



**TÉCNICO**  
LISBOA

## **Caracterização Experimental de uma Bomba Ejetora**

**Nelson Jorge da Silva Capela**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

**Júri**

Presidente: Prof. Doutor Mario Costa

Orientador: Prof. Doutor Edgar Fernandes

Arguente: Doutora Ana Moita

Vogais: TCor Eng. MAT João Silva

Cap Eng. MAT Ricardo Fernandes

**Dezembro de 2012**



# Agradecimentos

Desejo manifestar os mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para concluir o trabalho com êxito, pelo que esta dissertação não estaria completa sem focar este ponto, com especial referência:

Ao meu orientador científico, o Professor Doutor Edgar Caetano Fernandes, por todo o apoio, todos os conselhos, opiniões, motivação e todo o conhecimento científico que me transmitiu ao longo deste trabalho e sobretudo pela paciência que teve comigo.

Agradeço ao Teodoro Trindade, à Janaína Merícia e ao Edmundo Ferreira que me acompanharam durante os últimos meses de trabalho e sempre demonstraram total prontidão em ajudar-me em tudo o que necessitei.

Ao meu diretor de curso, o Tenente-Coronel Eng.º João Paulo Barreiros Pereira da Silva, pelo apoio prestado em qualquer altura ou na resolução de qualquer problema e pela motivação dada durante a realização do trabalho.

Aos meus colegas do Instituto Superior Técnico que me transmitiram as suas opiniões e conhecimentos e estiveram sempre disponíveis para ajudar, com especial referência ao João Brás.

À Academia Militar, por toda a formação que me instruiu e por tudo o que aprendi, ao longo dos anos que lá passei.

À OGME, por toda a disponibilidade, com especial referência ao Capitão Fernandes, pela total prontidão na ajuda necessária.

Aos meus camaradas e amigos do curso de Material, Transmissões e Engenharia Militar, por todo o apoio e amizade não só neste trabalho mas ao longo da vida.

À minha família. Pai, mãe, irmãos e avós por tudo. Pelo amor. Pela confiança. Por tudo o que fizeram por mim e por estarem sempre presentes.

Ao meu camarada de curso, o Alferes Luis Vermelho, pela amizade, dedicação e fidelidade ao longo destes anos académicos e pelo apoio prestado em momentos vaciladores.

À Marina Domingues, a minha namorada e melhor amiga. Pela paciência que tem para comigo, por me apoiar em qualquer momento e por ser o meu pilar e a minha fonte de equilíbrio.



# Resumo

A opção de futuro incide sobre os processos de combustão em regime pobre e com baixos índices de formação de poluentes.

Neste contexto, o presente trabalho estuda um ejetor de um queimador de gás propano, que equipa uma marmitta utilizada para confeção de alimentos no Exército Português, para compreender o mecanismo de arrastamento de ar, com vista a identificar as causas que possam contribuir para uma diminuição da razão de equivalência da mistura ar/combustível. Estes queimadores são dispositivos de funcionamento estritamente mecânico e de conceção simples que permitem uma gama de potências caloríficas compreendidas entre 8 e 22 kW. Permitem uma boa estabilidade de chama que é um requisito fundamental de segurança. A regulação de potência é executada através de uma válvula de ajuste, contendo três posições, uma em que a alimentação se encontra cortada e as outras duas permitindo funcionar na potência mínima e máxima.

De modo a efetuar o estudo do ejetor, numa primeira fase, submeteu-se o sistema a uma caracterização experimental do campo de escoamentos à entrada de ar do ejetor, a partir da técnica de diagnóstico Particle Image Velocimetry (PIV). Assim avalia-se de que forma o escoamento de ar exterior influencia o comportamento do escoamento da mistura de ar/combustível à saída do queimador.

Numa segunda fase, recorre-se à técnica de diagnóstico Quimiluminescência para medição de espécies químicas, para avaliar o comportamento do ejetor a alterações de vários parâmetros, tais como caudal de combustível, área de entrada de ar e área de saída da mistura do difusor. Conclui-se que o ejetor mostra-se "insensível" a alterações da área de saída e de entrada de ar, em relação ao valor médio da razão de equivalência. Porém observa-se que as misturas de ar/combustível são mais homogêneas quando as áreas de entrada, da saída e da garganta têm valores próximos.

**Palavras-Chave:** Particle Image Velocimetry, Quimiluminescência, queimador, razão de equivalência, ejetor.



# Abstract

The option of future focuses on combustion processes under poor and with low levels of pollutant formation.

