

Carlos Antonio Montalbán Caillaux

**Avaliação de Instabilidades em Chamas  
Produzidas por Nebulização de  
Combustíveis Líquidos Utilizando-se  
Processamento de Imagens**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.

São Paulo  
2007

Carlos Antonio Montalbán Caillaux

**Avaliação de Instabilidades em Chamas  
Produzidas por Nebulização de  
Combustíveis Líquidos Utilizando-se  
Processamento de Imagens**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:  
Engenharia Mecânica de Energia de  
Fluídos

Orientador:  
Prof. Dr. Guenther Carlos  
Krieger Filho

### Ficha Catalográfica

Caillaux, Carlos Antonio Montalbán

Avaliação de Instabilidades em Chamas Produzidas por Nebulização de Combustíveis Líquidos Utilizando-se Processamento de Imagens. São Paulo, 2007. 88 p.

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

1. Óleos Combustíveis. 2. Processamento de Imagens. 3. Combustão (processos) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Mecânica . II. Título.

*...a minha esposa Ana María, meus pais  
Jorge e Teresa e a minha irmã Milagros.*

# Agradecimentos

Ao mestre, conselheiro, orientador e principalmente amigo Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho, por ter acreditado e me dado confiança na condução e concretização deste trabalho.

Ao Eng. Francisco D.A. de Sousa, ao Prof Dr. Jurandir Itizo Yanagihara e ao Prof. Dr. José Roberto Simões, pelos conselhos, contribuições, valiosos comentários e pelas oportunas sugestões.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo pelo apoio técnico na realização deste trabalho e a todo o pessoal que ali trabalha, pela ajuda e amizade.

A todos amigos, Antônio, Aliandra, Amaury, Carlos Eduardo, Carlos Ramirez, Christian, Cyro, David, Diego, Eduarda, Fernando, Giancarlo, Guilherme, Jenny, Jimmy, José, Karla, Kleiber, Luis, Leonardo, Lorena, Matheus, Marcos, Maud, Marcelo, Natália, Newton, Pablo, Rafael, Rodolfo, Roger e Romel, pela ajuda, incentivo e compreensão. A todos que me apoiaram ao longo desse tempo sou eternamente grato a vocês.

# Resumo

Neste trabalho foram feitos estudos experimentais das instabilidades e os defeitos no processo de combustão do óleo combustível tipo 1B. As instabilidades investigadas foram o descolamento, o sopramento e defeitos tais como excesso de oxigênio e má nebulização. Como indicadores destas instabilidades e defeitos, foram utilizados a visualização, a mudança no valor dos tons de cinza e o aumento no número de objetos das imagens produzidas por câmaras CCD com filtros de interferência e também as medições da intensidade de radiação ultravioleta emitida pela chama usando um detector de chama UV. O principal objetivo desta dissertação de mestrado é caracterizar instabilidades e defeitos no processo de combustão utilizando a técnica do processamento de imagens digitais. Em especial, procurou-se identificar quais parâmetros do processamento digital de imagens poderão ser utilizados como detectores do sopramento, descolamento e má nebulização. Com este objetivo foram variados os seguintes parâmetros: a) a razão entre a vazão de vapor de nebulização e a vazão de combustível; b) a relação entre a vazão de ar primário e ar secundário. Os resultados obtidos mostram uma forte influência da vazão de ar primário e da vazão de vapor de nebulização na estabilidade das chamas. O valor médio do tom de cinza das imagens e o número de objetos nas imagens foram os parâmetros com maior sensibilidade ao início das instabilidades.

Palavras-chaves: *Estabilização, nebulização, chamas, CCD, imagens.*

# Abstract

In this work, the instabilities and defects in the combustion process of fuel oil type 1B were studied experimentally. The investigated instabilities was the blowout and liftoff, and defects such as excess of oxygen and poor atomization. As indication of these instabilities and defects, visualization, change in the value of gray tons, increase in the number objects in the images produced by CCD cameras with interferometric filters, and also measurements of the ultraviolet radiation intensity emitted by the flame were used. The main objective of this master thesis is characterize instabilities and defects in the combustion process using the technique digital image processing. Specially, this work aims to identify which parameters of the digital image processing could be used as detectors of blowout, liftoff and poor atomization. With this objective the following parameters were varied; a) the steam mass flowrate/fuel oil mass flowrate ration, and b) Primary air mass flowrate/secondary air mass flowrate ratio. The results show strong influence of the primary air mass flowrate and the steam mass flowrate in the stability of the flame. The average value of the gray tons and the objects number in the image were the parameters with higer sensitivity to the threshold of the instabilities.

Keywords: *Stabilization, Atomization, Flames, CCD, images.*

# Sumário

**Lista de Figuras**

**Lista de Tabelas**

**Lista de Abreviaturas**

**Lista de Símbolos**

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	3
1.2	Objetivo . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	O Fenômeno de Sopramento de Chamas de Difusão . . . . .	5
2.2	Dinâmica da Chama na Iminência do Sopramento . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Materiais e Metodologia</b>	<b>18</b>
3.1	Aparato Experimental . . . . .	18
3.1.1	Fornalha de Testes . . . . .	19
3.1.2	Vapor de água . . . . .	20
3.1.3	Ar de combustão . . . . .	20
3.1.4	Óleo combustível . . . . .	21
3.1.5	Água de resfriamento . . . . .	22
3.2	Instrumentação existente . . . . .	22
3.2.1	Medição de temperatura . . . . .	22
3.2.2	Medição de pressão/vazão de fluidos . . . . .	22



3.2.3	Sistema de aquisição de imagens . . . . .	23
3.2.4	Sistema de aquisição de dados . . . . .	25
3.3	Metodologia para o Monitoramento da Chama . . . . .	25
3.3.1	Metodologia para a Análise da Intensidade de Radiação Ultravioleta Emitida pela Chama . . . . .	25
3.3.2	Metodologia para a Análise de Imagens . . . . .	26
3.4	Estimativa da Incerteza . . . . .	36
3.4.1	Incerteza na uniformidade da luminosidade da chama. . . . .	37
3.4.2	Incerteza na uniformidade da forma da chama . . . . .	38
3.4.3	Incerteza do sensor CCD da câmara. . . . .	39
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>41</b>
4.1	Detecção de extinção de chamas . . . . .	41
4.2	Detecção de instabilidade de chamas . . . . .	42
4.3	Detecção de defeito de má nebulização . . . . .	50
4.4	Detecção de chamas com condições extremas de excesso de ar . . . . .	53
4.5	Intensidade de Radiação Ultravioleta . . . . .	56
4.5.1	Intensidade de Radiação Ultravioleta numa Chama Normal . . . . .	56
4.5.2	Intensidade de Radiação Ultravioleta de uma Chama Instável. . . . .	57
4.5.3	Intensidade de Radiação Ultravioleta de uma Chama Má Nebulizada. . . . .	57
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>61</b>
	<b>Anexo A – Tabela de distribuição t de Student</b>	<b>63</b>
	<b>Anexo B – Características dos Óleos Combustíveis</b>	<b>64</b>
	<b>Anexo C – Detetor de chama Ultravioleta</b>	<b>65</b>
	<b>Anexo D – Dados sobre as incertezas</b>	<b>66</b>

**Anexo E - Resultados**

**69**

**Referências**

**87**

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama esquemático do sistema de coordenadas e o esquema mostrando a posição da chama tripla em uma chama de difusão laminar sobre um jato redondo (GHOSAL; VERVISCH, 2001). . . . .	8
2.2	Dependência do comprimento de chama de difusão turbulenta, $L/d_0$ , versus $(\rho_0/\rho_\infty)^{1/2}\psi$ . $CO$ , $\psi = 2,46$ ; $H_2$ , $\psi = 34,2$ ; $C_2H_2$ , $\psi = 13,3$ ; $C_3H_8$ , $\psi = 15,7$ (BROADWELL; DAHM; MUNGAL, 1984) .	10
2.3	Posições típicas da base da chama no processo de sopramento de uma chama de metano diluída em 30% de nitrogênio. Imagens típicas da chama em cada região: pulsante, início do descolamento, descolamento e sopramento (WU et al., 2006a). . . . .	15
2.4	Esquema do processo de sopramento (WU et al., 2006a). . . . .	16
3.1	Arranjo experimental. . . . .	18
3.2	Desenho esquemático do queimador. . . . .	19
3.3	Vista da fornalha de testes vertical (IPT). . . . .	20
3.4	Queimador soprado, montado na fornalha de testes do IPT.- vista 1.	21
3.5	Queimador soprado, montado na fornalha de testes do IPT.- vista 2.	21
3.6	Vista Explodida do Conjunto Óptico. 1) Escotilha para alojamento dos vidros de quartzo, 2) Vidros de quartzo e anel de vedação, 3) Porca de fixação da escotilha ao pescoço do costado da fornalha, 4) Dispositivo de aperto dos vidros de quartzo, 5) Dispositivo de alojamento do filtro de interferência, 6) Porca de fixação do tubo porta câmara à escotilha, 7) Tubo porta câmara, 8) Câmara CCD, 9) Dispositivo de fechamento traseiro do conjunto óptico, 10) Cabos de alimentação e condução de sinal. . . . .	23
3.7	Chama normal: 3% de $O_2$ , relação ar primário/ar secundário = 500/500. . . . .	27
3.8	Chama com excesso de ar muito alto (6%). . . . .	27

3.9	Chama com excesso de ar muito baixo (1%). . . . .	28
3.10	(a) Chama estável: ArPArS=1,5; (b) Chama instável: ArPArS=4. . . . .	28
3.11	(a) Chama com boa nebulização; (b) Chama com má nebulização. . . . .	29
3.12	Seqüência de apagamento da chama. . . . .	29
3.13	Escala de cinzas com 256 tons de cinza. . . . .	32
3.14	Possíveis fontes de incerteza na medição das propriedades da chama. . . . .	37
4.1	Funções densidade de probabilidade para Chama Presente e Chama Ausente. . . . .	42
4.2	Aumento da instabilidade com o aumento da relação ar primário/ar secundário: (a) 500/500; (b) 650/350; (c) 700/300; (d) 750/250, relação vapor/óleo 0,33. Todas as imagens com filtro interferométrico de 650 nm. . . . .	43
4.3	Aumento da instabilidade com o aumento da ArPArS e com o aumento da relação vapor/óleo: (a)imagens com ArPArS 500/500 e relação vapor/óleo 0,33; (b) imagem com ArPArS 500/500 e relação vapor/óleo 0,62; (c) imagem com ArPArS 600/400 e relação vapor/óleo 0,33; (d) imagens com ArPArS 600/400 e relação vapor/óleo 0,4, utilizando o filtro interferométrico de 800 nm. . . . .	44
4.4	Sub-imagens da base da chama para os casos (a) 500/500; (b) 650/350; (c) 700/300; (d) 750/250. . . . .	45
4.5	Funções densidade de probabilidade para as categorias Chama Estável e Chama Instável das imagens feitas com o filtro interferométrico de 650 nm. . . . .	46
4.6	Funções densidade de probabilidade para as categorias Chama Estável e Chama Instável das imagens feitas com o filtro interferométrico de 800 nm. . . . .	47
4.7	Altura de descolamento versus velocidade de saída do jato para metano, propano e etileno (TURNS, 1996). . . . .	49
4.8	Altura do descolamento da chama estudada. . . . .	49
4.9	(a) Região de interesse; (b) Imagem limiarizada; (c) Imagem rotulada com 18 objetos identificados. . . . .	51

4.10	Funções densidade de probabilidade para Boa Nebulização e Má Nebulização de imagens feitas com o filtro interferométrico de 650 <i>nm</i> .	51
4.11	Funções densidade de probabilidade para Boa Nebulização e Má Nebulização de imagens feitas com o filtro interferométrico de 800 <i>nm</i> .	52
4.12	(a) Imagem original; (b) Imagem limiarizada; (c) Região de interesse.	53
4.13	Histograma de tons de cinza da região de interesse da imagem . . .	54
4.14	Histograma médio de tons de cinza das imagens de chama com excesso de ar muito alto. . . . .	55
4.15	Histograma médio de tons de cinza das imagens de chamas com excesso de ar muito baixo. . . . .	56
4.16	Histograma médio de tons de cinza das imagens de chamas com excesso de ar normal. . . . .	57
4.17	Funções densidade de probabilidade para os eventos Chama com Excesso de Ar Baixo, Chama com Excesso de Ar Normal e Chama com Excesso de Ar Alto. . . . .	58
4.18	Áreas das imagens médias limiarizadas . . . . .	58
4.19	Variação da tensão do foto-detector na condição normal de operação.	59
4.20	Variação da tensão do foto-detector para uma condição de operação instável. Relação ar primário/ar secundário de 2,33 e uma relação vapor/óleo de 0,33. . . . .	59
4.21	Variação da tensão do foto-detector de uma chama com má nebulização. Relação vapor/óleo 0,20 e relação ar primário/ar secundário 1. . . . .	60

# Lista de Tabelas

3.1	Resumo das Condições de Operação . . . . .	30
3.2	Resumo das contribuições para a incerteza. . . . .	40
D.1	Valores médios dos tons de cinza obtidas das imagens da chama. .	66
D.1	Valores médios dos tons de cinza obtidas das imagens da chama (continuação). . . . .	67
D.2	Valores das áreas das imagens da chama. . . . .	68
E.1	Tom de cinza médio para imagens de Chama Presente e Chama Ausente. . . . .	69
E.1	Tom de cinza médio para imagens de Chama Presente e Chama Ausente (continuação). . . . .	70
E.2	Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 <i>nm</i> . . . . .	71
E.2	Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 <i>nm</i> (continuação). .	72
E.2	Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 <i>nm</i> (continuação). .	73
E.2	Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 <i>nm</i> (continuação). .	74
E.3	Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 800 <i>nm</i> . . . . .	75
E.4	Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebu- lização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas con filtro interferometrico de 650 <i>nm</i> . . . . .	79
E.4	Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebu- lização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas con filtro interferometrico de 650 <i>nm</i> (continuação). . . . .	80

E.5	Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 <i>nm</i> . . . . .	81
E.5	Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 <i>nm</i> (continuação). . . . .	82
E.5	Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 <i>nm</i> (continuação). . . . .	83
E.5	Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 <i>nm</i> (continuação). . . . .	84
E.6	Distribuição da moda do histograma de tons de cinza para Chama com Excesso de Ar Normal. . . . .	85
E.7	Distribuição da moda do histograma de tons de cinza para Chama com Excesso de Ar Muito Alto e Chama com Excesso de Ar Muito Baixo. . . . .	86

# Lista de Abreviaturas

**ArPARS** relação ar primário/ar secundário

**CCD** Charge Coupled Device

**CFD** Dinâmica dos Fluidos Computacional

**DF** Chama de Difusão

**eV** *eletron Volt*

**FL** Mistura pobre

**FR** Mistura rica

**LIF** fluorescência induzida por laser

**LP** Premistura pobre

**PDF** Função densidade de probabilidade

**PIV** *Planar Imaging Velocimetry*

**PM** Pré-misturada

**Rvo** Relação Vazão de Vapor/Vazão de combustível

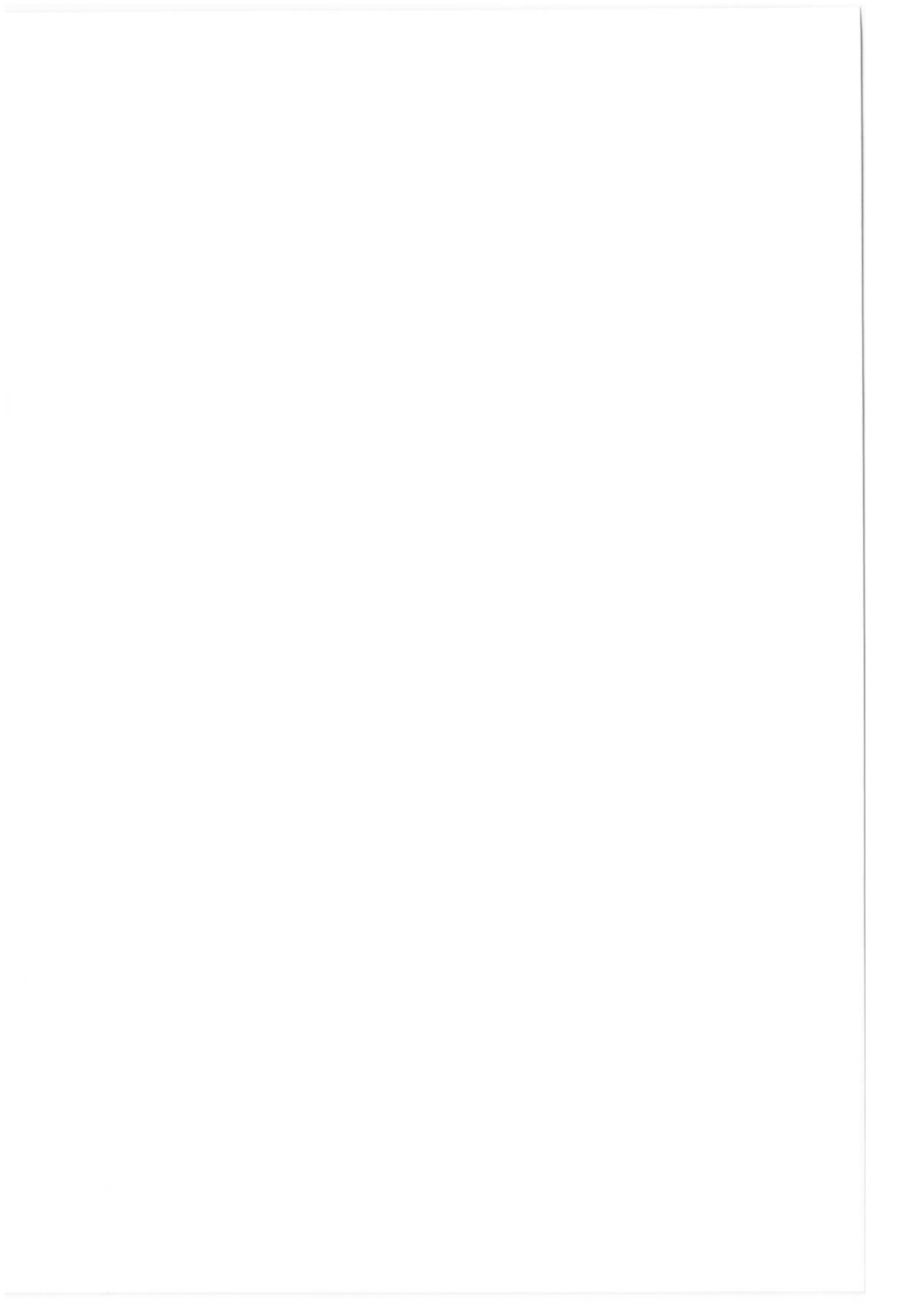
**SCIVA** Sistema Computacional de Inspeção Visual Automática



# Lista de Símbolos

Os seguintes símbolos serão utilizados:

símbolo	descrição	página
$\alpha$	Difusividade Térmica [ $m^2/s$ ]	9
$\epsilon$	Razão dos tempos característicos [-]	9
$\nu$	Viscosidade Cinemática [ $m^2/s$ ]	8
$\lambda$	Escala de Kolmogorov [m]	8
$\rho_e$	Massa específica do gás na saída do queimador [ $kg/m^3$ ]	6
$\rho_\infty$	Massa específica do ar ambiente. [ $kg/m^3$ ]	6
$\psi$	Razão ar-combustível estequiométrica [-]	10
$c_p$	Calor específico a pressão constante [ $J/kg.K$ ]	9
$d$	Diâmetro [m]	8
$H_s$	Altura da chama no limite estequiométrico [m]	16
$H_l$	Altura da chama no limite de flamabilidade pobre [m]	16
$H$	Altura característica ao longo do eixo do queimador [m]	6
$k$	Condutividade térmica [ $W/m.K$ ]	9
$L$	Comprimento da chama [m]	10
$Re$	Número de Reynolds [-]	8
$Sc$	Número de Schmidt [-]	8
$S_t$	Velocidade de queima turbulenta [m/s]	6
$S_l$	Velocidade de queima laminar [m/s]	6
$t_d$	Tempo de Mistura Local [s]	9
$t_c$	Tempo Químico Característico [s]	9
$t_\lambda$	Escala de Tempo de Kolmogorov [s]	8
$u$	Velocidade local do Jato [m/s]	8
$u_d$	Velocidade de descolamento [m/s]	15
$u_b$	Velocidade de sopramento [m/s]	15
$x$	Coordenada Axial [m]	8
$Y_{F,e}$	Fração mássica do combustível à saída do queimador [kg/kg]	6
$Y_{F,s}$	Fração mássica do combustível estequiométrica [kg/kg]	6



# 1 Introdução

Até o final da década de 80 do século XX, os critérios de dimensionamento de queimadores industriais para operação com óleo combustível estavam aparentemente bem estabelecidos pelos fabricantes, sob o ponto de vista do dispositivo nebulizador (aquele que produz o *spray* de óleo) e sob o ponto de vista do bocal de descarga de ar que circunscreve o dispositivo nebulizador. No entanto, devido ao uso de óleos combustíveis residuais cada vez mais pesados e a necessidade de redução das emissões de poluentes como material particulado, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio, decorrente do aumento de severidade da legislação ambiental, tais critérios precisam ser revistos. Com relação às emissões de *CO* e material particulado, a tendência é aumentar a eficiência dos dispositivos nebulizadores, ou seja, a capacidade de produzir *sprays* com menores diâmetros médios de gotas. O método mais imediato de reduzir o diâmetro médio das gotas em dispositivos que usam fluidos auxiliares de nebulização como ar comprimido ou vapor de água, que constituem a grande maioria desses dispositivos em uso industrial, é aumentar a razão fluido de nebulização/combustível. De fato, experimentos realizados em bancadas de testes de *sprays*, mostram que o aumento desse parâmetro reduz o diâmetro médio das gotas, o que, dentro de certos limites, reduz as taxas de emissão desses dois poluentes. No entanto, quando o valor da razão fluido de nebulização/combustível já é elevado, um aumento posterior provoca pequena redução do diâmetro médio e pode provocar instabilidades na chama, culminando com o seu completo descolamento ou sopramento.

O presente trabalho se propõe a avaliação e detecção destas instabilidades com a utilização de processamento de imagens. Muitos modelos foram propostos para tentar explicar a estabilização da chama. Trabalhos como o de Kalghatgi (1981) e Vanquickenborne e Tiggelen (1966) propuseram o modelo de combustão pré-misturada; Broadwell, Dahm e Mungal (1984) propuseram o modelo de mistura da grande escala turbulenta, Peters e Williams (1983) propuseram o modelo de extinção de elementos de chama e Schefer e Goix (1998) propuseram o modelo da chama tripla. Todas estas teorias tentam explicar o fenômeno do descolamento e

sopramento em chamas de difusão turbulenta.

Segundo Kalghatgi (1981) uma chama de difusão descola-se do queimador e forma uma chama descolada estável quando a vazão através do queimador incrementa-se além de um limite conhecido como o limite da estabilidade do descolamento. Se a vazão incrementa-se mais ainda, a chama extingue-se e esta vazão é denominada limite da estabilidade do sopramento. Broadwell, Dahm e Mungal (1984) propuseram que a velocidade de sopramento é atingida quando os produtos quentes da reação re-ingressam e são misturados rapidamente com o combustível não queimado do jato, resultando na diminuição da temperatura e concentração de radicais da mistura, impedindo a sua ignição. Peters e Williams (1983) propuseram que a chama de difusão turbulenta é considerada como um conjunto de elementos de chama laminar ou folhas de reação, esticadas e contorcidas pelo escoamento turbulento. Para esta chama de difusão turbulenta ancorada o incremento nos valores na taxa de deformação, pode conduzir a uma fração suficientemente grande das extinções dos elementos de chama de difusão laminar na borda para que o descolamento ocorra.

A estabilização da chama é um fenômeno a ser controlado em numerosas aplicações industriais, tais como fornalhas, caldeiras, foguetes e turbinas. Em aplicações industriais a chama é usualmente ancorada ao queimador para evitar instabilidades na chama, que produzem variações na pressão ou extinção, que conduz à emissão de hidrocarbonetos não queimados, e sopramento.

Os atuais esforços para melhorar os sistemas de potência e propulsão são direcionados para a geração de energia amigável ao meio ambiente. Estas melhoras focalizam-se na redução de emissões de poluentes, na melhora da eficiência e na diminuição de custos sem mudanças significativa na confiabilidade do equipamento.

Para poder monitorar as instabilidades e os defeitos no processo de combustão se utilizou a técnica do processamento de imagens digitais. O processamento de imagens digitais, permite a utilização de algoritmos complexos para o processamento das imagens, portanto, pode oferecer um desempenho sofisticado em tarefas simples e a implementação de métodos que seria impossível implementar para imagens analógicas. Com esta tecnologia pode-se realizar classificação, extração de características, reconhecer padrões, controle de processo, detecção de eventos, etc.

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo trata da introdução ao problema das instabilidades em chamas de difusão, a mo-

tivação pela qual este trabalho foi feito e o objetivo principal do trabalho. O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica dos modelos teóricos que tentam explicar o processo de estabilização da chama e por que e como ocorre o descolamento e o sopramento. No terceiro capítulo se discute a metodologia que foi utilizada para o reconhecimento das instabilidades e dos defeitos no processo de combustão. Neste terceiro capítulo também é descrito o aparato experimental e a instrumentação utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. O quarto capítulo está composto dos resultados obtidos do tratamento das imagens obtidas nas distintas condições de operação pesquisadas. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 1.1 Motivação

Este trabalho descreve uma investigação experimental de instabilidades e defeitos no processo de combustão de chamas de difusão. Este problema cresce em importância quando os esforços de desenvolvimento são focalizados na redução de  $NO_x$ ,  $CO$  e outros poluentes e na melhoria da eficiência e confiabilidade dos combustores.

O *blowout*, ou sopramento, é uma grande preocupação em sistemas industriais, onde se requer queimadores que operem econômica e confiavelmente durante longos períodos, com tempos mínimos de paradas. As estritas exigências em termos de emissões motivaram estes queimadores a operar pré-misturados ou com escasso combustível, a fim de minimizar as temperaturas da combustão e, conseqüentemente, o  $NO_x$ . Tal operação requer necessariamente operação na vizinhança do ponto de sopramento. Se isto ocorrer, o fenômeno de sopramento geralmente requer uma parada do sistema e re-início, o qual incrementa os custos de manutenção e reduz a disponibilidade (NAIR; LIEUWEN, 2003).

