformizassem, como observado em Villanueva (2021).

Como as frações molares de O₂ e CO₂ na mistura O₂/CO₂ foram alteradas, o número de *Reynolds* foi modificado, pois a viscosidade cinemática também é função das frações molares. Para verificar essa variação foram feitas as curvas de propriedades em função da fração molar de CO₂ e N₂. A figura 24 mostra a massa específica (figura 24a), a viscosidade dinâmica (figura 24b) e a viscosidade cinemática (figura 24c) em função da fração molar de diluente na mistura com oxigênio. A mistura está a 1 atm e 298 K.

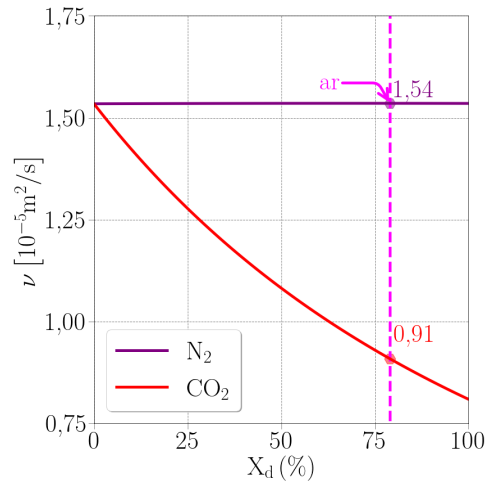
Na figura 24a, a massa específica da mistura com N₂ (linha sólida lilás) diminui conforme a diluição aumenta, atingindo o valor de 1,16 kg/m³. Já a massa específica da mistura com CO₂ (linha sólida vermelha) aumenta com a diluição alcançando o valor de 1,72 kg/m³ em X_d = 79%. Isso indica uma discordância entre a diluição usando CO₂, N₂ e com ar (linha magenta tracejada vertical), o nitrogênio torna a massa específica da mistura

Figura 24 – Massa específica, viscosidade dinâmica e viscosidade cinemática da mistura dos diluentes com O_2 em função das frações molares dos diluentes a 298 K e 1 atm. As linhas sólidas lilás são as propriedades na mistura O_2/N_2 e as linhas sólidas vermelhas as propriedades na mistura O_2/CO_2 . A linha magenta tracejada vertical indica a fração molar de N_2 no ar. O círculo lilás é o valor da propriedade no ar e o círculo em vermelho o correspondente ao mesmo valor de diluição com CO_2 .



(a) Massa específica.

(b) Viscosidade molecular.



(c) Viscosidade cinemática.

Fonte: Autor.

menor e o dióxido de carbono maior, a qual não atinge o valor da massa específica do ar, $1,20 \text{ kg/m}^3$, independente da quantidade de diluição.

A viscosidade dinâmica, por sua vez, diminui com o aumento do diluente como mostrado na figura 24b. A mistura com N_2 apresenta maiores valores, seguida da mistura com CO_2 . Na figura 24c, a combinação desses resultados é observada na viscosidade cinemática, a qual se mantém aproximadamente constante para o N_2 . Porém, os valores diminuem para o CO_2 , além de não atingir o valor do ar. Isso mostra que o aumento

da diluição usando CO_2 , diminui a viscosidade cinemática, assim o número de *Reynolds* aumenta mantendo U_b constante. Portanto, utilizando um jato da mistura O_2/CO_2 na entrada, não é possível manter Re e U_b fixos nas mesmas condições de diluição, além de não alcançar os mesmos valores de combustão ar-metano.

Desse modo, os escoamentos de entrada da câmara possuem números de *Reynolds* diferentes para as chamas estudadas. Além disso, a temperatura de chama adiabática diminuía, como desejado, porém não era possível manter, também, a potência térmica fixa, assim os casos comparados têm P_t diferentes, como visto na tabela 5.

Tabela 5 – Condições experimentais das chamas medidas por quimioluminescência: $T_e = 298 \text{ K}$, $\phi = 1,0$ e $U_b = 30 \text{ m/s}$.

Chama	$T_{ad} \text{ [K]}$	$X_{\text{O}_2} \text{ (\%)}$	$X_{\text{CO}_2} \text{ (\%)}$	$\nu \text{ [m}^2\text{/s]}$	$Re \text{ (10}^3\text{)}$	$P_t \text{ [kW]}$
ancorada	3889	65,0	35,0	$1,19 \cdot 10^{-5}$	25,2	25,0
descolada	3243	50,3	49,7	$1,08 \cdot 10^{-5}$	27,8	19,1
não visível	2404	32,3	67,7	$0,97 \cdot 10^{-5}$	30,6	13,2

Fonte: Autor.

As frações molares foram calculadas utilizando os valores das vazões mássicas apresentadas na tabela 4, tomando as massas molares de cada substância e usando as equações 2.4 e 2.5. A temperatura de chama adiabática, por sua vez, foi calculada pela primeira lei da Termodinâmica usando as frações molares e a razão de equivalência. A viscosidade cinemática foi obtida dos valores da figura 24c, por consequência, o número de *Reynolds* foi calculado pela equação 2.8. Por fim, a potência térmica foi calculada usando as vazões mássicas de metano, dadas na tabela 4 com o PCI do metano apresentado na tabela 1.

3.2.2 Procedimento de Transição e Extinção de Chama

As medições de transição e extinção de chama foram realizadas utilizando um procedimento padronizado. Inicialmente, a potência térmica foi mantida fixa e a vazão de oxigênio foi regulada suficientemente para atingir 30 m/s no jato central. A partir disso, a vazão de O_2 foi diminuída e a vazão de CO_2 aumentada lentamente, de tal forma que a velocidade permanecesse estável até acontecer a transição ou a extinção. Seguindo esse procedimento, esses fenômenos ocorriam conforme os passos de vazão eram realizados, sempre mantendo a potência térmica fixada para cada caso de estudo.

Ao longo desses experimentos, os regimes de chama mudaram de chama ancorada para chama descolada, atingindo o regime de chama não visível e finalmente a extinção. No caso do descolamento, a transição era percebida, pois a chama não ficava fixa no queimador, além do ruído sonoro aumentar consideravelmente. O fenômeno da extinção

ocorreu de forma gradual, assim o ruído da chama ficou em um nível baixo, de maneira que só era possível confirmar o evento visualmente. A transição de chama descolada para o regime de chama não visível, por sua vez, dependeu de um isolamento térmico adequado da câmara para uniformização de temperatura, logo foi necessário, para cada passo de vazão regulada, esperar um tempo da ordem de grandeza de horas de observações. Logo, esse experimento foi realizado apenas para razão de equivalência unitária, diferentemente do descolamento e a extinção, os quais foram realizados numa faixa de razão de equivalência.

A tabela 6 apresenta as condições de ocorrência de descolamento e de extinção. Para cada caso de um fenômeno foram realizados cinco experimentos. Logo, os valores da tabela são médias desses experimentos. Como são dois fenômenos e cinco casos, foram feitos 50 experimentos no total. Para ambos fenômenos, o único parâmetro selecionado previamente foi a potência térmica, ou de modo prático no laboratório, a vazão de metano. Aplicando o procedimento explicado, a razão de equivalência e a fração molar de CO_2 foram calculadas a partir dos valores observados para a vazões de oxigênio e dióxido de carbono que ocorreram nos fenômenos. Esses resultados serão analisados e discutidos na seção 4.2.

Tabela 6 – Condições experimentais de descolamento e de extinção: $T_e = 298 \text{ K}$ e $U_b = 30 \text{ m/s}$. As potências térmicas de cada caso e fenômeno foram selecionadas, as razões de equivalência e frações molares foram calculadas a partir dos resultados para cada caso e fenômeno.

Fenômeno	Condições	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
descolamento	ϕ	1,00	0,87	0,77	0,68	0,59
	X_{CO_2} (%)	42,9	40,1	39,0	35,6	33,0
	P_t [kW]	23,1	20,5	18,6	17,3	15,4
extinção	ϕ	1,01	0,87	0,80	0,70	0,54
	X_{CO_2} (%)	71,8	70,0	69,0	67,6	60,6
	P_t [kW]	10,9	10,3	9,6	9,0	8,3

Fonte: Autor.

3.3 Velocidade de Chama Laminar

Um código foi implementado em *Python* usando a biblioteca *Cantera* para um modelo de chama laminar de propagação livre (GOODWIN; MOFFAT; SPETH, 2015). Nesse modelo, as equações de conservação da massa, balanço de massa das espécies e conservação da energia são resolvidas para uma chama pré-misturada laminar (POINSOT; VEYNANTE, 2012). A velocidade de chama laminar foi calculada usando o mecanismo de

cinética química *GRI-3.0* (SMITH et al., 1998). Para cada medição de quimioluminescência, transição e extinção, a velocidade de chama laminar foi calculada. Para isso, a razão de equivalência e as frações molares indicadas nas tabelas 5 e 6 foram usadas como condições de contorno para cada chama, além de uma temperatura de 298,15 K dos reagentes e uma pressão de 1 atm. O apêndice A apresenta a função utilizada no cálculo da velocidade de chama laminar.

3.4 Quimioluminescência do radical OH*

Na quimioluminescência, a emissão espontânea de luz é gerada por espécies eletronicamente excitadas por resultado das reações químicas (ZHAO; BUTTSWORTH; CHOUDHURY, 2018). Essas espécies excitadas são representadas por um * ao lado da fórmula química, por exemplo, OH* (PACÍFICO et al., 2015). Essa técnica é comumente utilizada em combustão para determinar a localização de zonas de reação, dado que tais emissões são de relativa facilidade de detecção, além de ser um método não intrusivo (ZHAO; BUTTSWORTH; CHOUDHURY, 2018).

O resultado da medição por quimioluminescência pode ser apresentado em escala arbitrária, devido à dependência das configurações do instrumento de medição, no caso deste trabalho os sensores da câmera. Assim, geralmente é utilizado o termo unidades arbitrárias (u.a.) como unidade de medida para os valores medidos. Outra forma de apresentação é realizada normalizando os resultados pelo valor máximo, logo, a escala se torna normalizada e sem unidade de medida (KAMAT, 2019). As emissões do radical OH*, apresentadas neste trabalho, são indicadas em escala arbitrária. Dessa forma, a unidade de medida é arbitrária (u.a.), seja para o caso da intensidade instantânea (I_{OH^*}), da intensidade média (\bar{I}_{OH^*}) e desvio padrão da intensidade (I_{dp,OH^*}).

3.4.1 Convergência Estatística

Na literatura em combustão, os resultados de quimioluminescência são frequentemente apresentados utilizando a média das imagens adquiridas. Neste trabalho, além das médias, o desvio padrão será usado para análise. Desse modo, uma questão importante é: quantas imagens são necessárias para a convergência estatística dos resultados (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016)? É intuitivo imaginar que, quanto maior o número de dados, melhor será a convergência estatística. Isso acontece em medições estatisticamente independentes e não correlacionadas. Para essas medições, uma boa solução é utilizar o intervalo de confiança como parâmetro de convergência estatística (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016). No entanto, em escoamentos turbulentos essa prática não é suficiente. Isso ocorre devido à correlação temporal das medições, isto é, há uma diferença entre número total de amostras e número de amostras independentes. Dessa forma, em medições

de escoamentos turbulentos é preciso acrescentar critérios de avaliação de convergência estatística.

Os escoamentos turbulentos podem ser caracterizados desde as menores escalas (escalas de *Kolmogorov*) até as grandes escalas de movimento (escalas integrais) (POPE, 2000). Em escoamentos estatisticamente estacionários existe uma relação entre a convergência estatística de séries temporais e um conjunto de amostras independentes, as quais são não correlacionadas (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016). Essas amostras são definidas em um intervalo de tempo de escala integral. A escala de tempo integral do processo pode ser calculada pela equação 3.2 (POPE, 2000; PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

$$t_0 = \int_0^{\infty} \varrho(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

onde ϱ é a função autocorrelação da média de uma quantidade medida ψ . Dado isso, em escoamentos turbulentos estatisticamente estacionários só ocorrem contribuições significativas para a convergência dos estimadores para os valores esperados dos momentos estatísticos, quando o intervalo de tempo de medição for, no mínimo, duas vezes maior do que a escala de tempo integral (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016). O número de contribuições significativas só ocorrem a partir de $2t_0$ devido ao teorema de *Nyquist* (ou teorema de *Nyquist-Shannon*). Basicamente, o teorema mostra que a frequência de aquisição (f_s) tem que ser, no mínimo, maior que duas vezes a maior frequência que se deseja medir ($f_s > 2f_{\max}$) (GONZALEZ; WOODS, 2018; NAVARRO-RODRÍGUEZ; GARCÍA; GUERRERO, 2023). Dessa forma, o número de amostras independentes aquisitadas durante uma medição, dada pela equação 3.3, é o parâmetro que governa a convergência, em detrimento do número de amostras (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

$$N_{\text{ind}} = \frac{\Delta t}{2t_0} \quad (3.3)$$

onde Δt é o intervalo de tempo de medição. Isso posto, em um escoamento turbulento estatisticamente estacionário, o n -ésimo momento estatístico da variável ψ é dado pela equação 3.4 (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

$$\overline{\psi^n} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \psi^n(t) dt \quad (3.4)$$

Porém, em uma medição real o intervalo de tempo é finito. Assim, um estimador para o n -ésimo momento estatístico é dado pela equação 3.5 (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

$$\overline{\psi^n}_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \psi^n(t) dt \quad (3.5)$$

Logo, a convergência estatística do enésimo momento estatístico ocorre quando $\overline{\psi_{\Delta t}^n} \rightarrow \overline{\psi^n}$. Então, define-se o erro quadrático médio ($\varepsilon_{\Delta t(n)}$), do inglês *mean square error* (MSE), da diferença entre o estimador e o valor verdadeiro do enésimo momento estatístico.

$$\varepsilon_{\Delta t(n)}^2 \equiv \frac{\text{E} \left[\left(\overline{\psi_{\Delta t}^n} - \overline{\psi^n} \right)^2 \right]}{\left(\overline{\psi^n} \right)^2} \quad (3.6)$$

onde E se refere ao valor esperado. Então, desenvolvendo a equação 3.6.

$$\varepsilon_{\Delta t(n)}^2 = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \left[\varrho_{(n)}(\tau) - 1 \right] dt dt' \quad (3.7)$$

onde $\varrho_{(n)}(\tau) = \frac{\overline{\psi^n(t)\psi^n(t')}}{\left(\overline{\psi^n} \right)^2}$ é a função autocorrelação do enésimo momento estatístico e $\tau = t' - t$ é o atraso. Todavia, as medições são amostradas discretamente em uma frequência de aquisição finita. Portanto, modificando a equação 3.7 para variável discreta e tomando o primeiro e segundo momentos estatísticos, tem-se os erros quadráticos médios da média e da variância dados pelas equações 3.8 e 3.9, respectivamente (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

$$\varepsilon_{s(1)} \approx \left[\frac{2t_0 f_s}{N_s} \frac{\overline{\psi'^2}}{\left(\overline{\psi} \right)^2} \beta_{(1)} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{s(2)} \approx \left[\frac{2t_0 f_s}{N_s} \beta_{(2)} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

onde o subscrito “s” se refere a dados amostrados. Os valores de $\beta_{(1)}$ e $\beta_{(2)}$ são adquiridos assumindo uma expressão para função autocorrelação da média, valores os quais são dados pelas equações 3.10 e 3.11 (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

$$\beta_{(1)} = \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{t_0} \right) \right] - \frac{t_0}{t} \left[1 - \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \exp \left(-\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$\beta_{(2)} = \left[1 - \exp \left(-\frac{2t}{t_0} \right) \right] - \frac{t_0}{2t} \left[1 - \left(1 + \frac{2t}{t_0} \right) \exp \left(-\frac{2t}{t_0} \right) \right] \quad (3.11)$$

Note que, tanto o erro quadrático médio da média, quanto o erro quadrático médio da variância dependem da frequência amostral, do número de amostras e da estatística do conjunto de dados. Logo, não é possível determinar o número de dados suficiente para determinado erro. Dessa forma, é necessário realizar a medição e, para uma dada quantidade de dados, determinar a precisão estatística das estimativas (PAPAGEORGE; SUTTON, 2016).

No caso da medição por quimioluminescência realizada neste trabalho, a variável de interesse é a intensidade da emissão do radical OH*. Então, a média é $\bar{\psi} = \bar{I}_{\text{OH}^*}$ e a variância é $\overline{\psi'^2} = \overline{I_{\text{OH}^*}^{\prime 2}}$. Essas quantidades são calculadas para cada pixel, ou seja, as grandezas correspondem a um campo. Para a medição, foi selecionada uma frequência de aquisição de 2 kHz. Essa frequência foi estimada com base no cálculo da escala de tempo integral realizado a partir da intensidade turbulenta (ι), dada pela equação 3.12 (POPE, 2000).

$$t_0 \approx \frac{d}{\iota U_b} \quad (3.12)$$

onde $d = 10$ mm é o diâmetro do bocal central do queimador, $U_b = 30$ m/s é a velocidade de entrada e a intensidade turbulenta é definida por $\iota \equiv u'/U_b$. A flutuação da velocidade, por sua vez, é dada por u' . A intensidade turbulenta na saída de um jato axissimétrico, tipicamente varia entre 1% e 20% (POPE, 2000; BASSE, 2019). Assim, a frequência de aquisição deve ser $f_s > 300$ Hz, uma vez que $f_s > 1/(2t_0)$. Como esse cálculo é aproximado e t_0 é melhor calculado posteriormente a medição, uma escolha de 2 kHz foi adotada.