In this context, this work studies an ejector for a propane gas burner, fitted to a pot used for making food in the Portuguese Army, to understand the air entrainment mechanism, to identify the causes that can contribute to a decrease in the equivalence ratio of the air/fuel mixture. These burners are operating strictly mechanical devices and simple design that enable a range of heating powers from 8 and 22 kW. Allow a good flame stability which is a fundamental requirement of security. The power setting is performed through a valve adjustment, containing three positions, allowing work on zero power, minimum and maximum.

In order to achieve this goal, as a first step, has undergone the system comprising a ejector, the experimental characterization of the flow field of ejector air intake, from the Particle Image Velocimetry diagnostic technique (PIV). This is used to evaluate how the outside air flow influences the behavior of the flow of the air/fuel mixture at the outlet of the burner.

In a second phase, the diagnostic technique Chemiluminescence, measurement of chemical species is used to assess the behavior of various changes ejector parameters such as fuel flow, air intake area and output area of the diffuser. It is concluded that the ejector seems "insensitive" to change the input and output area, in relation to the average value of equivalence ratio. But it is observed that the air/fuel mixtures are more homogeneous when the areas of input, output and throat have close values.

**Keywords:** Particle Image Velocimetry, Chemiluminescence, burner, equivalence ratio, ejector.



# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b>	<b>II</b>
<b>Resumo</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>X</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Bomba Ejetora . . . . .	2
1.2.1 Princípio de Funcionamento . . . . .	4
1.2.2 Aplicações . . . . .	4
1.3 Motivação . . . . .	5
1.4 Objetivo e Estrutura do Trabalho . . . . .	6
<b>2 Método Experimental</b>	<b>7</b>
2.1 Instalação Experimental . . . . .	7
2.1.1 Sistema de Queima . . . . .	9
2.1.2 Potência do Queimador Utilizado . . . . .	10
2.2 Técnicas Experimentais . . . . .	11
2.2.1 Medição do Campo de Velocidades - PIV . . . . .	11
2.2.2 Quimiluminiscência . . . . .	16
2.3 Procedimento Experimental PIV . . . . .	24
2.3.1 Principais Opções Adoptadas em PIV . . . . .	24
2.3.2 Escolha do Referencial para Tratamento de Dados PIV . . . . .	26
<b>3 Apresentação dos Resultados e Discussão</b>	<b>27</b>
3.1 Modelo Matemático . . . . .	27
3.2 Resultados Experimentais PIV . . . . .	32
3.2.1 Determinação do Caudal de Ar Arrastado . . . . .	32
3.3 Resultados de Quimiluminiscência . . . . .	35
3.3.1 Visualização das Chamas . . . . .	35
3.3.2 Análise de Imagens . . . . .	38

<b>4 Conclusão</b>	<b>45</b>
<b>Referências</b>	<b>47</b>
<b>Anexos</b>	<b>51</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Principais dimensões do estabilizador de chama . . . . .	10
3.1	Valores da área de entrada, razão estequiométrica da mistura de ar/ propano, densidades do ar e propano . . . . .	32
3.2	Valores da velocidade média e $\phi$ do escoamento em redor do queimador. . . . .	33



# Lista de Figuras

1.1	Representação de chamas de difusão (1), parcialmente arejadas (2) e totalmente arejadas (3).[1]	1
1.2	Queimador de gás propano de uma Marmita . . . . .	2
1.3	Vista em corte transversal de uma bomba de jato de líquido típica. [2] . . . . .	3
1.4	Vista em corte transversal de um ejetor de gás típico. [2] . . . . .	3
2.1	Sistema de suporte para um ejetor . . . . .	7
2.2	Representação esquemática da instalação experimental PIV . . . . .	8
2.3	Representação esquemática do registo fotográfico . . . . .	8
2.4	Nomenclatura das zonas características do ejetor utilizado . . . . .	9
2.5	Sistema de queima. A- vista de frente, B- vista de lado, C- Representação esquemática das dimensões . . . . .	10
2.6	Imagem de um ensaio de PIV . . . . .	11
2.7	Esquema de introdução de <i>seeding</i> no escoamento de ar estudado pelo sistema de PIV . . . . .	13
2.8	Adequação janela de interrogação ao intervalo de tempo entre pulsos de laser. Comparação entre uma situação com um dado intervalo de tempo entre pulsos, $t_{pulsos}$ em (a), e um intervalo superior (b). . . . .	14
2.9	Características dos radicais excitados [7]. . . . .	17
2.10	Espetro da luz emitida por uma chama de metano [7]. . . . .	18
2.11	Espetro da luz emitida por uma chama de propano [7]. . . . .	18
2.12	Mecanismos de reação para as espécies excitadas OH*, CH* e C2* [8]. . . . .	19
2.13	Exemplos de sistemas utilizados para coleção de luz: a) resolução temporal; b) resolução espacial; c)resolução espectral. . . . .	20
2.14	Correlação entre a intensidade de quimiluminescência e razão de equivalência, para chamas laminares de pré-mistura de propano/ar [8] . . . . .	22
2.15	Imagem pós-processamento apresentada pelo MATLAB . . . . .	23
2.16	Perfis de velocidades para diferentes tempos entre pulsos: a) 40 $\mu$ s; b) 60 $\mu$ s. . . . .	25
2.17	Escoamento de ar e geometria ótima . . . . .	26
3.1	Esquema de arrastamento de ar num ejetor, [12]. . . . .	28
3.2	Variação de $\phi$ com o diametro do tubo . . . . .	29
3.3	Variação de $\phi$ com o diametro do injetor . . . . .	30
3.4	Variação de $\phi$ com o o diâmetro equivalente da saída . . . . .	30
3.5	Variação de $\phi$ com o caudal de combustível . . . . .	31
3.6	Variação de $\phi$ com perda de carga . . . . .	31
3.7	perfis de velocidade nas várias medições de PIV . . . . .	32
3.8	Evolução de $\phi$ com o caudal mássico de combustível . . . . .	33