Atualmente, o sopramento se evita operando o queimador numa faixa longe do limite da estabilidade, o qual é um tanto incerto. O conhecimento exato, em tempo real desta faixa permitiria que o queimador operasse próximo ao limite, gerando emissões mais baixas de poluentes. A habilidade de detectar os precedentes do sopramento pode, conseqüentemente, fornecer significativa rentabilidade na confiabilidade e operabilidade do queimador, permitindo um ótimo desempenho sobre períodos de tempo prolongados, reduzindo custos de manutenção e aumentando a vida do queimador.

Outro fator que motivou este estudo experimental foi a falta de bibliografia

referente a instabilidades em combustíveis líquidos e para chamas de tamanho industrial, os trabalhos encontrados so apresentam pesquisas para chamas de gás e em condições de laboratório.

## **1.2 Objetivo**

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é caracterizar instabilidades e defeitos no processo de combustão utilizando a técnica do processamento de imagens digitais. Em especial, procurou-se identificar quais parâmetros do processamento digital de imagens poderão ser utilizados como detectores das instabilidades como o sopramento, descolamento e má nebulização. Com estas características se espera poder monitorar e operar queimadores de óleo combustível, nas melhores condições possíveis.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 O Fenômeno de Sopramento de Chamas de Difusão

O problema de estabilização de uma chama de difusão formada por um jato de combustível num meio oxidante foi estudado por muitos pesquisadores tais como Wu et al. (2006a), Broadwell, Dahm e Mungal (1984), Kalghatgi (1981) e Vanquickenborne e Tiggelen (1966). Quatro mecanismos distintos foram propostos considerando o sopramento de chamas de difusão turbulentas baseados em:

1. Propagação da chama pré-misturada (VANQUICKENBORNE; TIGGELEN, 1966); (KALGHATGI, 1981);
2. Chama tripla (SCHEFER; GOIX, 1998),(MUNIZ; MUNGAL, 1997), (WU et al., 2006a);
3. Extinção dos elementos de chama (PETERS; WILLIAMS, 1983);
4. Mistura de grande escala turbulenta (BROADWELL; DAHM; MUNGAL, 1984).

Pesquisadores tais como Vanquickenborne e Tiggelen (1966) e Kalghatgi (1981), propuseram expressões para a velocidade do sopramento baseadas em considerações de chama pré-misturada, sugerindo que o sopramento ocorre quando a velocidade local do escoamento excede a velocidade de queima turbulenta pré-misturada máxima. As correlações propostas mostraram concordância com os resultados experimentais para a maioria das misturas de combustíveis gasosos.

Segundo Kalghatgi (1981) uma chama de difusão descola-se do queimador e forma uma chama descolada estável quando a vazão através do queimador incrementa-se além de um limite conhecido como o limite da estabilidade do descolamento. Se a vazão incrementa-se mais ainda, a chama extingue-se e esta vazão é denominada limite da estabilidade do sopramento. Para esta análise Kalghatgi (1981) utilizou metano, propano, etileno, acetileno, butano e hidrogênio.

Na base de uma chama de difusão estabilizada, a velocidade de queima turbulenta local,  $S_t$ , será igual à velocidade local do fluido,  $\bar{u}$ . Se a vazão através do queimador aumenta,  $\bar{u}$  incrementa-se e a base da chama será então deslocada a jusante para uma nova posição onde mais uma vez  $S_t$  será igual a  $\bar{u}$ . A chama será soprada quando a velocidade de queima turbulenta não acompanhar as mudanças na velocidade local do fluido, em qualquer posição do jato a jusante da base da chama. Define-se  $H$  como sendo a distância ao longo do eixo do queimador onde a concentração média de combustível cai para o nível estequiométrico. De acordo com dados experimentais  $H$  é independente da velocidade de saída do queimador e é dada pela seguinte expressão:

$$H = 4 \left[ \frac{Y_{F,e}}{Y_{F,s}} \left( \frac{\rho_e}{\rho_\infty} \right)^{1/2} - 5,8 \right] d, \quad (2.1)$$

onde  $d$  é o diâmetro de saída do injetor do queimador,  $Y_{F,e}$  é a fração mássica do combustível na saída do queimador,  $Y_{F,s}$  é a fração mássica de combustível estequiométrica,  $\rho_e$  é a massa específica do gás na saída do queimador e  $\rho_\infty$  é a massa específica do ar ambiente. Quanto maior o valor de  $H$ , mais espaço haverá para a base da chama procurar uma nova posição estável com o aumento da velocidade de saída do queimador, assim será mais difícil soprar a chama. Por considerações similares, quanto maior o valor da velocidade de queima laminar  $S_l$  do combustível em uma chama pré-misturada, mais difícil será soprar a chama, uma vez que a velocidade de queima turbulenta depende de  $S_l$ . A velocidade de queima turbulenta dependerá também dos parâmetros de turbulência local e da concentração do combustível. Estes, por sua vez, dependerão da viscosidade cinemática do combustível,  $\nu$ , e da relação das massas específicas,  $\rho_e/\rho_\infty$ , no plano de saída. Conseqüentemente, pode-se esperar que a velocidade de saída do escoamento no momento do sopramento,  $u_b$ , dependa de  $H$ ,  $S_l$ ,  $\nu$  e  $\rho_e/\rho_\infty$ . Uma análise dimensional resulta em

$$\frac{u_b}{S_l} = f \left( R_H, \frac{\rho_e}{\rho_\infty} \right) \quad (2.2)$$

onde

$$Re_H = H \frac{S_l}{\nu} \quad (2.3)$$

é o número de Reynolds baseado em  $H$ .



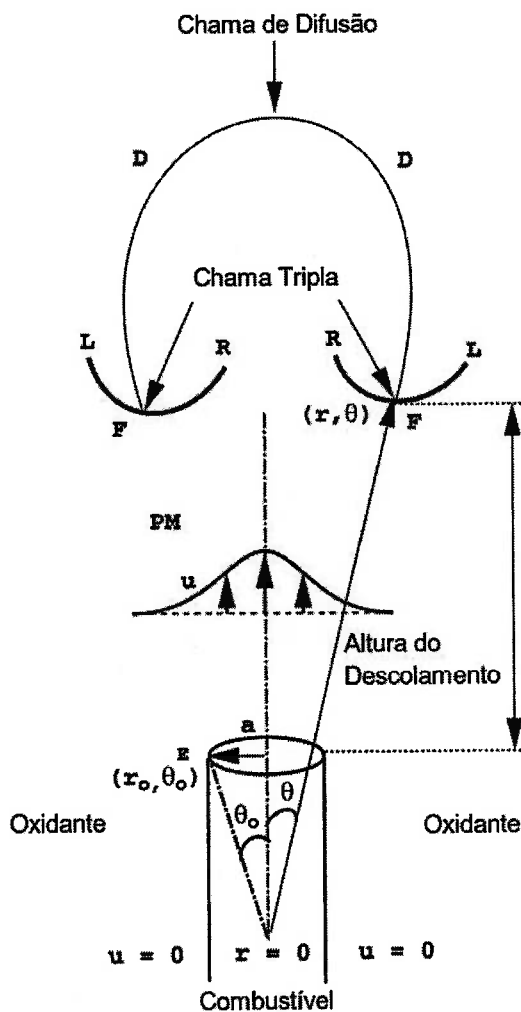
Kalghatgi (1981) achou, empiricamente, que os dados para combustíveis puros e misturados estão relacionados por:

$$\frac{u_b}{S_l} \left( \frac{\rho_e}{\rho_\infty} \right)^{1,5} = 0,017 R_H (1 - 3,5 \times 10^{-6} R_H) . \quad (2.4)$$

Segundo Ghosal e Vervisch (2001) a chama de difusão descolada é estabilizada por meio de uma chama tripla no campo distante do jato. As chamas triplas são estruturas características de chamas parcialmente pré-misturadas, ver figura 2.1. O combustível e o oxidante experimentam uma pré-mistura parcial na zona (PM). A mistura então é queimada em duas ramificações, a de Mistura rica (FR) e a da Mistura pobre (FL). No meio destas duas zonas as correntes quentes de combustível não queimado e oxidante se encontram e reagem como uma Chama de Difusão (DF) ao longo da superfície estequiométrica. A estrutura constituída por estes três ramais FR, FL e DF é conhecida como a chama tripla. A chama tripla tem uma velocidade de propagação característica determinada pelo ambiente local. A chama é estabilizada no ponto onde a velocidade de propagação iguala-se à velocidade da mistura na linha estequiométrica.

A aplicabilidade do conceito da chama tripla para estabilização de chamas descoladas foi também pesquisado por Muniz e Mungal (1997). Neste trabalho eles utilizaram *Planar Imaging Velocimetry* (PIV) para estudar o campo de velocidades na base de uma chama de difusão descolada de etileno e metano com ar secundário. Os resultados mostraram que a base da chama é estabilizada em regiões de baixa velocidade do jato. Eles descobriram que a velocidade local do escoamento deve estar perto da velocidade de chama laminar pré-misturada e não exceder três vezes  $S_l$ .

Broadwell, Dahm e Mungal (1984) sugerem uma descrição simples do mecanismo de estabilidade para chamas de difusão turbulentas baseado na natureza dos movimentos de grande escala observados em jatos turbulentos. Da análise deste modelo, extrai-se um parâmetro que determina a velocidade de sopramento para combustíveis puros e combustíveis diluídos com ar ou com  $CO_2$ . Este parâmetro relaciona dois tempos: o tempo característico da reação química, que é baseado na velocidade de uma chama laminar pré-misturada e o tempo associado à mistura dos gases não queimados que é baseado na distribuição de velocidades de um jato isotérmico. Neste modelo, a mistura até o nível molecular começa quando o ar e o jato misturam-se devido aos movimentos das grandes estruturas turbulentas, limitada pelo diâmetro do jato ( $d$ ). Um processo semelhante a uma cascata de Kolmogorov (TENNEKES; LUMLEY, 1972) começa neste



**Figura 2.1:** Diagrama esquemático do sistema de coordenadas e o esquema mostrando a posição da chama tripla em uma chama de difusão laminar sobre um jato redondo (GHOSAL; VERVISCH, 2001).

estado inicial e depois de um tempo,  $t_d \sim d/u$ , onde  $d$  e  $u$  são o diâmetro local do jato e a velocidade média local, as flutuações na concentração atingem a escala de Kolmogorov,  $\lambda$ . Durante esta cascata a mistura molecular ocorre na interface entre os dois fluidos e é completada por difusão através das regiões de escala  $\lambda$  num tempo  $t_\lambda \sim (d/u)Sc/Re^{1/2}$  onde  $Sc$  é o número de Schmidt,  $\nu/\mathcal{D}$ ,  $Re$  é o número de Reynolds igual a  $u_0 d_0/\nu_0$  (o índice inferior  $_0$  indica valores na saída do jato),  $\nu$  e  $\mathcal{D}$  são a viscosidade cinemática do combustível e a difusividade de massa respectivamente.

Se os gases são reativos, as reações químicas tomam lugar na interface entre os dois gases, a qual constitui uma folha de chama laminar esticada (*strained laminar flame sheets*). É também nesta interface que os dois gases são misturados na escala de Kolmogorov. Para valores de  $x/d_0$  pequenos, comparados com o comprimento da chama,  $L/d_0$ , o jato tem uma mistura rica e fria, de forma que a combustão, a qual ocorre perto das condições estequiométricas nas folhas de

chama, é extinta quando  $\lambda$  é alcançado e ocorre a mistura com o restante do fluido do jato.

O sopramento ocorre quando a combustão começa no campo distante numa distância axial proporcional ao comprimento da chama. Broadwell, Dahm e Mungal (1984) propuseram que a velocidade de sopramento é atingida quando os produtos quentes da reação re-ingressam e são misturados rapidamente com o combustível não queimado do jato, resultando na diminuição da temperatura e concentração de radicais da mistura, impedindo a sua ignição.

O critério de sopramento é: quando a razão do tempo de mistura local,  $t_d$ , com o tempo químico característico,  $t_c$ , é menor que algum valor crítico,  $\epsilon$ , o sopramento ocorre.

Para uma chama laminar pré-misturada,  $S_l$ , a difusividade térmica,  $\alpha = k/\rho c_p$  (onde  $k$  é a condutividade térmica e  $c_p$  é o calor específico a pressão constante de uma mistura estequiométrica combustível/ar) e  $t_c$  são relacionados para obter a seguinte expressão:

$$S_l \sim \left( \frac{\alpha}{t_c} \right)^{1/2}. \quad (2.5)$$

Conseqüentemente,  $\alpha/S_l^2$  fornece uma medida do tempo químico para a oxidação de um combustível. Usando estas expressões para  $t_d$  e  $t_c$ , postula-se que uma chama é soprada num valor crítico de  $\epsilon$ , onde

$$\epsilon = \frac{t_d}{t_c} = \frac{d_s/u_s}{\alpha/S_l^2}. \quad (2.6)$$

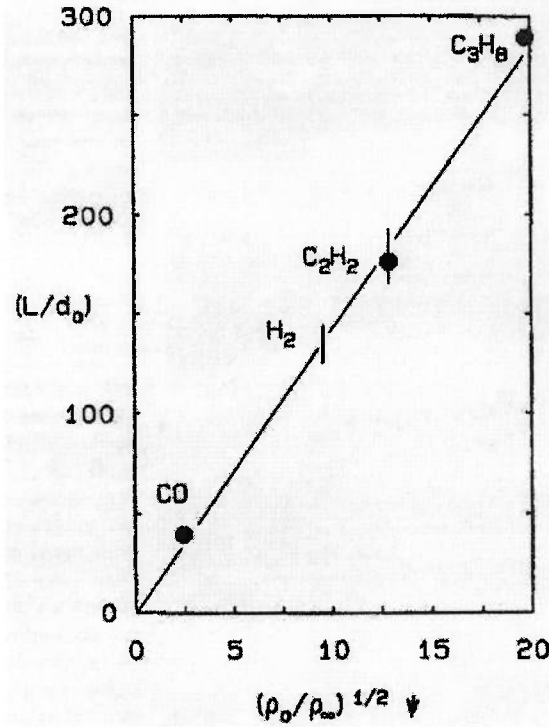
O índice inferior  $_s$  indica que  $d$  e  $u$  serão avaliados em uma distância axial  $x$ , proporcional ao comprimento  $L$  da chama.

Por similaridade e conservação da quantidade de movimento (POPE, 2000) tem-se, para um jato turbulento livre:

$$d_s = c_1 x \quad (2.7)$$

e

$$u_s = c_2 u_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho_\infty} \right)^{1/2} \left( \frac{d_0}{x_s} \right), \quad (2.8)$$



**Figura 2.2:** Dependência do comprimento de chama de difusão turbulenta,  $L/d_0$ , versus  $(\rho_0/\rho_\infty)^{1/2}\psi$ . CO,  $\psi = 2,46$ ; H<sub>2</sub>,  $\psi = 34,2$ ; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>,  $\psi = 13,3$ ; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>,  $\psi = 15,7$  (BROADWELL; DAHM; MUNGAL, 1984)

e então

$$t_d = \frac{d_s}{u_s} = \frac{\left(\frac{c_1}{c_2}\right) x_s^2}{u_0 d_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\infty}\right)^{1/2}}. \quad (2.9)$$

A figura 2.2 mostra a dependência que tem o comprimento da chama,  $L/d_0$ , com o parâmetro  $(\rho_0/\rho_\infty)^{1/2}\psi$ , onde  $\psi$  é a razão estequiométrica em base mássica. Diferentes combustíveis foram avaliados no trabalho de Broadwell, Dahm e Mungal (1984). A figura 2.2 indica que o comprimento requerido para misturar  $\psi$  partes do ar com uma parte do combustível do jato, denotada por  $L$ , é dada por  $L/d_0 = c_3(\rho_0/\rho_\infty)^{1/2}\psi$ , para todos os combustíveis estudados. Assim, pode-se estimar  $x_s$  por:

$$\frac{x_s}{d_0} = c_4 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\infty}\right)^{1/2} \psi. \quad (2.10)$$

Com esta expressão para  $x_s$ , e equação 2.9 mostra-se que

$$t_d \sim \frac{d_s}{u_s} \sim d_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\infty}\right)^{1/2} \frac{\psi^2}{u_0}, \quad (2.11)$$

notando que as equações 2.8 e 2.10 implicam que  $u_s/u_0 \sim 1/\psi$ . Usando a equação 2.11 para  $t_d$  na equação 2.6, tem-se

$$\epsilon = \frac{d_0 S_t^2 \psi^2 \left( \frac{\rho_0}{\rho_\infty} \right)^{1/2}}{u_b k}, \quad (2.12)$$

onde  $u_b$  é a velocidade do sopramento. Desta análise chegou-se à conclusão de que a velocidade do sopramento incrementa-se linearmente com o diâmetro do injetor do combustível, com os quadrados da velocidade da chama laminar e da razão estequiométrica mássica e com a raiz quadrada da razão das massas específicas do ar e do combustível.

Segundo Broadwell, Dahm e Mungal (1984), o modelo de grandes escalas não é capaz de descrever todos os processos instáveis que ocorrem em chamas de difusão turbulentas. Em particular, o modelo não explica a propagação da chama para montante do local de ignição. O modelo proposto serve apenas para explicar a estabilização da chama numa determinada porção do jato. Os autores reconhecem que um modelo para todas as instabilidades ainda necessita de mais estudos experimentais. Experimentos recentes com imagens geradas por laser realizadas por Muniz e Mungal (1997) fornecem a sustentação para o papel que as estruturas de grande escala têm nos processos de estabilização e extinção de chamas.

Wu et al. (2006b) estudaram os limites de estabilidade, descolamento e sopramento, de uma chama turbulenta não pré-misturada descolada e o sopramento de uma chama ancorada, para chamas de hidrogênio puro, hidrogênio/propano, hidrogênio/dióxido de carbono e hidrogênio com fluxo anular ao redor do jato de  $CO_2$  e  $C_3H_8$ . No caso do jato de hidrogênio puro, a altura de descolamento incrementou-se linearmente com a velocidade do jato e foi utilizada fotografia direta para determinar a altura do descolamento. A medição da altura do descolamento para esta chama concorda com os resultados obtidos por Kalghatgi (1981). A adição de propano em várias concentrações conduz ao descolamento e ao sopramento enquanto que a adição de  $CO_2$  produz sopramento da chama ancorada somente em concentrações acima do 6%. A velocidade do descolamento diminuiu rapidamente com o incremento da concentração de  $CO_2$  e  $C_3H_8$  e, em relação à altura do descolamento, esta incrementou-se com a adição do dióxido de carbono e do propano. Eles consideraram que, tanto o propano, como o dióxido de carbono são igualmente efetivos em soprar a chama.

Quando a configuração com fluxo anular ao redor do jato foi testada, verificou-se que as chamas de hidrogênio descolaram facilmente quando o propano e o  $CO_2$  foram adicionados. Nesta configuração observou-se que a altura do descolamento depende principalmente da velocidade do fluxo anular e que foi pouco influenciada pela velocidade do jato central. A altura do descolamento depende principalmente da velocidade do fluido anular, tendo pouca influência, para esta configuração, a velocidade do jato de hidrogênio. Wu et al. (2006b) concluíram que a maneira mais efetiva de descolar ou soprar uma chama de hidrogênio é a adição de gases não queimados coaxialmente ao redor do jato de hidrogênio. A altura do descolamento para uma configuração com fluxo anular ao redor do jato central depende predominantemente da velocidade do fluxo anular e é pouco influenciada pela velocidade do jato central.

Na configuração do jato simples (sem fluxo anular), a adição de propano mostrou-se mais efetiva em produzir descolamento da chama e teve uma altura maior do que a obtida com a adição do  $CO_2$ . No entanto, o propano e o  $CO_2$  mostraram-se igualmente efetivos causando o sopramento da chama. Conclui-se que a cinética química tem uma grande influência nos parâmetros de estabilidade na configuração do jato simples.

Recentemente as teorias propostas por Kalghatgi (1981) e Broadwell, Dahm e Mungal (1984) foram re-examinadas usando uma ampla base de dados de chamas de metano, propano e hidrogênio com diversos diluentes (CHAO et al., 2004). Estes resultados mostraram que a maioria das velocidades de sopramento medidas estão de acordo com as previsões obtidas a partir da fórmula proposta por Kalghatgi (1981) e com os calculados utilizando o modelo de grande escala (BROADWELL; DAHM; MUNGAL, 1984) incluindo os efeitos do número de Reynolds.

Peters e Williams (1983) propuseram que a chama de difusão turbulenta é considerada como um conjunto de elementos de chama laminar, como se fossem folhas de reação esticadas e contorcidas pelo escoamento turbulento. É conhecido que se a taxa de deformação imposta em uma chama de difusão laminar excede um valor crítico, então a reação cessará abruptamente na chama. O valor máximo da taxa de deformação em escoamentos turbulentos muda para valores mais elevados se a velocidade da saída do jato do combustível aumenta. Para uma chama de difusão turbulenta ancorada, este incremento nos valores na taxa de deformação pode conduzir a uma quantidade suficientemente grande de extinções dos elementos de chama de difusão laminar na borda do jato, com conseqüente descolamento. Depois do descolamento, a turbulência do jato frio na saída tem um número de Reynolds mais elevado e, conseqüentemente, taxas de deformação

mais elevadas. Entretanto, a uma distância suficientemente grande a jusante da saída do escoamento, o valor máximo da taxa de deformação diminui para um valor tal que uma razoável quantidade dos elementos de chama de difusão laminar permaneçam em reação. Os elementos de chama de difusão podem, conseqüentemente, permanecer estáveis em uma configuração descolada, com uma altura de descolamento que aumenta quando a velocidade de saída do escoamento aumenta. Neste modelo, todos os efeitos da pré-mistura no nível molecular são negligenciados, embora as concentrações exibam uma aparente mistura causada pela turbulência. Os elementos de chama de difusão laminar acontecem em superfícies estequiométricas instantâneas locais. Na altura do descolamento, a maior parte destas superfícies estão localizadas afastadas da linha central do jato. Aumentar a velocidade de saída do escoamento faz com que, eventualmente, a posição média das superfícies estequiométricas, a montante da altura do descolamento, comece a aproximar-se à linha de centro do jato. Para velocidades de saída suficientemente elevadas há poucas superfícies estequiométricas nas regiões onde as taxas de deformação são baixas o suficiente para que os elementos de chama de difusão em reação existam. Assim, a estabilização da chama de difusão turbulenta não pode ser alcançada. Isto define as condições para o sopramento, embora na prática o sopramento possa ocorrer em velocidades de saída mais baixas, como consequência da passagem de uma estrutura turbulenta relativamente grande que carrega as regiões de estabilização da chama a jusante junto com ele.

## 2.2 Dinâmica da Chama na Iminência do Sopramento

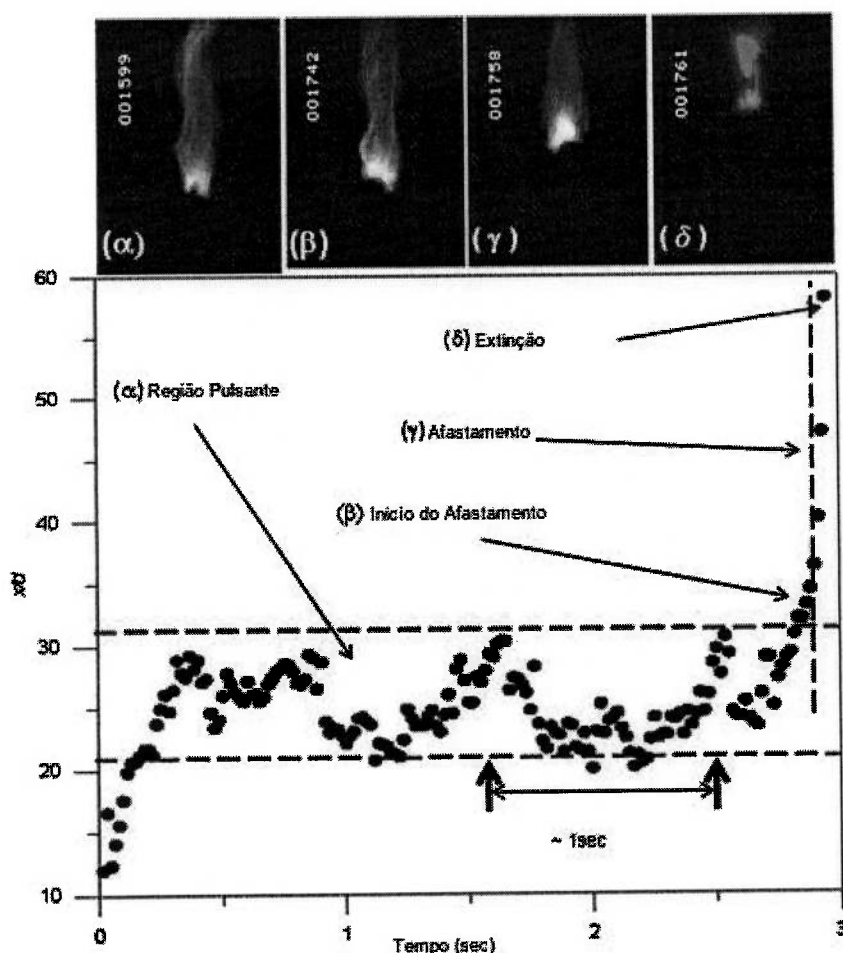
Freqüentemente, extinções locais da chama e re-ignições também são observadas na iminência do sopramento. Isto resulta em mudanças globais e locais nas taxas de transferência de calor na zona de combustão produzindo as correspondentes mudanças na acústica, na luminosidade e nas emissões de radiação, além da mudança na temperatura da chama. As emissões de radiação e luminosidade podem ser detectadas por sensores e podem ser usadas para caracterizar o processo de sopramento no queimador.

Wu et al. (2006a) utilizaram imagens de dispersão Rayleigh e fluorescência induzida por laser (LIF) para medir a fração de mistura local à frente da base da chama e a posição da base da chama, respectivamente. Estes resultados foram quantitativamente comparados com os resultados obtidos pela fórmula da velocidade do sopramento proposta por Kalghatgi (1981).