A janela de medição, por sua vez, foi selecionada com 960×512 pixels para o ajuste adequado da medição das chamas. Dessa forma, o número de imagens fica limitado ao tamanho da memória RAM de 12 GB da câmera. Utilizando essa configuração de taxa de aquisição e número de pixels, o número máximo possível foi de 17.375 imagens. Portanto, para cada caso de regime de combustão foram aquisitadas 17.375 imagens a 2 kHz. Logo, o intervalo de tempo de medição foi próximo de 8,7 s, que foi calculado usando a equação 3.13.

$$f_s = \frac{N_s}{\Delta t} \quad (3.13)$$

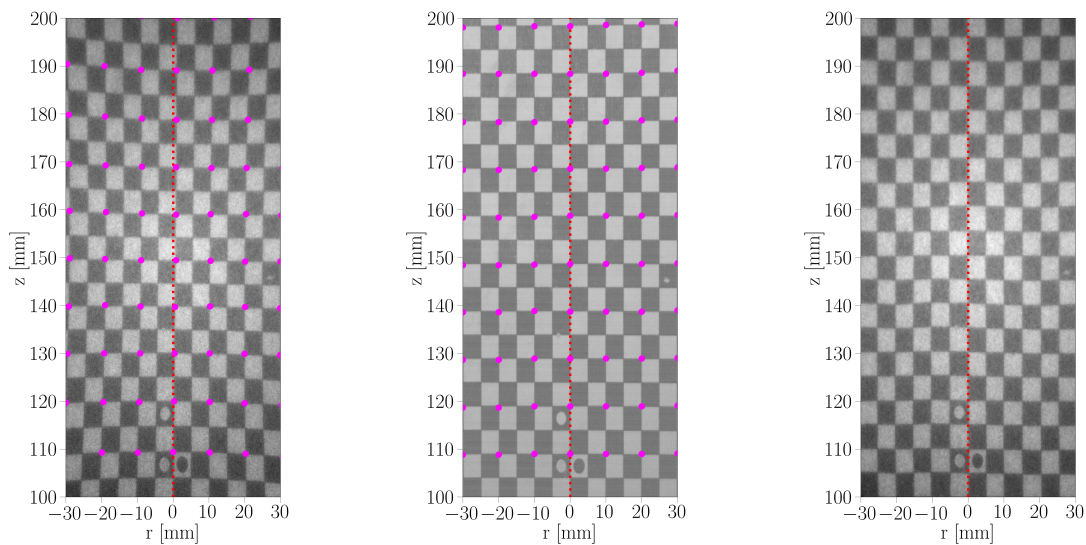
Os erros quadráticos médios da média e da variância serão apresentados no capítulo 4. Cada pixel do campo foi calculado usando as equações 3.8 e 3.9. Por fim, um caso unidimensional será apresentado com o intuito de exemplificar a convergência estatística em função do número de amostras independentes. O código dessa implementação é apresentado no anexo B.

3.4.2 Pré Processamento das Imagens

Para realizar o experimento de aquisição de imagens por quimioluminiscência foi preciso fazer uma conversão dos deslocamentos em unidades de pixel para mm, além de determinar a posição da janela de medição e o eixo de simetria. Para isso, foi utilizado um alvo calibrado com posições já conhecidas. Esse alvo foi montado com um plano

quadriculado, com quadrados de 5 mm, e círculos que indicam uma posição em relação ao eixo de simetria e ao queimador. Desse modo, foi possível calibrar a posição da janela de medição.

Figura 25 – Imagens do alvo calibrado para o pré-processamento. A figura 25a apresenta a imagem distorcida do alvo. A figura 25b apresenta a imagem sem distorção do alvo. A figura 25c indica a correção da distorção da imagem. Os pontos em magenta foram utilizados como referência entre as imagens. A linha vermelha pontilhada representa a linha de centro da câmara.



(a) Imagem com intensificador. (b) Imagem sem intensificador. (c) Imagem transformada.

Fonte: Autor.

Além disso, para observar as imagens da medição por quimioluminescência foi imprescindível utilizar o intensificador de imagens, o qual foi apresentado na seção 3.1. Entretanto, a imagem com intensificador apresenta uma distorção. Para eliminar essa distorção nas imagens, foi realizada uma correção, a qual utilizou a imagem do alvo calibrado com e sem intensificador, como mostrado na figura 25. O algoritmo de correção toma os mesmos pontos nas duas imagens e transforma a imagem distorcida na imagem corrigida, apresentada na figura 25c. Os pontos em magenta indicados na figura foram selecionados como parâmetros de entrada do código. Tomando como base esses pontos é possível notar a diferença entre as imagens com e sem intensificador. No alvo calibrado sem intensificador os pontos formam retas, tanto horizontais como verticais. Já no alvo calibrado com intensificador, as curvaturas formadas são bem notáveis. Nota-se, também, a diferença entre o quadriculado da imagem com intensificador e a imagem transformada. Além disso, a linha vermelha pontilhada passa pela linha de centro das imagens e da câmara, linha a qual pode ser tomada como referência para verificar a imagem transformada. Portanto, a partir dessa transformação, foi criada uma função em *Python* que foi aplicada em cada imagem de chama medida por quimioluminescência.

3.4.3 Pós Processamento das Imagens

O pós processamento das imagens aquiritadas foi um ponto crítico para os resultados de medição por quimioluminescência. Sobretudo para o regime de chama não visível, pois a intensidade diminuiu drasticamente e a relação sinal ruído se tornou importante. Devido a isso, uma série de testes foram realizados usando diversos filtros espaciais e algoritmos de pós-processamento a fim de se alcançar imagens com a qualidade necessária para análise. Nos trabalhos em combustão, o segmento de pós processamento de imagens não tem muito destaque, mesmo sendo de fundamental importância para a geração dos resultados. Dessa forma, na maioria dos estudos, os autores pouco dissertam sobre o pós processamento. Logo, as referências são muitas reduzidas para casos críticos na combustão, os quais são necessários conhecimentos mais aprofundados sobre o assunto. Dado isso, nesta subseção serão apresentados os procedimentos que tiveram êxito, isto é, a sequência de aplicações no pós processamento que produziram os resultados que serão apresentados no capítulo 4.

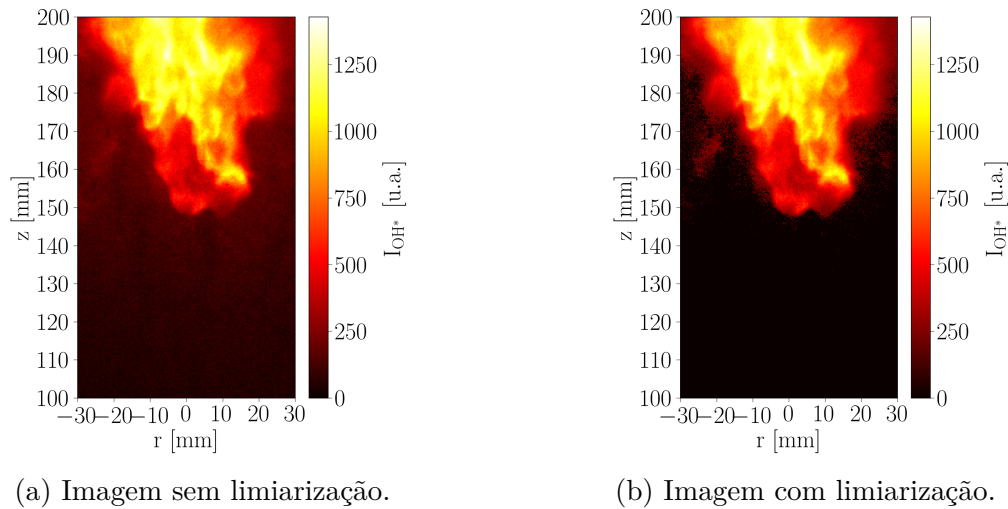
- Limiarização

O primeiro procedimento aplicado no pós processamento das imagens foi a limiarização, do inglês *threshold*, o qual foi utilizado principalmente com o intuito de eliminar o ruído escuro, do inglês *dark noise*. Esse ruído é inerente aos sensores devido a um efeito térmico, o qual gera uma corrente elétrica dependente da temperatura do sensor (BOYAT; JOSHI, 2015; FELLERS; DAVIDSON, 2020). Na limiarização, um valor (limiar de corte) é selecionado para a eliminação do ruído. Esse limiar de corte foi estimado unindo a aquisição dos dados sem chama e ponderando com o nível de intensidade das imagens (BAYER; KOZAKEVICIUS, 2010; TRINDADE; FERREIRA; FERNANDES, 2014). O resultado da medição sem chama indicou valores médios máximos da ordem de 100 u.a.. No entanto, como os casos de chama ancorada, descolada e não visível exibiram níveis de intensidade diferentes, em cada caso foi aplicado um limiar de corte. Como exemplo, a figura 26 mostra uma imagem instantânea de chama descolada antes e depois da aplicação da limiarização. A diferença é mais perceptível fora da chama, o que produz um contorno mais visível na fronteira da zona de reação.

- Filtragem temporal

Além da limiarização, um filtro passa-baixa temporal foi aplicado *pixel a pixel* nos conjuntos de imagens. A frequência de corte foi selecionada com base no teorema de *Nyquist*. Assim, a frequência de corte selecionada foi de 999 Hz, a qual é a máxima possível pelo teorema, dado que a frequência de aquisição selecionada foi de 2000 Hz. Dessa forma, o espectro de frequência dos sinais ficou entre zero e a frequência de corte, para que se evitem quaisquer frequências acima da frequência de aquisição devidas aos ruídos.

Figura 26 – Aplicação da limiarização em uma imagem instantânea de chama descolada.

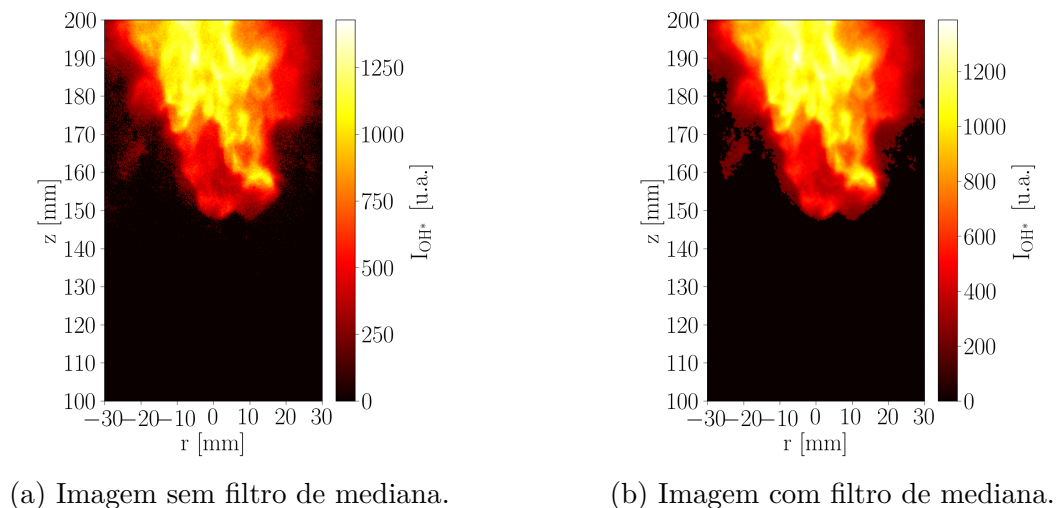


Fonte: Autor.

- Filtragem espacial

Na análise das imagens foi constatado o ruído de impulso, também dito do tipo “sal e pimenta” (GONZALEZ; WOODS, 2018). Esse ruído afeta as imagens gerando diversos pontos, geralmente pretos e brancos, produzindo um “chuveiro” na imagem. Com a finalidade de suavizar as imagens, eliminando esse tipo de ruído, foi aplicado um filtro de mediana. A figura 27 mostra as imagens instantâneas de chama descolada antes e depois da aplicação do filtro. Na imagem sem o filtro é possível notar o ruído na transição entre as cores, por exemplo, entre o preto e vermelho ou entre o vermelho e amarelo. Após a aplicação do filtro, o ruído é imperceptível e as cores ficaram suavizadas.

Figura 27 – Aplicação do filtro de mediana na imagem média.

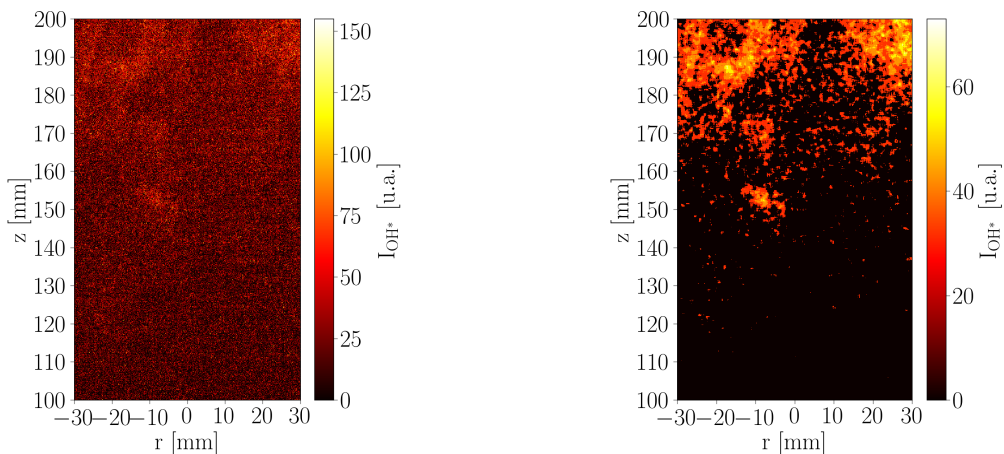


Fonte: Autor.

No regime de combustão de chama não visível, a intensidade de emissão do radical OH* reduziu consideravelmente em relação aos outros casos, cerca de 17% da intensidade do caso de chama descolada e 11% do caso de chama ancorada, em média. Dessa maneira, o sinal medido nesse caso era comparável aos ruídos. Logo, foi necessário aplicar técnicas de pós processamento, de tal forma para eliminar o ruído, prejudicando ao mínimo o sinal medido.

Essa questão foi resolvida, primeiramente observando que há uma coerência temporal nos sinais medidos nesse regime. Isto é, a dinâmica da chama quadro a quadro foi percebida, a partir da intensidade das emissões. Logo, foi possível verificar que o sinal realmente era gerado pela combustão. Com base nisso, o ruído foi eliminado aplicando uma convolução nas imagens, convolução a qual, foi aplicada com um filtro passa-alta e passa-baixa em série. Além de utilizar o filtro de mediana com uma janela maior que a aplicada nas chamas ancoradas e descoladas. A figura 28 mostra o resultado das técnicas introduzidas para gerar as imagens.

Figura 28 – Aplicação do pós processamento na imagem instantânea de chama não visível.



(a) Imagem sem pós processamento.

(b) Imagem com pós processamento.

Fonte: Autor.

As diferenças entre as imagens instantâneas de chama não visível sem pós processamento (figura 28a) e com pós processamento (figura 28b) são bem evidentes. Em primeiro lugar, na figura 28a são observados pequenos conglomerados com intensidade um pouco maior, especialmente acima de 180 mm. Esses conglomerados, quando vistos em sequência, se movimentam de forma coerente, o que determina a dita coerência temporal da chama. Nota-se que esses bolsões são recuperados na figura 28b. Além disso, outras regiões de reação são conservadas, as quais reduzem conforme a posição axial.

Essa sequência de técnicas de procesamento de imagens foi aplicada nos três casos de estudo. O código de pós processamento com as técnicas utilizadas é apresentado no anexo C.

4 Resultados e Discussões

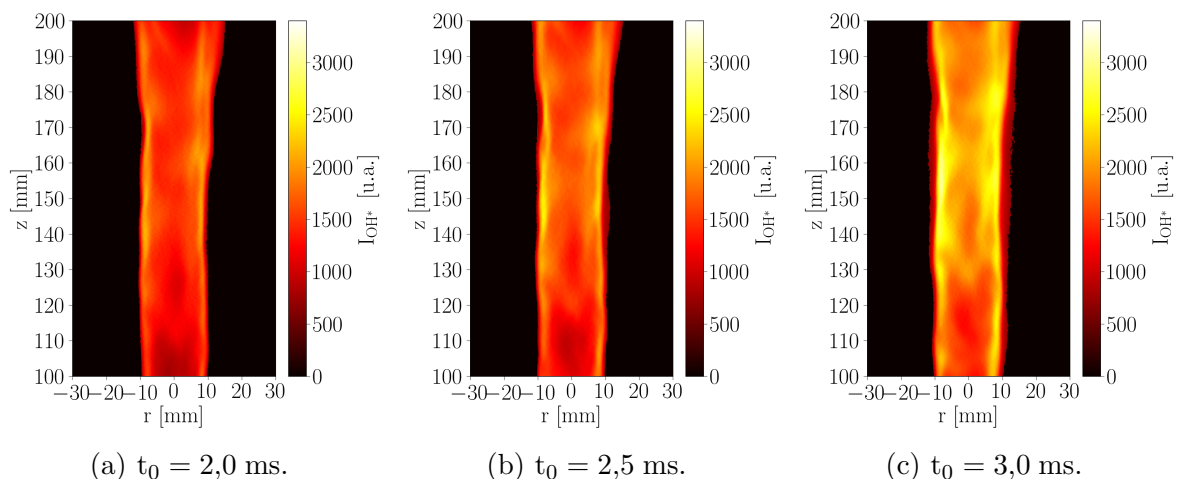
Neste capítulo serão apresentados os resultados das medições por quimioluminescência do radical OH^* obtidas da oxidação do metano diluída com CO_2 , além dos pontos de transição de regimes de combustão e a extinção de chama. Os resultados dos três regimes de combustão são descritos individualmente nas primeiras seções e comparados ao final do capítulo. As correlações entre a transição de chama ancorada para descolada e a extinção são analisadas. Por fim, o diagrama de estabilidade, semelhante ao mostrado na figura 20, será discutido para as chamas encontradas e ponderadas suas limitações.

4.1 Macroestruturas de Chamas e Análise de Convergência

4.1.1 Chamas Ancoradas

Durante a operação na câmara na razão de equivalência unitária foram encontradas chamas ancoradas para temperatura de chama adiabática desde $T_{\text{ad}} = 5142 \text{ K}$ ($X_{\text{CO}_2} = 0\%$) até $T_{\text{ad}} = 3604 \text{ K}$ ($X_{\text{CO}_2} = 44\%$), sempre mantendo uma velocidade de escoamento estável em 30 m/s . As chamas a cada instante mantiveram a conhecida topologia de jato fixado na borda central da saída do queimador. A figura 29 exibe uma sequência de três imagens instantâneas de chamas ancoradas. É possível verificar que o formato de jato observado por luminescência natural também é capturado com duas regiões com intensidades bem distintas, fora e no jato. Além disso, a intensidade no jato não é uniforme, como esperado, há regiões onduladas com picos e vales de intensidade que se deslocam ao longo do jato com o passar do tempo.