3.9	Evolução da chama com o aumento do caudal de combustível . . . . .	36
3.10	Varição de $\phi$ ao longo da chama para $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . . . . .	37
3.11	Varição de $\phi$ ao longo da chama . . . . .	37
3.12	Varição de $\phi$ com o caudal de combustível . . . . .	38
3.13	Varição de $\phi$ com o caudal de combustível . . . . .	39
3.14	Configuração da saída do difusor . . . . .	40
3.15	Varição de $\phi$ com a área de saída . . . . .	41
3.16	Varição de $\phi$ com a área de saída . . . . .	42
3.17	Varição de $\phi$ com a entrada de ar . . . . .	43
3.18	Varição de $\phi$ com a entrada de ar . . . . .	44

# Lista de Acrónimos

$\dot{m}_{ar}$	–	<i>Caudal mássico de ar</i>
$\dot{m}_{comb}$	–	<i>Caudal mássico de combustível</i>
$\dot{m}_{mist}$	–	<i>Caudal mássico da mistura</i>
$\dot{V}$	–	<i>Caudal volumétrico</i>
$\bar{u}$	–	<i>Velocidade média</i>
$R$	–	<i>Constante dos Gases Perfeitos</i>
$M_{ar}$	–	<i>Massa molar do ar</i>
$M_{comb}$	–	<i>Massa molar do combustível</i>
$A_{total}$	–	<i>Área total das secções de entrada</i>
$A_e$	–	<i>Área de entrada</i>
$A_g$	–	<i>Área da garganta</i>
$A_s$	–	<i>Área de saída</i>
$D_e$	–	<i>Diâmetro de uma secção de entrada</i>
$D_g$	–	<i>Diâmetro da garganta</i>
$D_s$	–	<i>Diâmetro equivalente da saída</i>
$\phi$	–	<i>Razão de equivalência da mistura ar-combustível</i>
$\rho_{ar}$	–	<i>Massa volúmica do ar</i>
$\rho_{comb}$	–	<i>Massa volúmica do combustível</i>
$\rho_{mist}$	–	<i>Massa volúmica da mistura de ar-combustível</i>
$t_{pulsos}$	–	<i>Tempo entre dois disparos de laser consecutivos</i>
$\dot{Q}_{queim}$	–	<i>Potência calorífica</i>
$k$	–	<i>Coefficiente de perda de carga</i>
$V_P$	–	<i>Velocidade característica do escoamento</i>
$S_L$	–	<i>Velocidade de propagação de chama laminar</i>
$h$	–	<i>Constante de Planck</i>
$\lambda$	–	<i>Comprimento de onda</i>
<b>PCS</b>	–	<i>Poder Calorífico Superior</i>
<b>PIV</b>	–	<i>Particle Image Velocimetry</i>
<b>CCD</b>	–	<i>Charge-Coupled Device</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Os queimadores a gás têm como objetivo a obtenção de energia térmica através da queima de um combustível gasoso (ex. gás natural, propano, butano, etc.). Os queimadores podem ser divididos em três classes, dependendo do tipo de chama, ou seja, como o combustível e o oxidante entram em contato. Numa chama de difusão (ou não arejada), os reagentes estão inicialmente separados e a combustão ocorre com a difusão do oxigénio da atmosfera circundante no fluxo de gás emergente. Numa chama de pré-mistura, o combustível e o oxidante são previamente misturados e só depois é que se dá a ignição da mistura. Caso a combustão se complete com o fornecimento de ar primário, a chama toma a designação de totalmente ventilada ou totalmente pré-misturada. Se apenas parte do ar total necessário é fornecido no ar primário, então a chama toma a designação de parcialmente arejada, e o ar restante (conhecido como ar secundário) difunde-se nos gases de combustão quente a jusante da frente de chama [1]. Os três tipos de chama diferem no que diz respeito aos processos físicos e químicos dominantes bem como na aparência (Figura 1.1). Todos têm sido utilizados extensivamente pelos engenheiros de combustão, onde as diferentes propriedades da chama são particularmente adequadas para determinadas aplicações.