Wu et al. (2006a) identificaram a base da chama com processamento digital de imagens. De acordo com as características dinâmicas da chama, o processo do sopramento pode ser dividido em quatro regiões: pulsante, início do descolamento, descolamento e sopramento. Para entender as características do processo de sopramento de diferentes misturas de combustível/oxidante foram traçadas as posições da base da chama em função do tempo, para chamas de metano e propano. As posições típicas da base e imagens das chamas nas quatro regiões (pulsante, início do descolamento, descolamento e sopramento) de uma chama de metano diluído com 30% de nitrogênio - são mostradas na figura 2.3.

No trabalho de Wu et al. (2006a) a condição inicial do processo de sopramento é controlada por uma excitação acústica. Logo que a excitação acústica é desligada a base da chama começa a pulsar na direção axial com uma freqüência aproximada de 1 Hz. Este estado é definido como pulsante e apresentado pela imagem  $\alpha$  na figura 2.3. Quando a base da chama atinge a altura de  $x/d = 34$ , ela traslada-se a jusante continuamente sendo incapaz de voltar. Este é o início do afastamento mostrado na imagem  $\beta$  da figura 2.3. Quando a chama se afasta mais a jusante, a ponta da chama torna-se vermelha mas a base da chama permanece azul, esta é a região de descolamento mostrada na imagem  $\gamma$  da figura 2.3. Finalmente, quando a altura atinge  $x/d = 59$  a chama torna-se pequena com uma base azul, conforme mostrado na imagem  $\delta$  na figura 2.3. A extinção da chama ocorre nesta região. No processo são observadas faixas vermelhas e manchas indicando





**Figura 2.3:** Posições típicas da base da chama no processo de sopramento de uma chama de metano diluída em 30% de nitrogênio. Imagens típicas da chama em cada região: pulsante, início do descolamento, descolamento e sopramento (WU et al., 2006a).

baixa temperatura local e regiões não queimadas. Para ilustrar o mecanismo de estabilização, propagação e a quebra da estrutura da chama tripla numa chama descolada no processo do sopramento, as linhas tracejadas e pontilhadas denotam contornos de nível estequiométrico e os limites de flamabilidade pobre e rico são mostrados na Figura 2.4.

Neste processo, se a chama descolada estiver inicialmente estabilizada numa faixa a montante da “linha de cintura” ou diâmetro máximo do contorno estequiométrico quando a velocidade de saída do jato,  $u_0$ , estiver entre a velocidade de descolamento,  $u_d$ , e a velocidade de sopramento,  $u_b$ , (figura 2.4b), a chama descolada é estável e permanece descolada (VANQUICKENBORNE; TIGGELEN, 1966). Como mostrado na figura 2.4c, se a base de uma chama descolada é empurrada para além do ponto máximo de cintura enquanto que a velocidade de saída do jato é igual à velocidade de sopramento, a chama passará para a região pulsante do processo de sopramento e se tornará instável.

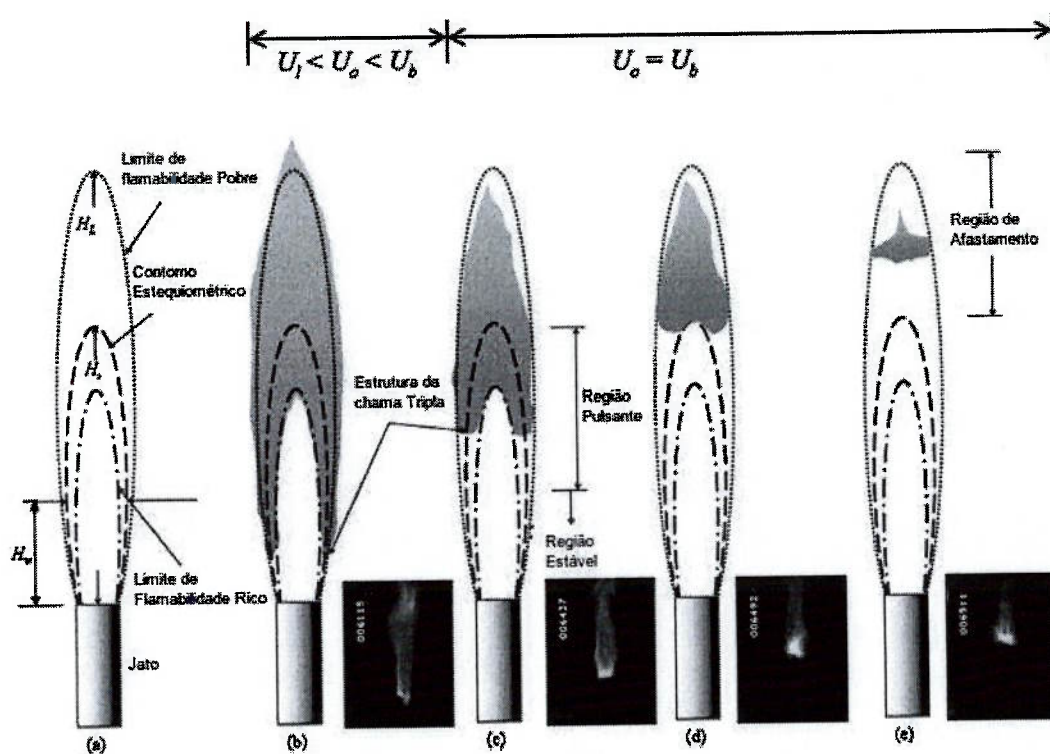


Figura 2.4: Esquema do processo de sopramento (WU et al., 2006a).

Na região pulsante, a estrutura da chama tripla se encontra na base da chama e do ramo estequiométrico. Esse ramo se move ao longo do contorno estequiométrico e serve como o ponto de estabilização da chama tripla. A região pulsante corresponde a uma faixa axial do ponto máximo de cintura à ponta do contorno estequiométrico. O equilíbrio da velocidade local do fluido e a velocidade de propagação da chama no ponto de estabilização da chama tripla resulta na pulsação da chama na região pulsante. Como a chama é empurrada a jusante, a base da chama move-se para o centro ao longo do contorno estequiométrico e tem velocidade de escoamento mais elevada. À medida que a chama é empurrada pelo escoamento além do contorno estequiométrico (figura 2.4d), o ponto de estabilização e o ramo estequiométrico da chama tripla desaparecem e a chama se torna pobre e finalmente se extingue (figura 2.4e). O contorno estequiométrico pode ser determinado pelas propriedades locais do gás e a velocidade inicial do jato na saída. Portanto, para uma chama turbulenta não só o limite de sopramento como também o processo de sopramento e os comportamentos dinâmicos que o acompanham podem ser estimados e caracterizados baseado na velocidade inicial, número de Reynolds e as propriedades do combustível na saída do jato.

Outros tipos de instabilidades podem existir e representar um papel importante no processo de sopramento, estes tipos de instabilidades ainda não estão claramente estabelecidos e precisam de mais experimentos para o seu conhecimento.

Como pode ser visto nesta revisão bibliográfica, todos os trabalhos tratam de chamas de combustíveis gasosos. Assim, a discussão para chamas de combustíveis líquidos nebulizados ainda é necessária. O presente trabalho procura contribuir nesta direção.

### 3 Materiais e Metodologia

Neste trabalho foram realizados experimentos com chamas em escala semi-industrial (800 - 900 kW), variando os valores dos seguintes parâmetros: a relação entre vazão de vapor e vazão de óleo, a relação entre vazão de ar primário e vazão de ar secundário. Os efeitos em variáveis diretamente decorrentes da estabilidade, como a intensidade de radiação (UV) e as variações nas propriedades das imagens da chama, foram monitorados. O arranjo experimental utilizado é mostrado esquematicamente na figura

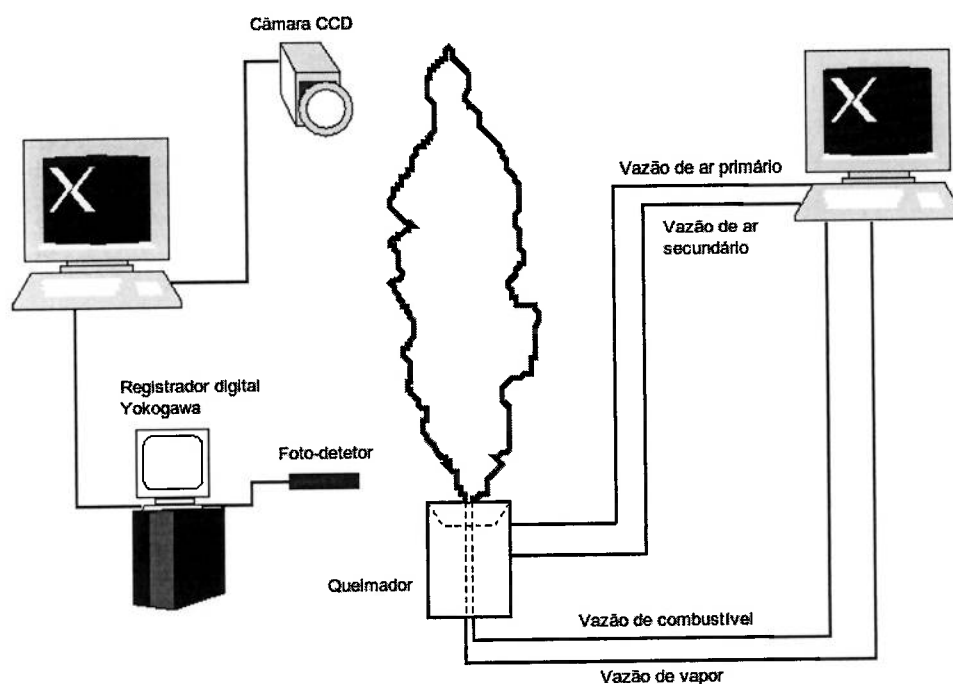


Figura 3.1: Arranjo experimental.

#### 3.1 Aparato Experimental

O Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões - LETMCE - do Instituto de pesquisas Tecnológicas (IPT), na área de combustão industrial, possui a infra-estrutura e equipamentos necessários para a execução da parte experimental do projeto, composta por: fornalha de testes, vapor de água, ar de

combustão, óleo combustível e água de resfriamento (PACÍFICO; FURNARI; SOUSA, 2004).

### 3.1.1 Fornalha de Testes

Para a execução do estudo proposto, foi utilizada uma fornalha de testes vertical. Esta fornalha tem 1,45 m de diâmetro interno e 4,0 m de altura, sendo constituída por carcaça metálica dupla, refrigerada a água (figura 3.3). A carcaça refrigerada é constituída por doze compartimentos independentes, com entradas e saídas de água individuais e com dispositivos de medição de vazão de água, temperatura de entrada e saída.

Os gases de combustão de saída da fornalha passam por um recuperador de calor do tipo radiação que permite aquecer o ar até uma temperatura próxima de 300°C. A exaustão dos produtos de combustão é feita por um canal com acessos para a inserção de instrumentação, que se conecta a uma chaminé que permite operar a fornalha com pressões efetivas entre  $-10$  e  $+10$  mm H<sub>2</sub>O. O queimador utilizado nos testes atinge uma potência de 800–900 kW. O injetor de combustível tem um diâmetro de 14,3 mm e um ângulo de 50° entre *sprays* (figura 3.2). O queimador é dotado de fluxos de ar primário, secundário e terciário, como pode ser visto nas figuras 3.4 e 3.5 (PACÍFICO; FURNARI; SOUSA, 2004).

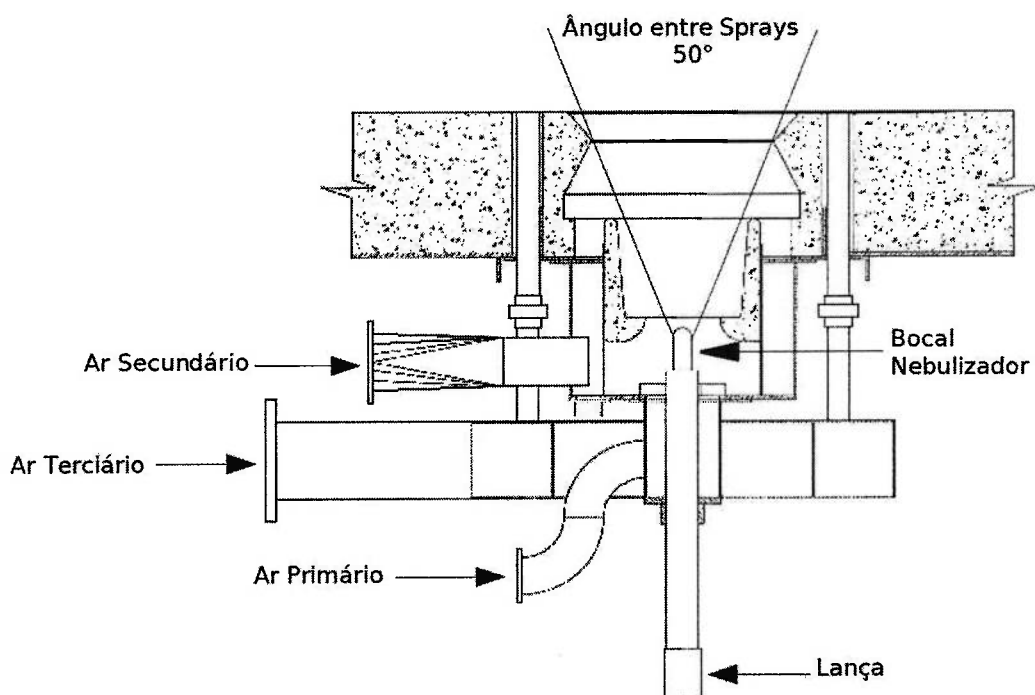
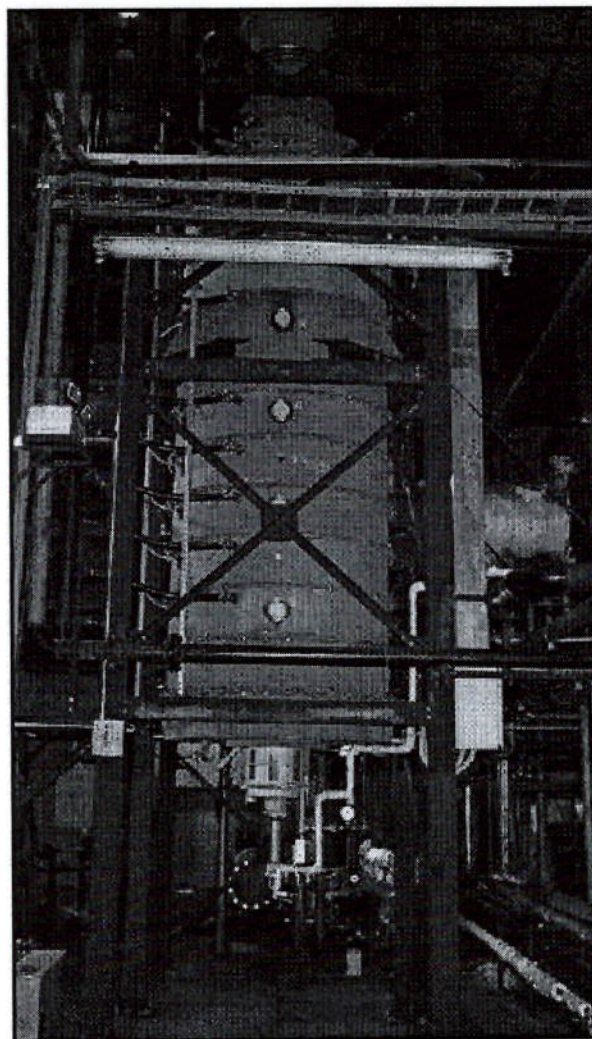


Figura 3.2: Desenho esquemático do queimador.



**Figura 3.3:** Vista da fornalha de testes vertical (IPT).

### 3.1.2 Vapor de água

Na área de utilidades do laboratório existe uma caldeira fogo-tubular horizontal, operada com gás natural, com capacidade de produção de  $0,166 \text{ kg/s}$  ( $600 \text{ kg/h}$ ) de vapor saturado a pressões de até  $1,2 \text{ MPa}$  para fornecer vapor de água, utilizado como fluido de nebulização no queimador.

### 3.1.3 Ar de combustão

O ar de combustão, fornecido ao queimador instalado na fornalha, é comprimido por um conjunto de ventiladores que podem operar em série ou em paralelo, fornecendo vazões de até  $0,417 \text{ kg/s}$  ( $1500 \text{ kg/h}$ ) e pressões de até  $20 \text{ kPa}$ . Adicionalmente, existe um ventilador centrífugo de 4 estágios que pode fornecer vazões da mesma ordem, porém com pressões de até  $45 \text{ kPa}$ .

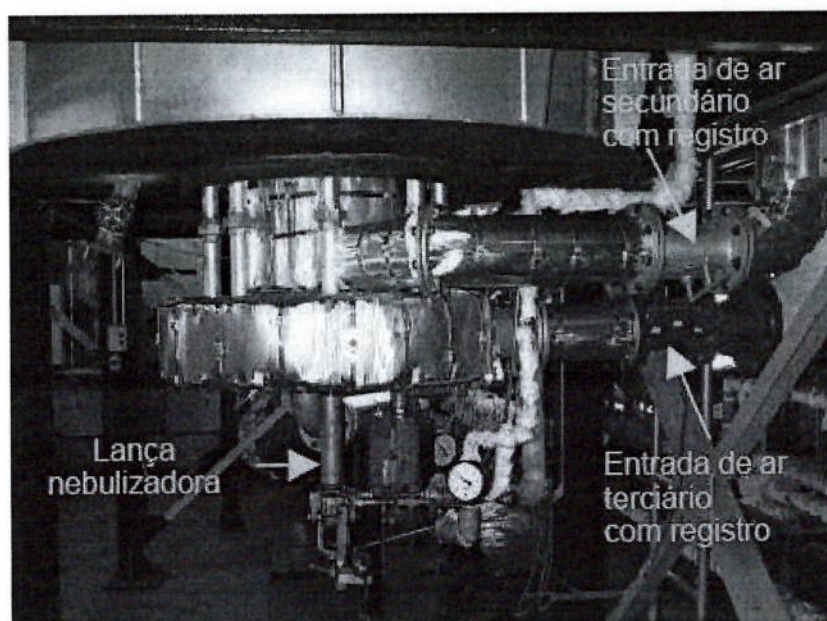


Figura 3.4: Queimador soprado, montado na fornalha de testes do IPT.- vista 1.

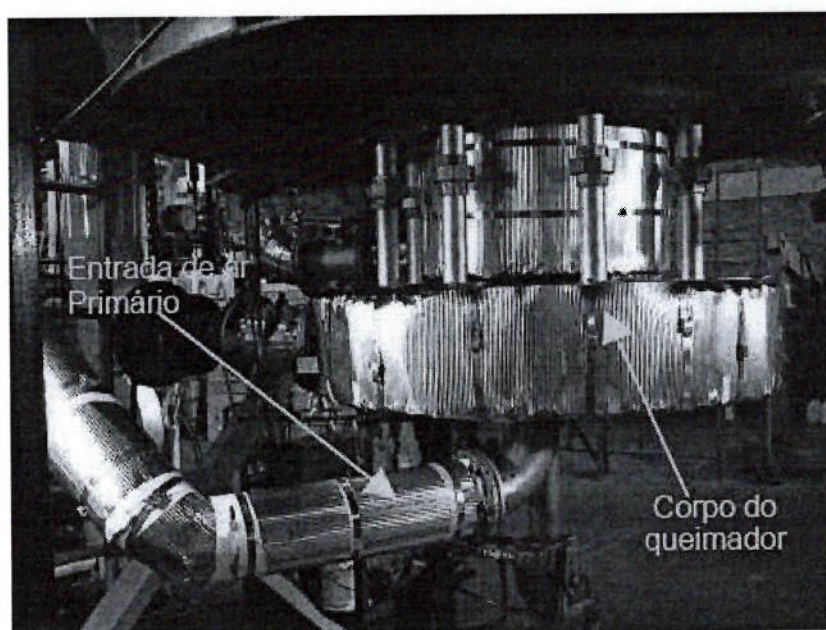


Figura 3.5: Queimador soprado, montado na fornalha de testes do IPT.- vista 2.

### 3.1.4 Óleo combustível

O combustível utilizado foi óleo do tipo 1B, com as seguintes características:

- Teor de cinzas: 0,04%
- Teor de enxofre:  $S = 0,93\%$
- Composição elementar (% massa):  $C = 88,10$ ;  $H = 9,92$ ;  $N = 1,49$
- Viscosidade cinemática:  $1334 \text{ cSt @ } 50^\circ\text{C}$ ;  $63 \text{ cSt @ } 100^\circ\text{C}$

- Densidade:  $1,01 \text{ g/cm}^3 @ 50^\circ\text{C}$
- Poder calorífico superior, PCS:  $41,9 \text{ MJ/kg}$
- Teor de asfaltenos:  $11,0\%$
- Resíduo de carbono Conradson:  $13,0\%$

Existe também um tanque de recepção vertical, dotado de sistemas de aquecimento, bombeamento e agitação, com capacidade para estocar até  $15000 \text{ kg}$  de óleos pesados. Adicionalmente existe um tanque de serviço, no qual a temperatura do óleo é condicionada para o abastecimento ao queimador, dotado de uma estação de bombeamento com capacidade máxima de  $0,07 \text{ kg/s}$  ( $250 \text{ kg/h}$ ).

### 3.1.5 Água de resfriamento

Para resfriamento da água que circula nas carcaças da fornalha de teste, existe uma torre de resfriamento evaporativa com capacidade de  $4,0 \text{ MW}$ , dotada de uma estação de bombeamento com vazão de água de até  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  e outra de  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Como nas condições de máxima eficiência de transferência de calor na fornalha de teste, apenas cerca de  $70\%$  da potência liberada é transferida às paredes e ao resfriador convectivo de gases, conclui-se que a potência máxima de operação das fornalhas ( $1,2 \text{ MW}$ ) é compatível com a capacidade da torre.

## 3.2 Instrumentação existente

### 3.2.1 Medição de temperatura

Para medição de temperaturas no interior de escoamentos em tubulações de água, óleo, vapor, gases e em canais de gases a altas temperaturas, foram utilizados termopares simples (normalmente de isolamento mineral) adequados às temperaturas medidas.

### 3.2.2 Medição de pressão/vazão de fluidos

A medição de pressão do fluido foi feita por transdutores capacitivos de pressão total, cujo sinal de saída é enviado a sistemas de aquisição de dados. Apenas em montagens provisórias foram utilizados manômetros de coluna de água ou do tipo Bourdon, de indicação local. A medição de vazão foi realizada por placas de orifício, venturis ou orifícios sônicos, dependendo das faixas de pressão e vazão,

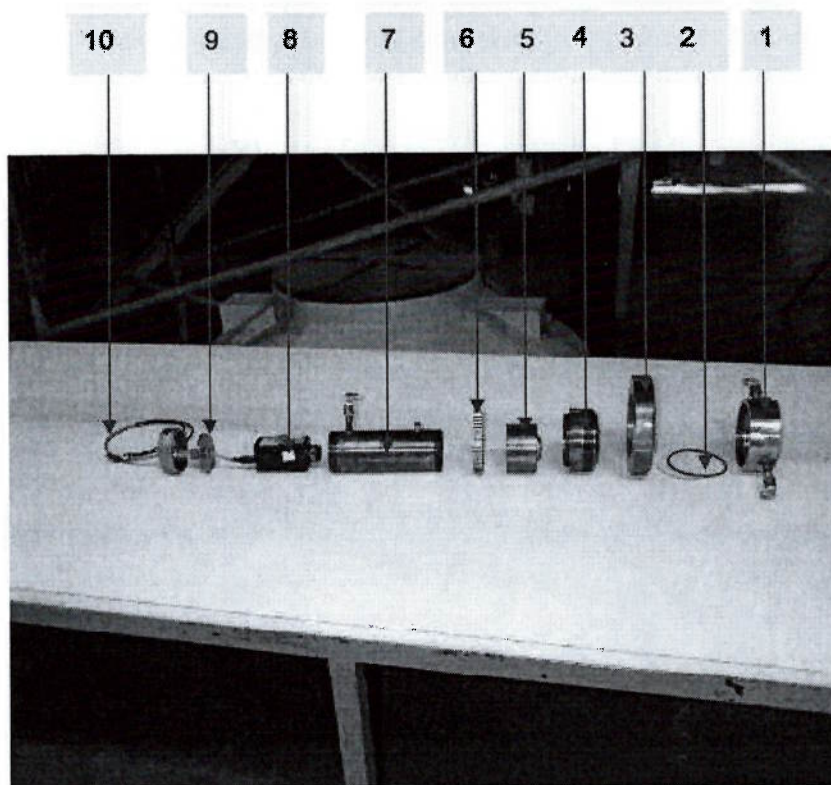


dotados de transdutores de pressão total e diferencial, e termopares. Os sinais são conectados a sistemas de aquisição automática de dados.

### 3.2.3 Sistema de aquisição de imagens

O Laboratório opera com um sistema de aquisição de imagens de chamas, constituído por:

- Três conjuntos óticos compostos de lentes grande-angulares, filtros de interferência (650 e 800 *nm*) e câmaras Charge Coupled Device (CCD), além dos cabos de interligação destes à placa digitalizadora (figura 3.6).



**Figura 3.6:** Vista Explodida do Conjunto Óptico. 1) Escotilha para alojamento dos vidros de quartzo, 2) Vidros de quartzo e anel de vedação, 3) Porca de fixação da escotilha ao pescoço do costado da fornalha, 4) Dispositivo de aperto dos vidros de quartzo, 5) Dispositivo de alojamento do filtro de interferência, 6) Porca de fixação do tubo porta câmara à escotilha, 7) Tubo porta câmara, 8) Câmara CCD, 9) Dispositivo de fechamento traseiro do conjunto óptico, 10) Cabos de alimentação e condução de sinal.

Os componentes principais do conjunto ótico são:

**Vidros de quartzo:** Cada escotilha contém dois vidros, com diâmetro de 95 *mm* e espessura 5 *mm*, separados por um anel espaçador. Entre os

vidros escoa água de resfriamento limpa. A transmissividade é superior a 90% na faixa de comprimentos de onda de interesse (300 a 2000 nm).