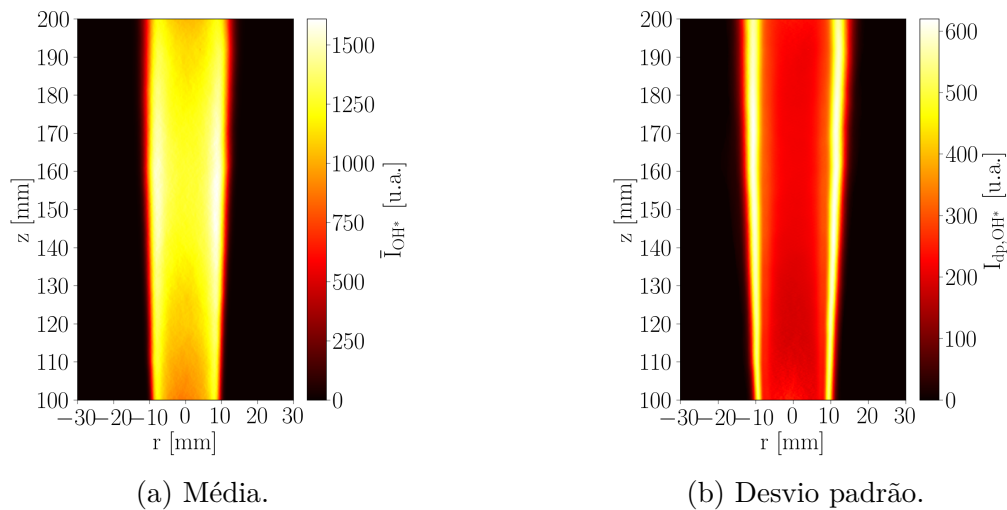
Figura 29 – Sequência de imagens instantâneas de chama ancorada.



Fonte: Autor.

Os campos de intensidade média e desvio padrão são mostrados na figura 30. No campo médio, os valores máximos de intensidade são vistos na fronteira do jato. Fronteira, na qual ocorrem os maiores gradientes de intensidade quando analisados na direção radial. Os valores no campo de desvio padrão definem três regiões: dentro, na fronteira e fora do jato. Há uma definição nítida da fronteira do jato com os máximos valores, indicando que as maiores flutuações das emissões do radical OH^* ocorrem nessa região. Isso ocorre de modo semelhante às grandes escalas de turbulência, na fronteira do jato, onde ocorrem os máximos gradientes, as flutuações mais significativas e conseqüentemente maior energia cinética turbulenta (VILLANUEVA, 2021).

Figura 30 – Campos de intensidade média e desvio padrão de chamas ancoradas.



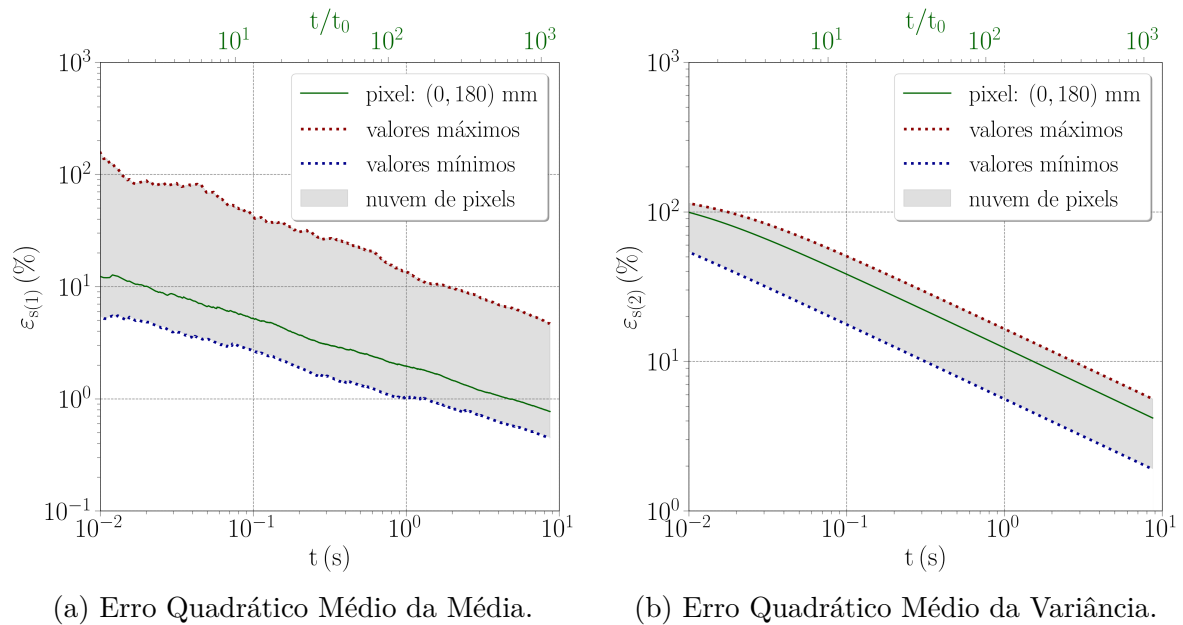
Fonte: Autor.

A convergência dos erros quadráticos médios da média e da variância são mostrados na figura 31. O erro quadrático médio da média só apresenta valores representativos na zona de reação. Isso acontece pois fora dessa região os valores médios tendem a zero, como visto na figura 30a. Assim, os erros explodem ou geram uma indeterminação matemática fora da região de reação, como observa-se pela equação 3.8. Logo, somente os valores na zona de reação foram considerados para análise, referidos neste texto como valores representativos para a convergência estatística.

Na figura 31a os valores representativos dos erros da média são apresentados pela faixa cinza no gráfico, legendado como nuvem de pixels. Como esperado, os valores diminuem com o tempo, de maneira geral. As linhas pontilhadas em vermelho e em azul delimitam o envelope de erro nos valores máximos e mínimos, respectivamente. No instante 8,7 s tem-se os erros finais, os quais ficaram distribuídos entre 0,4% e 4,7%. O pixel selecionado na posição radial de 0 mm e posição axial de 180 mm é indicado pela linha sólida verde. O eixo secundário do gráfico se refere ao tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel. Nota-se que, seguindo a linha verde, quando o valor do erro

estava na ordem de 10%, o instante de tempo era próximo de 0,02 s e o tempo normalizado cerca de 2,5. No instante final de medição o erro desse pixel intigiu o valor de 0,8%, isso para um instante de tempo normalizado de 10^3 em 8,7 s. Isto é, para diminuir uma ordem de grandeza no erro, foi necessário aumentar a ordem de grandeza do tempo em pouco mais de duas vezes. Essa tendência também foi observado por Papageorge e Sutton (2016). Portanto, pela tendência do gráfico, para mudar a ordem de grandeza do erro é necessário aumentar no mínimo duas vezes a ordem de grandeza do intervalo de tempo de medição. Como foi utilizado o limite da memória da câmera, esses são os mínimos erros possíveis para a medição com a configuração de número de pixels e frequência de aquisição.

Figura 31 – Convergência estatística dos erros quadráticos médios da média e da variância de chamas ancoradas em função do tempo. A faixa cinza engloba todos os pixels do campo. As linhas pontilhadas vermelha e azul são os limites máximo e mínimo, respectivamente, do envelope de erros. A linha sólida verde se refere ao pixel da posição radial 0 mm e axial 180 mm, linha a qual o eixo secundário indica o tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel.



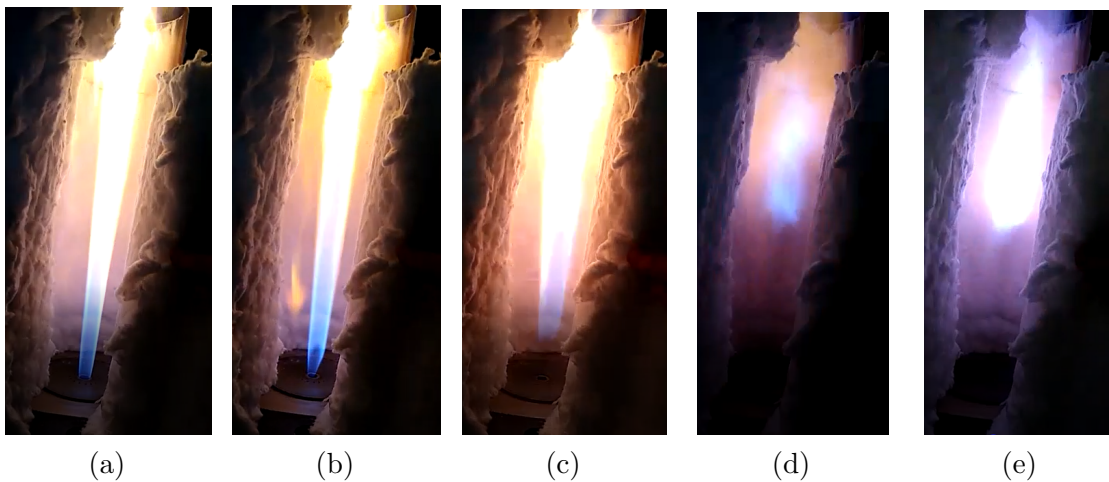
Fonte: Autor.

O erro quadrático médio da variância (figura 31b) indica a convergência assintótica esperada. Essa característica mais comportada, em comparação ao erro da média, ocorre devido a independência da média e da variância da variável turbulenta medida, como visto na equação 3.9. Dessa forma, os erros finais da variância ficaram entre 1,9% e 5,6%. O erro do pixel selecionado possui comportamento assintótico acima de $t/t_0 = 10$ atingindo um erro final de 4,2%.

4.1.2 Chamas Descoladas

A transição de chama ancorada para descolada ocorreu conforme reduzia-se T_{ad} . À medida que a temperatura de chama adiabática diminuía, a chama tornava-se cada vez mais amarelada e o ruído aumentava continuamente até ocorrer o descolamento. A figura 32 mostra a transição de chama ancorada para descolada, gravada por luminescência natural.

Figura 32 – Sequência de imagens instantâneas de luminescência natural da transição de chama ancorada para descolada.

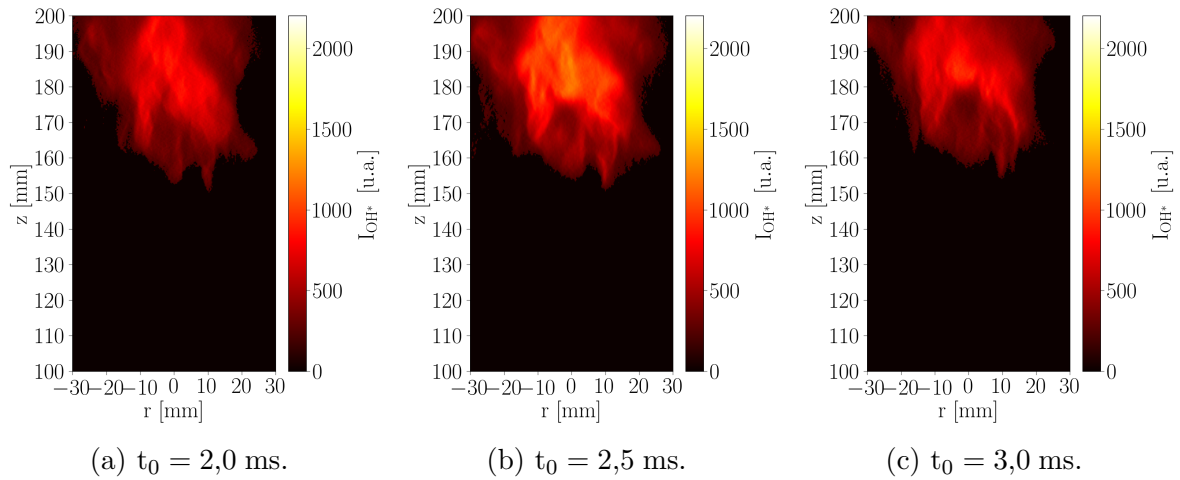


Fonte: Autor.

As chamas descoladas produziram alto ruído sonoro ligado à oscilação da distância de descolamento e à mudança na topologia da chama. Isso ocorreu no intervalo de $T_{ad} = 3604$ K ($X_{CO_2} = 44\%$) a $T_{ad} = 2795$ K ($X_{CO_2} = 60\%$). A figura 33 mostra três imagens instantâneas da intensidade da quimioluminescência do radical OH^* . Nota-se que, nesses três quadros, só há intensidade significativa acima de 150 mm. Variações de intensidade são vistas na região de reação, as quais não são possíveis de serem vistos na imagem da figura 32e, o que torna imprescindível realizar a quimioluminescência para observar esses gradientes.

O campo médio de intensidade de chama descolada mostra uma região de reação bem definida, com gradientes de intensidade mais suaves do que o visto na chama ancorada. A zona de reação de chama descolada, além de ficar distante do queimador, ficou com distância máxima em relação ao queimador menor que a chama ancorada, o que tornou a chama mais compacta e centralizada na câmara. A intensidade média máxima da chama descolada ficou centrada na janela de medição acima de 180 mm. Tanto nas imagens instantâneas, como na imagem média a região de reação é bem definida, porém com oscilações na macroestrutura. As alterações na topologia e posição da chama são notadas no campo de desvio padrão da intensidade. Os picos de intensidade desse campo ficaram concentrados na parte inferior da chama, indicando a variação da distância de descolamento

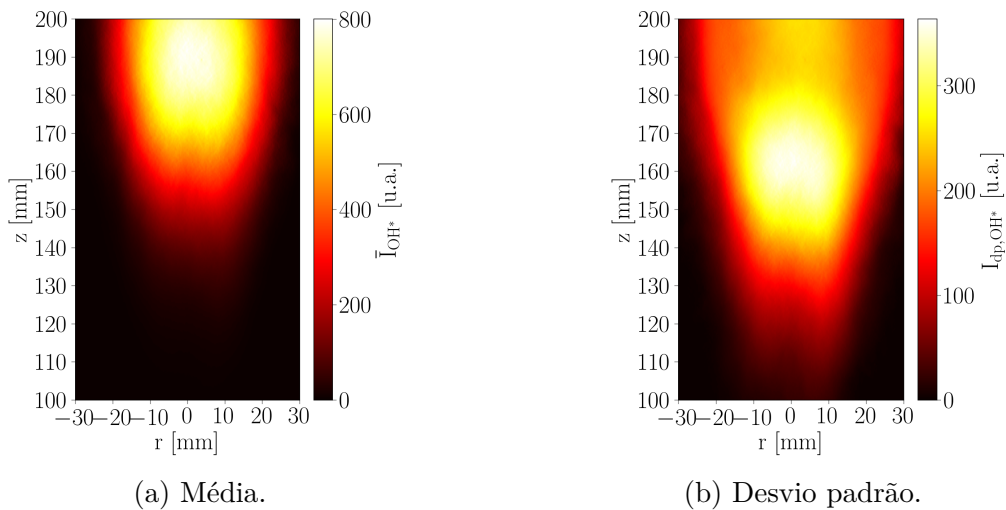
Figura 33 – Sequência de imagens instantâneas de chama descolada.



Fonte: Autor.

de chama. Ademais, acima de 160 mm, a intensidade ficou significativa até as extremidades da janela de medição, o que indica a variação da posição da chama na direção radial.

Figura 34 – Campos de intensidade média e desvio padrão de chamas descoladas.

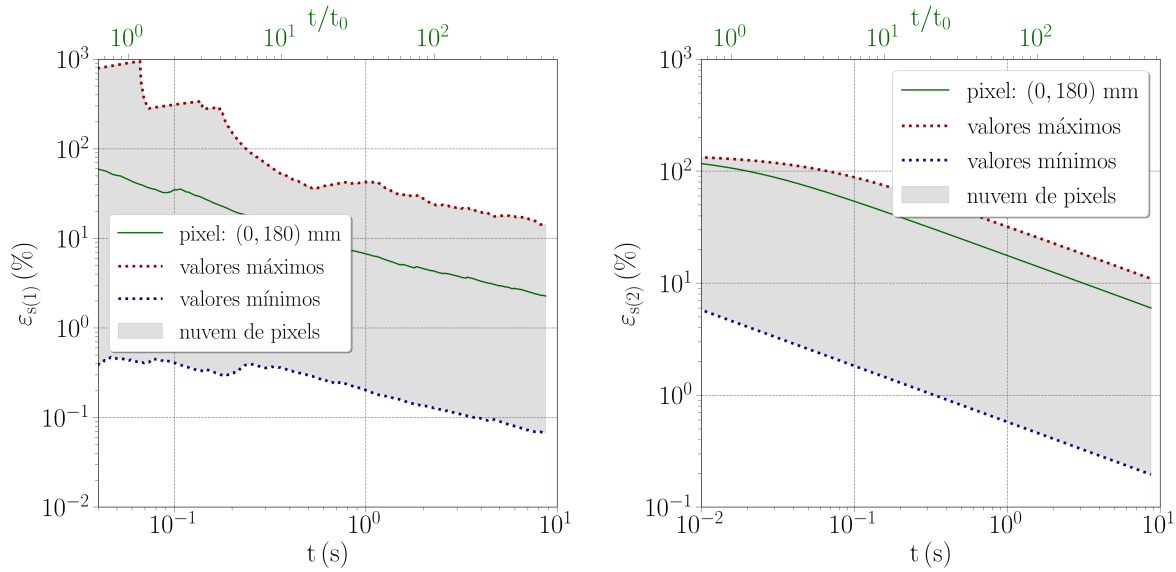


Fonte: Autor.

A convergência dos erros quadráticos médios da média e da variância são indicados na figura 35. A convergência estatística dos valores representativos da média (figura 35a) apresenta convergência semelhante ao caso da chama ancorada. Os valores finais de erro quadrático médio da média ficaram entre 0,07% e 14,4%. Nota-se que há uma diferença entre os tempos normalizados para o pixel selecionado em (0,180) mm, isso se deve a diferença na escala de tempo integral entre as duas chamas nesse ponto. Apesar disso, o erro final foi de 2,3%, o qual foi próximo do valor da chama ancorada. O erro quadrático médio da variância (figura 35b), por sua vez, ficou entre 0,2% e 11,0%. O valor final do

pixel em (0, 180) mm foi de 6,0%. Além disso, o comportamento assintótico é visto como na chama ancorada.