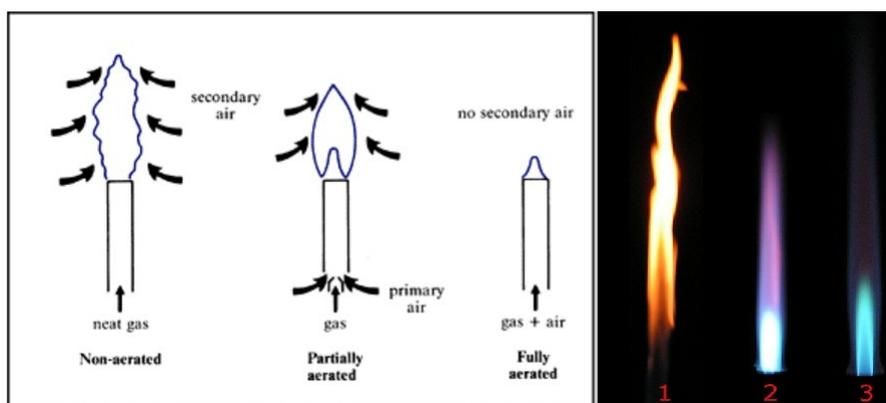


Figura 1.1: Representação de chamas de difusão (1), parcialmente arejadas (2) e totalmente arejadas (3).[1]

O Sistema em estudo neste trabalho é um queimador de gás propano de uma Marmita que utiliza estabilizadores de chama de misturas gasosas parcialmente pré-misturadas. A configuração utilizada neste género de equipamentos pode ser observada na figura 1.2.



Figura 1.2: Queimador de gás propano de uma Marmitta

A indústria do gás existe há aproximadamente 200 anos, contudo o seu desenvolvimento foi condicionado pelos poucos conhecimentos existentes em combustão. No princípio do século vinte com Bunsen, Hinshelwood, Semenov, entre outros, formaram-se as bases teóricas do processo de combustão, que permitiu o desenvolvimento desta indústria. O princípio do queimador de pré-mistura, foi desenvolvido por Robert Bunsen. Estes queimadores são compostos por espalhadores que funcionam, normalmente, com uma mistura estequiométrica, ou perto da mesma, que é previamente controlada numa câmara de modo a ficar o mais uniforme possível antes da combustão. Nos espalhadores dos queimadores a gás o ar primário é arrastado por efeito tipo "Venturi", sendo tipicamente 40% do ar total necessário. O ar secundário é arrastado na vizinhança da chama, e é cerca de 60% do total. A configuração do conjunto vai influenciar esta relação, que por sua vez está interligada com o desempenho energético do sistema, em termos de temperatura de chama atingida, formação de CO / NOx e na estabilidade de chama.

## 1.2 Bomba Ejetora

As bombas ejetoras são dispositivos usados para induzir um fluido secundário por impulso e transferência de energia de um jacto primário de alta velocidade. Os ejetores podem ser operados com fluidos incompressíveis (líquidos) e nesta aplicação são normalmente denominados bombas de jato. Por outro lado quando empregues com fluidos compressíveis (gases e vapores) tomam o termo de ejetores [2]. Uma grande diferença entre os dois, para além dos estados de fluido de trabalho, é bico supersónico do ejetor de gás. A abordagem supersónica permite uma maior conversão de energia do fluido primário que se traduz num aumento de pressão do fluido secundário. No entanto, a abordagem referida apresenta uma complexidade termodinâmica considerável nas secções de mistura e difusão. Nas Figuras 1.3 e 1.4 é possível visualizar as secções transversais da bomba de jacto de líquido e ejetores de gás.