**Filtros de interferência;** 650 – 800 nm (infravermelho)

**Lentes:** Modelo *V – ZLP12*, adquiridas da *Marshall Electronics Inc.* Tais lentes propiciam ângulo de visão de até 82° dependendo da distância focal ajustada.

a câmara CCD tem as seguintes características:

- *B/W* (branco e preto) modelo *V1070* da *Marshall Electronics Inc.*
  - Elemento sensor de 1/2" (7,95 mm × 6,45 mm), modelo *ICX 038 BLA* da *Sony*
  - Número de pixels: 811 (*H*) × 508 (*V*).
  - Sistema de varredura: 525 linhas, 60 quadros/s.
  - Posições do *shutter* reguláveis: *S1* (60 quadros/s), *S2* (125 quadros/s), até *S8* (10000 quadros/s).
  - Tensão de alimentação 12 *VCC*.
  - Conexão do cabo de vídeo - tipo *BN*
- Placa de aquisição de imagem (*Frame Grabber*) - modelo *PC-COMP*, Part Number 601-00030-00, fabricada pela *Coreco Imaging Inc.*, apta a operar simultaneamente com até 3 câmaras, instalada em micro computador com memória *RAM*, disco rígido e velocidade de processamento compatíveis com aquisição de imagens em frequências de até 30 *Hz*.
  - Um programa de aquisição e tratamento de imagens, dotado de uma grande quantidade de ferramentas, denominado *SCIVA* (Sistema Computacional de Inspeção Visual Automática)(*MARTINS., 2006*). É capaz de abrir e gravar arquivos do tipo *bitmap* representativos de imagens monocromáticas ou coloridas

Com esse sistema foi possível estabelecer critérios para avaliação de condições anormais de operação de queimadores industriais, podendo utilizá-los com propósitos de pesquisa, manutenção e, eventualmente, de controle (*SOUSA; MARTINS; BRUNA, 2003*).

### 3.2.4 Sistema de aquisição de dados

Todos os valores de variáveis, de fronteira ou internas à chama, passíveis de aquisição contínua, são adquiridos automaticamente e armazenados num arquivo conversível para EXCEL por um programa desenvolvido no próprio laboratório, denominado *ARGO*. Além da aquisição, estocagem dos valores e sua apresentação em janelas, o programa dispõe ainda de apresentação gráfica da evolução de qualquer uma das variáveis, permitindo a seleção de intervalos privilegiados para intervenção, no caso de condições com ruídos de operação e posterior tratamento.

## 3.3 Metodologia para o Monitoramento da Chama

Monitorou-se a instabilidade introduzida na chama, através da medição simultânea (não intrusiva) de duas variáveis: intensidade de radiação e propriedades das imagens. É importante enfatizar que, neste caso, como as variáveis de interesse se referem à região inicial da chama, a inserção de qualquer sonda para medição intrusiva afetaria fortemente a estabilidade (no sentido de aumentá-la) e, portanto, as medições foram não-intrusivas.

### 3.3.1 Metodologia para a Análise da Intensidade de Radiação Ultravioleta Emitida pela Chama

Devido à presença de radicais (*OH* principalmente), a região inicial da chama emite radiação na faixa ultravioleta. Este efeito é utilizado em sistemas de monitoramento de chamas industriais, mediante uso de foto-detector. À medida que a chama se torna mais instável, a variação da intensidade de radiação incidente no foto-detector aumenta de amplitude e este fato é usado, neste trabalho, para diagnosticar a aproximação do ponto de sopramento. Para tal, o sinal elétrico gerado pela foto-célula, é amplificado, e fornecido a um dos canais do sistema de aquisição. Após a obtenção do sinal da foto-célula, esta é tratada para extrair os valores de variância, que mostraram grande sensibilidade com o início das instabilidades. Para tal propósito foi utilizado um foto-detector modelo *C7027A1049* da *Honeywell*, ligado em série a uma impedância. A medição foi feita com um registrador digital modelo *MV200* da *Yokogawa*, escala de 0 – 6 V. Frequência de registro dos dados de 1 Hz.

### 3.3.2 Metodologia para a Análise de Imagens

A chama pode ser monitorada por uma câmara CCD que captura imagens, na faixa ultravioleta ou na faixa infravermelho, dependendo do filtro de interferência interposto. Um programa de aquisição e tratamento de imagens produz um arquivo a partir do qual será possível, diagnosticar a proximidade das instabilidades (MARTINS et al., 2007). Nair e Lieuwen (2003) também utilizaram esta técnica para o diagnóstico de sopramento iminente de chamas.

#### 3.3.2.1 Geração dos Conjuntos de Imagens de Chamas

Realizaram-se diversos ensaios de captura e gravação de imagens instantâneas e de imagens médias, ou seja a média de 100 amostras de imagens instantâneas, visando a geração de conjuntos de arquivos de imagens para as seguintes condições operacionais da fornalha:

- (a) chama normal;
- (b) chama com excesso de ar muito alto;
- (c) chama com excesso de ar muito baixo;
- (d) chama instável;
- (e) chama com má nebulização;
- (f) Seqüências de apagamento da chama.

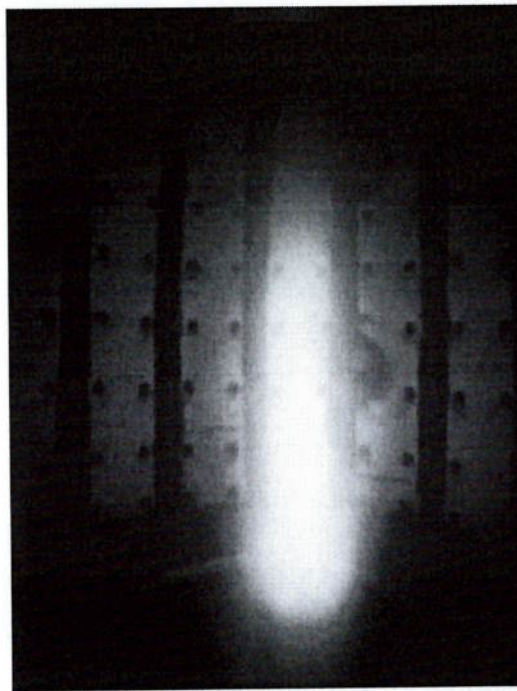
Para cada uma das categorias de chamas foram estabelecidas condições operacionais apropriadas à sua geração, como descrito a seguir:

(a) Chamas normais (figura 3.7):

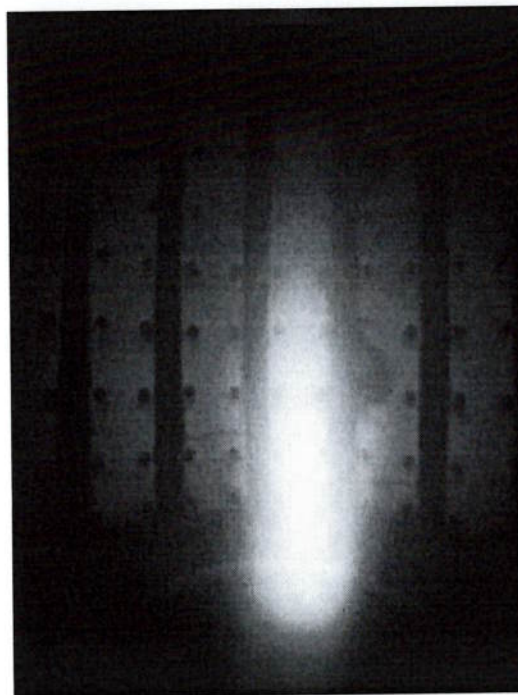
- teor de  $O_2$  igual a 3%;
- relação ar primário / ar secundário igual a 1;
- relação vapor / óleo igual a 0,33 (20 kg de vapor / 60 kg de óleo);

(b) Chamas com excesso de ar muito alto (figura 3.8):

- relação ar primário / ar secundário igual a 1;
- relação vapor / óleo igual a 0,33;
- teor de  $O_2$  variando entre 5%, 7% e 8%



**Figura 3.7:** Chama normal: 3% de  $O_2$ , relação ar primário/ar secundário = 500/500.



**Figura 3.8:** Chama com excesso de ar muito alto (6%).

(c) Chamas com excesso de ar muito baixo (figura 3.9):

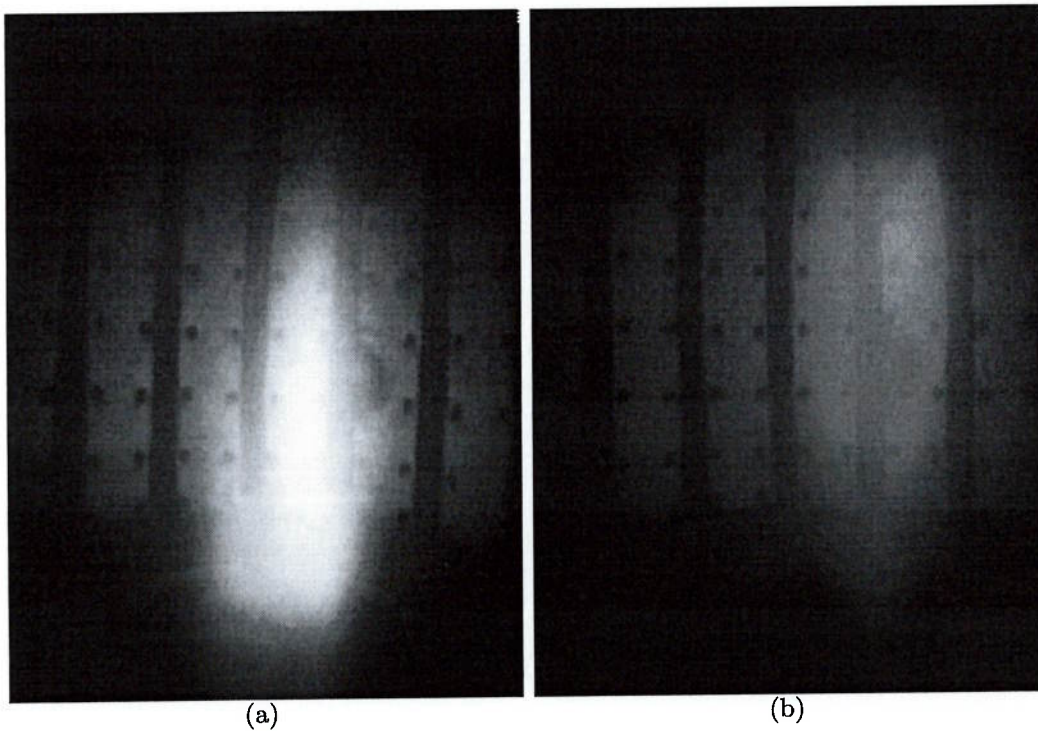
- relação ar primário / ar secundário igual a 1;
- relação vapor / óleo igual a 0,33;
- teor de  $O_2$  variando entre 1 e 1,5%.

(d) Chamas instáveis (figura 3.10):



**Figura 3.9:** Chama com excesso de ar muito baixo (1%).

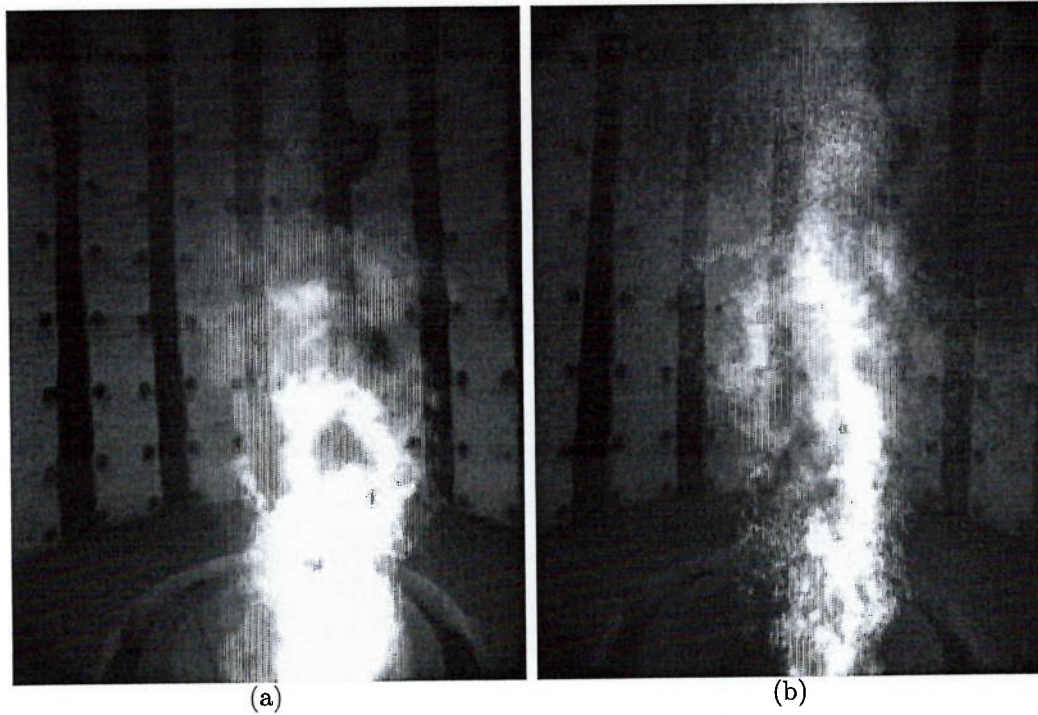
- teor de  $O_2$  variando entre 3 e 3,8%;
- relação ar primário / ar secundário variando de 60/40 até 80/20;
- relação vapor / óleo superior a 0,33.



**Figura 3.10:** (a) Chama estável:  $ArPARS=1,5$ ; (b) Chama instável:  $ArPARS=4$ .

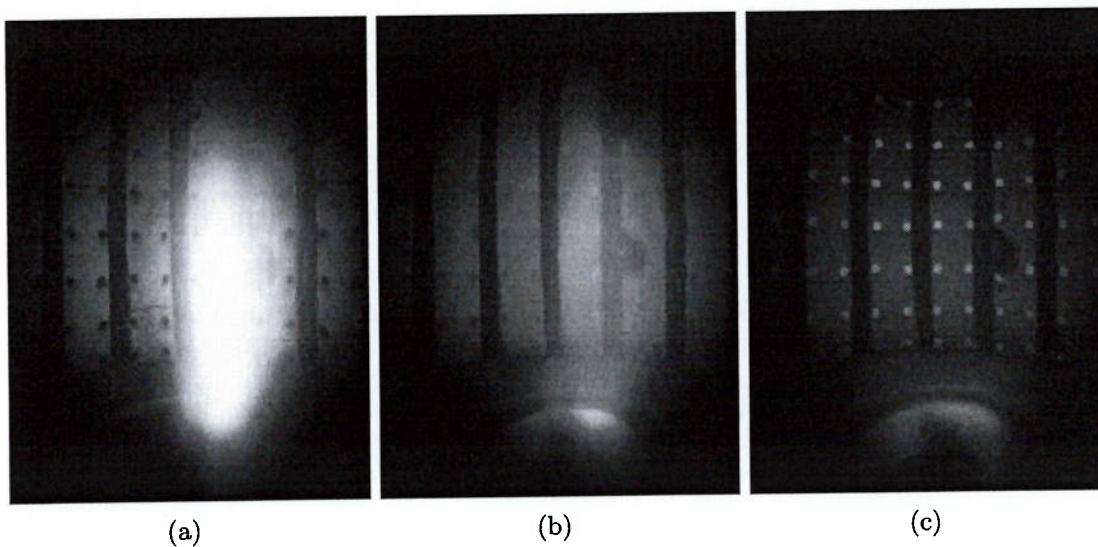
(e) Chamas mal nebulizadas (figura 3.11):

- teor de  $O_2$  variando entre 3 e 3,8%;
- relação ar primário / ar secundário igual a 1;
- relação vapor / óleo inferior a 0,33, podendo chegar até 0,20.



**Figura 3.11:** (a) Chama com boa nebulização; (b) Chama com má nebulização.

Para a geração de seqüências de eventos de apagamento de chama (figura 3.12) o fluxo de óleo para o queimador foi interrompido.



**Figura 3.12:** Seqüência de apagamento da chama.

Os experimentos de captura de imagens produziram diversos conjuntos de imagens médias e instantâneas, com filtro interferométrico de 650 e de 800 nm, que foram devidamente organizadas em lotes. Ao todo, foram obtidos 6 lotes de imagens, mostrados na tabela 3.1:

**Tabela 3.1:** Resumo das Condições de Operação

Caso	R. Vapor/Óleo	R. Ar Prim./Sec.	Teos de O <sub>2</sub> [%]
Chama normal	0,33	1	3
Chama excesso ar alto	0,33	1	5-7
Chama excesso ar baixo	0,33	1	1-2
Chama instável	0,33	1,5-4	3-3,8
Chama má nebulizadas	0,20-0,33	1	3-3,8
Seq. apagamento de chama	0,0	1	21

- (a) chamas normais: 300 imagens médias;
- (b) chamas com excesso de ar muito alto: 90 imagens médias;
- (c) chamas com excesso de ar muito baixo: 80 imagens médias;
- (d) chamas com variados graus de estabilidade: 350 imagens médias;
- (e) chamas com diferentes qualidades de nebulização: 300 imagens instantâneas;
- (f) seqüências de imagens sem chamas: 200 imagens instantâneas.

### 3.3.2.2 Processamento de Imagens Digitais

O processamento de imagens é uma forma de processamento de informação na qual a informação de entrada é uma imagem. Ao contrário do tratamento de imagens que se preocupa somente na manipulação de figuras para sua representação final, o processamento de imagens é um estágio para novos processamentos de dados tais como aprendizagem de máquina ou reconhecimento de padrões. Cada imagem é uma matriz de 480 linhas e 640 colunas (307200 *Pixels*)



### 3.3.2.3 Aquisição de Imagens

A fase de aquisição de imagens consiste em obter uma representação da informação visual. Esta deve ser a mais fiel possível e ao mesmo tempo ser processável por um computador. É usual que tal representação seja construída a partir de alguma fonte de radiação, como calor, raios X, microondas, etc., captadas por dispositivos sensíveis a tais radiações. A informação visual incidente nos dispositivos é inicialmente convertida em tensões elétricas que constituem a representação da imagem. Nesta pesquisa foram utilizadas câmaras CCD (em inglês *Charge Coupled Devices*).

O dispositivo CCD é um semiconductor capaz de converter sinais de luz em sinais elétricos. Os semi-condutores, especialmente o silício, possuem seus elétrons segmentados em diversas camadas, denominadas bandas. Para cada banda há elétrons com uma dada energia característica. A banda de energia menor é denominada banda de valência enquanto a de energia mais elevada denomina-se banda de condução. A maioria dos elétrons são encontrados na banda de valência. No entanto, através da ação do calor ou da luz (absorção de fótons), esses elétrons de baixa energia podem ser excitados e saltar para bandas de maior energia, deixando lacunas na banda de valência. Tais lacunas passam a funcionar praticamente como cargas positivas devido ao efeito da falta do respectivo elétron que saltou. Esta concentração de elétrons (tensão elétrica), que varia de acordo com a absorção de fótons da luz oriunda de uma imagem, constitui uma representação discreta de uma informação visual.

O fenômeno ideal (desejado) é o salto para a banda de condução, aquela de maior energia, e, para isto, é necessário um ganho de pelo menos  $1,1 \text{ eV}$ . A absorção de energia entre  $1,1 \text{ eV}$  e  $5 \text{ eV}$  gera o salto de um elétron para a banda de condução e o surgimento de uma lacuna na banda de valência. Com energia maior que  $5 \text{ eV}$  há o surgimento de múltiplos pares de elétron/lacuna, porém os elétrons excitados decaem da banda de valência após algum tempo, neutralizando as lacunas. No CCD isso é evitado com o uso de um campo elétrico. Esse processo torna-se cada vez mais intenso até os  $10 \text{ keV}$  de energia, quando o silício praticamente não sofre mais interação com os ftons de luz, devido ao curto comprimento de onda de luz nessa faixa de energia.

O CCD é uma pastilha de silício organizada como uma matriz de pequenas regiões chamadas *pixels* (em inglês *picture elements*), onde cada pixel é capaz de manifestar o fenômeno acima descrito, ou seja, representar uma parte da imagem através de um nível discreto de tensão armazenado, e o seu número determina



**Figura 3.13:** Escala de cinzas com 256 tons de cinza.

a resolução da imagem. A resolução é a medida da acuidade visual, que é a capacidade do olho humano em detectar detalhes ao observar uma imagem. No que se refere a sistemas de visão artificial, a resolução depende da densidade de pixels utilizados para representar a imagem real. Quanto mais pixels, mais detalhes finos serão representáveis e melhor será a resolução e, normalmente, mais caro será o sistema de visão (RUSS, 2007).

#### 3.3.2.4 Imagens em Tom de Cinza

Uma imagem em nível de cinza é uma imagem na qual, o valor de cada pixel é uma amostra da luminosidade do campo de visão. Imagens desse tipo são tipicamente compostas de tons de cinza, variando entre o preto, com a menor intensidade, e o branco, com maior intensidade. As imagens em tons de cinza são diferentes das imagens binárias, que possuem apenas duas cores, preto e branco. As imagens em tons de cinza têm diversos tons de cinza no interior da escala. Imagens em tons de cinza são o resultado da medição da intensidade de luz sobre cada *pixel* numa faixa do espectro eletromagnético, por exemplo, o espectro visível. Imagens em tons de cinza são tipicamente armazenadas com uma resolução de 8 *bits* (1 *byte*) por pixel, o que permite 256 tons de cinza (figura 3.13), tipicamente numa escala não linear. Aplicações específicas, como imagens médicas, requerem mais níveis para ser possível amplificar os detalhes da imagem e evitar erros de arredondamento computacional.

#### 3.3.2.5 Limiarização

A limiarização é um método importante e simples de segmentação de imagem que tenta identificar e extrair um alvo do seu fundo tendo como base uma distribuição de níveis de cinza ou textura em imagens. Os pixels representam cada um dos elementos individuais (pontos) que constituem uma imagem (matriz de pontos) em escala de cinzas, marcados como objeto pixel (*pixels object*), se seu valor for maior do que o valor do limiar, que supõe um objeto mais brilhante do que o fundo, e marcados como pixels do fundo em qualquer outro caso. Tal imagem é então mostrada como uma imagem binária ou de dois níveis, usando preto e branco, para distinguir as regiões. Tipicamente, um pixel objeto tem o valor de 1

(branco) em quanto que um pixel do fundo tem o valor de 0 (preto) (RUSS, 2007). O parâmetro chave no processo de limiarização é obviamente a escolha do limiar. Existem diferentes métodos para escolher o limiar. O método mais simples seria escolher o valor médio. O mais apropriado seria se os pixels objetos fossem mais brilhantes do que o fundo. Em uma imagem sem ruído com valores uniformes do fundo, a média seria a melhor escolha para o valor do limiar, porém geralmente este não é o caso. Uma aproximação ideal seria gerar o histograma da imagem e usar o “ponto do vale” como limiar. A aproximação do histograma supõe que há um valor médio para os pixels do fundo e para os pixels objeto, e que os valores dos pixels apresentam variação em torno destes valores médios. No entanto, computacionalmente isto não é tão simples, por que em imagens reais, os “pontos do vale” não são claramente definidos.

### 3.3.2.6 Método de Otsu para limiarizar imagens

Para determinar o limiar de uma imagem eficientemente, Otsu (1979) propôs um critério para maximizar a variância entre classes da intensidade do pixel ao limiarizar uma imagem. Uma imagem é uma função  $2D$  de intensidade de níveis de cinza e contém  $N$  pixels com níveis de cinza do 1 ao  $L$ . O número de pixels com nível de cinza  $i$  é denotado  $f_i$ , dando a probabilidade de nível de cinza  $i$  em uma imagem, dado por:

$$P_i = f_i/N . \quad (3.1)$$

No caso de limiarização de uma imagem em dois níveis, os pixels são divididos em duas classes,  $C_1$  com níveis de cinza  $[1, \dots, t]$  e  $C_2$  com níveis de cinza  $[t + 1, \dots, L]$ . Então a distribuições da probabilidade de níveis de cinza para estas duas classes são:

$$C_1 : P_1/\omega_1(t), \dots, P_t/\omega_1(t) \quad (3.2)$$

e

$$C_2 : P_{t+1}/\omega_2(t), P_{t+2}/\omega_2(t), \dots, P_L/\omega_2(t) , \quad (3.3)$$

onde

$$\omega_1(t) = \sum_{i=1}^t P_i \quad (3.4)$$

e

$$\omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^L P_i . \quad (3.5)$$

As médias para as classes  $C_1$  e  $C_2$  são:

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^t iP_i/\omega_1(t) \quad (3.6)$$

e

$$\mu_2 = \sum_{i=t+1}^L iP_i/\omega_2(t) . \quad (3.7)$$

Denotando por  $\mu_T$  a intensidade média para toda a imagem, tem-se:

$$\omega_1\mu_1 + \omega_2\mu_2 = \mu_t , \quad (3.8)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 . \quad (3.9)$$

Usando análise discriminatória, Otsu (1979) definiu a variância entre classes da imagem limiarizada como:

$$\sigma_B^2 = \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu_T)^2 . \quad (3.10)$$

Para uma limiarização de dois níveis, Otsu (1979) verificou que o limiar ótimo  $t^*$  é escolhido assim que a variância entre classes  $\sigma_B^2$  é maximizada, isto é:

$$t^* = \text{Arg Max}\{\sigma_B^2(t)\} \text{ para } 1 \leq t < L . \quad (3.11)$$

### 3.3.2.7 Medições de Distância, Perímetro e Área

A distância  $d\{(j_1, k_1), (j_2, k_2)\}$  é uma função real avaliada entre dois pontos de uma imagem  $(j_1, k_1)$  e  $(j_2, k_2)$  que satisfaz as seguintes condições (PRATT, 2007):

$$d\{(j_1, k_1), (j_2, k_2)\} \geq 0 , \quad (3.12)$$

$$d\{(j_1, k_1), (j_2, k_2)\} = d\{(j_2, k_2), (j_1, k_1)\}, \quad (3.13)$$

$$d\{(j_1, k_1), (j_2, k_2)\} + d\{(j_2, k_2), (j_3, k_3)\} \geq d\{(j_1, k_1), (j_3, k_3)\}. \quad (3.14)$$

Há um número de funções de distância que satisfazem as propriedades definidas. As medidas mais comuns encontradas em análises de imagens são:  
A distância Euclidiana,

$$d_E = [(j_1 - j_2)^2 + (k_1 - k_2)^2]^{1/2}, \quad (3.15)$$

a magnitude da distância, (3.16),

$$d_M = |j_1 - j_2| + |k_1 - k_2| \quad (3.16)$$

e o máximo valor da distância, (3.17),

$$d_X = \text{MAX} \{|j_1 - j_2|, |k_1 - k_2|\}. \quad (3.17)$$

As medições de perímetro e área são significativas somente para imagens binárias. Considere uma imagem binária discreta contendo um ou mais objetos, onde  $F(j, k) = 1$  se um pixel faz parte de um objeto e  $F(j, k) = 0$  para todos os pixels do fundo.