Figura 35 – Convergência estatística dos erros quadráticos médios da média e da variância de chamas descoladas em função do tempo. A faixa cinza engloba todos os pixels do campo. As linhas pontilhadas vermelha e azul são os limites máximo e mínimo, respectivamente, do envelope de erros. A linha sólida verde se refere ao pixel da posição radial 0 mm e axial 180 mm, linha a qual o eixo secundário indica o tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel.



(a) Erro Quadrático Médio da Média.

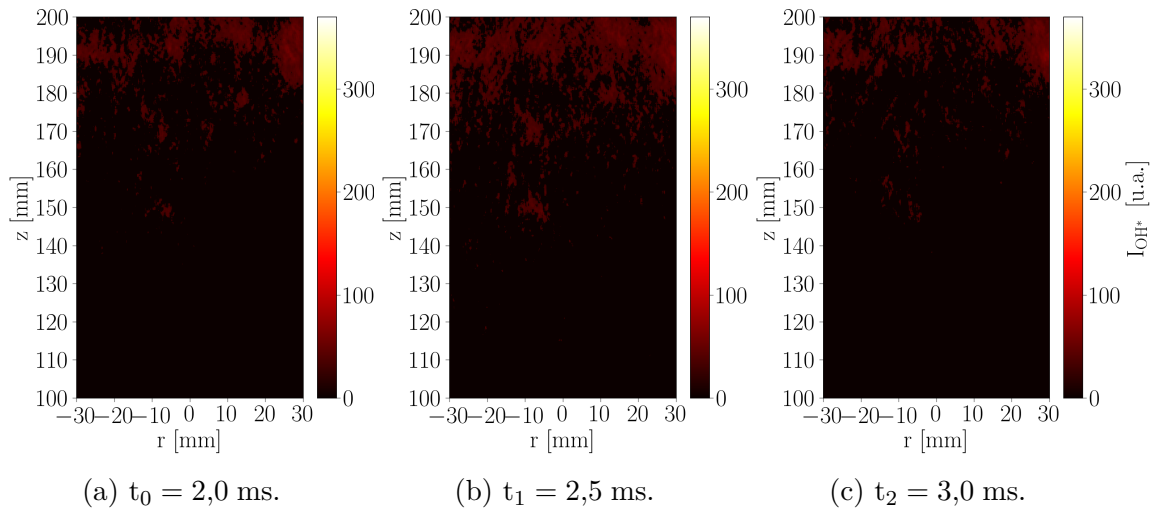
(b) Erro Quadrático Médio da Variância.

Fonte: Autor.

4.1.3 Chamas não Visíveis

O regime de chamas não visíveis ocorreu de $T_{ad} = 2795$ K ($X_{CO_2} = 60\%$) até $T_{ad} = 2208$ K ($X_{CO_2} = 71,8\%$). Nesse regime, o ruído sonoro diminui drasticamente em relação ao ruído de chama descolada. Além disso, a luminosidade tornou-se mais uniforme e menos intensa dentro da câmara. As intensidades máximas de emissão de OH^* reduziram de 3399 u.a., para 2203 u.a. e 370 u.a. para as chamas ancorada, descolada e regime não visível, respectivamente. Essa redução de intensidade indica que as reações ocorrem com menor intensidade nesse regime, embora as reações químicas ainda estejam presentes (VILLANUEVA, 2021). Isso pode ser visto na figura 36, na qual três capturas instantâneas de chama não visível. Nesse regime, diferente dos outros, as imagens instantâneas não indicam uma topologia bem definida. Pequenas porções de zonas de reação se modificam ao longo do tempo e estão distribuídas na janela, principalmente acima de 180 mm. Dessa maneira, as mudanças de posição da zona de reação são muito mais pronunciadas e se torna difícil definir a topologia da chama.

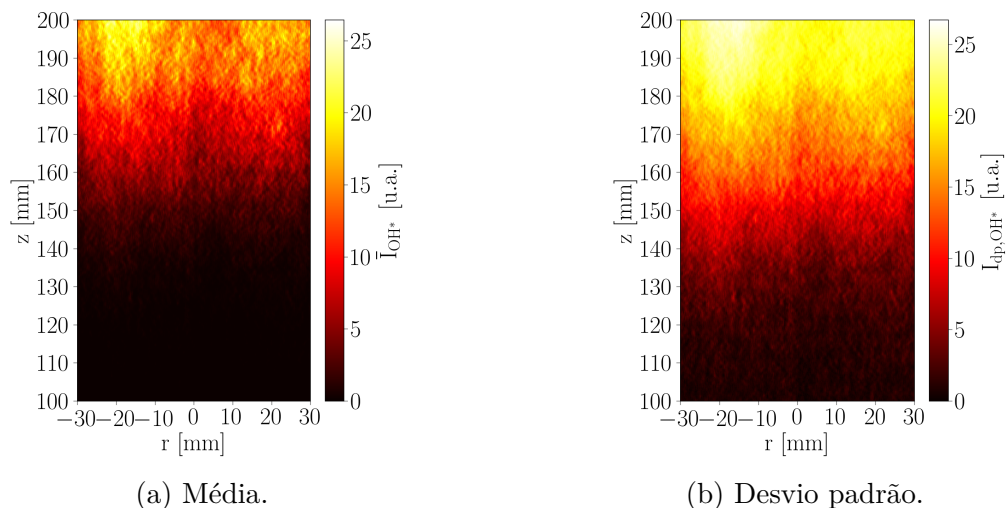
Figura 36 – Sequência de imagens instantâneas de chamas não visíveis.



Fonte: Autor.

No campo médio, mostrado na figura 37a, abaixo de 140 mm não são observados valores significativos, acima disso, os valores aumentam gradativamente com a posição axial. Assim, na média, a zona de reação se concentrou na parte superior da janela de medição. Além disso, as emissões ficaram distribuídas no domínio, indicando uniformidade da zona de reação. O campo de desvio padrão, mostrado na figura 37b, indica uma distribuição semelhante com a média. No entanto, diferente do observado na chama descolada, as maiores flutuações ocorrem nas mesmas posições de intensidades médias máximas. Isso mostra que, apesar da zona de reação ter uma região de preferência, ocorrem grandes flutuações da intensidade nessa mesma região. Isso revela, portanto, que as zonas de maior intensidade são produzidas e consumidas com maior regularidade.

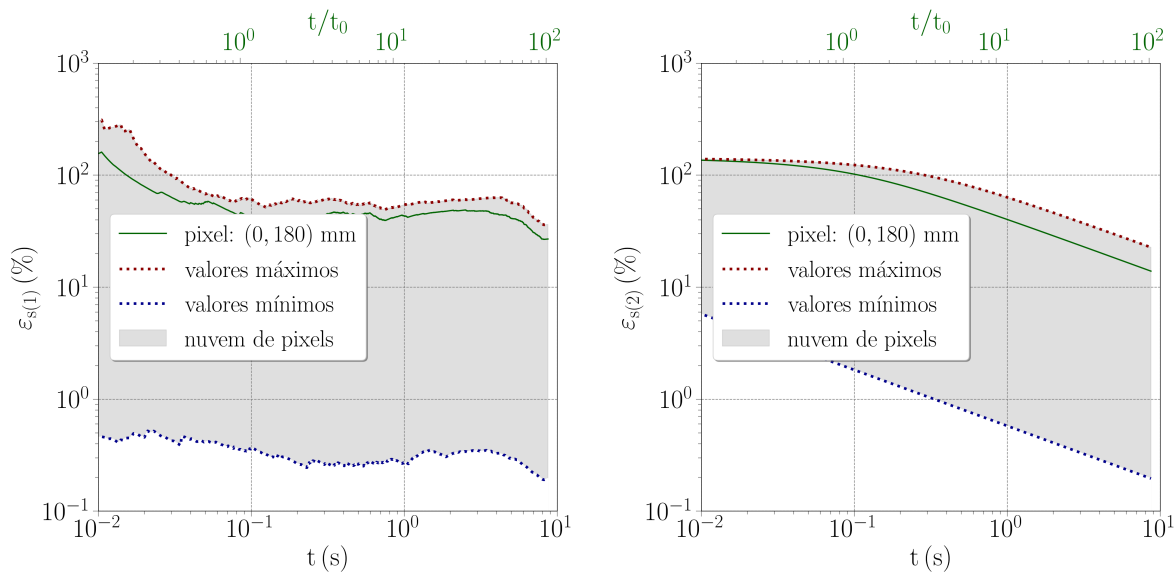
Figura 37 – Campos de intensidade média e desvio padrão de chamas não visíveis.



Fonte: Autor.

A convergência estatística dos erros quadráticos da média e da variância são apresentados na figura 38. Os valores representativos finais dos erros da média ficaram entre 0,2% e 36,7%, com o valor do pixel selecionado alcançando o valor final de 27,1%. O trecho de convergência linear visto nos casos anteriores é alcançado após 3 s, como pode ser observado na linha verde. Assim, essa condição de chama apresenta maiores erros quadráticos da média dos três casos. Por fim, o erro da variância ficou entre 0,2% e 22,7%, como observado na figura 38b. A convergência foi assintótica como nos outros casos com erro final de 13,9% para o pixel escolhido. Esse regime apresentou os maiores valores de erros. Isso se deve, possivelmente, a esse ser o regime mais crítico entre os três estudados, o que gerou um efeito na estatística e consequentemente nos erros da média e da variância.

Figura 38 – Convergência estatística dos erros quadráticos médios da média e da variância de chamas não visíveis em função do tempo. A faixa cinza engloba todos os pixels do campo. As linhas pontilhadas vermelha e azul são os limites máximo e mínimo, respectivamente, do envelope de erros. A linha sólida verde se refere ao pixel da posição radial 0 mm e axial 180 mm, linha a qual o eixo secundário indica o tempo normalizado pela escala de tempo integral desse pixel.



(a) Erro Quadrático Médio da Média.

(b) Erro Quadrático Médio da Variância.

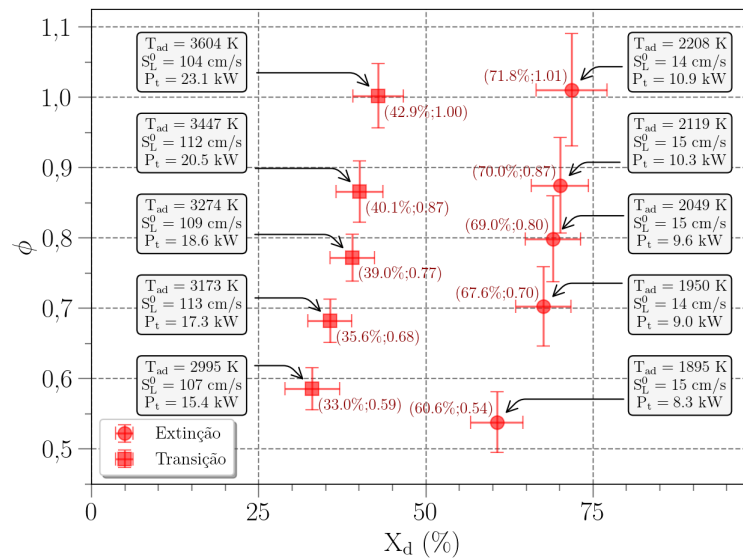
Fonte: Autor.

4.2 Estabilidade de Chama

O procedimento de operação da câmara, explicado na seção 3.2.2, foi aplicado a uma série de dez potências térmicas. O descolamento ocorreu nas cinco potências maiores e a extinção nas cinco menores. Desse modo, a região de ocorrência de chama ancorada é delimitada entre a fração molar de CO_2 nula e os pontos indicados por quadrados vermelhos, denominados transição, na figura 39. Analogamente, os pontos apresentados em

círculos vermelhos delimitam a região de ocorrência de combustão, ou seja, a extinção de chama. Em ambos casos, transição e extinção, a razão de equivalência diminuiu conforme a potência térmica era reduzida, além da fração molar de diluente, conseqüentemente a temperatura de chama adiabática diminuía.

Figura 39 – Pontos experimentais de descolamento e de extinção. As barras representam a incerteza combinada de medição.



Fonte: Autor.

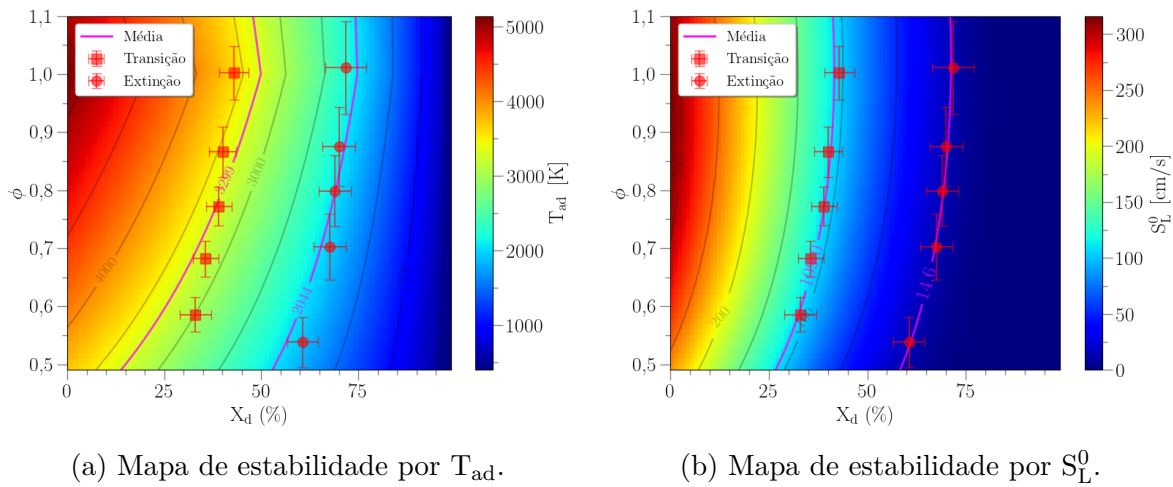
Para explicar esses comportamentos, existem, na literatura em oxi-combustão, indicações de transições de macroestruturas e extinção de chama em função de vários parâmetros globais, tais como: número de *Reynolds* em Abdelhafez et al. (2018a), Abdelhafez et al. (2018b) e Ali et al. (2021); densidade de potência em Abdelhafez et al. (2018a), Abdelhafez et al. (2018b); temperatura de chama adiabática Jourdain et al. (2017), Abdelhafez et al. (2018a), Abdelhafez et al. (2018b), Vandel et al. (2020) e Ali et al. (2021) e velocidade de chama laminar em Jourdain et al. (2017), Vandel et al. (2020). No entanto, somente a temperatura de chama adiabática e a velocidade de chama laminar apresentaram correlações com os resultados de forma geral. Desse modo, T_{ad} e S_L^0 são os candidatos imediatos a serem correlacionados com a estabilidade de chama. Essas variáveis são mostradas nas caixas sinalizadas na figura 39, além da potências térmicas de cada experimento.

4.2.1 Correlações de Estabilidade de Chama

A figura 40 mostra os pontos experimentais com mapas de T_{ad} (figura 40a) e de S_L^0 (figura 40b) de fundo. Os valores médios foram calculados a partir dos valores mostrados nas caixas da figura 39 e as linhas de valores médios dos pontos experimentais foram plotadas para comparação com os pontos. A figura 40 apresenta o mapa no intervalo

completo de fração molar de CO_2 . Para a temperatura de chama adiabática, embora alguns pontos ainda estejam dentro das barras de incerteza, a linha de tendência dos pontos experimentais não segue as isotermas, isso fica evidente na linha média de T_{ad} , indicando que não há uma correlação. No entanto, para a velocidade de chama laminar, a linha média segue a tendência dos pontos experimentais. Portanto, há uma melhor correlação dos resultados com velocidade de chama laminar em comparação com a temperatura de chama adiabática.

Figura 40 – Pontos experimentais de transição e extinção nos mapas de T_{ad} e S_L^0 no espaço $\phi - X_d$. As linhas magenta são as médias calculadas a partir dos pontos experimentais.

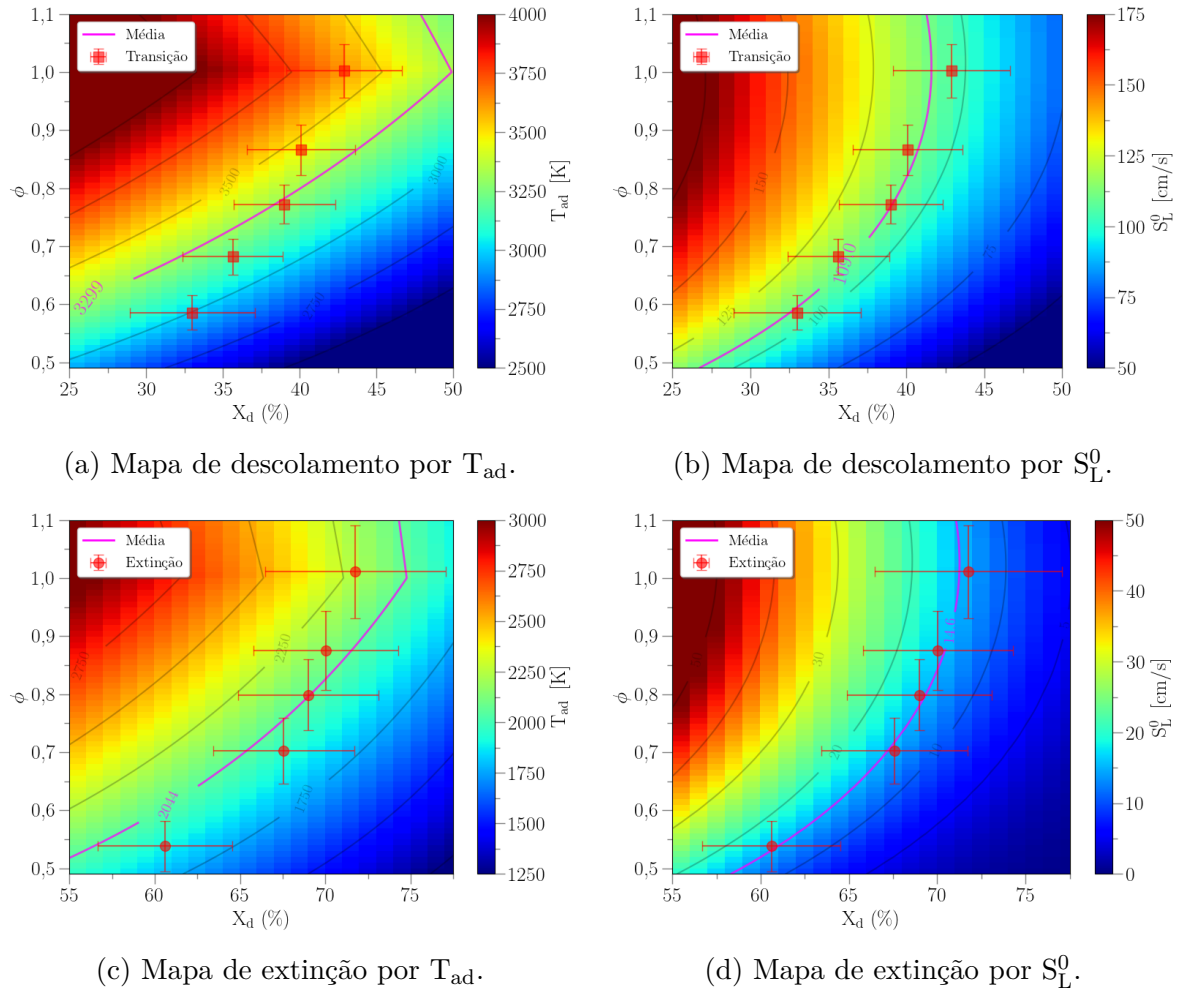


Fonte: Autor.