Os ejetores são os dispositivos mais simples entre todos os compressores e bombas de vácuo. Na maioria dos casos, eles fornecem a maior opção para gerar um vácuo nos processos. Devido à sua simplicidade, ejetores de jacto convencional correctamente projectados para uma determinada situação são muito propensos a erros em estimativas das quantidades e dos transtornos operacionais. Além disso, eles são facilmente alterados para dar os resultados exactos necessários (rede e Richenberg, 1967).

Os ejetores oferecem inúmeras vantagens, que são resumidas a seguir:

- Baixa manutenção, porque não contêm partes móveis que sofram desgaste ou se quebrem;
- Um baixo custo relativo aos outros dispositivos, porque têm uma estrutura elementar;
- São de fácil instalação o que permite a colocação em lugares com pouca acessibilidade.

Por outro lado, as principais desvantagens do ejetor são:

- São projectados para trabalhar em dadas condições e um desvio deste ponto pode reduzir a eficiência destes dispositivos;
- Apresentam uma eficiência térmica muito baixa, ou seja, fracos isoladores térmicos.

Os principais componentes de um ejetor são:

- Bocal primário;
- Câmara de sucção;
- Garganta;
- Difusor.

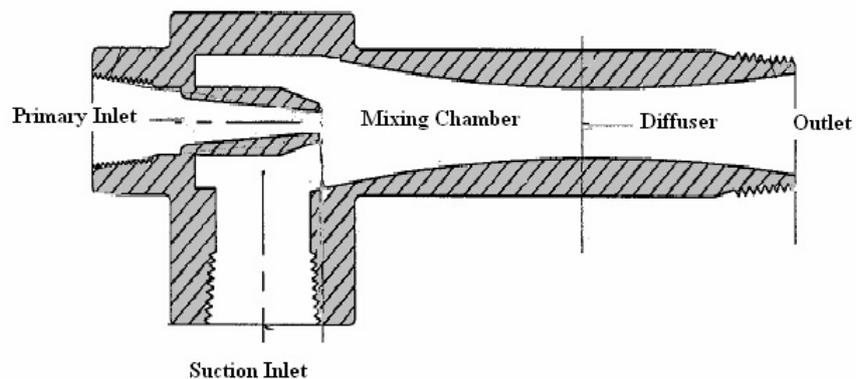


Figura 1.3: Vista em corte transversal de uma bomba de jato de líquido típica. [2]

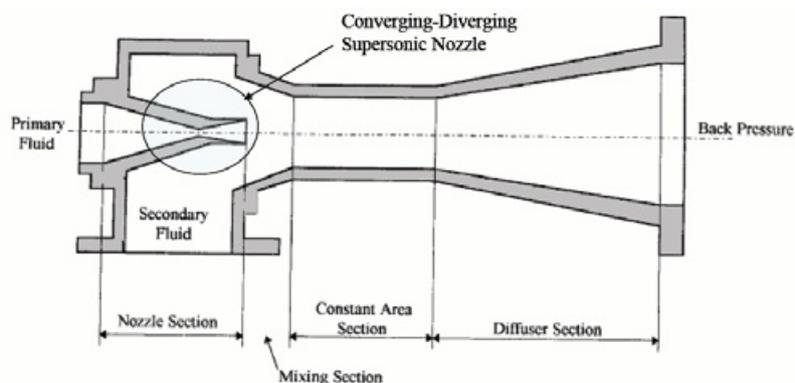


Figura 1.4: Vista em corte transversal de um ejetor de gás típico. [2]

## 1.2.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento dos ejetores pode ser descrito em três secções:

1. Secção do bocal: o bocal primário é geralmente um bocal do tipo convergente-divergente. Um fluido de alta pressão, conhecido como fluido primário, expande e acelera através do bocal principal, fluindo para fora do bocal com velocidades supersónicas para criar uma região de pressão muito baixa, no plano de saída do bocal e, posteriormente, na garganta. Por conseguinte, uma diferença de pressão entre as correntes no plano de saída do bocal e a entrada da câmara de sucção é estabelecida, o que vai induzir um arrastamento de fluido secundário. Desde que a velocidade seja muito alta, próxima de velocidades sónicas, a consideração de processo adiabático e isentrópico são aplicáveis.
2. Secção de mistura: Com base na teoria de Munday e do Bagster [3], presume-se que o fluido primário flui sem se misturar com o fluido secundário e que se expande e forma uma conduta convergente para o fluido secundário. Em algumas secções transversais ao longo da conduta, a velocidade do fluido secundário aumenta para valores supersónicos e sufoca, foram nomeados como "hipotética garganta" (ou "garganta fictícia" ou "garganta aerodinâmica" em algumas literaturas). Começa então o processo de mistura. Presume-se que a pressão dos dois fluidos é uniforme na garganta. Além disso, esta mistura faz com que a velocidade do fluido primário baixe enquanto o que a do fluido secundário é acelerada. No final da garganta, as duas correntes estão completamente misturadas e presume-se que a pressão estática permanece constante. Devido a uma região de alta pressão a jusante da garganta da câmara de mistura, o fluxo passa por uma sucessão de ondas de choque normais e/ou oblíquas acompanhado por um correspondente aumento de pressão. Este choque provoca um efeito de compressão maior e uma queda súbita da velocidade de fluxo de supersónico a subsónico. Além disso, a mistura de fluido facilmente sofre mudança de fase e pode ocorrer um choque de condensação.
3. Secção do difusor: A mistura dos fluxos principais e secundários passa através do difusor e converte a energia cinética em energia de pressão. Na saída do difusor, a velocidade é reduzida a zero e a pressão é elevada o suficiente para provocar a descarga.