O perímetro de cada objeto é a contagem do número de lados de um pixel que se estendem em torno dos limites do objeto começando em um pixel arbitrário do limite e retornando ao pixel inicial. A área de cada objeto dentro da imagem é simplesmente a contagem do número de pixels no objeto para cada  $F(j, k) = 0$  ou 1 dentro do perímetro  $P$  do objeto.

### 3.3.2.8 Cálculo do Número de Objetos

Para determinar o número de objetos presentes em uma dada região retangular da imagem é necessário conhecer os seguintes parâmetros:

- Valor  $L$  do limiar utilizado no processo de binarização da imagem;
- As coordenadas da região retangular de interesse.

O número de objetos da região selecionada é calculado por meio do algoritmo de rotulação (HORN, 1986) na região de interesse da imagem original binarizada para o valor de limiar escolhido.

Este algoritmo funciona através da leitura de uma imagem pixel por pixel, a fim de identificar regiões de pixels conectados, ou seja, regiões de pixels adjacentes, os quais compartilham o mesmo valor de intensidade, no caso de imagens binárias este valor é 1. O operador do algoritmo de rotulação varre a imagem movendo-se ao longo de uma linha até chegar no ponto  $P$ . Quando isto ocorrer, ele analisa os quatro vizinhos do ponto  $P$  (direita, esquerda, acima e abaixo). Com base nessas informações a rotulação de  $P$  ocorre do seguinte modo:

- Se todos os quatro vizinhos são 0, atribuir um novo rótulo para  $P$ ,
- Se apenas um vizinho tem o valor de 1, atribuir este valor para  $P$ ,
- Se dois ou mais vizinhos têm o valor de 1, atribuir um dos rótulos para  $P$  e fazer uma nota de equivalência.

Após concluir a varredura, os pares de rótulos equivalentes são ordenados em classes de equivalência e um único rótulo é atribuído a cada classe. Como etapa final, uma segunda varredura é feita na imagem, durante a qual cada rótulo é substituído pelo rótulo atribuído a sua classe de equivalência. Para exibição, os rótulos podem ser de diferentes tons de cinza ou cores.

### 3.4 Estimativa da Incerteza

No cálculo de incertezas da medição das propriedades da chama se tem incertezas do tipo A, que são estimativas de uma grandeza que variam aleatoriamente, e incertezas do tipo B, que são informações que podem ser obtidas de resultados de medições similares já realizadas anteriormente, experiência prática, dados do fabricante, certificados de calibração, referência de manuais de instrução, etc. Estes valores de incertezas serão combinados ao final para determinar a incerteza total do sistema de medição. Assim, as incertezas que devem ser consideradas neste trabalho são:

$I_l$ : Incerteza na luminosidade da chama.

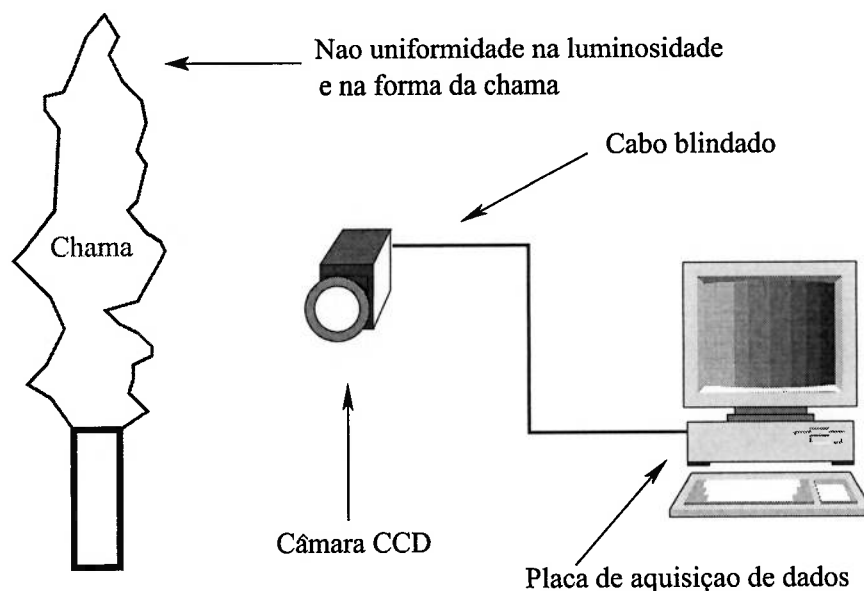
$I_s$ : Incerteza na forma da chama.

$F_l$ : Incerteza na uniformidade da luminosidade da chama.

$F_s$ : Incerteza na uniformidade da forma da chama.

$C$ : Incerteza da câmara CCD.

A figura 3.14 mostra as possíveis fontes de incerteza na medição das propriedades da chama.



**Figura 3.14:** Possíveis fontes de incerteza na medição das propriedades da chama.

### 3.4.1 Incerteza na uniformidade da luminosidade da chama.

Este cálculo considera incerteza do tipo A, pois mede uma grandeza aleatória. Os valores dos tons de cinza extraídos de 30 imagens da chama em condição de operação normal, são mostrados na tabela D.1. O intervalo de incerteza recomendado e usado em análise de precisão é de 95%.

Para um número de amostras pequeno, onde o número de graus de liberdade é menor do que 30, deve ser utilizada a distribuição t de Student.

$$i = \pm t_{95\%}(v) \times s(\bar{x}) . \quad (3.18)$$

Onde  $i$  é a incerteza,  $t_{95\%}(v)$  é o valor da distribuição t para uma probabilidade de 95% e  $s(\bar{x})$  é o desvio padrão.

O valor médio das amostras de tons de cinza das imagens é:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 83,18 , \quad (3.19)$$

e a variância,

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 17,19, \quad (3.20)$$

o valor da variância da média é:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} = 0,57, \quad (3.21)$$

a seguir calcula-se o desvio padrão por:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 4,15, \quad (3.22)$$

e finalmente o desvio padrão da média, que é dado por:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0,76. \quad (3.23)$$

Da tabela de distribuição t de Student A, com o valor de  $v = (n - 1) = 29$  graus de liberdade e  $p = 95\%$ , obtêm-se:

$$t_{95\%}(v) = 1,699.$$

Assim, a incerteza tipo A é:

$$i = \pm t_{95\%}(v) \times s(\bar{x}) = \pm 1,699 \times (0,76) = 1,292.$$

Isto significa que a incerteza na medição da luminosidade da chama é:

$$i = \pm 1,292 \text{ Tons de cinza (95\%) .}$$

### 3.4.2 Incerteza na uniformidade da forma da chama

O cálculo da incerteza na uniformidade da forma da chama é similar ao procedimento de cálculo anterior. Na tabela D.2 são apresentados os valores da área da chama.

Desta tabela obtêm-se o valor da média:



$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 37106,26, \quad (3.24)$$

o valor da variância

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{x=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12844857,85, \quad (3.25)$$

o valor da variância da média,

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} = 428161,92, \quad (3.26)$$

o desvio padrão,

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 3583,97, \quad (3.27)$$

e o desvio padrão da média,

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 654,34. \quad (3.28)$$

Da tabela de distribuição t de student A, com o valor de  $v = (n - 1) = 29$  graus de liberdade e  $p = 95\%$ , obtense:

$$t_{95\%}(v) = 1,699.$$

Assim, a incerteza tipo A é:

$$i = \pm t_{95\%}(v) \times s(\bar{x}) = \pm 1,699 \times (654,34) = 1111,72.$$

Isto significa que a incerteza na medição na forma da chama é:

$$i = \pm 1111,72 \text{ pixels (95\%)}. \quad (3.29)$$

### 3.4.3 Incerteza do sensor CCD da câmera.

A incerteza devida ao sensor CCD da câmera segundo o calculado por Rossini e Krenzinger (2007) é  $\frac{1}{256} = 0,004$ .

É apresentado (tabela 3.2) o resumo das contribuições para a incerteza na medição da luminosidade e da forma da chama.

**Tabela 3.2:** Resumo das contribuições para a incerteza.

Incerteza	Tipo	Contribuição
$F_l$	Tipo A	$\pm 1,292$ Tons de cinza
$F_s$	Tipo A	$\pm 1111,72$ pixels
$C$	Tipo B	$\pm 0,004$

Portanto a incerteza total será a soma quadrática de todas as incertezas do processo de medição:

$$u(x) = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}, \quad (3.29)$$

Para o cálculo da incerteza na luminosidade da chama utiliza-se a incerteza na uniformidade da luminosidade da chama e a incerteza do sensor CCD da câmera, calculadas no passo anterior.

$$u(l) = \sqrt{1,292^2 + 0,004^2} = 1,292 \text{ Tons de cinza}$$

Para o cálculo da Incerteza na forma da chama utilizando a incerteza na uniformidade da forma da chama,

$$u(f) = \sqrt{1111,72^2 + 0,004^2} = 1111,72 \text{ pixels} .$$

Pode-se observar que o valor da incerteza do sensor CCD é pequeno comparado com os outros valores de incerteza e este não altera em nada o valor da incerteza.

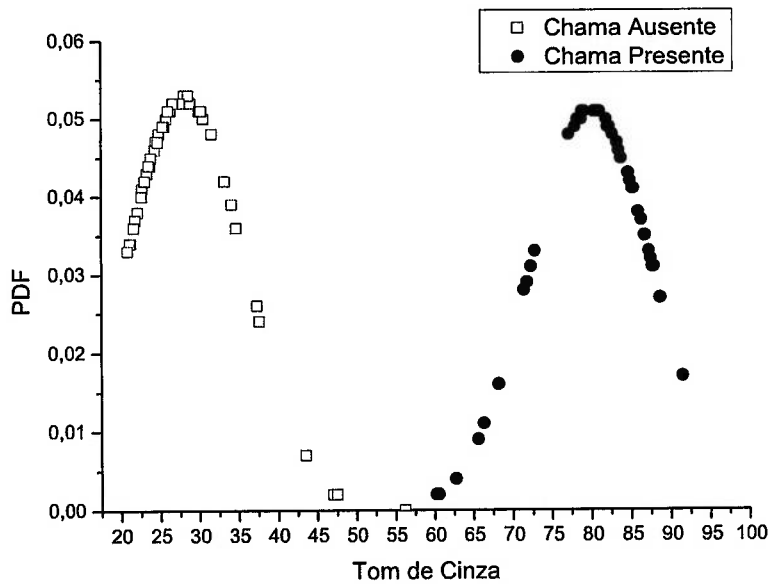
## 4 Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos da análise das imagens das chamas feitas com filtro interferométrico de 650 e 800 *nm*. São apresentadas também os resultados obtidos pelo foto-detector UV. Os resultados são discutidos considerando: detecção de extinção, detecção de instabilidades, má nebulização e excesso de oxigênio.

### 4.1 Detecção de extinção de chamas

Considerando-se que a extinção da chama pode contribuir para os riscos quanto à segurança do processo, a sua monitoração deve ser realizada com a máxima frequência possível. Para esta análise foram utilizadas as imagens instantâneas e a propriedade discriminatória para a avaliação da instabilidade será o tom de cinza médio da imagem. O filtro interferométrico utilizado foi de 650 *nm* e 800 *nm*.

Após a extração do valor do tom de cinza dos conjuntos de imagens de chama presente e chama ausente, pode-se observar na tabela E.1, que existe uma grande diferença entre os tons de cinza médios das imagens com chama presente e chama ausente. Na imagem 4.1 tem-se as funções densidade de probabilidade para os conjuntos de imagens chama presente e chama ausente, nos quais os valores médios do tom de cinza foram 78,82 e 23,62 respectivamente. Estas duas funções não apresentam valores em comum. Assim, para a detecção de extinção, pode-se usar o valor do tom médio de cinza. No caso do queimador estudado, este valor é cerca de 23 como a incerteza do tom de cinza é  $\pm 1$ , o valor limite pode ser adotado como  $23 \pm 1$ . Vê-se também que a incerteza não afeta os resultados.



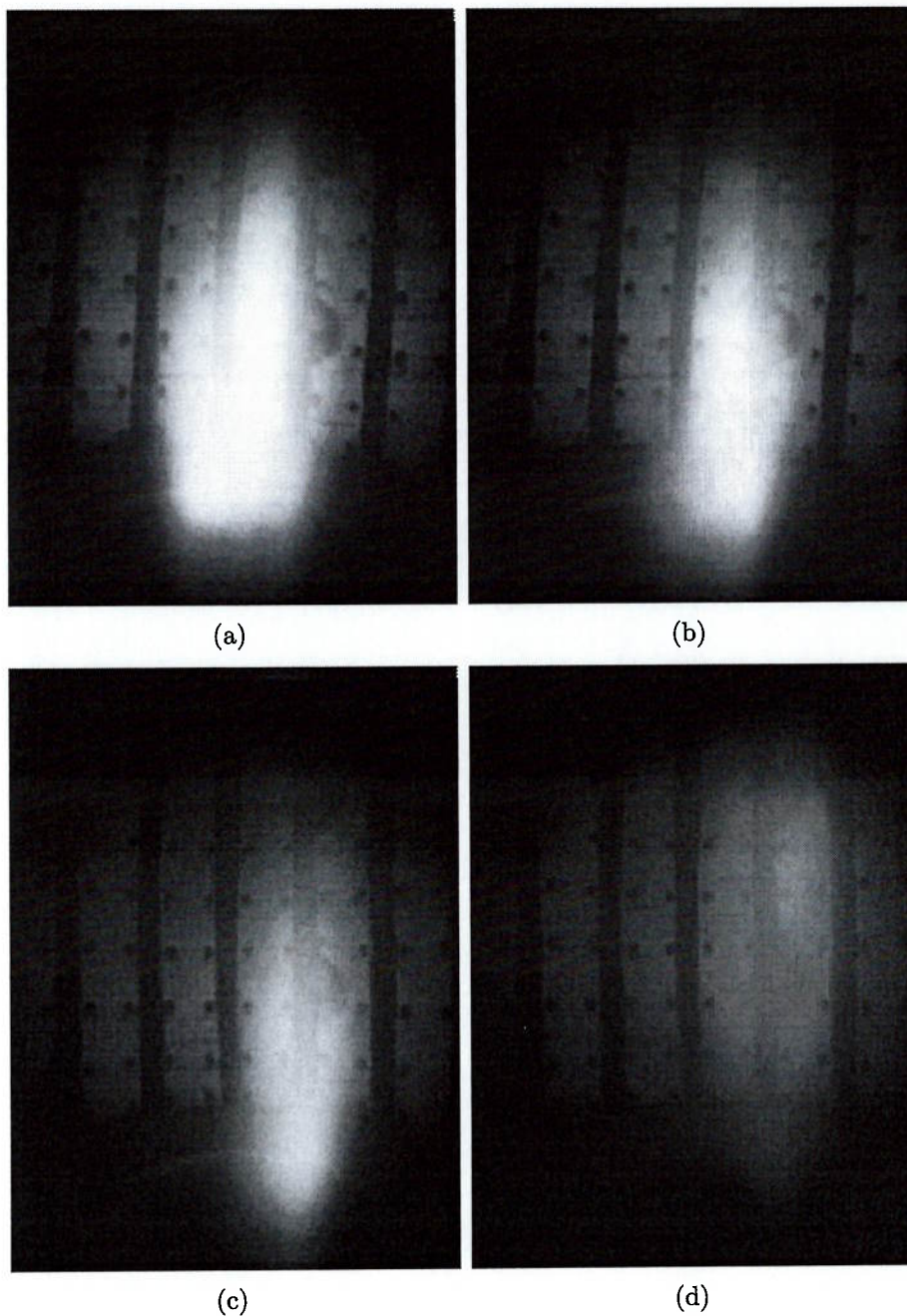
**Figura 4.1:** Funções densidade de probabilidade para Chama Presente e Chama Ausente.

## 4.2 Detecção de instabilidade de chamas

Após a análise das imagens médias de chamas para diversas relações ar primário/ar secundário (500/500, 600/400, 650/350, 700/300, 750/250 e 800/200) e relação vapor/óleo 0,33, pôde-se concluir que ocorre apreciável esmaecimento da região próxima à raiz da chama à medida que a mesma se vai tornando mais e mais instável. As figuras 4.2a-d foram obtidas com a utilização de filtro interferométrico de 650 nm, já as figuras 4.3 foram obtidas com a utilização de filtro interferométrico de 800 nm. Assim, é suficiente calcular as propriedades de uma sub-imagem retangular situada na base da chama (figura 4.4) para caracterizar seu grau de estabilidade, ou seja, descolamento ou sopramento. Tomou-se o tom de cinza médio desta sub-imagem como a propriedade que irá diferenciar uma chama estável de uma instável. As figuras 4.3a-d correspondem aos conjuntos de imagens: a) imagens com ArPARS 500/500 e relação vapor/óleo 0,33, b) imagem com ArPARS 500/500 e relação vapor/óleo 0,62, c) imagem com ArPARS 600/400 e relação vapor/óleo 0,33, d) imagens com ArPARS 600/400 e relação vapor/óleo 0,4.

O programa SCIVA (MARTINS., 2006) possui uma interface gráfica que fornece as coordenadas da região retangular de interesse na imagem, com auxílio da interface implementada, a sub-imagem é delimitada pelas seguintes coordenadas:

- $x_0 = 426$  e  $x = 640$

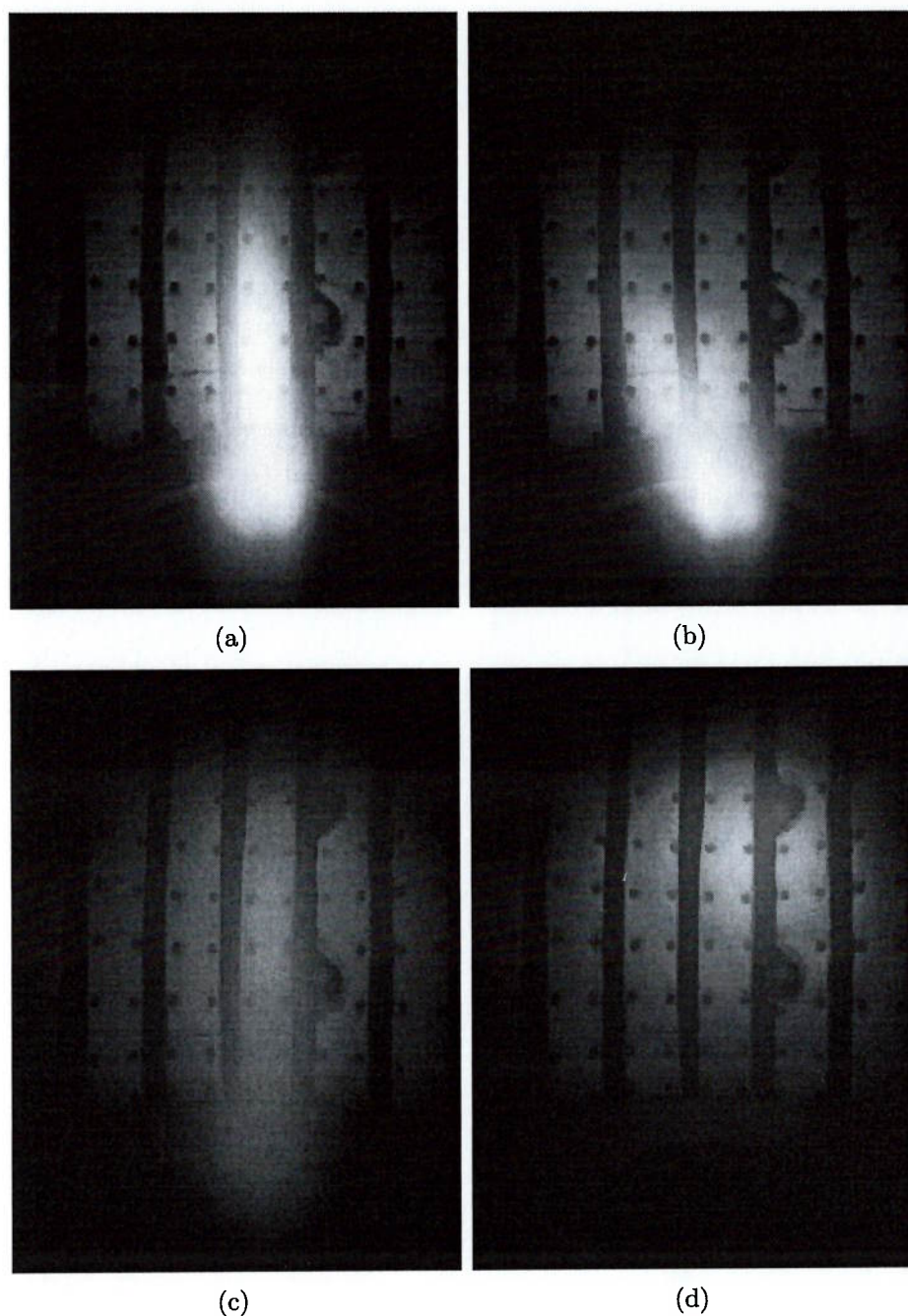


**Figura 4.2:** Aumento da instabilidade com o aumento da relação ar primário/ar secundário: (a) 500/500; (b) 650/350; (c) 700/300; (d) 750/250, relação vapor/óleo 0,33. Todas as imagens com filtro interferométrico de 650 nm.

- $y_0 = 0$  e  $y = 480$ .

O sistema de coordenadas da imagem inicia no vértice superior esquerdo da imagem, com o eixo  $x$  horizontal orientado para a direita e o eixo  $y$  vertical orientado para baixo.

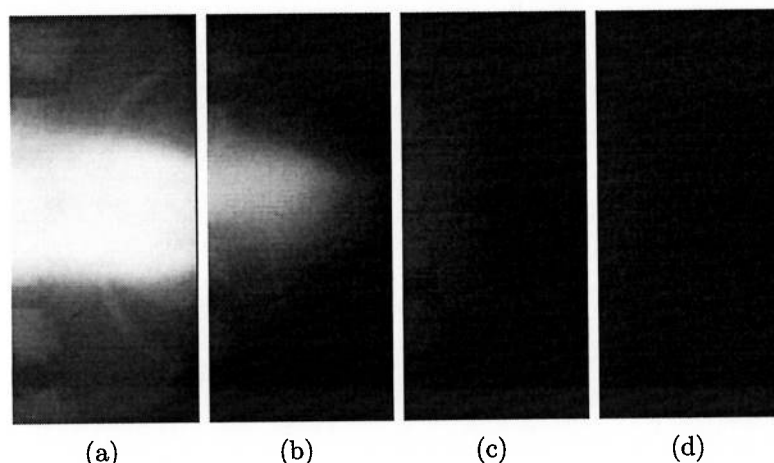
Conforme se apresenta na tabela E.2, os ensaios realizados nas condições nas quais a vazão de ar primário foi aumentada e a vazão de ar secundário diminuída,



**Figura 4.3:** Aumento da instabilidade com o aumento da ArPARS e com o aumento da relação vapor/óleo: (a) imagens com ArPARS 500/500 e relação vapor/óleo 0,33; (b) imagem com ArPARS 500/500 e relação vapor/óleo 0,62; (c) imagem com ArPARS 600/400 e relação vapor/óleo 0,33; (d) imagens com ArPARS 600/400 e relação vapor/óleo 0,4, utilizando o filtro interferométrico de 800 nm.

produziram as distribuições de valores de tons de cinza médio das regiões de interesse das imagens com Chama Estável e Chama Instável. Os ensaios correspondem a relações ar primário/ar secundário (ArPARS) iguais a 500/500, 600/400, 650/350, 700/300, 750/250 e 800/200.

O tom de cinza apresenta valores bem mais elevados nas imagens com Chama



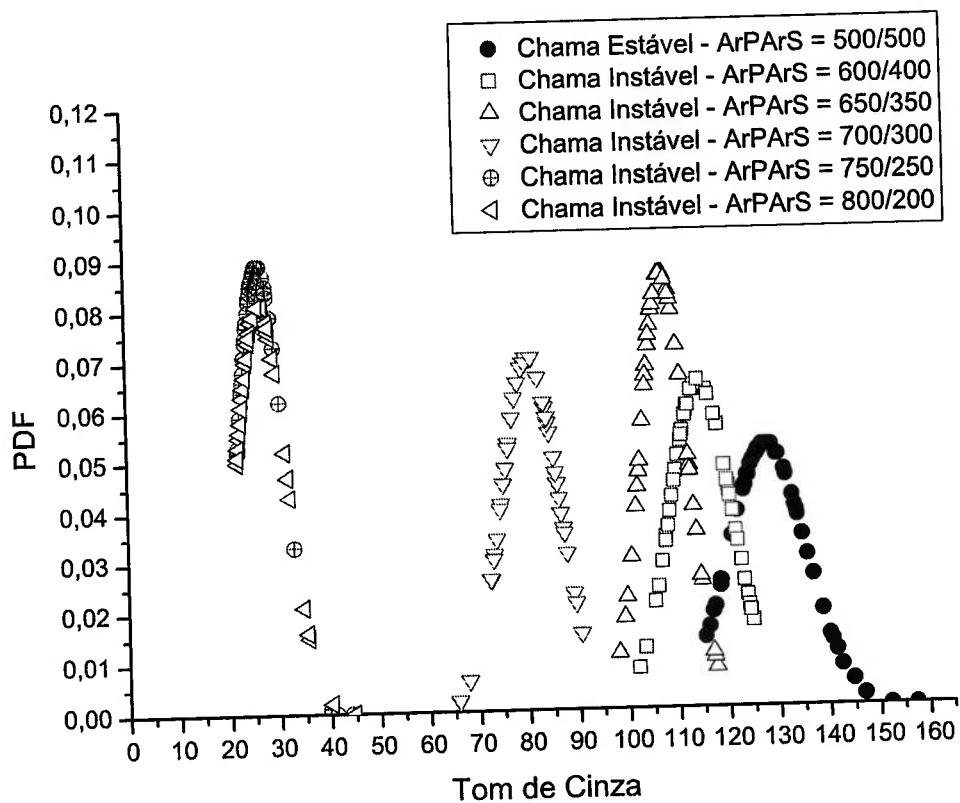
**Figura 4.4:** Sub-imagens da base da chama para os casos (a) 500/500; (b) 650/350; (c) 700/300; (d) 750/250.