A figura 41 apresenta o descolamento no intervalo reduzido dos resultados dos experimentos de transição e extinção. Na análise em $\phi = 1$, a extinção ocorre em $T_{\text{ad}} = 2208 \text{ K}$, a qual é próxima da temperatura de chama adiabática do ar nas condições dos reagentes (2327 K), o que mostra a maior tendência à extinção da oxi-combustão diluída com CO_2 em relação à combustão ar-combustível. Abdelhafez et al. (2018a) atribuem essa diferença ao impacto negativo do CO_2 na cinética química. Kutne et al. (2011), Amato et al. (2011) e Ali et al. (2021) também encontraram resultados semelhantes. Além de não haver correlação, a temperatura de chama adiabática não justifica resultados de cinética química. Essa restrição de T_{ad} é observada nos resultados comparativos de oxi-chamas diluídas com CO_2 ou N_2 , as quais embora mantenham T_{ad} constantes em transições de chamas, os valores diferem dependendo da diluição e combustíveis (ABDELHAFEZ et al., 2018a; ABDELHAFEZ et al., 2018b; ALI et al., 2021).

A velocidade de chama laminar, ao contrário da temperatura de chama adiabática, é calculada utilizando a cinética química. O mapa de S_L^0 no espaço $\phi - X_d$ apresentado na figura 40b foi realizado tendo em vista esta limitação de T_{ad} . É notável como em baixas frações molares de CO_2 a velocidade alcança valores de até 315 cm/s conhecidos por serem

Figura 41 – Mapas de temperatura de chama adiabática da oxi-combustão do metano em função da razão de equivalência e da fração molar de diluente com reagentes a 300 K e 1 atm.



Fonte: Autor.

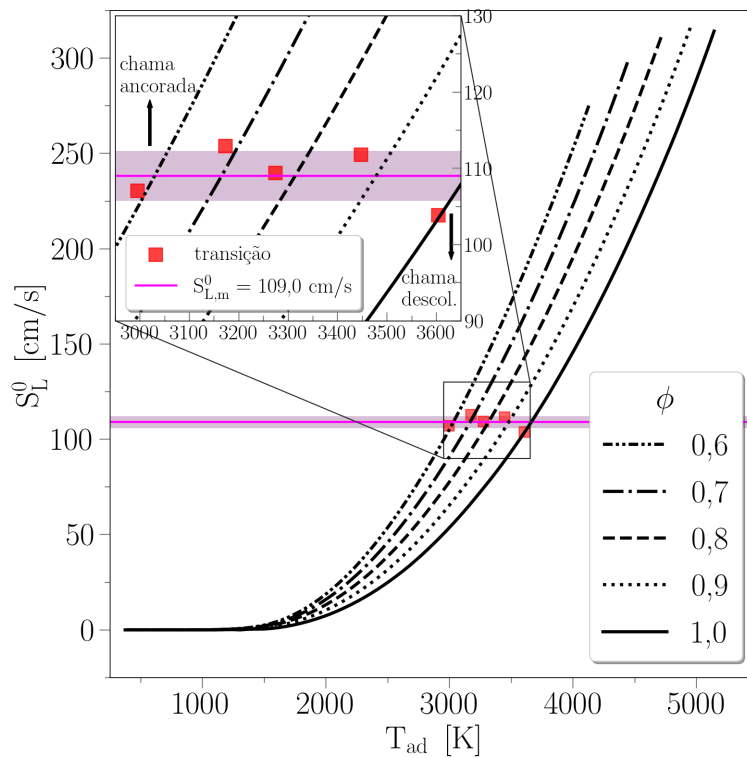
da ordem da combustão de H_2 – ar (KHALIL; GUPTA, 2017). Isso pode justificar a ancoragem das chamas discutidas na seção 4.1.1 e as chamas descoladas na seção 4.1.2, pois nessas chamas a competição de velocidades determina a posição em relação a borda do queimador (JOURDAINE et al., 2017). Além disso, as chamas ar-metano alcançam valores da ordem de 37 cm/s, valor o qual, não foi suficiente para ancorar chamas turbulentas nesse queimador (VILLANUEVA, 2021).

4.2.2 Diagrama de estabilidade

A união desses mapas de estabilidade pode ser vista na figura 42, a qual foi realizada visando a correlação entre a velocidade de chama laminar e os regimes de combustão feito em Vandell et al. (2020) e observada na figura 20. Essa correlação foi generalizada para a combustão do metano diluída com CO_2 ou H_2O de ar a oxi-combustível. No entanto,

destaca-se que tanto as geometrias dos queimadores, quanto a configuração de mistura (reagentes pré-misturados com *swirler* em Vandell et al. (2020)) são diferentes. Ademais, as chamas discutidas são turbulentas, logo, as justificativas dos resultados apresentados ficam limitadas, assim como visto em Watanabe et al. (2016) na seção 2.2.

Figura 42 – Diagrama de transição de chama ancorada para chama descolada. A velocidade da chama laminar na razão de equivalência 1,0 é mostrada como linha sólida preta, 0,9 como linha pontilhada preta, 0,8 como linha tracejada preta, 0,7 como linha preta tracejada com ponto e 0,6 como linha preta tracejada com ponto duplo. Os quadrados representam os pontos experimentais de transição. A linha horizontal magenta representa a velocidade de chama laminar média dos pontos experimentais. A área sombreada denota o desvio padrão em torno da média.



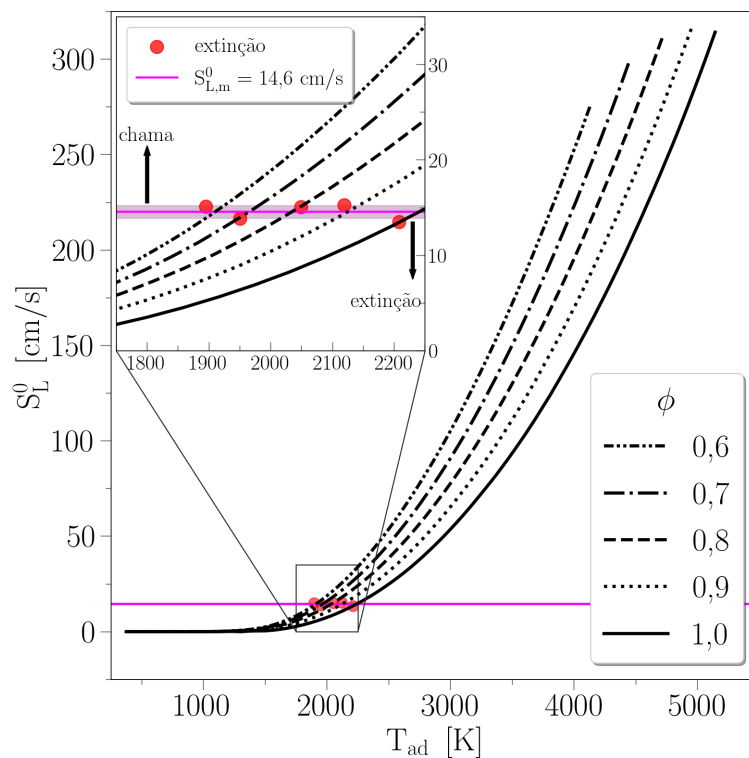
Fonte: Autor.

Nos gráficos de S_L^0 vs T_{ad} apresentados nas figuras 42, 43 e 44, as curvas indicam a evolução da velocidade laminar da chama em função da temperatura de chama adiabática. Para cada razão de equivalência, pequenas frações molares de CO_2 implicam maiores temperaturas de chama adiabática, conseqüentemente maiores velocidades de chama laminar, ou seja, a temperatura de chama adiabática é indicativo do nível de diluição da chama e a velocidade de chama laminar representa as mudanças na cinética química e no transporte de espécies causadas pela diluição. Além disso, em razões de equivalência menores que o valor unitário, o mesmo nível de diluição resulta em S_L^0 maior. De fato, em razões de equivalência menores que um, a diluição é realizada pelo próprio O_2 , a conhecida competição de O_2 e CO_2 pelo radical H torna-se importante e as velocidades de chama

laminar são reduzidas (WATANABE et al., 2016). Os pontos experimentais foram inseridos nas curvas e são melhor observados no quadro ampliado. A linha horizontal magenta é a média dos valores experimentais e a área sombreada é o desvio padrão em torno da média, onde a maioria dos pontos está inserida. No caso do descolamento, figura 42, os pontos nas curvas acima dessa região significam que ocorre chama ancorada e abaixo as chamas descoladas. No caso da extinção, figura 43, na região abaixo da linha não há combustão.

Além disso, tanto o descolamento, como a extinção ocorrem a uma velocidade de chama laminar numa faixa estreita, como visto em Vandel et al. (2020). Entretanto, neste trabalho, ampliam-se os resultados para uma faixa de razão de equivalência.

Figura 43 – Diagrama de extinção de chama. A velocidade da chama laminar na razão de equivalência 1,0 é mostrada como linha sólida preta, 0,9 como linha pontilhada preta, 0,8 como linha tracejada preta, 0,7 como linha preta tracejada com ponto e 0,6 como linha preta tracejada com ponto duplo. Os círculos representam os pontos experimentais de extinção. A linha horizontal magenta representa a velocidade de chama laminar média dos pontos experimentais. A área sombreada denota o desvio padrão em torno da média.

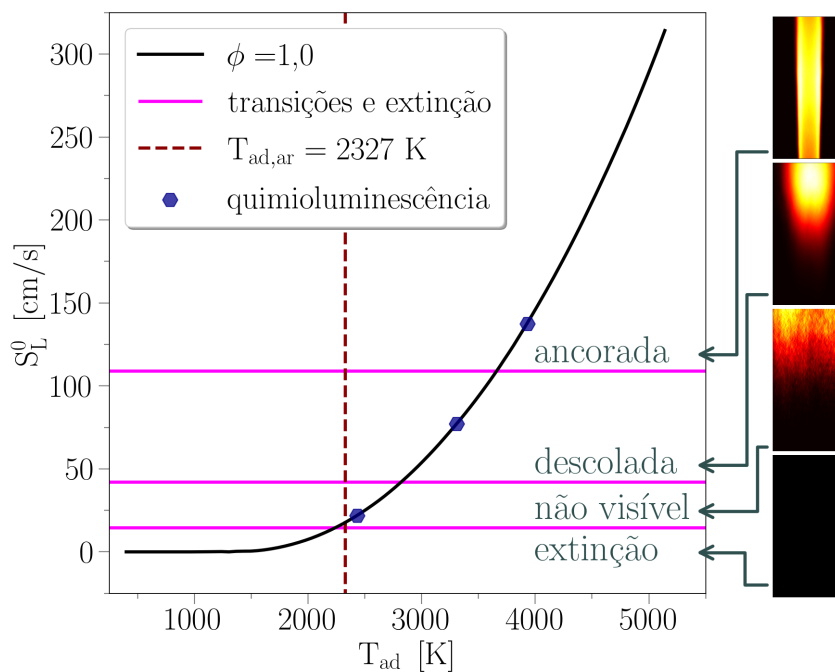


Fonte: Autor.

A figura 44 mostra as macroestruturas médias das chamas em suas regiões de ocorrência de velocidade de chama laminar em função da temperatura de chama adiabática. As linhas médias de descolamento e extinção são indicadas, juntamente com a transição de chama descolada para o regime de chama não visível, a qual foi realizada para $\phi = 1$. As macroestruturas das chamas se modificam conforme a temperatura de chama adiabática

é modificada devido à diluição. Dessa forma, esse diagrama representa as transições e extinção de chama conforme a chama é diluída.

Figura 44 – Evolução da velocidade de chama laminar, macroestrutura média da chama e estabilidade estática em função da temperatura de chama adiabática. $T_e = 298$ K, $\phi = 1,0$ e $U_b = 30$ m/s. A linha tracejada indica a temperatura de chama adiabática do ar na estequiometria ($T_{ad,ar} = 2327$ K). As linhas com velocidade constante em magenta mostram as transições entre regimes e a extinção. Os hexágonos em azul são os pontos de medição por quimioluminescência da chama ancorada ($T_{ad} = 3889$ K; $S_L^0 = 137,4$ cm/s), chama descolada ($T_{ad} = 3243$ K; $S_L^0 = 76,9$ cm/s) e regime de chama não visível ($T_{ad} = 2404$ K; $S_L^0 = 21,9$ cm/s).



Por fim, salienta-se que esses resultados estão relacionados com a manutenção da velocidade constante na entrada. Isso significa que assume-se, em última análise, que as escalas de tempo de turbulência foram mantidas na mesma ordem de grandeza. Assim, o aumento do diluente altera a cinética química e as propriedades de transporte de tal forma que, em última análise, aumenta-se a escala de tempo química característica até que ocorra o descolamento ou a extinção. Portanto, as relações entre T_{ad} e S_L com os regimes de combustão e a estabilidade estática são justificadas por números de *Damköhler* globais dessas chamas de modo análogo ao realizado em Amato et al. (2011).

5 Conclusões

Neste trabalho, o efeito da diluição de CO_2 na estabilidade estática de chama turbulenta de oxi-metano não pré-misturada em uma câmara de recirculação interna à pressão atmosférica foi apresentado. As condições operacionais foram definidas mantendo a velocidade de entrada da mistura O_2/CO_2 fixa e os regimes de chama ancorada, descolada e não visível foram observados. Por último, a extinção ocorreu de forma gradual, caracterizando o *blowoff*.

As medições da emissão do radical OH^* por quimioluminescência mostraram as macroestruturas médias das chamas, além de fornecer uma indicação da flutuação das emissões pelo campo de desvio padrão. A chama ancorada exibiu uma macroestrutura de jato bem definida estabilizada no bocal de entrada da câmara de combustão. A chama descolada produziu grande ruído sonoro e oscilações na topologia e na distância de descolamento. No regime de chama não visível, as reações foram distribuídas de forma mais uniforme dentro da câmara e apresentaram uma redução considerável de emissões de OH^* e de ruído sonoro. Por fim, foi realizada uma análise da convergência estatística da média e da variância dos resultados das medições por quimioluminescência. Para isso, o erro quadrático médio foi utilizado como parâmetro de convergência. Os resultados mostraram melhor convergência para o caso de chama ancorada, seguido pelos casos de chama descolada e não visível, o qual apresentou os maiores erros na média e na variância, por ser o caso mais crítico dessa medição.

O descolamento e a extinção foram avaliados na faixa de razão de equivalência de 0,5 a 1,0. Os resultados indicam que ambos fenômenos ocorrem em uma pequena faixa velocidade de chama laminar, em detrimento da temperatura de chama adiabática, independentemente da razão de equivalência. Embora a configuração da câmara seja não pré-misturada, essa correlação sugere que a velocidade de chama laminar é um parâmetro representativo das alterações no transporte de espécies e na cinética química causadas pela diluição, nos fenômenos de descolamento e extinção da chama.

Portanto, este trabalho contribuiu com a literatura em oxi-combustão apresentando os regimes de combustão, bem como as respectivas macroestruturas de chama. Além disso, os resultados experimentais indicaram que a correlação da velocidade de chama laminar com os fenômenos de descolamento e extinção, se estende em uma faixa de razão de equivalência.

Em trabalhos futuros, as escalas de tempo da turbulência e química podem ser analisadas com o intuito de avaliar a interação entre a cinética química e a turbulência. Além dessa avaliação, a análise dos parâmetros turbulentos de campo, tais como energia

cinética turbulenta, taxa de dissipação, bem como as componentes do tensor de *Reynolds*, pode ser realizada afim de verificar o significado de manter a velocidade de entrada constante. Ademais, essas investigações podem realizadas em oxi-combustão diluída com H_2O , a qual permanece como lacuna de pesquisa.

Referências

ABDELHAFEZ, A. et al. Adiabatic flame temperature for controlling the macrostructures and stabilization modes of premixed methane flames in a model gas-turbine combustor. *Energy & Fuels*, v. 32, n. 7, p. 7868–7877, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01133>>.

ABDELHAFEZ, A. et al. Stability map and shape of premixed $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ flames in a model gas-turbine combustor. *Applied Energy*, v. 215, p. 63–74, 2018. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918301119>>.

ABDELWAHID, S. et al. Effects of H_2 enrichment and inlet velocity on stability limits and shape of $\text{CH}_4/\text{H}_2-\text{O}_2/\text{CO}_2$ flames in a premixed swirl combustor. *Energy & Fuels*, v. 32, n. 9, p. 9916–9925, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01958>>.

ABUBAKAR, Z.; MOKHEIMER, E. M. A.; KAMAL, M. M. A review on combustion instabilities in energy generating devices utilizing oxyfuel combustion. *International Journal of Energy Research*, v. 45, n. 12, p. 17461–17479, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.7010>>.