Pode observar-se que devido à estrutura geométrica especial do ejetor, o fluxo do ejetor é muito complexo, que envolve fluxo supersónico, interações de choque e mistura turbulenta de dois fluidos e fluxo de duas fases em alguns casos. Daí o principal esforço da modelação do ejetor se focar a explicar o fluxo complexo e mecanismo de mistura.

## 1.2.2 Aplicações

Devido à sua simplicidade, os ejetores são utilizados para diversos fins. Um número de aplicações está listado abaixo (Schmitt, 1975) [4]:

1. Extração: sucção do fluido induzido.
2. Compressão: compressão do fluido induzido descarregado à pressão de expansão do fluido motriz.
3. Ventilação e ar condicionado: extração e descarga de gás com pequenas diferenças na compressão perto da pressão atmosférica.
4. Propulsão ou elevação: compressão intermediária do fluido descarregado a uma certa velocidade de ajuste.

5. Mistura uniforme de dois fluidos: fornecendo uma concentração uniforme ou temperatura numa reação química.
6. Transporte: transporte pneumático ou hidráulico de produtos em pó ou frações.

### **1.3 Motivação**

A expansão acentuada do consumo de energia, embora possa reflectir-se no crescimento económico e na melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos. A natureza finita dos recursos fósseis, e o impacto ambiental da sua produção e consumo, alertaram o mundo para a necessidade de mudança dessas premissas de suporte ao modelo de desenvolvimento. Novos caminhos têm que ser encontrados para viabilizar a manutenção dos padrões de vida das sociedades desenvolvidas e as justas pretensões dos países em desenvolvimento, sem contudo comprometer o futuro das gerações vindouras. O desafio é enorme e a solução de longo prazo está longe de ser conhecida mas, no curto e médio prazo, uma das ações tem de passar pelo aumento da eficiência nos sistemas de combustão.

O Exército Português tem vindo a aumentar a sua atenção na eficiência energética pela procura de soluções face ao aumento energético, aumento de competitividade na economia e atenuação das emissões de gases de efeito estufa.

As crescentes exigências nos hábitos alimentares têm exigido uma evolução nas técnicas de preparação, confeção, conservação e transporte.

Na confeção dos alimentos intervêm, assim, vários componentes que formam um sistema, que terá grande interesse estudar e caracterizar, para que se possa otimizar, mantendo os limites da qualidade sensorial, nutritiva, funcional e de conveniência dos alimentos.

Neste contexto, este trabalho, tem como objetivo caracterizar o processo de combustão num ejetor que faz parte integrante de um queimador de uma marmita. Pretende-se sobretudo uma análise crítica e substanciada da estabilidade e estrutura da chama.

## 1.4 Objetivo e Estrutura do Trabalho

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo avaliar e compreender o mecanismo de funcionamento de um queimador do tipo "bomba ejetora" que equipa fogões do tipo industrial usado nas Forças Armadas. Numa última fase, avaliar um potencial de melhoramento do sistema. Este mecanismo tem sido estudado experimentalmente e teoricamente, durante muitos anos, e é de importância vital para os designers de queimadores, porque a quantidade de ar primário recolhido tem um efeito considerável sobre os requisitos de conceção de porta do queimador, a estabilidade da chama, forma e temperatura, e, em última análise, o desenho da câmara de combustão propriamente dito.

Esta dissertação divide-se em quatro capítulos, nos quais se inclui o presente, que teve em vista uma breve apresentação e enquadramento ao trabalho a realizar, e efetuar a revisão bibliográfica dos estudos elaborados sobre as temáticas abordadas.