Estável do que as imagens com Chama Instável. A média do tom de cinza para as imagens de chamas com relação ar primário/ar secundário (ArPArS) 500/500 é 127,7; 114,6 para chamas com ArPArS de 600/400; 107,4 para chamas com ArPArS 650/350; 80,6 para chamas com ArPArS 700/300; 26,6 para chamas com ArPArS 750/250 e 26,7 para chamas com ArPArS 800/200 (tabela E.2). Na figura 4.5 são mostradas as funções densidade de probabilidade das imagens das chamas estáveis e instáveis.

A tabela E.3 mostra os valores de tom de cinza para as chamas com ArPArS 500/500 e relação vapor/óleo 0,33, imagem com ArPArS 500/500 e relação vapor/óleo 0,62, imagem com ArPArS 600/400 e relação vapor/óleo 0,33, imagens com ArPArS 600/400 e relação vapor/óleo 0,4, utilizando o filtro interferométrico de 800 nm. Na figura 4.6 se observa a função densidade de probabilidade dos tons de cinza das imagens feitas com filtro interferométrico de 800 nm.

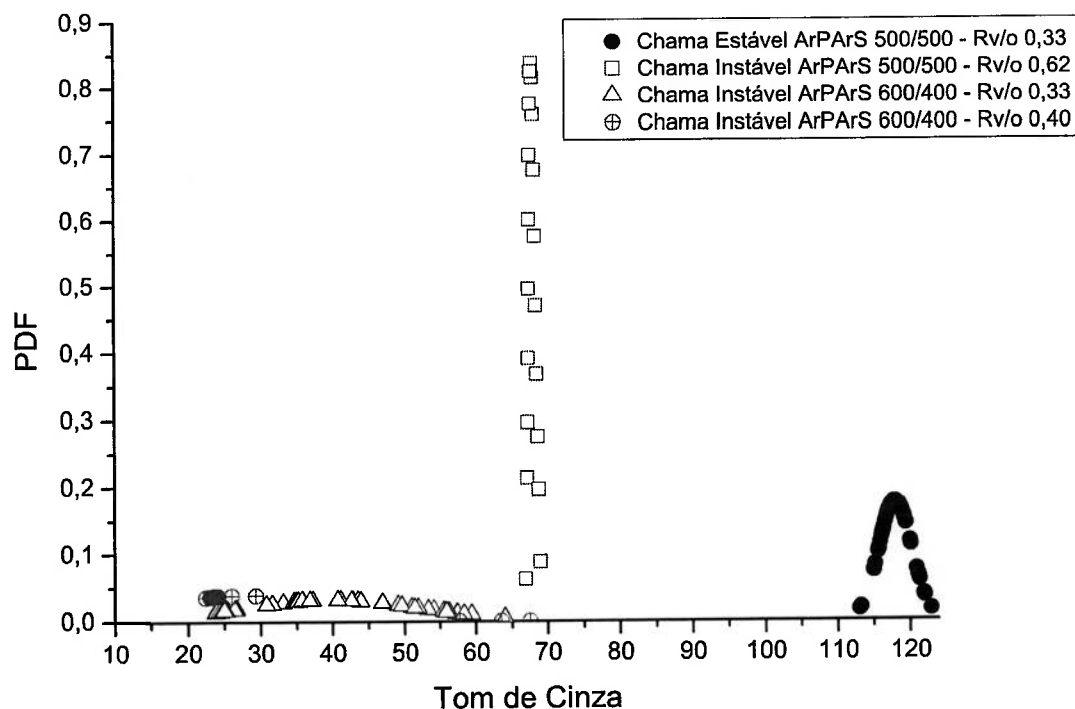
Na figura 4.6, as chamas com ArPArS 500/500 e relação vapor/óleo 0,33 tem um valor médio de tom de cinza de 117,9, as imagem com ArPArS 500/500 e relação vapor/óleo 0,62 tem um valor médio de tom de cinza de 67,9, imagem com ArPArS 600/400 e relação vapor/óleo 0,33 tem o valor médio de 39,6, ArPArS 600/400 e relação vapor/óleo 0,4 tem o valor médio de 26,48. Verificou-se que tanto com o filtro de 650 nm como o de 800 nm, para os casos analisados as chamas estáveis tem tom de cinza médio em torno de  $127 \pm 1$  e com o aparecimento de instabilidades, precursora extinção, o tom de cinza médio diminui.

Por motivos de comparação foi calculada a velocidade de sopramento e altura de descolamento de uma chama de propano utilizando a formulação proposta por Kalghatgi (1981). Utilizou-se o propano como aproximação a fase gasosa do



**Figura 4.5:** Funções densidade de probabilidade para as categorias Chama Estável e Chama Instável das imagens feitas com o filtro interferométrico de 650 nm.





**Figura 4.6:** Funções densidade de probabilidade para as categorias Chama Estável e Chama Instável das imagens feitas com o filtro interferométrico de 800 nm.

óleo combustível utilizado neste trabalho. As expressões propostas por Kalghatgi (1981) são validas apenas para combustíveis gasosos. As propriedades do propano são:

$$\begin{aligned} \rho: & \quad 1,854 \text{ kg/m}^3 \\ S_i: & \quad 0,3422 \text{ m/s} \\ Y_{f,stoich}: & \quad 0,06035 \\ \nu: & \quad 8,26 \times 10^{-6} \text{ N - s/m}^2 \end{aligned}$$

O diâmetro do bocal injetor do queimador é 0,0143 m. Segundo Kalghatgi (1981) temos que a altura característica esta dada pela equação 2.1.

$$H = 4(0,0143) \left[ \frac{1}{0,06035} \left( \frac{1,854}{1,1614} \right)^{1/2} - 5,8 \right]$$

$$H = 0,8657 \text{ m}$$

O número de Reynolds (equação 2.1)

$$Re_H = \frac{(1,854)(0,3422)(0,8657)}{8,26 \times 10^{-6}}$$

$$Re_H = 66493$$

Usando a correlação da velocidade de sopramento (equação 2.4) temos:

$$\begin{aligned} \frac{u_b}{S_l} \left( \frac{\rho_e}{\rho_\infty} \right)^{1,5} &= 0,017 R_H (1 - 3,5 \times 10^{-6} R_H) \\ \frac{u_b}{S_l} \left( \frac{\rho_e}{\rho_\infty} \right)^{1,5} &= 0,017 [1 - 3,5 \times 10^{-6} (66065)] \\ \frac{u_b}{S_l} \left( \frac{\rho_e}{\rho_\infty} \right)^{1,5} &= 867 \end{aligned}$$

Finalmente usamos este resultado para a velocidade de sopramento.

$$u_b = (867)(0,3422) \left( \frac{1,1614}{1,854} \right)^{1,5}$$

$$u_b = 147 \text{ m/s} .$$

Usando a velocidade de sopramento se determina a altura do descolamento com ajuda da figura 4.7.

$$h_{\text{descolamento}} \cong 0,19 \text{ m}$$

Comparando a altura calculada com a altura do descolamento da chama estudada neste trabalho (figura 4.8) se observa que a altura da chama estudada é 2,5 vezes maior do que a altura calculada. Isto mostra que a formulação adotada para combustíveis gasosos não se aplica aos combustíveis líquidos.

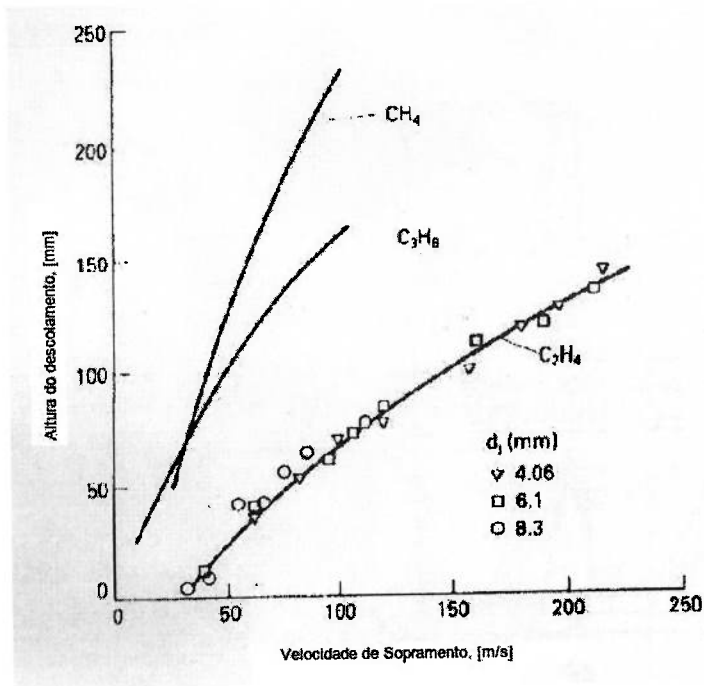


Figura 4.7: Altura de descolamento versus velocidade de saída do jato para metano, propano e etileno (TURNS, 1996).

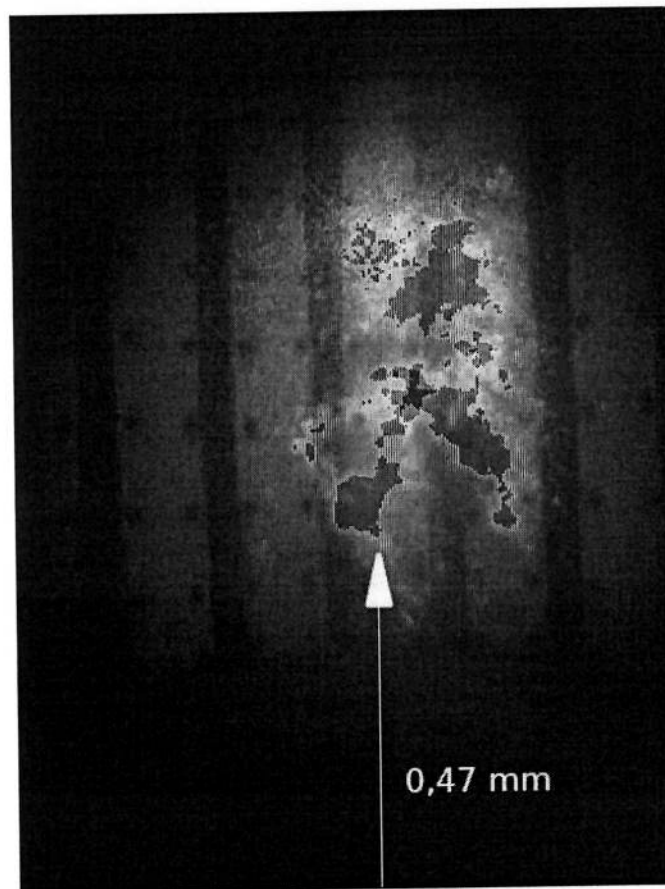


Figura 4.8: Altura do descolamento da chama estudada.

### 4.3 Detecção de defeito de má nebulização

Investigou-se neste trabalho também os defeitos de má nebulização. Estes defeitos são perceptíveis em imagens de chamas instantâneas: à medida que a relação vapor/óleo diminui e passa a atingir valores inferiores a 0,33, a zona ao redor da correspondente imagem instantânea torna-se cada vez mais pulverizada com pequenos objetos, indicativos da presença de material particulado. Portanto, pode-se estabelecer uma relação entre a quantidade de objetos de uma dada região (sub-imagem) da chama instantânea e a qualidade da nebulização, ou seja, à medida que o número de objetos da sub-imagem observada aumenta, a qualidade da nebulização piora. Levando em consideração esta característica, estabeleceu-se que a qualidade da nebulização seria avaliada a partir das imagens instantâneas da chama e com a contagem do número de objetos de uma dada região ou sub-imagem retangular da imagem da chama. Esta sub-imagem é delimitada pelas seguintes coordenadas:

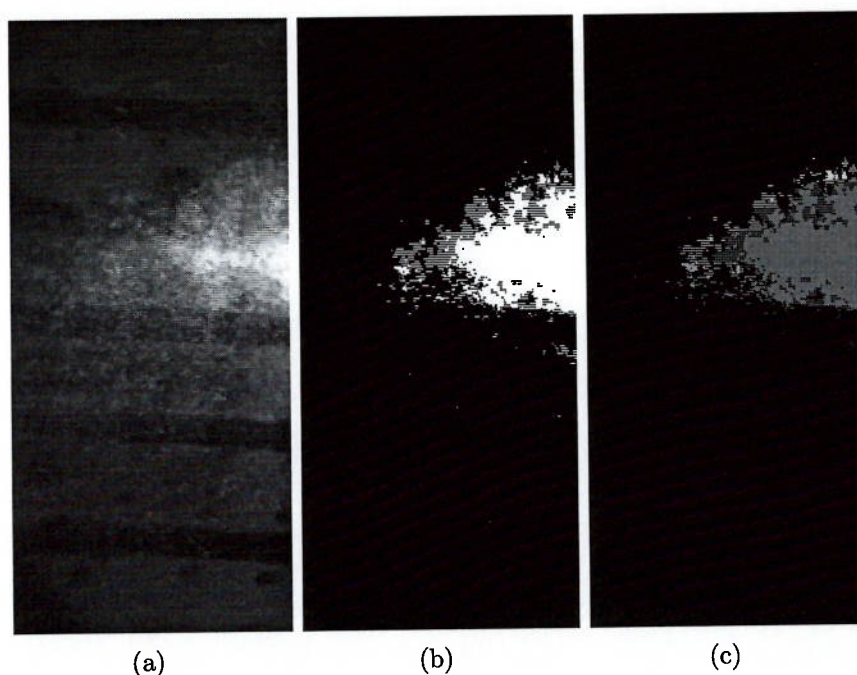
- $x_0 = 0$  e  $x = 213$
- $y_0 = 0$  e  $y = 480$ .

As figuras 4.9 ilustram o procedimento de cálculo do número de objetos de uma dada região de interesse em uma imagem instantânea de chama, adotando-se o limiar  $L = 128$  para esta análise. Na figura 4.9c cada um dos objetos identificados é representado por um conjunto de pixels conectados apresentando o mesmo tom de cinza.

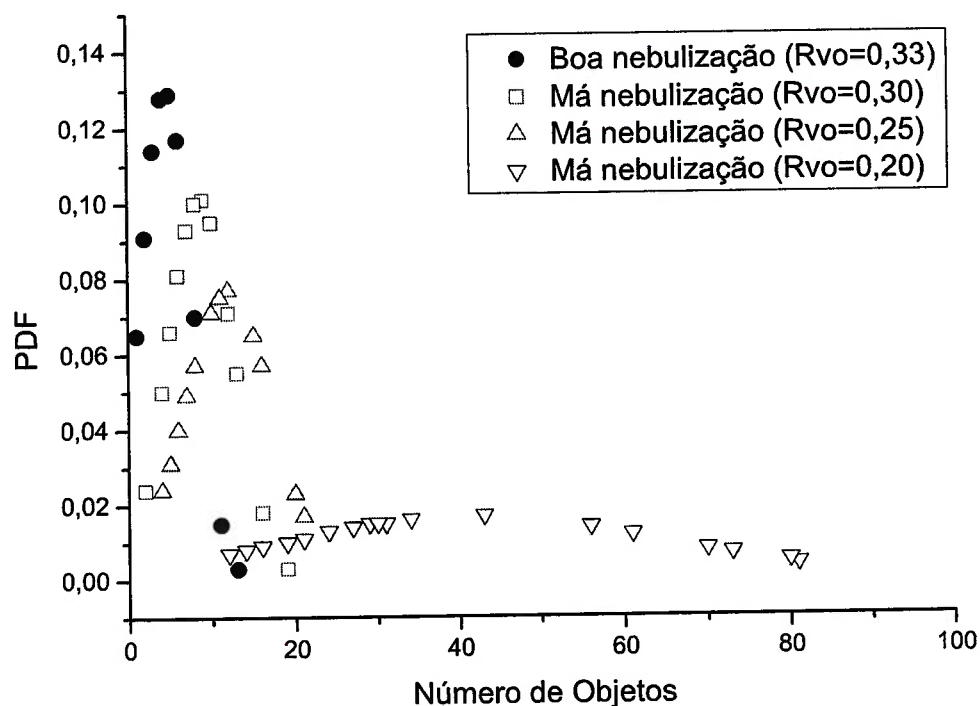
A tabela E.4 apresenta os valores do número de objetos para as imagens de chama com boa nebulização (relação vapor/ar superior a 0,33) e as com má nebulização (relação vapor/ar inferior a 0,33) feitas com filtro interferométrico de 650 nm.

No gráfico da figura 4.10 são apresentadas as funções de densidade de probabilidade para as imagens da chama com boa nebulização, ou seja, com uma relação vapor/óleo de 0,33 e as imagens com má nebulização que correspondem às relações de vapor/óleo 0,20, 0,25 e 0,30. Os valores médios do número de objetos são 4 para a condição de operação normal; 8, 11 e 42 para as condições que correspondem a Rvo 0,20, 0,25 e 0,30 respectivamente. Vê-se que o número de objetos aumenta com a má nebulização.

Os valores médios dos tons de cinza para as imagens feitas com o filtro interferométrico de 800 nm são apresentados na tabela E.5. A figura 4.11 mostra

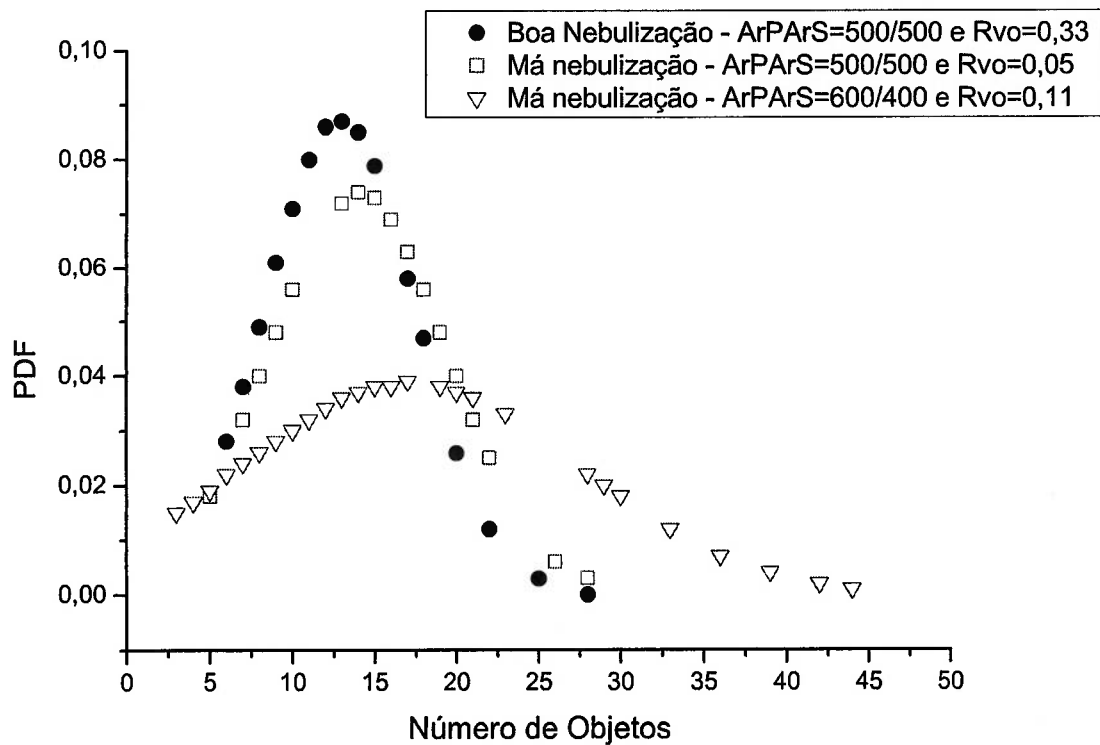


**Figura 4.9:** (a) Região de interesse; (b) Imagem limiarizada; (c) Imagem rotulada com 18 objetos identificados.



**Figura 4.10:** Funções densidade de probabilidade para Boa Nebulização e Má Nebulização de imagens feitas com o filtro interferométrico de 650 nm.

as funções densidade de probabilidade do número de objetos para chamadas com boa e má nebulização. Estas imagens foram feitas com filtro interferométrico de 800 nm. Na figura 4.11 o valor médio do número de objetos para a condição de



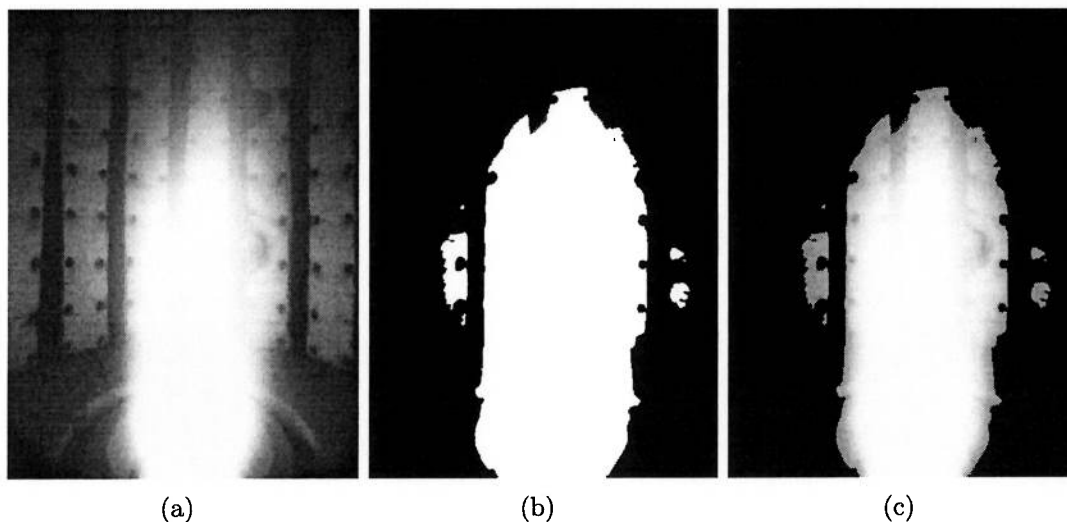
**Figura 4.11:** Funções densidade de probabilidade para Boa Nebulização e Má Nebulização de imagens feitas com o filtro interferométrico de 800 nm.

operação normal é 12,90, para as imagens com Relação vapor/óleo de 0,05 o valor médio do número de objetos é 14,02 e para as imagens com relação vapor/óleo 0,11 o valor médio é 17,14. Como nos conjuntos de dados das figuras 4.10 e 4.11a relação vapor/óleo (Rvo) não são as mesmas - por dificuldades técnicas - não foi possível avaliar isoladamente a eficiência dos filtros de 650 e 800 nm.

## 4.4 Detecção de chamas com condições extremas de excesso de ar

Excesso de ar muito elevado leva à redução da eficiência do processo e a aumento das taxas de emissão de  $CO$ . A operação com excesso de ar baixo, pode levar à taxas de emissão de  $CO$  e material particulado muito altas. Da observação das imagens da chama, extraiu-se um conjunto de imagens que têm as mesmas características e que foram tomadas em condições extremas de excesso de ar, muito alto ou muito baixo. Para a análise destas imagens foram utilizadas as imagens médias como fonte de informação. A análise deste conjunto de imagens foi focalizada sobre a região mais luminosa, que corresponde à chama. Serão utilizadas como variáveis discriminantes as características dos histogramas de tons de cinza dessas imagens e a moda destes histogramas.

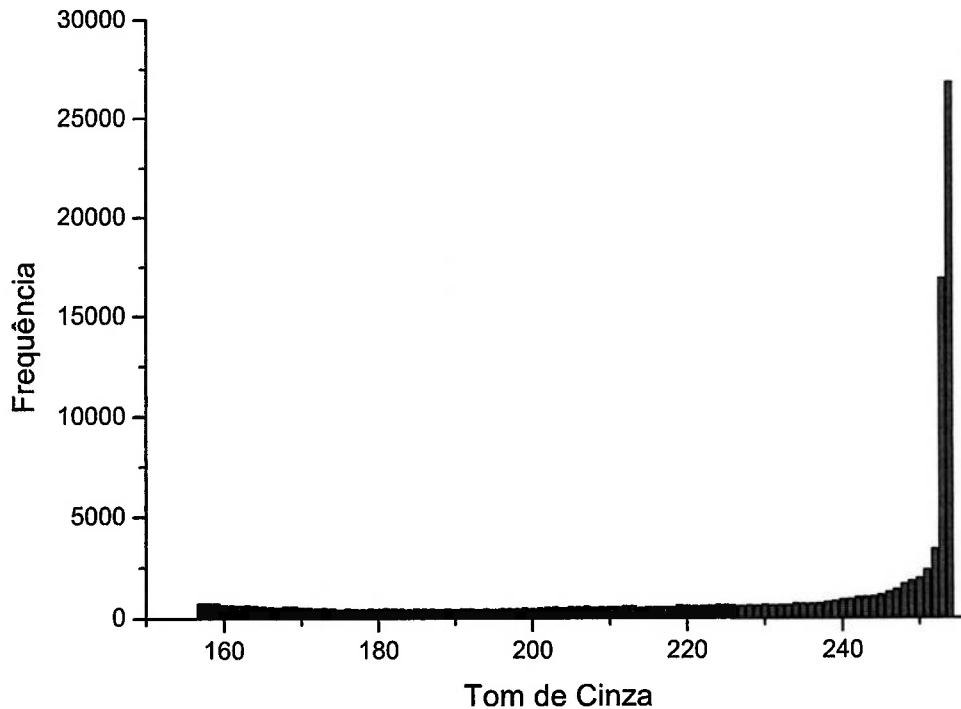
Para realizar esta análise, primeiro a imagem deve ser limiarizada para que possa ser identificada a região de interesse, da qual se irá extrair o histograma de tons de cinza. Conforme pode ser observado na figura 4.12, faz-se a subtração da imagem limiarizada menos a imagem original, esta operação deixa exposta a região mais luminosa da imagem.