ALI, A. et al. Comparative analysis of the stability and structure of premixed $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{CO}_2$ and $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{N}_2$ flames for clean flexible energy production. *Energy*, v. 214, p. 118887, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220319940>>.

ALLAM, R. et al. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide. *Energy Procedia*, v. 37, p. 1135–1149, 2013. ISSN 1876-6102. GHGT-11 Proceedings of the 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 18-22 November 2012, Kyoto, Japan. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021300221X>>.

AMATO, A. et al. Methane Oxycombustion for Low CO_2 Cycles: Blowoff Measurements and Analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 133, n. 6, 02 2011. ISSN 0742-4795. 061503. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4002296>>.

ANDERSON, R. et al. Oxy-fuel turbo machinery development for energy intensive industrial applications. *Energy Procedia*, v. 63, p. 511–523, 2014. ISSN 1876-6102. 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-12. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214018712>>.

ANDERSON, R. E. et al. Adapting Gas Turbines to Zero Emission Oxy-Fuel Power Plants. Volume 2: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Electric Power, p. 781–791, 06 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/GT2008-51377>>.

BANDILLA, K. W. 31 - carbon capture and storage. In: LETCHER, T. M. (Ed.). *Future Energy (Third Edition)*. Third edition. Elsevier, 2020. p. 669–692. ISBN 978-0-08-102886-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081028865000311>>.

BASSE, N. Turbulence intensity scaling: A fugue. 10 2019.

- BAYER, F. M.; KOZAKEVICIUS, A. J. Spc-threshold: Uma proposta de limiarização para filtragem adaptativa de sinais. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, v. 11, n. 2, p. 121–132, 2010. ISSN 2676-0029. Disponível em: <<https://tema.sbmac.emnuvens.com.br/tema/article/view/96>>.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. *Fundamentals of thermodynamics*. 8. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- BOYAT, A. K.; JOSHI, B. K. A review paper: Noise models in digital image processing. arXiv, 2015. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1505.03489>>.
- CHAKROUN, N.; GHONIEM, A. Techno-economic assessment of sour gas oxy-combustion water cycles for co2 capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 36, p. 1–12, 2015. ISSN 1750-5836. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615000468>>.
- CHEN, L.; YONG, S. Z.; GHONIEM, A. F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and cfd modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 38, n. 2, p. 156–214, 2012. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128511000529>>.
- CHORPENING, B. et al. Demonstration of a Reheat Combustor for Power Production With CO2 Sequestration. Volume 2: Turbo Expo 2003, p. 405–415, 06 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/GT2003-38511>>.
- DAI, C. et al. Combustion characteristics of a methane jet flame in hot oxidant coflow diluted by h2o versus the case by n2. *Energy & Fuels*, v. 32, n. 1, p. 875–888, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03060>>.
- DITARANTO, M.; SAUTET, J.; SAMANIEGO, J. Structural aspects of coaxial oxy-fuel flames. *Experiments in fluids*, Springer, v. 30, n. 3, p. 253–261, 2001.
- DWYER, I. *Series RM Rate-Master Flowmeters Specifications - Installation and Operating Instructions*. [S.l.]: Dwyer Instruments, Inc., 2015.
- ENERGY-INSTITUTE, O. *Statistical Review of World Energy*. 72. ed. [S.l.]: Statistical Review of World Energy 2023, 2023.
- FELLERS, T. J.; DAVIDSON, M. W. *CCD Noise Sources and Signal-to-Noise Ratio*. 2020. Acesso: 06/03/2023. Disponível em: <<https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsnr.html>>.
- FUJIMORI, T.; YAMADA, T. Realization of oxyfuel combustion for near zero emission power generation. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 34, n. 2, p. 2111–2130, 2013. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748912004002>>.
- GARMORY, A.; MASTORAKOS, E. Numerical simulation of oxy-fuel jet flames using unstructured les–cmc. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 35, n. 2, p. 1207–1214, 2015. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748914000352>>.

GHONIEM, A. F. Needs, resources and climate change: Clean and efficient conversion technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 37, n. 1, p. 15–51, 2011. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128510000341>>.

GIERTH, S. et al. Assessment of differential diffusion effects in flamelet modeling of oxy-fuel flames. *Combustion and Flame*, v. 197, p. 134–144, 2018. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218018303523>>.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 4. ed. [S.l.]: Pearson Education Limited, 2018.

GOODWIN, D.; MOFFAT, H.; SPETH, R. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. version 2.2.0. 01 2015.

HANSINGER, M.; PFITZNER, M.; SABELNIKOV, V. A. Les of oxy-fuel jet flames using the eulerian stochastic fields method with differential diffusion. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 38, n. 2, p. 2665–2672, 2021. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748920302972>>.

HE, M.; SUN, Y.; HAN, B. Green carbon science: Scientific basis for integrating carbon resource processing, utilization, and recycling. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 52, n. 37, p. 9620–9633, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201209384>>.

HE, M.; SUN, Y.; HAN, B. Green carbon science: Efficient carbon resource processing, utilization, and recycling towards carbon neutrality. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 61, n. 15, p. e202112835, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.202112835>>.

HUSSAIN, M. et al. A highly diluted oxy-fuel micromixer combustor with hydrogen enrichment for enhancing turndown in gas turbines. *Applied Energy*, v. 279, p. 115818, 2020. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920312988>>.

JANSEN, D. et al. Pre-combustion co2 capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 40, p. 167–187, 2015. ISSN 1750-5836. Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO2 Capture and Storage. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615001917>>.

JOURDAINE, P. et al. A comparison between the stabilization of premixed swirling co2-diluted methane oxy-flames and methane/air flames. *Fuel*, v. 201, p. 156–164, 2017. ISSN 0016-2361. 1st International Workshop on Oxy-Fuel Combustion. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116311061>>.

KAMAT, P. V. Absolute, arbitrary, relative, or normalized scale? how to get the scale right. *ACS Energy Letters*, v. 4, n. 8, p. 2005–2006, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acsendergylett.9b01571>>.

KATLA, D.; BARTELA Łukasz; SKOREK-OSIKOWSKA, A. Evaluation of electricity generation subsystem of power-to-gas-to-power unit using gas expander and heat recovery

- steam generator. *Energy*, v. 212, p. 118600, 2020. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220317084>>.
- KHALIL, A. E.; GUPTA, A. K. Flame fluctuations in oxy-co₂-methane mixtures in swirl assisted distributed combustion. *Applied Energy*, v. 204, p. 303–317, 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917309108>>.
- KUTNE, P. et al. Experimental analysis of the combustion behaviour of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 33, n. 2, p. 3383–3390, 2011. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748910002373>>.
- KVAMSDAL, H. M.; JORDAL, K.; BOLLAND, O. A quantitative comparison of gas turbine cycles with co₂ capture. *Energy*, v. 32, n. 1, p. 10–24, 2007. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054420600048X>>.
- LI, H. et al. Impurity impacts on the purification process in oxy-fuel combustion based co₂ capture and storage system. *Applied Energy*, v. 86, n. 2, p. 202–213, 2009. ISSN 0306-2619. IGEC III. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908001281>>.
- LI, P. et al. Mild oxy-combustion of gaseous fuels in a laboratory-scale furnace. *Combustion and Flame*, v. 160, n. 5, p. 933–946, 2013. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218013000394>>.
- MACKEY, B. G. et al. *Green Carbon Part 1: The role of natural forests in carbon storage*. ANU Press, 2008. ISBN 9781921313875. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/j.ctt24hcnf>>.
- MATHIEU, P.; NIHART, R. Zero-Emission MATIANT Cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 121, n. 1, p. 116–120, 01 1999. ISSN 0742-4795. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2816297>>.
- MENDIARA, T.; GLARBORG, P. Ammonia chemistry in oxy-fuel combustion of methane. *Combustion and Flame*, v. 156, n. 10, p. 1937–1949, 2009. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218009001953>>.
- NAVARRO-RODRÍGUEZ Ángel; GARCÍA, P.; GUERRERO, J. M. Introduction to digital sampled systems and nyquist sampling theorem. In: GARCÍA, J. (Ed.). *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*. Oxford: Elsevier, 2023. p. 652–656. ISBN 978-0-12-823211-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128212042001276>>.
- NEMITALLAH, M. et al. Effect analysis on the macrostructure and static stability limits of oxy-methane flames in a premixed swirl combustor. *Energy*, v. 159, p. 86–96, 2018. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218311964>>.
- NOBLE, D. R. et al. Syngas Mixture Composition Effects Upon Flashback and Blowout. Volume 1: Combustion and Fuels, Education, p. 357–368, 05 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/GT2006-90470>>.

OLIVEIRA, J. F. G. de; TRINDADE, T. C. G. *Sustainability performance evaluation of renewable energy sources: The case of Brazil*. [S.l.]: Springer, 2018.

PACÍFICO, A. L. et al. *Curso Técnicas Avançadas de Diagnóstico em Combustão*. 1. ed. [S.l.]: International Combustion Institute Summer School (ICISS), 2015.

PAPAGEORGE, M.; SUTTON, J. A. Statistical processing and convergence of finite-record-length time-series measurements from turbulent flows. *Experiments in Fluids*, Springer, v. 57, n. 8, p. 126, 2016.

POINSOT, T.; VEYNANTE, D. *Theoretical and numerical combustion*. 3. ed. [S.l.]: RT Edwards, Inc., 2012.

POPE, S. B. *Turbulent Flows*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.

RACKLEY, S. A. 1 - introduction. In: RACKLEY, S. A. (Ed.). *Carbon Capture and Storage (Second Edition)*. Second edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 2017. p. 3–21. ISBN 978-0-12-812041-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128120415000015>>.

RAJA, A. K.; SRIVASTAVA, A. P.; DWIVEDI, M. *Power Plant Engineering*. 1. ed. [S.l.]: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2016.

RICHARDS, G. A.; CASLETON, K. H.; CHORPENING, B. T. Co₂ and h₂o diluted oxy-fuel combustion for zero-emission power. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, v. 219, n. 2, p. 121–126, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1243/095765005X5990>>.

SAANUM, I.; DITARANTO, M. Experimental study of oxy-fuel combustion under gas turbine conditions. *Energy & Fuels*, v. 31, n. 4, p. 4445–4451, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03114>>.

SAANUM, I. et al. Demonstration Plant and Combustion System for an Oxy-Fuel Gas Turbine Cycle. Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions, 06 2016. V04AT04A056. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/GT2016-57142>>.

SEVAULT, A. et al. On the structure of the near field of oxy-fuel jet flames using raman/rayleigh laser diagnostics. *Combustion and Flame*, v. 159, n. 11, p. 3342–3352, 2012. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218012001976>>.

SHROLL, A. P. *Dynamic stability, blowoff, and flame characteristics of oxy-fuel combustion*. Dissertação (Mestrado) — Massachusetts Institute of Technology, 2011.

SHROLL, A. P.; SHANBHOUE, S. J.; GHONIEM, A. F. Dynamic-Stability Characteristics of Premixed Methane Oxy-Combustion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 134, n. 5, 03 2012. ISSN 0742-4795. 051504. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4004737>>.

SMITH, G. et al. *Mechanism GRI 3.0*. 1998. Acesso: 28/07/2022. Disponível em: <<http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/index.html>>.

STANGER, R. et al. Oxyfuel combustion for co₂ capture in power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 40, p. 55–125, 2015. ISSN 1750-5836. Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO₂ Capture and Storage. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615002637>>.

SUNDKVIST, S. G. et al. Concept for a Combustion System in Oxyfuel Gas Turbine Combined Cycles. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 136, n. 10, 05 2014. ISSN 0742-4795. 101513. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4027296>>.

TAAMALLAH, S. et al. On the characteristic flow and flame times for scaling oxy and air flame stabilization modes in premixed swirl combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 36, n. 3, p. 3799–3807, 2017. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748916302784>>.

TAAMALLAH, S.; SHANBHOGUE, S. J.; GHONIEM, A. F. Turbulent flame stabilization modes in premixed swirl combustion: Physical mechanism and karlovitz number-based criterion. *Combustion and Flame*, v. 166, p. 19–33, 2016. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218015004502>>.

TRINDADE, T.; FERREIRA, A.; FERNANDES, E. Characterization of combustion chemiluminescence: An image processing approach. *Procedia Technology*, v. 17, p. 194–201, 2014. ISSN 2212-0173. Conference on Electronics, Telecommunications and Computers – CETC 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017314004642>>.

VANDEL, A. et al. Study of the influence of water vapour and carbon dioxide dilution on flame structure of swirled methane/oxygen-enriched air flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 113, p. 110010, 2020. ISSN 0894-1777. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177719311914>>.

VANDEL, A. et al. Study of the influence of water vapour and carbon dioxide dilution on pollutants emitted by swirled methane/oxygen-enriched air flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 130, p. 110483, 2022. ISSN 0894-1777. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177721001291>>.

VERÍSSIMO, A.; ROCHA, A.; COSTA, M. Experimental study on the influence of the thermal input on the reaction zone under flameless oxidation conditions. *Fuel Processing Technology*, v. 106, p. 423–428, 2013. ISSN 0378-3820. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382012003244>>.

VERÍSSIMO, A. S.; ROCHA, A. M. A.; COSTA, M. Operational, combustion, and emission characteristics of a small-scale combustor. *Energy & Fuels*, v. 25, n. 6, p. 2469–2480, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ef200258t>>.

VILLANUEVA, H. H. S. *Caracterização Experimental do Escoamento em uma Câmara de Combustão de Metano Operando no Regime sem Chama visível*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2021.

WALL, T. et al. An overview on oxyfuel coal combustion—state of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 87, n. 8, p. 1003–1016, 2009. ISSN 0263-8762. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876209000598>>.

WANG, L. et al. Physical and chemical effects of CO_2 and H_2O additives on counterflow diffusion flame burning methane. *Energy & Fuels*, v. 27, n. 12, p. 7602–7611, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ef401559r>>.

WATANABE, H.; SHANBHOUE, S. J.; GHONIEM, A. F. Impact of Equivalence Ratio on the Macrostructure of Premixed Swirling CH_4/Air and $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ Flames. Volume 4B: Combustion, Fuels and Emissions, 06 2015. V04BT04A014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/GT2015-43224>>.

WATANABE, H. et al. The structure of swirl-stabilized turbulent premixed CH_4/air and $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ flames and mechanisms of intense burning of oxy-flames. *Combustion and Flame*, v. 174, p. 111–119, 2016. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218016302644>>.

WIMMER, K.; SANZ, W. Optimization and comparison of the two promising oxy-combustion cycles net power cycle and graz cycle. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 99, p. 103055, 2020. ISSN 1750-5836. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583619307571>>.

WÜNNING, J.; WÜNNING, J. Flameless oxidation to reduce thermal no-formation. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 23, n. 1, p. 81–94, 1997. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128597000063>>.

YADAV, S.; MONDAL, S. A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (ccs) technology. *Fuel*, v. 308, p. 122057, 2022. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121019335>>.

ZHAO, M.; BUTTSWORTH, D.; CHOUDHURY, R. Experimental and numerical study of OH^* chemiluminescence in hydrogen diffusion flames. *Combustion and Flame*, v. 197, p. 369–377, 2018. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218018303845>>.

ZHENG, C.; LIU, Z. *Oxy-fuel combustion: fundamentals, theory and practice*. [S.l.]: Academic Press, 2017.

ZHENG, L. *Oxy-fuel combustion for power generation and carbon dioxide (CO_2) capture*. [S.l.]: Elsevier, 2011.

Apêndices

APÊNDICE A – Código de Implementação da Velocidade de Chama Laminar

```
#-----#  
#-----#  
#-----#  
  
# Paulo Henrique dos Santos Santana  
  
#-----#  
#-----#  
#-----#  
  
# importando bibliotecas  
import cantera as ct  
import numpy as np  
  
#-----#  
#-----#  
#-----#  
  
def frellyPropagating(diluyente , phi ,Xd,TR):  
  
    # quantidade de diluente – kmol  
    alpha = Xd/(100-Xd)  
  
    # Parametros de entrada  
    Tu = TR # temperatura de entrada reagentes – K  
    pu = ct.one_atm # pressao de entrada reagentes – Pa  
  
    # Usando o mecanismo de reacao GRI-Mech 3.0  
    gas = ct.Solution(gri30.xml)
```

```

# criando as variaveis
SL = np.zeros(len(phi))
dL = np.zeros(len(phi))
tc = np.zeros(len(phi))

for contador in range(len(razaoEquivalencia)):
    # Escolhendo a razao de equivalencia na entrada
    gas.set_equivalence_ratio(phi[contador],
                              CH4, {O2:1.0,
                                     str(diluyente):alpha[contador]})

    # Temperatura (K) e pressao (Pa) dos gases
    gas.TP = Tu[contador], pu

    #-----#

    # Define flame simulation conditions

    # Parametros do tubo
    d = 14/1000 # distancia tubo - m

    # Criando o objeto chama
    flame = ct.FreeFlame(gas, width = d)

    # Definindo as tolerancias do solver
    flame.set_refine_criteria(ratio = 3, slope = 0.1, curve = 0.1)

    #-----#

    # Solve

    try:
        flame.solve(loglevel = 1, auto = True)
        SL[contador] = 100*flame.velocity[0]
        # Flame tickness calculation based on temperature gradient
        gradT = np.gradient(flame.T, flame.grid)
        dL[contador] = (max(flame.T) - min(flame.T))/gradT.max()
        # Characteristic time scale calculation tc
        tc[contador] = dL[contador]/flame.velocity[0]

```

except :

SL[contador] = 0

dL[contador] = 0

tc[contador] = 0

FP = [SL,dL,tc]

return FP

##-----##
##-----##
##-----##

APÊNDICE B – Código de Implementação da Convergência Estatística

```

#-----#
#-----#
#-----#

# Paulo Santana

#-----#
#-----#
#-----#

# importando bibliotecas
import numpy as np
from tqdm import tqdm
from scipy import signal

#-----#
#-----#
#-----#

# functions

def integralTime(dt, corr):
    '''Method to calculate integral time scale based on correlation'''
    for i, v in enumerate(corr):
        if v < 0:
            idx = i-1
            corrI = corr[:idx]
            break
    else:

```

```

        corrI = corr
    corrI = corr[:idx]
    t0 = np.trapz(corrI, dx=dt)

    return t0

def movingMean(data, ax):

    sum1 = np.cumsum(data, axis = ax)
    meanH = sum1/(np.arange(np.shape(data[0])[0]) + 1)

    return meanH

def movingVariance(data, ax):

    n = len(data)
    varH = (n/(n-1))*(movingMean(data**2, ax) - movingMean(data, ax)**2)

    return varH

# mean e variance
def mediaMovel(dados, eixo):
    sum1 = np.cumsum(dados, axis = eixo)
    mean = sum1/(np.arange(np.shape(dados)[0]) + 1)

    return mean

def varianciaMovel(dados, eixo):
    n = len(dados)
    var = (n/(n-1))*(mediaMovel(dados**2, eixo) - mediaMovel(dados, eixo)**2)

    return var

#-----#
#-----#
#-----#

#-----#

```

```
# Pegando os dados
```

```
#-----#
```

```
# Nome do caso experimental - sera o nome do arquivo que vai ser salvo
```

```
print('')
```

```
case = 'Lifted'
```

```
experiment = '10'
```

```
print('Data_-' + str(case) + '_-Experiment_-' + str(experiment))
```

```
print('')
```

```
# Local dos dados e tipo de arquivo
```

```
# data = 'testData'
```

```
data = 'totalData'
```

```
# local para salvar os resultados
```

```
savePath = '2-Images/Convergence/' + str(data) + '/Text/'
```

```
# Data
```

```
Idata = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment'
```

```
+ str(experiment) + str(data) + str(case) + 'PostProcessed.npy')
```

```
radial = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment'
```

```
+ str(experiment) + str(data) + str(case) + 'Radial.npy')
```

```
axial = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment'
```

```
+ str(experiment) + str(data) + str(case) + 'Axial.npy')
```

```
print('Leu_ os_dados')
```

```
print('')
```

```
#-----#
```

```
#-----#
```

```
#-----#
```

```
# informacoes de medicao
```

```
pixelr = 512 # numero de pixels na horizontal
```

```
pixelz = 960 # numero de pixels na vertical
```

```
# informacoes de medicao
```

```
fs = 2000 # frequencia amostral - Hz
```

```

Ns = len(Idata) # numero de amostras
Dt = Ns/fs # tempo total de medicao - s

t = np.linspace(0, Dt, num = Ns, endpoint = True) # vetor de tempos

print('Fez o vetor de tempos')
print('')

#####

# media
M = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment' + str(experiment)
            + str(data) + str(case) + 'Mean.npy')

#####

# informacoes de medicao
fs = 2000 # frequencia amostral - Hz
Ns = len(Idata) # numero de amostras
Dt = Ns/fs # tempo total de medicao - s

#####

# integral time scale - s (process)
l0 = 10/1000 # escala de comprimento cararcteristico integral - m
Ub = 30 # velocidade de entrada - m/s
I = 20/100 # intensidade turbulenta - %
tt = 10/(I*Ub)
t0 = np.full_like(M, tt)

# caso experimental # esse serve para o erro final
lag = np.linspace(-Dt, Dt, num = int(2*Ns-1), endpoint = True)
# vetor de lags
tau0 = np.where(lag == 0)[0][0]
tau1 = np.where(lag == Dt)[0][0]+1

u = Idata-M # fluctuation

```

```

for contadorColuna in tqdm(range(len(Idata[0][0]))):
    for contadorLinha in range(len(Idata[0])):
        rho = signal.correlate(u[:, contadorLinha, contadorColuna],
                               u[:, contadorLinha, contadorColuna], mode = 'full')
        # autocorrelation

        rho /= np.max(rho) # normalization

        rhoDt = rho[tau0:tau1]
        tau = lag[tau0:tau1]

        integ = integralTime(1/fs, rhoDt)
        if integ >= 0:
            t0[contadorLinha][contadorColuna] = integ

print('Calculou a escala de tempo integral (processo)')
print('')

#-----#
#-----#
#-----#

# valor para rearranjar os dados
# valor = Idata.reshape((int(pixelz*pixelr), len(Idata)))
r = np.where(np.around(radial[0], 1) == 0.0)[0][0] # r = 0 mm
z = np.where(np.around(axial[:, 0], 1) == 180.0)[0][0] # z = 180 mm

# tirando os valores fora da janela de medicaao
# tomando os valores na 'chama'
Mn = M/np.max(M)
valor = []
tempo = []
for contadorLinha in tqdm(range(len(M))):
    for contadorColuna in range(len(M[0])):
        if Mn[contadorLinha][contadorColuna] > 0.15:
            valor.append(Idata[:, contadorLinha, contadorColuna])
            tempo.append(t0[contadorLinha, contadorColuna])
        if contadorLinha == z and contadorColuna == r:
            valorPixel = Idata[:, contadorLinha, contadorColuna]

```

```

valor = np.array(valor)
tempo = np.array(tempo)

print('')
print('Leu os valores')
print('')

#####

meanPixel = mediaMovel(valorPixel, 0)
varPixel = varianciaMovel(valorPixel, 0)
I2Pixel = varPixel/(meanPixel**2) # turbulent intensity (**2)

# mean e variance
mean = movingMean(valor, 1)
var = movingVariance(valor, 1)
I2 = var/(mean**2) # turbulent intensity (**2)

print('Calculou a media e a variancia')
print('')

#####

# mean relative error
tempo0 = np.tensordot(tempo, 1/t, axes = 0) # tempo normalizado

# presumed autocorrelation - high Reynolds number
beta1 = (1-np.exp(-1/tempo0)) -
(tempo0/1)*(1-(1+(1/tempo0))*np.exp(-1/tempo0))

esT1 = np.sqrt(2*(I2)*(tempo0)*beta1)
beta1Pixel = (1-np.exp(-1*(t/t0[z][r]))) -
((t0[z][r]/t)/1)*(1-(1+(1*(t/t0[z][r]))) * np.exp(-1*(t/t0[z][r])))

```

```
es1Pixel = np.sqrt(2*(I2Pixel)*(t0[z][r]/t)*beta1Pixel)
```

```
# tomando os valores maximos e minimos dos erros
```

```
esT1min = []
```

```
esT1max = []
```

```
for contadorErro in tqdm(range(len(esT1[0]))):
```

```
    esT1min.append(np.min(esT1[:, contadorErro]))
```

```
    esT1max.append(np.max(esT1[:, contadorErro]))
```

```
esT1min = np.array(esT1min)
```

```
esT1max = np.array(esT1max)
```

```
print('Calculou o erro')
```

```
#-----#  
#-----#  
#-----#
```


APÊNDICE C – Código de Implementação de Pós Processamento de Imagem

```

#-----#
#-----#
#-----#

# Experiment – Oxy–Methane
# Paulo Santana

#-----#
#-----#
#-----#

#-----#

# importante bibliotecas

#-----#

import numpy as np # biblioteca Python usada para trabalhar com arrays
import matplotlib.pyplot as plt # biblioteca para criar visualizacoes
# estaticas, animadas e interativas em Python
from scipy.signal import butter, lfilter
from scipy import ndimage
from scipy.ndimage import convolve1d
from scipy.signal import firwin, welch
from tqdm import tqdm
from skimage.transform import PiecewiseAffineTransform, warp

#-----#
#-----#
#-----#

```

```

#-----#
# funcoes
#-----#

def butter_lowpass(cutoff, fs, order=5):
    nyq = 0.5 * fs
    normal_cutoff = cutoff / nyq
    b, a = butter(order, normal_cutoff, btype='low', analog=False)
    return b, a

def butter_lowpass_filter(data, cutoff, fs, order=5):
    b, a = butter_lowpass(cutoff, fs, order=order)
    y = lfilter(b, a, data)
    return y

#-----#

def filtroLinhas(imagem):
    comprimentoFiltro = 65

    somaLinhaHorizontal = np.reshape(imagem, (len(imagem), -1), 'C')
    .mean(axis = 1)
    frequenciaAmostravelVertical, powerSpectralDensity
    # = welch(somaLinhaHorizontal)
    # Estimate PSD using Welchs method

    powerSpectralDensity[frequenciaAmostravelVertical < 1/25] = 0.0
    powerSpectralDensity[frequenciaAmostravelVertical == 0] = 0.0
    frequenciaDistorcao = frequenciaAmostravelVertical
    [powerSpectralDensity.argmax()]

    frequenciaDelta = (40/100)*frequenciaDistorcao #0.025

    hpf = firwin(comprimentoFiltro,
    frequenciaDistorcao-frequenciaDelta, pass_zero = 'highpass')

```

```

lpf = firwin(comprimentoFiltro, frequenciaDistorcaocao,
pass_zero = 'lowpass')

imagemConvolucao = convolve1d(imagem, hpf, axis = 0)
imagemConvolucao = convolve1d(imagemConvolucao, lpf, axis = 1)
imagemFiltrada = imagem - imagemConvolucao

return imagemFiltrada

```

```

#-----#

```

```

def transformadaImagem(image):

```

```

    # transforma a imagem distorcida pelo intensificador
    # https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/transform/
    plot_piecewise_affine.html#sphx-glr-auto-examples-transform-plot-
    piecewise-affine-py
    # https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
    # https://www.apriorit.com/dev-blog/
    ai-fix-image-distortions-using-opencv

```

```

    rows, cols = image.shape[0], image.shape[1]

```

```

#-----#

```

```

    # pontos no target - imagem com intensificador

```

```

    src = np.array([
        # coluna -30 mm
        [29., 862.],
        [32., 775.],
        [35., 695.],
        [36., 617.],
        [37., 543.],
        [37., 468.],
        [35., 392.],
        [32., 317.],
        [29., 240.],
        [23., 157.],

```

```
[17., 71.],  
#-----  
# coluna -20 mm  
[108., 855.],  
[111., 772.],  
[112., 692.],  
[113., 615.],  
[114., 541.],  
[112., 467.],  
[112., 394.],  
[110., 318.],  
[108., 241.],  
[105., 161.],  
[98., 78.],  
#-----  
# coluna -10 mm  
[188., 851.],  
[188., 766.],  
[190., 689.],  
[190., 613.],  
[190., 539.],  
[188., 465.],  
[187., 392.],  
[186., 318.],  
[184., 241.],  
[181., 161.],  
[178., 78.],  
#-----  
# coluna 0 mm  
[265., 848.],  
[263., 765.],  
[263., 687.],  
[262., 612.],  
[262., 537.],  
[262., 465.],  
[260., 391.],  
[259., 318.],  
[258., 242.],  
[256., 162.],
```

[255., 80.],
#-----
coluna +10 mm
[343., 849.],
[339., 765.],
[338., 687.],
[337., 611.],
[335., 538.],
[335., 464.],
[334., 392.],
[333., 318.],
[333., 241.],
[333., 161.],
[332., 78.],
#-----
coluna +20 mm
[420., 850.],
[417., 766.],
[414., 687.],
[411., 611.],
[410., 538.],
[408., 463.],
[408., 391.],
[407., 317.],
[407., 239.],
[409., 159.],
[410., 75.],
#-----
coluna +30 mm
[500., 855.],
[495., 771.],
[491., 690.],
[487., 611.],
[485., 536.],
[483., 463.],
[482., 389.],
[482., 315.],
[486., 236.],
[488., 154.],

```
[492., 70.]  
])
```

```
#-----#
```

```
# pontos no target - imagem sem intensificador
```

```
dst = np.array([  
    # coluna -30 mm  
    [17., 855.],  
    [18., 780.],  
    [18., 702.],  
    [19., 625.],  
    [20., 548.],  
    [20., 471.],  
    [22., 395.],  
    [23., 318.],  
    [24., 241.],  
    [25., 165.],  
    [26., 89.],  
    #-----#  
    # coluna -20 mm  
    [96., 855.],  
    [97., 780.],  
    [97., 702.],  
    [98., 625.],  
    [99., 548.],  
    [99., 471.],  
    [100., 395.],  
    [101., 318.],  
    [102., 241.],  
    [103., 165.],  
    [104., 89.],  
    #-----#  
    # coluna -10 mm  
    [172., 857.],  
    [172., 780.],  
    [173., 702.],  
    [174., 626.],  
    [174., 549.],
```

[175., 472.],
[176., 397.],
[177., 320.],
[178., 243.],
[177., 166.],
[179., 90.],

#—————
coluna 0 mm

[248., 857.],
[250., 780.],
[250., 703.],
[251., 627.],
[252., 551.],
[253., 473.],
[254., 396.],
[255., 320.],
[256., 243.],
[257., 166.],
[257., 90.],

#—————
coluna 10 mm

[327., 859.],
[328., 780.],
[328., 703.],
[328., 627.],
[330., 551.],
[330., 473.],
[331., 396.],
[331., 320.],
[331., 243.],
[332., 166.],
[332., 90.],

#—————
coluna 20 mm

[405., 860.],
[405., 782.],
[405., 705.],
[406., 628.],
[408., 551.],

```

    [408., 473.],
    [409., 396.],
    [409., 320.],
    [409., 243.],
    [410., 166.],
    [411., 90.],
    #-----
    # coluna 30 mm
    [482., 861.],
    [483., 785.],
    [483., 706.],
    [483., 629.],
    [483., 552.],
    [484., 474.],
    [485., 398.],
    [485., 321.],
    [486., 244.],
    [488., 167.],
    [488., 90.]
  ])

```

```

dst = dst + np.array([5,0]) # deslocamento linear do target

```

```

#-----#

```

```

tform = PiecewiseAffineTransform()
tform.estimate(src, dst)

```

```

#-----#

```

```

out_rows = rows
out_cols = cols
out = warp(image, tform.inverse, output_shape = (out_rows, out_cols))

```

```

return out

```

```

#-----#

```

```

#-----#

```

```

#-----#

```



```
#-----#  
  
# Pegando os dados  
  
#-----#  
  
# Nome do caso experimental - sera o nome do arquivo que vai ser salvo  
print('')  
case = 'Anchored'  
experiment = '10'  
print('Data_-' + str(case) + '_-Experiment_' + str(experiment))  
print('')  
  
# Local dos dados e tipo de arquivo  
# data = 'testData'  
data = 'reducedData'  
# data = 'totalData'  
  
# local para salvar os resultados  
savePath = '2-Images/Statistics/' + str(data) + '/'  
  
# Data  
ldata = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment' +  
str(experiment) + str(data) + str(case) + 'Pixel.npy')  
radial = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment' +  
str(experiment) + str(data) + str(case) + 'Radial.npy')  
axial = np.load('./1-Data/' + str(data) + '/Experiment' +  
str(experiment) + str(data) + str(case) + 'Axial.npy')  
  
print('Leu-os-dados')  
print('')  
  
#-----#  
#-----#  
#-----#  
  
#-----#  
  
# Pos processamento
```

```
#-----#  
  
# processing = 'Crude'  
# processing = 'NewAxis'  
processing = 'Text'  
  
#-----#  
  
for it, img in enumerate(tqdm(Idata)):  
    Idata[it] = filtroLinhas(filtroLinhas(Idata[it]))  
  
cutThreshold = 700  
Idata[Idata < cutThreshold] = 0 # eliminando o ruído eletrônico  
Idata = ndimage.median_filter(Idata, size = (1,3,3)) # filtro mediana  
  
#-----#  
  
# filtros temporais  
  
# informacoes de medicao  
fs = 2e3 # frequencia amostral - Hz  
  
# Requisitos do filtro  
ordem = 5 # ordem do filtro  
fc = 999 # frequencia de corte (Hz)  
  
for contadorColuna in tqdm(range(len(Idata[0][0]))):  
    for contadorLinha in range(len(Idata[0])):  
        # filtro do sinal  
        Idata[:, contadorLinha, contadorColuna] = butter_lowpass_filter  
            (Idata[:, contadorLinha, contadorColuna], fc, fs, ordem)  
  
#-----#  
#-----#  
#-----#  
  
#-----#
```

```
# Estatística descritiva
```

```
#-----#
```

```
M = np.mean(Idata , axis = 0) # mrdia
```

```
Im = transformadaImagem(M)
```

```
#-----#
```

```
S = np.sqrt(np.var(Idata , axis = 0, ddof = 1)) # desvio padrao
```

```
Is = transformadaImagem(S)
```

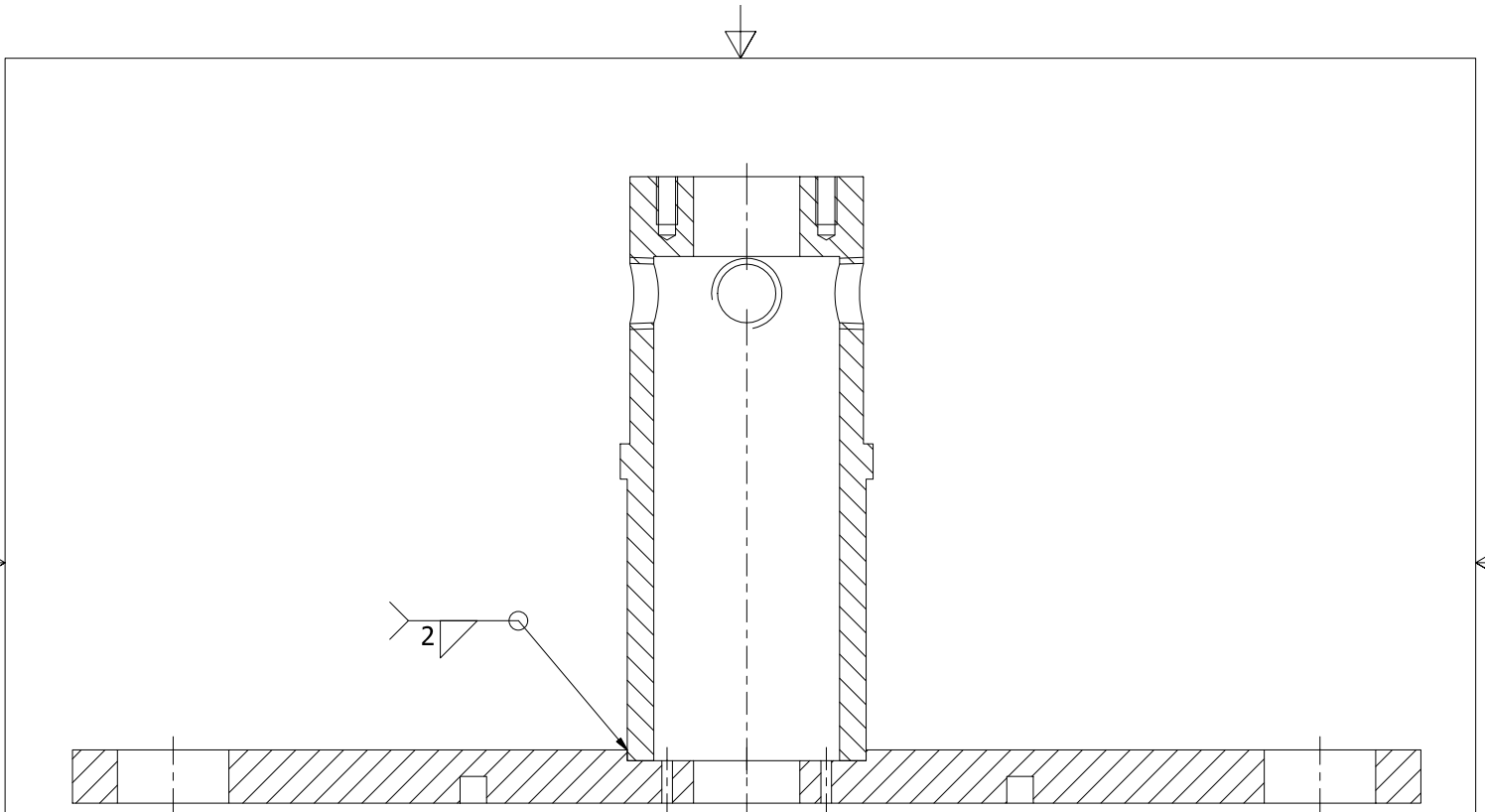
```
#-----#
```

```
#-----#
```

```
#-----#
```