No Capítulo 2 descreve-se o método experimental. Neste faz-se uma apresentação da instalação experimental utilizada, e definem-se as condições de funcionamento estudadas nos ensaios experimentais. Apresenta-se igualmente uma explicação detalhada das técnicas experimentais usadas, com especial destaque ao sistema de PIV e Quimiluminescência.

No Capítulo 3 apresenta-se e discute-se os resultados obtidos, pela aplicação das técnicas experimentais do capítulo 2. Numa primeira fase, estima-se o caudal mássico de ar através da razão de equivalência da mistura, obtida por Quimiluminescência. Numa segunda fase determina-se o caudal mássico de ar através de perfis de velocidade, obtidos por PIV. Em última análise comparam-se os resultados.

No Capítulo 4 apresenta-se as conclusões finais retiradas do trabalho efetuado, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Método Experimental

### 2.1 Instalação Experimental

Neste capítulo apresenta-se a instalação experimental, bem como a instrumentação utilizada e uma explicação das técnicas usadas para obtenção os resultados pretendidos.

O ejetor em estudo faz parte integrante de um queimador, de uma marmitta, composto por 38 ejetores. No âmbito de facilitar as atividades experimentais bem como a redução do consumo de gás, foi construído um suporte. O sistema de suporte, representado na figura 2.1, permite acoplar um ejetor, ou seja, um injetor e o respetivo estabilizador de chama.

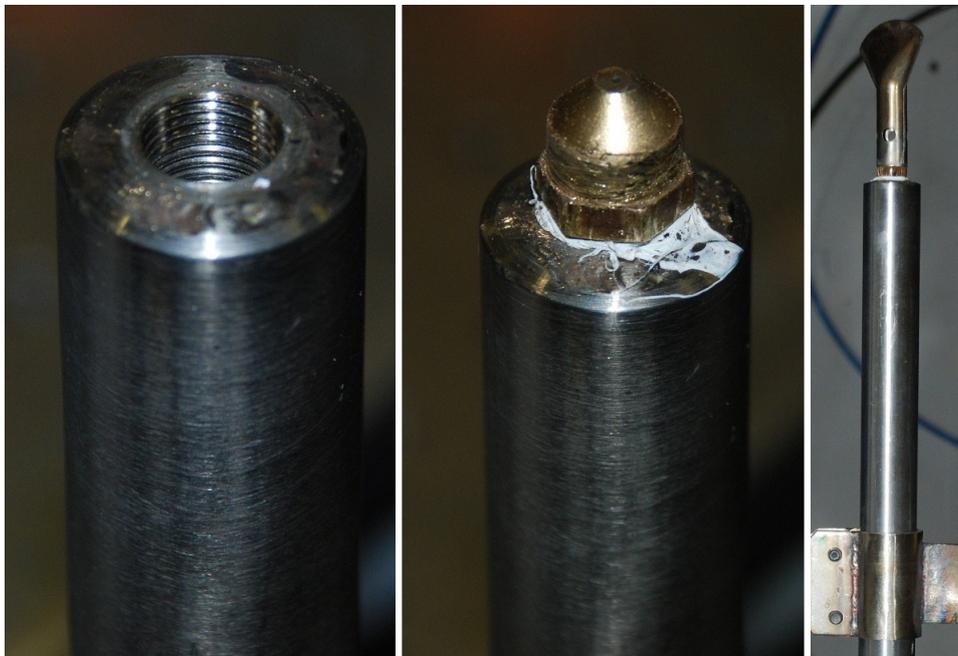


Figura 2.1: Sistema de suporte para um ejetor

O controlo do caudal de combustível é feito para condições de pressão e temperatura normal (PTN), através de um caudalímetro mássico digital de 5 l/m, Alicat Mass Flow Controller. O caudal mássico de combustível e o ar arrastado no queimador definem a razão de equivalência da mistura.

O sistema implementado em PIV, encontra-se esquematizado na figura 2.2.