**Figura 4.12:** (a) Imagem original; (b) Imagem limiarizada; (c) Região de interesse.

Na figura 4.13 é apresentado o histograma de tons de cinza da região de interesse.

A partir desses histogramas individuais construíram-se histogramas médios de tons de cinza (figuras 4.14, 4.15, 4.16) para as 03 categorias de chamas consideradas: com excesso de ar normal, com excesso de ar muito alto e com excesso



**Figura 4.13:** Histograma de tons de cinza da região de interesse da imagem

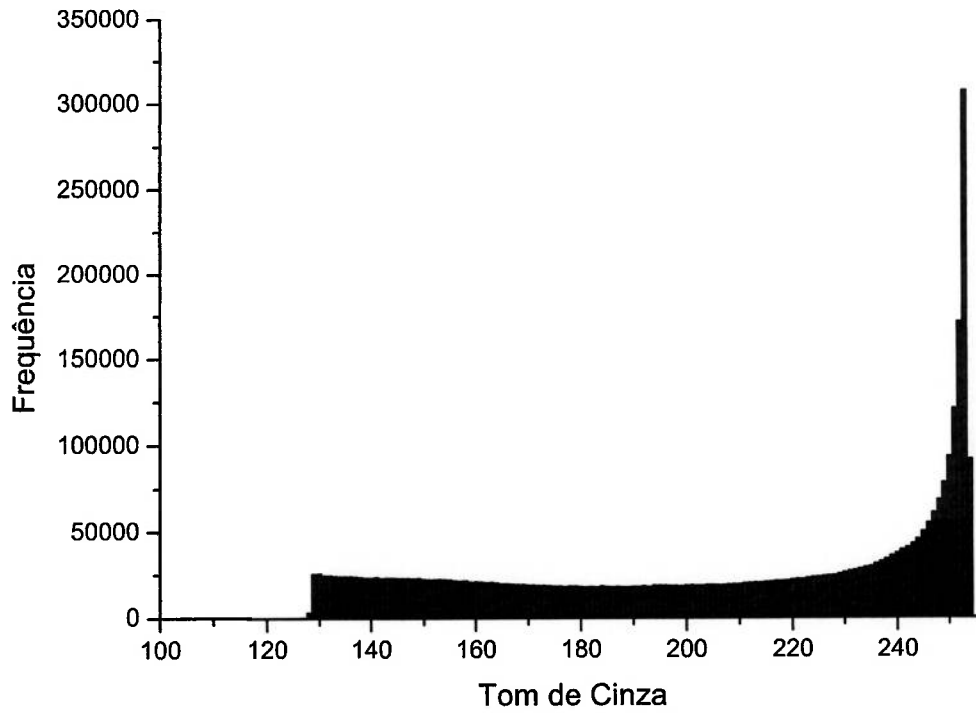
de ar muito baixo.

Observando as características de forma dos histogramas médios associados às três classes de chama, constata-se que os três apresentam modas bastante distintas entre si, portanto esta será a variável discriminatória para esta classe de defeitos no processo de combustão. A moda do histograma foi aplicada aos histogramas de tons de cinza das imagens, obtendo-se assim a distribuição de valores do parâmetro discriminatório dos conjuntos de chamas que se enquadram dentro desta classificação, estes valores são apresentados nas tabelas E.6 e E.7.

A moda do histograma apresenta valores elevados para chamas com excesso de ar baixo, apresenta valores baixos para chamas com excesso de ar alto e valores intermediários, comparado com os anteriores, para chamas com excesso de ar normal. O gráfico 4.17 representa as funções de densidade de probabilidade construídas para cada os conjuntos de chamas excesso de ar alto e baixo. No gráfico o valor médio da moda do histograma para a chama em condições de operação normal esta em torno de 6, já o valores médios para as chamas com excesso alto e baixo são 3,3 e 9,2 respectivamente. Há superposição da moda entre a função da chama normal e as chamas com excesso alto e baixo.

A figura 4.18 representa a variação das áreas médias das imagens das chamas





**Figura 4.14:** Histograma médio de tons de cinza das imagens de chama com excesso de ar muito alto.

desta condição e como elas variam com o aumento ou a redução do teor de oxigênio.

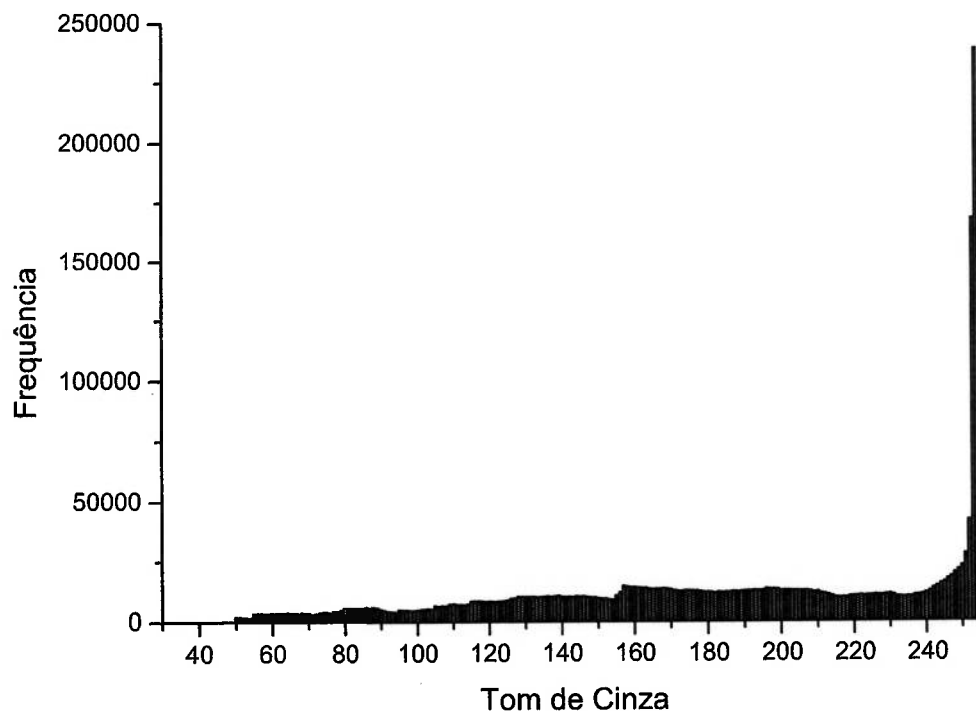


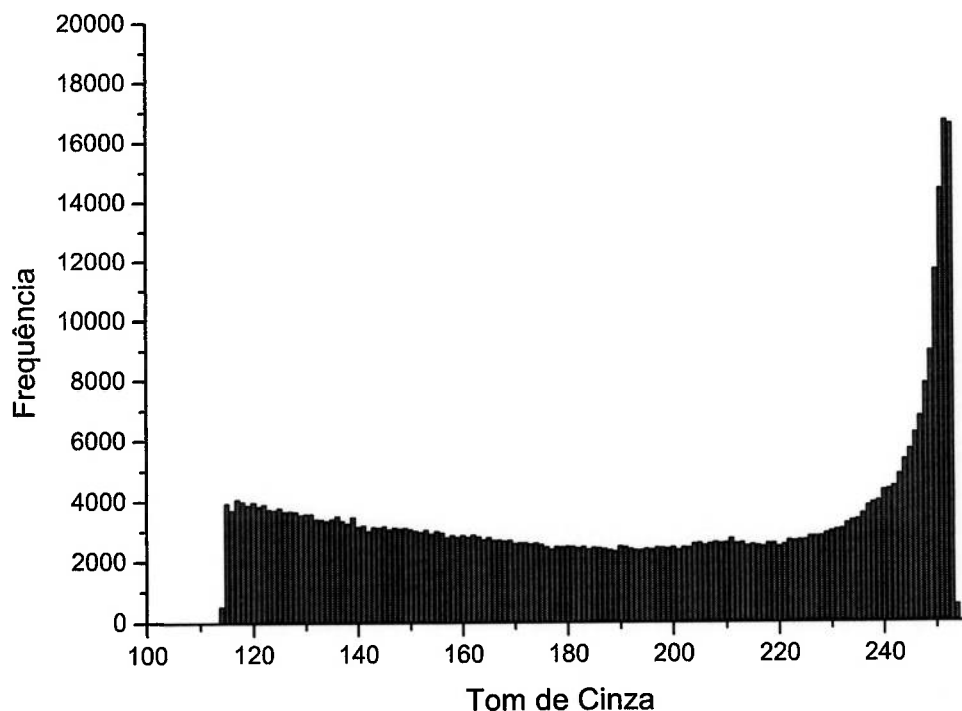
Figura 4.15: Histograma médio de tons de cinza das imagens de chamas com excesso de ar muito baixo.

## 4.5 Intensidade de Radiação Ultravioleta

O sinal do foto-detector foi adquirido para chamas em condição normal, instáveis e chamas mal nebulizadas. O sinal foi usado para comparar com o processamento de imagens.

### 4.5.1 Intensidade de Radiação Ultravioleta numa Chama Normal

Os resultados mostram a variação da tensão do foto-detector *Honeywell*. A frequência de registro dos dados foi de 1 *Hz* e para esta condição foram registrados 5940 valores. Na figura 4.19 pode-se observar que os valores da tensão do foto-detector dos quais extrai-se que o valor médio da tensão é 1,0328 *V*, o valor máximo e 2,1830*V* e o mínimo de 0,0 *V*. O valor da variância da tensão é de 0,13408.



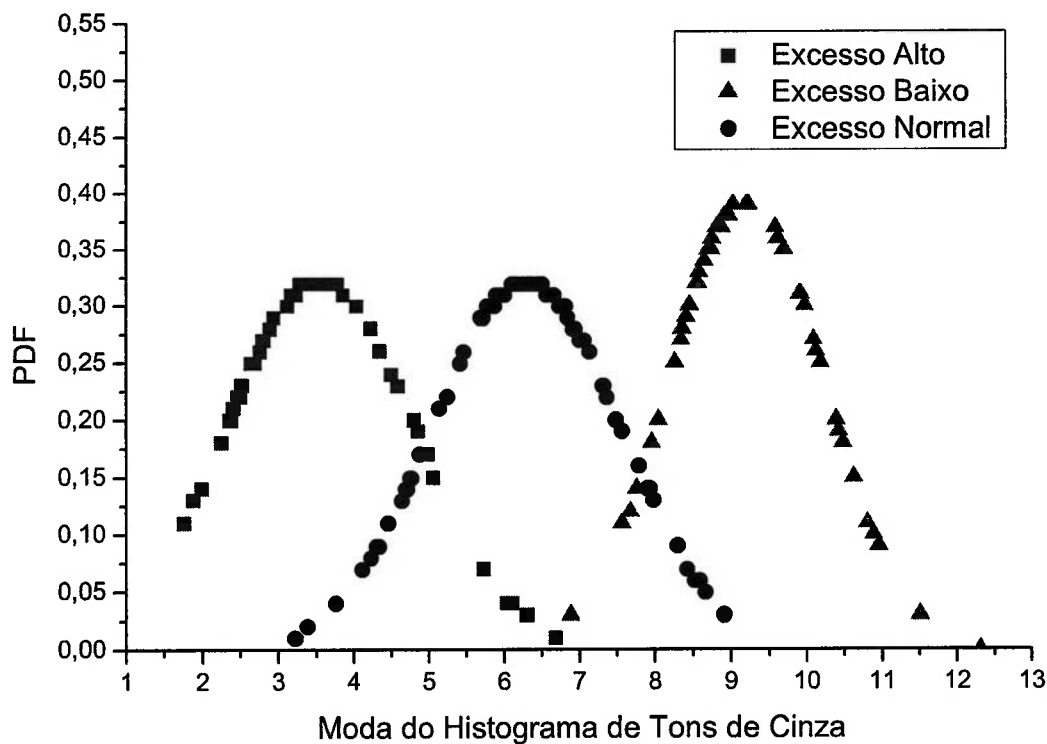
**Figura 4.16:** Histograma médio de tons de cinza das imagens de chamas com excesso de ar normal.

#### 4.5.2 Intensidade de Radiação Ultravioleta de uma Chama Instável.

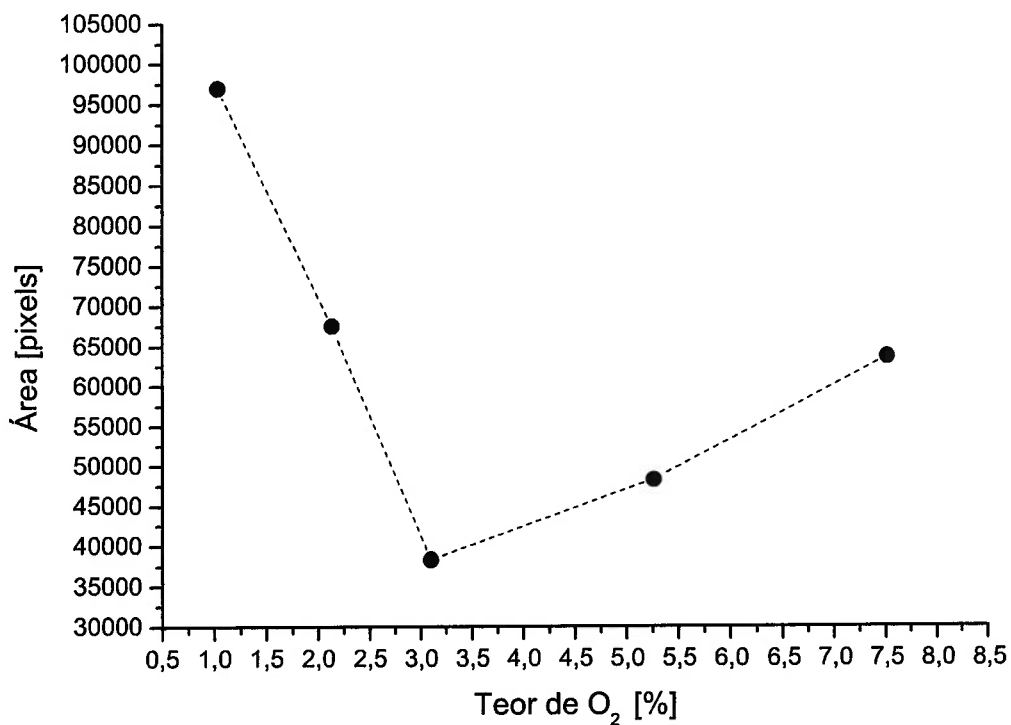
Para esta condição, o valor máximo da tensão é  $2,9390 V$ , o valor mínimo é  $0,0 V$  e o valor médio é  $0,05058 V$ . O valor da Variância é  $0,063727$ . Nesta condição se operou com uma relação de ar primário/ar secundário de  $2,33$  e uma relação vapor/óleo de  $0,33$ . Para esta condição foram registrados 5220 dados. Na figura 4.20 se observa os valores da tensão obtidos durante a operação do queimador em condições instáveis.

#### 4.5.3 Intensidade de Radiação Ultravioleta de uma Chama Má Nebulizada.

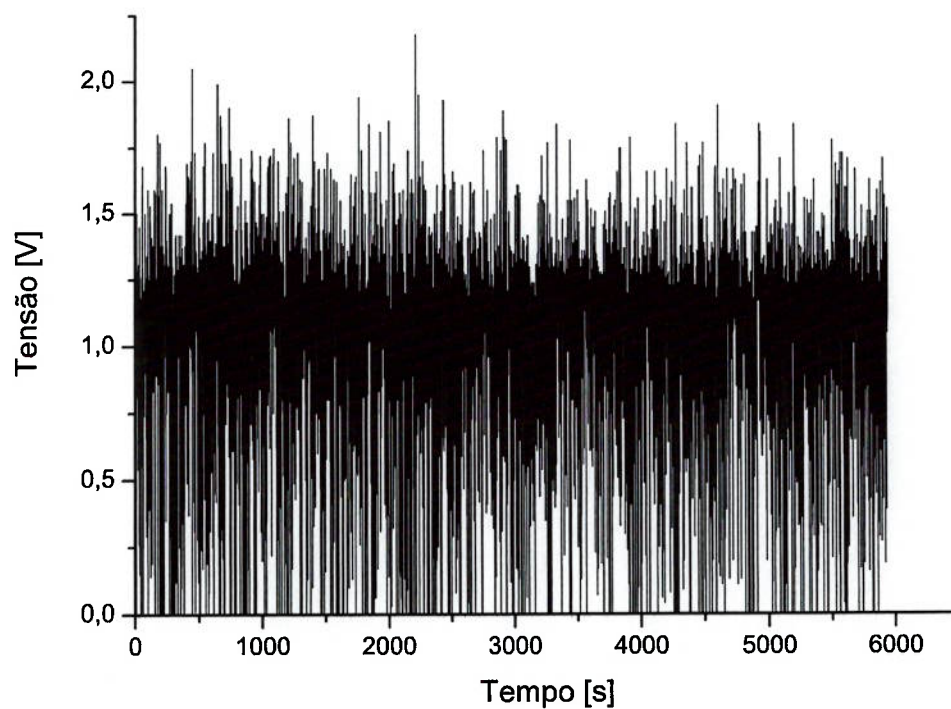
Esta condição apresenta a variação da tensão da foto-célula para uma chama má nebulizada. Nesta condição a relação vapor/óleo foi  $0,20$  e a relação ar primário/ar secundário de  $1$ . A figura 4.21 mostra os valor da tensão da foto-célula. O máximo valor da tensão é de  $2,8480 V$  e o mínimo é  $0,0 V$ . A tensão tem um valor médio de  $0,37233 V$  e a variância é  $0,45249$



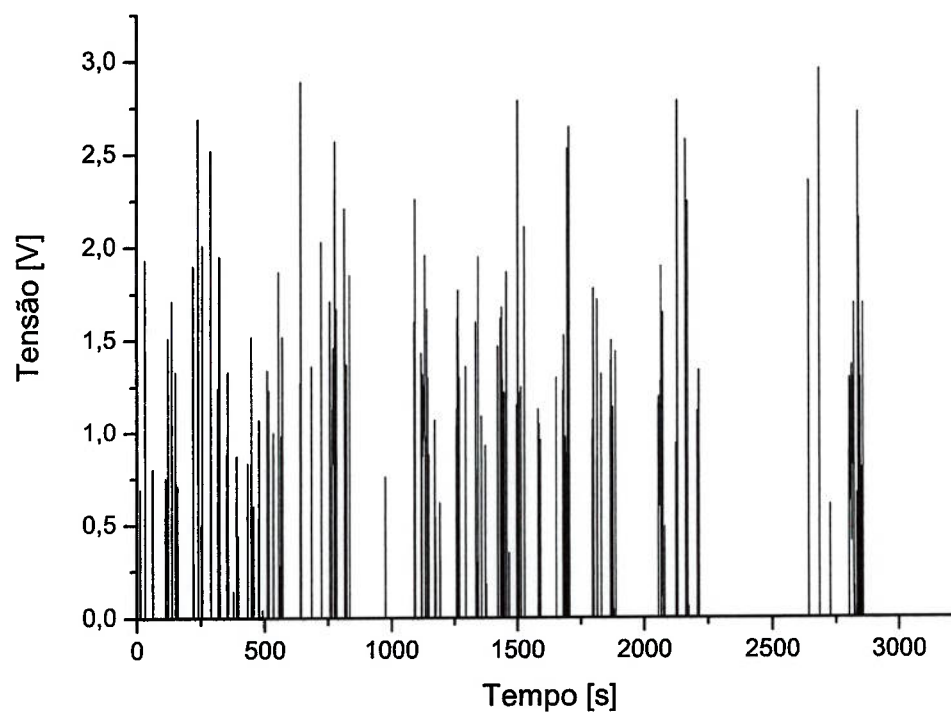
**Figura 4.17:** Funções densidade de probabilidade para os eventos Chama com Excesso de Ar Baixo, Chama com Excesso de Ar Normal e Chama com Excesso de Ar Alto.



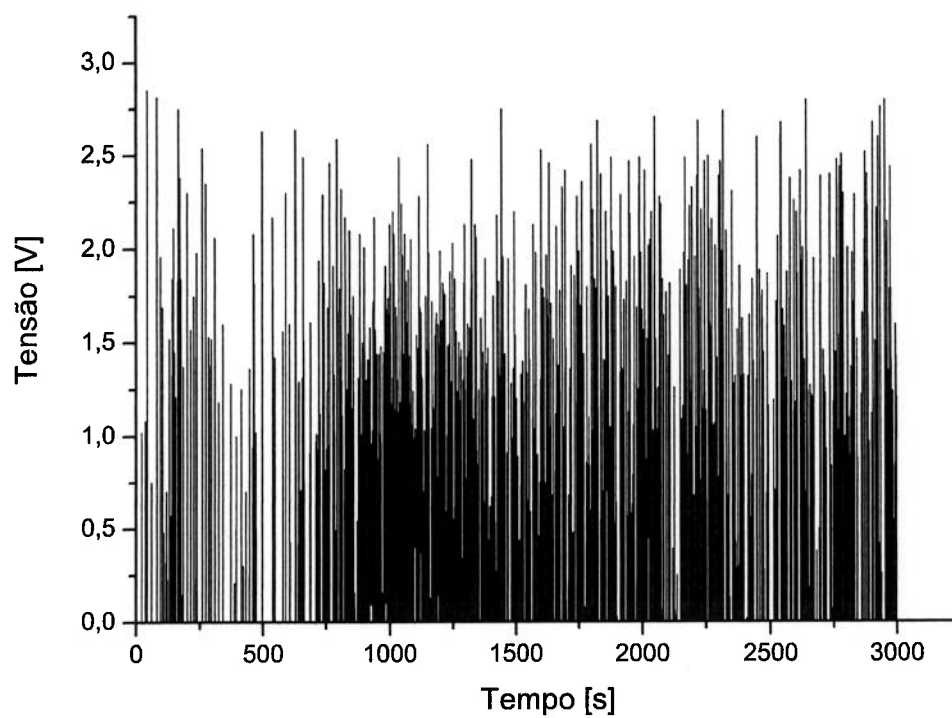
**Figura 4.18:** Áreas das imagens médias limiarizadas .



**Figura 4.19:** Variação da tensão do foto-detector na condição normal de operação.



**Figura 4.20:** Variação da tensão do foto-detector para uma condição de operação instável. Relação ar primário/ar secundário de 2,33 e uma relação vapor/óleo de 0,33.



**Figura 4.21:** Variação da tensão do foto-detector de uma chama com má nebulização. Relação vapor/óleo 0,20 e relação ar primário/ar secundário 1.

## 5 Conclusões

As medições óticas feitas no queimador estudado mostraram que a chama é sensível às mudanças na vazão de ar primário e secundário. As condições nas quais a vazão de ar primário foi incrementada e a vazão de ar secundário diminuída (razão ar primário/ar secundário  $> 1$ ) mostraram instabilidades, as quais foram detectadas pela inspeção da base da chama e confirmadas pela sinal do foto-detector. O sinal do foto-detector atingiu o seu valor máximo de tensão na medição da chama em condições normais, para todas as outras condições esta sinal caiu para menos de 1 V.

A redução na vazão de vapor de nebulização (razão vapor/óleo  $< 0,33$ ) contribuiu com a má nebulização do combustível. Este defeito no processo de combustão foi caracterizado pelo aumento no número do objetos nas sub-imagens da ponta da chama. O incremento da vazão de vapor, melhorou as condições de nebulização, porém combinado com o aumento da relação de ar primário/ar secundário facilitou o início das instabilidades.

Depois do processamento das imagens, se observou que o descolamento no queimador estudado foi caracterizado pelo tom de cinza médio na base da chama. No caso de operação normal o valor médio do tom de cinza é  $127 \pm 1$  para as imagens feitas com o filtro de 650 nm e  $117 \pm 1$  para as imagens feitas com o filtro de 800 nm. Para qualquer valor inferior a esta média, a chama será considerada uma chama instável.

Para o defeito de má nebulização foi considerado o número de objetos como o parâmetro discriminante. Para chamas em condição normal de operação o número médio de objetos é 4. O incremento no número de objetos é um sinal de má nebulização.

Em chamas com excesso de  $O_2$ , a moda do histograma de tons de cinza para chamas com excesso de  $O_2$  normal (3%) é 6. Vê-se que o valor da moda para chamas com excesso de  $O_2$  alto aumenta e para chamas com excesso de  $O_2$  baixo, este valor diminui. Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se: variação

paramétrica (experimento fatorial) das variáveis de entrada do queimador para obter o mapa de operação estável do queimador e associa-lo à técnica de análise de imagens estudada neste trabalho. Complementar este dados com informação das flutuações de pressão dentro da câmara.