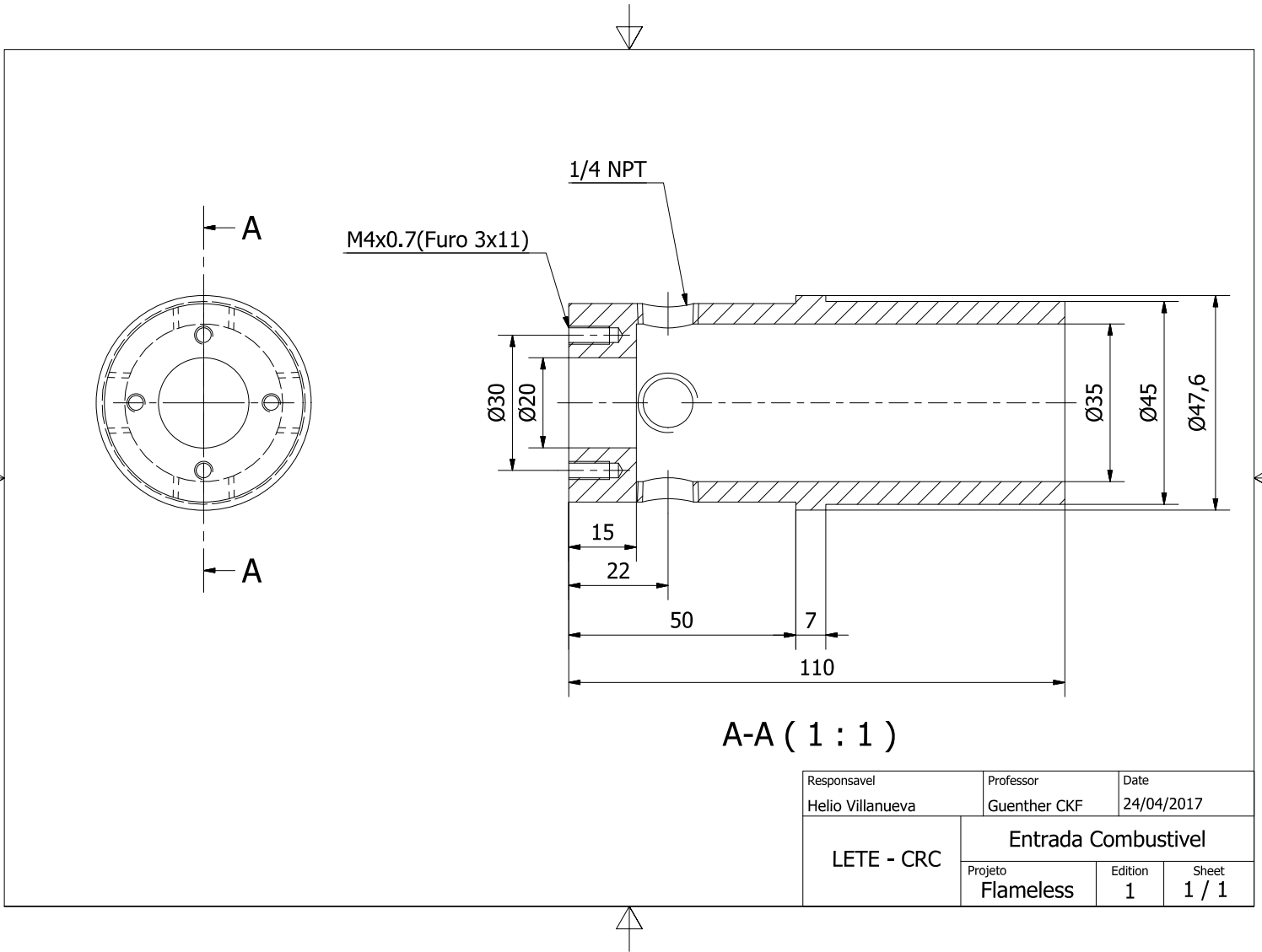

Anexos

ANEXO A – Desenhos de Fabricação da Câmara de Combustão



Obs: Peças em INOX

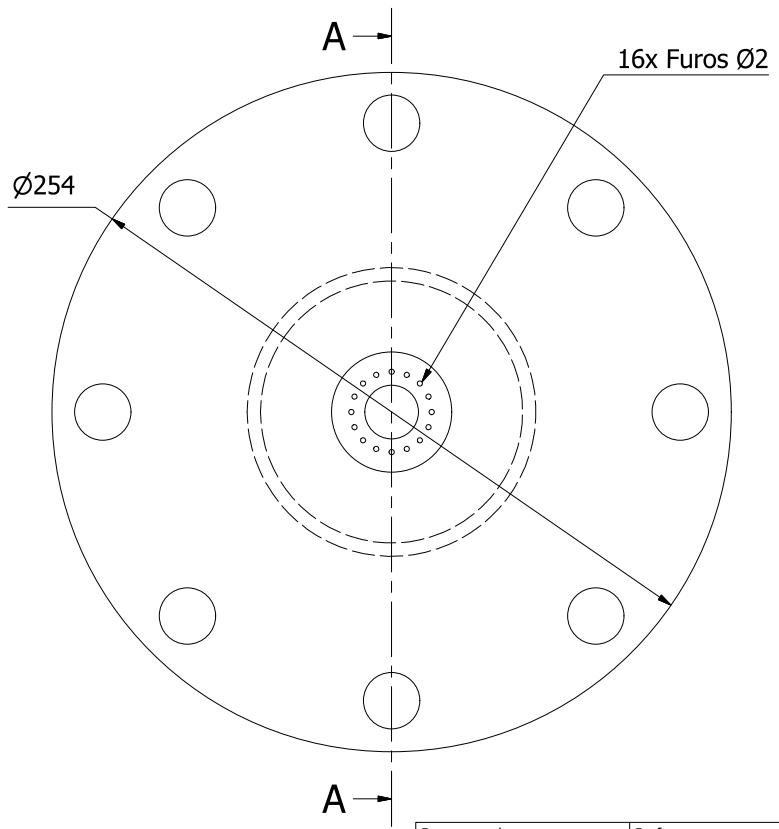
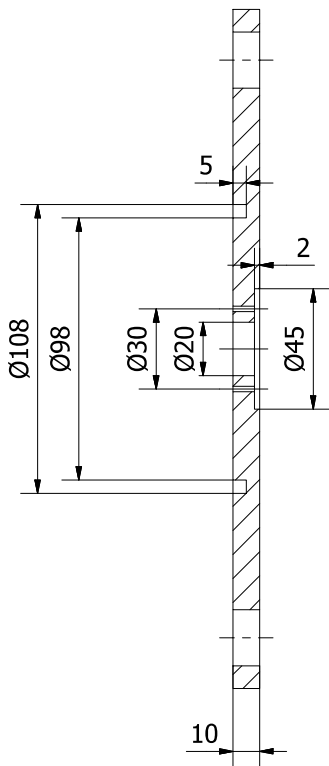
Responsavel	Professor	Date	
Helio Villanueva	Guenther CKF	25/04/2017	
LETE - CRC	Entrada Soldada		
	Projeto	Edition	Sheet
Flameless	1	1 / 1	



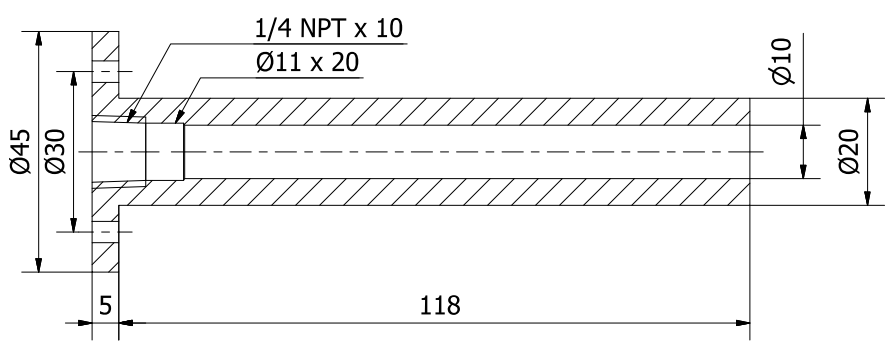
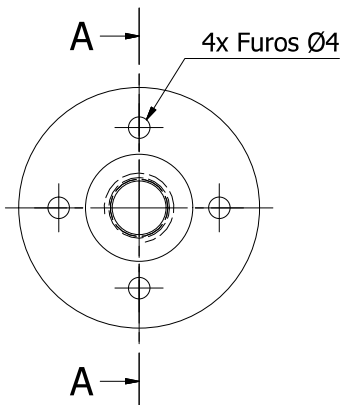
A-A (1 : 1)

Responsavel	Professor	Date	
Helio Villanueva	Guenther CKF	24/04/2017	
LETE - CRC	Entrada Combustivel		
	Projeto	Edition	Sheet
Flameless	1	1 / 1	

A-A (1 : 2)

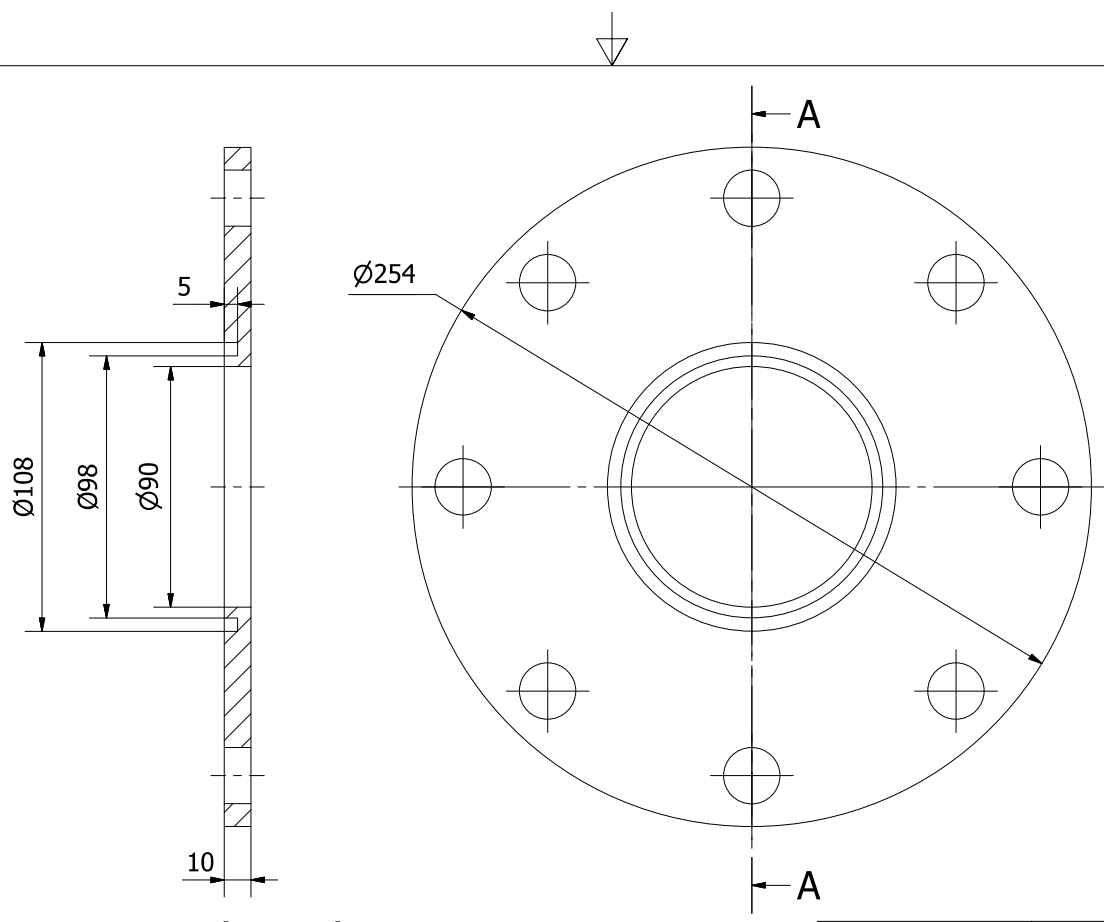


Responsavel	Professor	Date	
Helio Villanueva	Guenther CKF	25/04/2017	
LETE - CRC		Flange Entrada	
Projeto	Edition	Sheet	
Flameless	1	1 / 1	



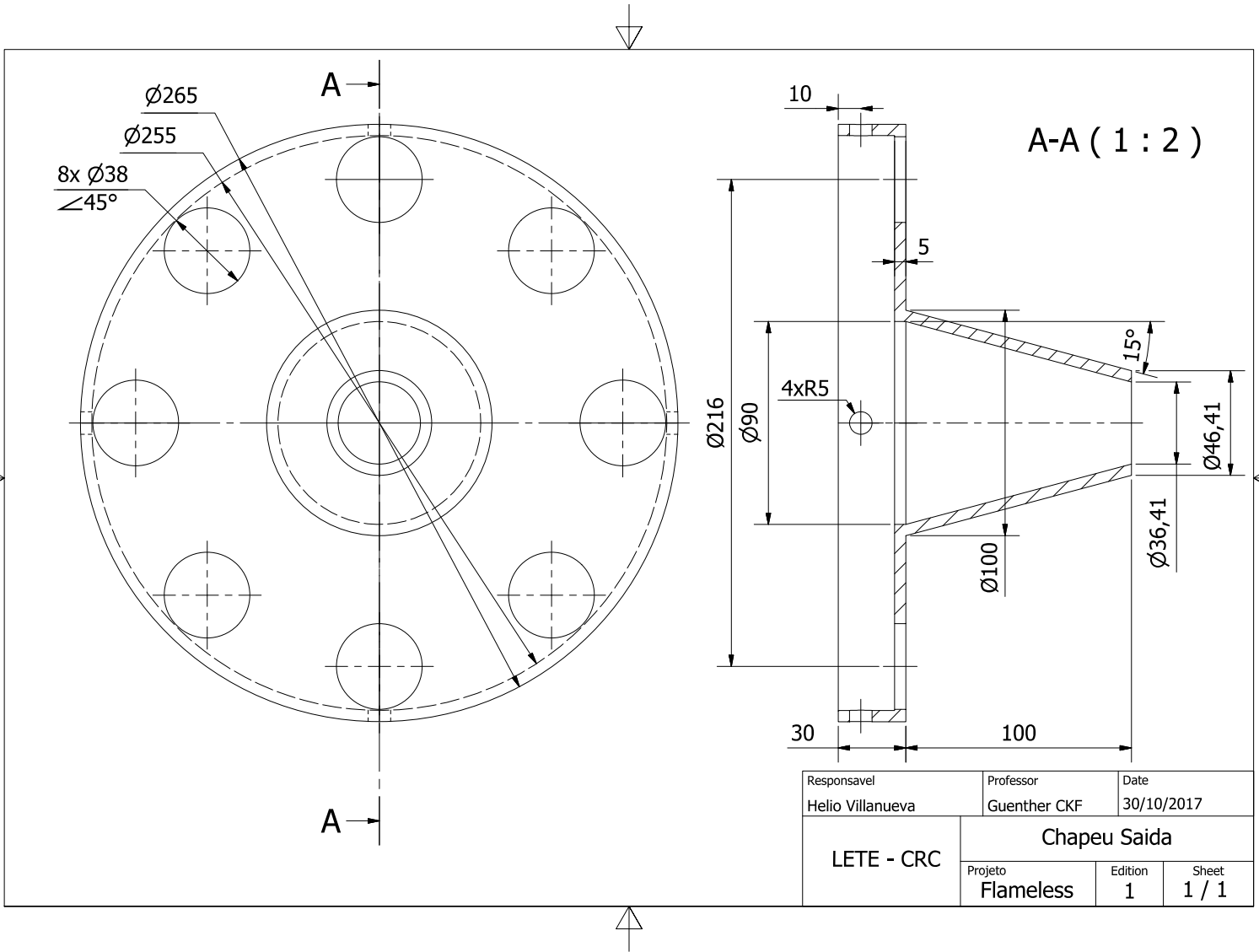
A-A (1 : 1)

Responsavel Helio Villanueva	Professor Guenther CKF	Date 25/04/2017	
LETE - CRC	Entrada Movel		
	Projeto Flameless	Edition 1	Sheet 1 / 1



A-A (1 : 2)

Responsavel Helio Villanueva	Professor Guenther CKF	Date 25/04/2017
LETE - CRC	Flange Saida	
	Projeto Flameless	Edition 1
		Sheet 1 / 1



Responsavel	Professor	Date	
Helio Villanueva	Guenther CKF	30/10/2017	
LETE - CRC		Chapeu Saida	
		Projeto	Sheet
Flameless		1	1 / 1