## Anexo A – Tabela de distribuição t de Student

### Distribuição t de Student - $t_n$

Os valores tabelados correspondem aos pontos  $x$  tais que:  $P(t_n \leq x)$

n	$P(t_n \leq x)$							
	0,600	0,750	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995	0,9995
1	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,260	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,259	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,259	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,258	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,258	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,258	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,257	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,257	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,257	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,257	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,257	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,256	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,256	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,256	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,256	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,256	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,256	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,256	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,256	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,256	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,255	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,254	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,254	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
$\infty$	0,253	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

## Anexo B – Características dos Óleos Combustíveis

ÓLEO COMBUSTÍVEL TIPO	PONTO DE FULGOR, °C	PONTO DE FLUIDEZ, °C	TEOR DE ENXOFRE, % PESO	ÁGUA E SEDIMENTOS, % VOLUME	VISCOSIDADE, SSF A 50°C	DENSIDADE RELATIVA, 20/4°C	PODER CALORÍFICO SUPERIOR, kcal/kg	TEMPERATURA DE ARMAZENAGEM, °C (5000 SSU)	TEMPERATURA DE NEBULIZAÇÃO, °C (100 SSU)
	TÍPICO	TÍPICO	MÁXIMO	MÁXIMO	MÁXIMO	TÍPICO	TÍPICO		
1A	92	6	5.0	2.0	600	1.009	10008	52	135
1B	74	8	1.0	2.0	600	0.957	10388	52	135
2A	89	10	5.5	2.0	900	1.000	10059	58	153
2B	74	3	1.0	2.0	900	0.959	10386	58	153
3A	104	21	5.5	2.0	2400	1.017	9891	70	170
3B	-	-	1.0	2.0	2400	-	-	70	170
4A	185	33	5.5	2.0	10000	1.030	9860	85	190
4B	> 80	-	1.0	2.0	10000	0.980	10276	85	190
5A	-	-	5.5	2.0	30000	-	-	100	206
5B	-	-	1.0	2.0	30000	-	-	100	206
6A	183	-	5.5	2.0	80000	1.020	9930	110	218
6B	-	-	1.0	2.0	80000	-	-	110	218
7A	238	80	5.5	2.0	300000	1.031	9843	120	234
7B	> 100	-	1.0	2.0	300000	1.001	10212	120	234
8A	-	-	5.5	2.0	1000000	1.045	9987	130	248
8B	> 100	-	1.0	2.0	1000000	1.004	10188	130	248
9A	-	-	5.5	2.0	sem limite	-	-	-	-
9B	-	-	1.0	2.0	sem limite	-	-	-	-

# Anexo C – Detetor de chama Ultravioleta

## MINIPEEPER® ULTRAVIOLET FLAME DETECTORS

### SPECIFICATIONS

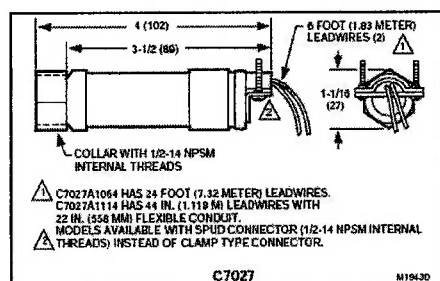


Fig. 1. Installation dimensions of C7027A in in. (mm).

### C7027A Minipeeper® Ultraviolet Flame Detector:

**Ambient Operating Temperature Ratings:** 0°F to 215°F (-18°C to 102°C), or -40°F to 215°F [-40°C to +102°C], depending on model.

**Maximum Pressure Rating:** 5 psi (34.5 kPa).

**Mounting:** Collar with 1/2-14 NPSM internal threads for mounting on a 1/2 in. sight pipe.

**Wiring Connections:** Two 6 ft [1.83 m], color-coded, NEC Class 1 leadwires, rated for 221°F (105°C). (C7027A1064 has 24 ft [7.32 m] leadwires.) Rear of detector has a clamp type connector for 1/2 in. flexible metallic conduit. (Models are available with 1/2 in. internally threaded spud connector instead of the clamp). C7027A1114 has 44 in. (1.118 m) leadwires and 22 in. (558 mm) flexible conduit.

**Dimensions:** See Fig. 1.

**Replacement Part:** 129685 Flange Gasket.

**NOTE:** The ultraviolet radiation sensing tube is not field replaceable.

#### Accessory:

136733 Heat Block, laminated plastic, insulating the flame detector from sight pipe temperatures up to 266°F (130°C), 1/2-14 NPSM external threads on one end and 1/2-14 NPSM internal threads on the other end (see Fig. 8). Included with C7027A1080.  
390427B Bushing, for mounting to 3/8 in. sight pipe. Included with C7027A1080.

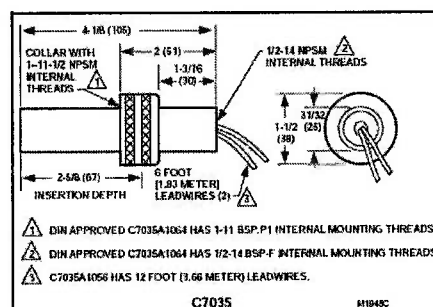


Fig. 2. Installation dimensions of C7035A in in. (mm).

### ORDERING INFORMATION

When purchasing replacement and modernization products from your TRADELINE® wholesaler or distributor, refer to the TRADELINE® Catalog or price sheets for complete ordering number.

If you have additional questions, need further information, or would like to comment on our products or services, please write or phone:

1. Your local Home and Building Control Sales Office (check white pages of your phone directory).
2. Home and Building Control Customer Relations  
Honeywell, 1885 Douglas Drive North  
Minneapolis, Minnesota 55422-4386 (800) 328-5111

In Canada—Honeywell Limited/Honeywell Limitée, 35 Dynamic Drive, Scarborough, Ontario M1V 4Z9.

International Sales and Service Offices in all principal cities of the world, Manufacturing in Australia, Canada, Finland, France, Germany, Japan, Mexico, Netherlands, Spain, Taiwan, United Kingdom, U.S.A.

## Anexo D – Dados sobre as incertezas

Tabela D.1: Valores médios dos tons de cinza obtidas das imagens da chama.

n	$x_i$ (Tom de Cinza)
1	80,4
2	72,3
3	91,5
4	83,8
5	77,2
6	78,9
7	78,8
8	85,3
9	78,3
10	79,2
11	82,2
12	79,0
13	88,7
14	82,3
15	82,7
16	85,2
17	88,7
18	86,3
19	81,9
20	86,3
21	84,7
22	87,5
23	87,7
24	80,6
25	87,3
26	83,3

*continua...*

**Tabela D.1:** Valores médios dos tons de cinza obtidas das imagens da chama  
(continuação).

n	$x_i$ (Tom de Cinza)
27	84,9
28	83,5
29	81,1
30	85,9
Média	83,2

**Tabela D.2:** Valores das áreas das imagens da chama.

n	$x_i$ (pixels)
1	40443
2	37209
3	39903
4	32407
5	38063
6	34586
7	36213
8	32164
9	39212
10	44772
11	37534
12	33093
13	37005
14	35941
15	30322
16	40662
17	38453
18	41784
19	33976
20	42571
21	35601
22	35344
23	34917
24	37327
25	37734
26	41354
27	36275
28	38155
29	40444
30	29724
Média	37106

## Anexo E – Resultados

Tabela E.1: Tom de cinza médio para imagens de Chama Presente e Chama Ausente.

Chama Presente				Chama Ausente			
con1	con2	con3	con4	con1	con2	con3	con4
62,7	84,9	81,1	80,4	28,9	47,0	56,2	47,5
66,3	82,1	85,9	72,3	25,8	37,3	43,5	34,7
65,6	84,9	78,0	91,5	24,3	33,2	37,6	30,0
60,5	87,9	81,9	83,8	23,3	30,5	34,1	28,1
71,8	80,9	86,3	77,2	22,7	28,6	31,6	26,8
60,2	86,7	84,7	78,9	22,1	27,3	30,2	25,4
71,4	86,8	87,5	78,8	21,8	26,3	28,6	24,7
	72,3	87,7	85,3	21,6	25,5	27,5	24,4
	68,2	80,6	78,3	21,2	24,8	26,6	23,7
	72,8	87,3	79,2	21,1	24,3	26,0	23,5
		83,3	82,2	20,8	23,8	25,3	23,0
		84,9	79,0	20,8	23,5	24,7	22,6
		83,5	88,7	20,8	23,2	24,3	22,6
			82,3	20,7	22,9	24,0	22,3
			82,7	20,6	22,6	23,6	22,2
			85,2	20,5	22,4	23,4	21,9
			88,7	20,4	22,3	23,0	21,8
			86,3	20,4	22,0	22,9	21,8
				20,4	22,0	22,5	21,6
				20,3	21,8	22,5	21,7
				20,1	21,7	22,3	21,2
				20,1	21,5	22,1	21,2
				20,1	21,4	21,9	21,3
				20,1	21,3	21,9	21,3

*continua...*

**Tabela E.1:** Tom de cinza médio para imagens de Chama Presente e Chama Ausente (continuação).

Chama Presente				Chama Ausente			
con1	con2	con3	con4	con1	con2	con3	con4
				20,1	21,3	21,9	21,3
				20,0	21,2	21,6	20,7
				20,1	21,2	21,5	20,9
				20,0	21,1	21,5	20,9
				20,0	20,9	21,4	21,2
				20,0	21,0	21,3	20,7
					20,8	21,1	21,1
					20,9	21,2	20,8
						21,1	20,7
						21,0	20,5
						21,1	20,7
						20,9	20,5
						20,8	20,6
							20,5
							20,6
Tons de cinza médios - Chama Presente				Tons de cinza médios - Chama Ausente			
67,2	84,8	82,9	80,4	21,3	24,6	25,5	23,1



Tabela E.2: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 nm.

Chamas Estável	Chamas Instáveis					
	ArPaRS=500/500	ArPaRS=600/400	ArPaRS=650/350	ArPaRS=700/300	ArPaRS=750/250	ArPaRS=800/200
157,2	113,9	113,1	89,1	41,0	34,8	
146,8	110,1	117,4	89,5	22,5	21,9	
142,4	107,6	105,4	80,5	22,5	27,1	
140,5	111,1	109,3	85,9	22,0	24,6	
136,8	107,5	114,7	86,0	39,8	35,8	
134,7	108,4	112,4	86,4	44,1	28,7	
132,8	109,3	112,5	84,5	22,9	24,0	
129,6	124,7	104,2	83,7	30,4	29,3	
130,0	123,7	110,2	87,8	27,5	23,5	
125,6	124,3	117,0	90,5	27,5	32,3	
126,4	119,3	108,7	87,2	32,9	27,5	
125,0	121,4	113,6	86,4	24,5	28,5	
124,1	120,3	107,7	83,5	28,8	31,4	
123,8	118,0	107,3	76,3	21,9	29,7	
123,1	119,8	106,8	86,7	26,3	28,2	
120,6	120,2	105,9	87,3	25,0	24,9	

*continua...*

Tabela E.2: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 nm (continuação).

Chamas Estável		Chamas Instáveis				
ArPARS=500/500		ArPARS=600/400	ArPARS=650/350	ArPARS=700/300	ArPARS=750/250	ArPARS=800/200
120,6		120,8	110,2	80,1	29,4	26,5
116,0		120,1	107,8	79,6	25,1	31,9
118,4		101,9	107,8	85,7	28,7	25,3
115,2		105,3	104,2	80,2	24,1	27,1
152,0		109,6	107,5	76,4	26,7	27,2
144,6		106,0	99,7	85,3	23,3	35,6
141,4		113,8	109,3	86,7	25,9	44,7
138,6		115,9	101,7	77,1	25,8	22,0
135,7		113,5	108,1	84,2	28,2	25,0
133,7		114,1	105,6	72,6	25,3	27,4
131,2		113,6	114,5	82,4	23,9	40,2
129,8		122,5	107,1	79,2	24,8	22,4
127,8		124,0	102,0	81,1	25,6	22,7
126,0		112,0	104,6	77,7	26,1	23,0
125,7		108,8	107,1	84,1	24,7	23,2

continua...

Tabela E.2: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 nm (continuação).

Chamas Estável	Chamas Instáveis					
	ArPaRS=500/500	ArPaRS=600/400	ArPaRS=650/350	ArPaRS=700/300	ArPaRS=750/250	ArPaRS=800/200
124,5	109,3	110,8	80,7	24,8	22,0	22,0
123,9	124,2	102,3	84,0	27,5	22,5	22,5
123,4	121,8	103,2	72,5	25,9	23,0	23,0
121,8	120,3	116,8	73,8	23,8	22,2	22,2
140,0	111,7	105,9	73,3	24,2	22,0	22,0
118,3	108,0	98,0	75,7	27,5	25,5	25,5
117,2	110,7	102,5	78,4	24,5	24,2	24,2
116,8	113,5	105,0	80,9	26,1	22,7	22,7
133,6	113,0	108,1	80,2	25,1	22,0	22,0
131,5	123,1	104,8	77,7	28,1	25,6	25,6
128,7	117,5	104,8	74,7	23,1	24,9	24,9
129,6	119,8	104,0	79,9	26,3	23,4	23,4
128,4	112,1	112,2	67,9	23,3	28,4	28,4
127,5	116,3	109,1	74,5	23,8	23,0	23,0
126,9	112,3	103,8	75,2	23,5	29,7	29,7

continua...

Tabela E.2: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 650 nm (continuação).

Chamas Estável		Chamas Instáveis			
ArPARS=500/500	ArPARS=600/400	ArPARS=650/350	ArPARS=700/300	ArPARS=750/250	ArPARS=800/200
126,4	106,8	106,0	81,2	23,5	24,9
127,2	103,2	108,8	73,1	26,8	26,4
123,2	114,3	99,2	65,8	28,0	24,7
133,2	110,9	100,7	76,2	24,5	23,7
Tons de cinza médios - Chama Estável					
127,7	114,6	107,4	80,6	26,5	26,7
Tons de cinza médios - Chamas Instáveis					

Tabela E.3: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 800 nm.

Chama Estável	Chamas Instáveis		
	ArPARS=500/500	ArPARS=500/500	ArPARS=600/400
121,3	67,3	35,8	22,4
121,9	67,9	55,5	24,1
119,4	67,2	54,1	23,5
122,0	68,1	57,3	23,6
120,1	66,9	57,4	24,0
121,9	68,1	59,4	23,5
119,1	68,7	53,3	23,8
121,2	68,3	51,0	23,8
121,1	68,0	55,5	23,0
122,9	68,5	56,2	23,7
118,0	68,5	33,1	29,3
120,0	68,1	49,1	23,5
118,1	68,0	26,7	23,1
117,4	68,5	42,8	63,5
120,9	68,1	49,6	23,7
118,1	67,9	25,1	23,6

*continua...*

Tabela E.3: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 800 nm.  
(continuação)

Chama Estável	Chamas Instáveis		
	ArPARS=500/500	ArPARS=600/400	ArPARS=600/400
118,0	68,0	31,6	26,0
115,7	68,4	24,8	23,3
120,0	68,8	23,8	23,8
116,6	67,9	24,3	23,4
120,1	68,0	24,5	23,7
117,9	69,0	43,5	67,5
116,8	68,7	58,3	24,1
116,4	67,7	43,9	23,9
116,1	68,6	30,8	23,7
117,8	68,0	25,2	23,4
115,2	68,2	51,9	23,3
118,5	68,1	41,1	23,8
115,9	68,3	42,6	23,3
117,9	68,2	46,9	23,2
116,2	68,1	34,6	23,8

*continua...*

**Tabela E.3:** Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 800 nm.  
(continuação)

Chama Estável	Chamas Instáveis		
	ArPARS=500/500	ArPARS=500/500	ArPARS=600/400
117,1	68,3	55,8	23,8
118,9	68,3	26,6	23,5
117,1	68,4	24,0	23,5
116,1	67,9	64,0	23,4
115,6	68,5	55,9	24,0
115,6	67,6	40,7	57,7
118,0	67,7	34,9	23,6
116,4	68,2	24,8	23,5
113,2	67,3	35,2	23,7
115,7	67,8	25,4	23,3
113,0	66,9	24,4	23,1
116,9	67,3	24,8	23,3
115,0	67,8	35,7	
116,3	67,5	37,2	
117,5	67,4	26,4	

*continua...*

Tabela E.3: Tom de cinza médio para sub-imagem da raiz de Chama Estável e Chama Instável e filtro interferométrico de 800 nm.  
(continuação)

Chama Estável	Chamas Instáveis		
ArPArS=500/500	ArPArS=500/500	ArPArS=600/400	ArPArS=600/400
118,7	67,5	36,8	
117,1	67,7	51,4	
118,8	67,7	25,2	
119,2	67,5	25,0	
Tom de cinza médio - Chama Estável	Tom de cinza médio - Chamas Instáveis		
117,97	67,99	39,68	26,48



Tabela E.4: Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 650 nm.

Chamas Com Boa Nebulização		Chamas Com Má Nebulização	
vap/ar = 0,33		vap/ar = 0,25    vap/ar = 0,30	
5,00	8,00	5,00	27,00
13,00	10,00	20,00	34,00
6,00	5,00	11,00	70,00
2,00	12,00	15,00	43,00
5,00	16,00	6,00	61,00
6,00	4,00	5,00	12,00
3,00	7,00	15,00	24,00
8,00	6,00	20,00	81,00
3,00	13,00	10,00	73,00
1,00	7,00	15,00	29,00
4,00	9,00	11,00	31,00
1,00	8,00	7,00	80,00
4,00	4,00	21,00	56,00
11,00	8,00	8,00	21,00
4,00	10,00	12,00	61,00

*continua...*

**Tabela E.4:** Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 650 nm (continuação).

Chamas Com Boa Nebulização		Chamas Com Má Nebulização		
vap/ar = 0,33		vap/ar = 0,20	vap/ar = 0,25	vap/ar = 0,30
3,00		8,00	16,00	30,00
2,00		9,00	4,00	16,00
4,00		19,00	16,00	61,00
3,00		2,00	11,00	14,00
4,00		8,00	11,00	19,00
Nº médio de objetos - Chama com Boa Nebulização		Nº médio de objetos - Chama com Má Nebulização		
4,6		8,6      11,9      42,1		

**Tabela E.5:** Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 nm.

Chamas Com Boa Nebulização		Chamas Com Má Nebulização	
vap/ar = 0,33		vap/ar = 0,05	
		vap/ar = 0,11	
14,00	16,00	29,00	
14,00	21,00	16,00	
22,00	16,00	21,00	
12,00	7,00	20,00	
12,00	15,00	17,00	
8,00	17,00	13,00	
18,00	13,00	15,00	
15,00	8,00	19,00	
12,00	16,00	20,00	
12,00	5,00	28,00	
9,00	10,00	4,00	
10,00	8,00	4,00	
7,00	14,00	16,00	
15,00	17,00	15,00	
11,00	10,00	12,00	

*continua...*

**Tabela E.5:** Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 nm (continuação).

Chamas Com Boa Nebulização vap/ar = 0,33	Chamas Com Má Nebulização vap/ar = 0,05	vap/ar = 0,11
11,00	9,00	11,00
7,00	20,00	11,00
11,00	28,00	42,00
25,00	15,00	30,00
12,00	22,00	17,00
9,00	8,00	6,00
13,00	19,00	20,00
10,00	9,00	14,00
11,00	10,00	17,00
8,00	17,00	23,00
17,00	13,00	16,00
13,00	7,00	5,00
13,00	15,00	36,00
11,00	21,00	33,00
9,00	22,00	10,00

*continua...*

Tabela E.5: Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamas feitas com filtro interferométrico de 800 nm (continuação).

Chamas Com Boa Nebulização	Chamas Com Má Nebulização	
vap/ar = 0,33	vap/ar = 0,05	vap/ar = 0,11
8,00	10,00	44,00
11,00	26,00	11,00
15,00	7,00	7,00
6,00	9,00	20,00
22,00	15,00	5,00
15,00	18,00	11,00
10,00	17,00	9,00
12,00	9,00	10,00
17,00	18,00	17,00
11,00	17,00	39,00
14,00	14,00	8,00
20,00	7,00	19,00
12,00	14,00	20,00
13,00	20,00	23,00
14,00	15,00	3,00

*continua...*

**Tabela E.5:** Número de objetos para sub-imagem de Chama com Boa Nebulização e Chama com Má Nebulização para chamadas feitas com filtro interferométrico de 800 nm (continuação).

Chamas Com Boa Nebulização vap/ar = 0,33	Chamas Com Má Nebulização vap/ar = 0,05	vap/ar = 0,11
11,00	7,00	3,00
11,00	13,00	11,00
17,00	10,00	6,00
7,00	19,00	36,00
28,00	8,00	15,00
Nº médio de objetos - Chama com Boa Nebulização 12,90	Nº médio de objetos - Chama com Má Nebulização 14,02	17,14

**Tabela E.6:** Distribuição da moda do histograma de tons de cinza para Chama com Excesso de Ar Normal.

con1	con2	con3	con4
6,47	8,30	6,82	4,11
6,38	6,18	5,93	5,69
6,11	6,57	6,15	4,88
7,14	6,51	6,78	4,46
7,33	6,45	6,60	4,23
6,26	6,61	5,81	3,22
7,31	7,98	6,46	4,64
5,78	7,57	7,79	4,75
5,73	5,84	8,66	4,71
6,79	5,42	7,93	3,76
6,95	7,49	6,93	5,25
6,60	6,34	7,01	3,38
6,27	5,85	8,52	5,88
6,01	7,49	6,46	6,33
6,92	4,69	4,77	5,99
6,85	8,91	4,34	7,37
5,90	7,07	8,59	5,47
4,30	6,93	6,15	6,24
5,14	7,90	8,42	6,76
7,14	6,74	5,92	6,67
Moda média do histograma de tons de cinza			
6,37	6,84	6,80	5,19

**Tabela E.7:** Distribuição da moda do histograma de tons de cinza para Chama com Excesso de Ar Muito Alto e Chama com Excesso de Ar Muito Baixo.

Excesso De Ar Muito Alto			Excesso de Ar Muito Baixo			
5% O <sub>2</sub>		7% O <sub>2</sub>	1% O <sub>2</sub>		2% O <sub>2</sub>	
con1	con2	con1	con1	con2	con1	con2
3,17	3,12	3,78	8,80	10,13	9,12	9,81
2,25	2,81	3,63	8,72	10,71	7,61	8,63
2,38	1,99	4,99	9,22	10,06	9,91	8,63
2,64	2,36	6,69	9,96	9,04	7,16	9,04
2,50	3,49	6,30	8,93	10,12	8,7	10,31
1,76	1,76	4,23	9,04	10,45	8,09	8,3
2,89	2,41	4,04	9,10	9,98	8,58	10,43
2,51	3,71	4,58	9,63	10,19	8,99	8,66
2,80	2,94	3,98	8,58	10,4	7,76	9,7
4,35	3,69	4,59	7,68	8,89	9,62	8,76
1,88	3,59	3,23	9,21	9,59	8,92	6,89
2,51	2,25	4,59	7,96	10,63	8,55	8,37
2,69	2,40	3,65	8,35	12,31	8,27	8,46
4,23	2,76	3,47	10,43	9,04	8,36	8,59
3,34	2,52	3,27	8,36	8,46	9,03	8,75
2,79	3,66	3,51	9,71	9,23	8,05	10,13
3,28	3,86	3,47	10,49	8,71	10,81	10,96
2,46	2,65	3,70	8,47	8,66	7,57	9,93
3,66	2,52	4,80	11,51	8,42	10,89	9,91
4,86	3,63	4,50	9,63	9,24	10,1	8,82
Moda média do histograma de tons de cinza						
Chama com excesso de ar alto			Chama com excesso de ar baixo			
2,95	2,91	4,25	9,19	9,71	8,8	9,15



## Referências

BROADWELL, J. E.; DAHM, W. J. A.; MUNGAL, M. G. Blowout of turbulent flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 20, p. 303–310, 1984.

CHAO, Y.-C.; WU, C.-Y.; LEE, K.-Y.; LI, Y.-H.; CHEN, R.-H.; CHENG, T.-S. Effects of dilution on blowout limits of turbulent jet flames. *Combustion Science and Technology*, v. 176, n. 10, p. 1735 – 1753, out. 2004.

GHOSAL, S.; VERVISCH, L. Stability diagram for lift-off and blowout of a round jet laminar diffusion flame. *Combustion and Flame*, v. 123, p. 646–655, 2001.

HORN, B. K. P. *Robot Vision*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1986. (The MIT electrical Engineering and Computers Science Series). ISBN 0070303495.

KALGHATGI, G. T. Blowout stability og gaseous jet diffusion flames. part i: In still air. *Combustion and Flame*, v. 26, p. 233–239, 1981.

MARTINS., F. P. R. *Sistema Integrado de Visão Computacional*. Avenida Prof. Almeida Prado, 532., 2006.

MARTINS, F. P. R.; SOUSA, F. D. A.; TANNURI, E. A.; NODA, M. K. *Sistema Computacional para Monitoramento e Diagnóstico de Defeitos de Chamas de Fornos de Refino em Tempo Real: Simulaç?es, Testes e Especificaç?es*. Avenida Prof. Almeida Prado, 532., 2007.

MUNIZ, L.; MUNGAL, M. Instantaneous flame stabilization velocity in lifted jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, v. 111, p. 16–31, 1997.

NAIR, S.; LIEUWEN, T. Acoustic detection of imminent blowout in pilot and swirl stabilized combustors. *AIAA*, jun. 2003.

OTSU, N. A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, v. 9, p. 62–66, mar. 1979.

PACÍFICO, A. L.; FURNARI, F.; SOUSA, F. D. A. de. *Otimização de Conjuntos Queimadores para Fornos Petroquímicos*. Avenida Prof. Almeida Prado, 532., 2004.

PETERS, N.; WILLIAMS, F. A. Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames. *AIAA*, v. 21, n. 3, p. 423–429, mar. 1983.

POPE, S. B. *Turbulent Flows*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

PRATT, W. K. *Digital Image Processing*. Fourth edition. Los Altos, California.: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey., 2007. ISBN 978-0-471-76777-0.

- ROSSINI, E. G.; KRENZINGER, A. Maps of sky relative radiance and luminance distributions acquired with a monochromatic ccd camera. *Solar Energy*, n. 81, p. 1323–1332, ago. 2007.
- RUSS, J. C. *Image Processing Handbook*. 5th. ed. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 0-8493-7254-2.
- SCHEFER, R. W.; GOIX, P. J. Mechanism of flame stabilization in turbulent, lifted-jet flames. *Combustion and Flame*, v. 112, n. 4, p. 559–574, mar. 1998.
- SOUSA, F. D. A.; MARTINS, F. P. R.; BRUNA, W. *Desenvolvimento de sistemas avançados de monitoração de chamas em fornos de refino*. Avenida Prof. Almeida Prado, 532., 2003.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. *A First Course in Turbulence*. Cambridge: MIT press, 1972. ISBN 0-262-200198.
- URNS, S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. United states of America: McGraw-Hill, 1996. (McGraw-Hill series in Mechanical Engineering). ISBN 0-07-911812-7.
- VANQUICKENBORNE, L.; TIGGELEN, A. V. The stabilization mechanism of lifted diffusion flames. *Combustion and Flame*, v. 10, p. 59–69, 1966.
- WU, C. Y.; CHAO, Y. C.; CHENG, T. S.; LI, Y. H.; LEE, K. Y.; YUAN, T. The blowout mechanism of turbulent jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, v. 145, p. 481–494, 2006.
- WU, Y.; AL-RAHBI, I. S.; LU, Y.; KALGHATGI, G. T. The stability of turbulent hydrogen jet flames with carbon dioxide and propane addition. *Fuel*, v. 86, n. 12-13, p. 840–1848, dez. 2006. ISSN 0016-2361.