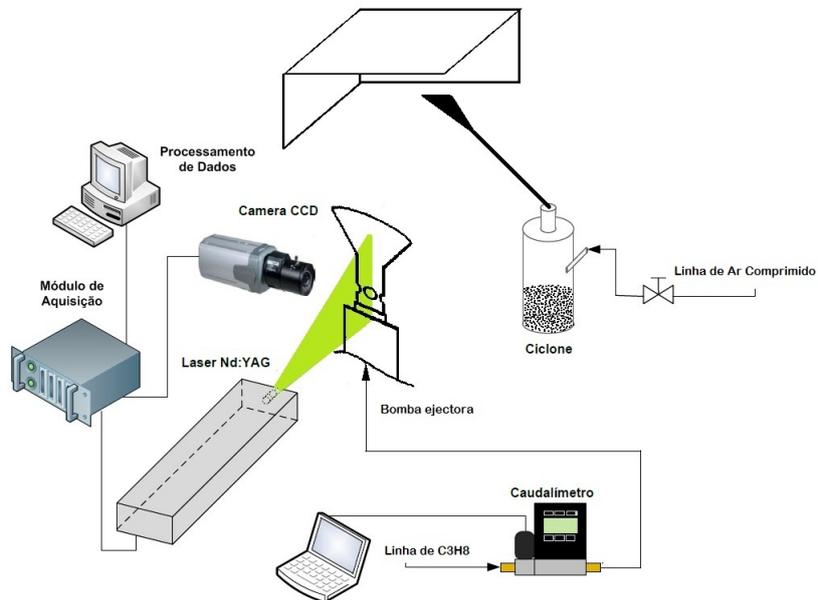


Figura 2.2: Representação esquemática da instalação experimental PIV

O sistema implementado para registo fotográfico, encontra-se esquematizado na figura 2.3.

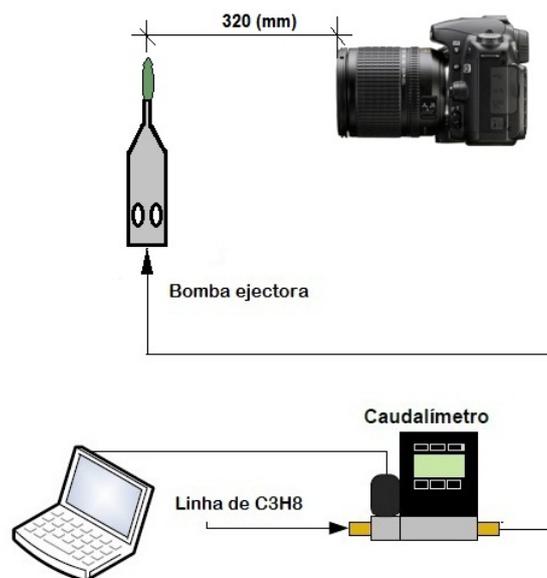


Figura 2.3: Representação esquemática do registo fotográfico

### 2.1.1 Sistema de Queima

Os queimadores usados vulgarmente em aplicações de unidades alimentares designam-se por queimadores parcialmente arejados porque, nem todo o ar necessário à combustão do gás é totalmente pré-misturado.

O mecanismo de entrada de ar primário ou ar de pré-mistura pode ser descrito com referência à figura 2.4. A corrente de gás emerge do injetor como jacto livre, com um caudal que depende da pressão do gás, do diâmetro do injetor e da composição do gás. A transferência de quantidade de movimento entre o jacto e o ar circundante causa a entrada e expansão no início da garganta. Por outro lado a pressão estática a montante tem de ser superior para vencer as resistências do fluido no interior do estabilizador de chama. Desta forma a mistura de gás/ar chega à cabeça do estabilizador de chama e sai pelos seus orifícios.

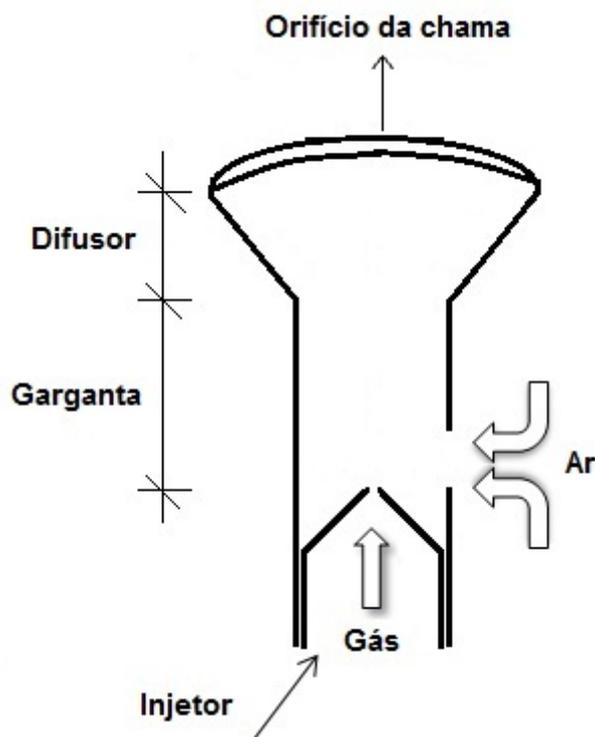


Figura 2.4: Nomenclatura das zonas características do ejetor utilizado

A figura 2.5 ilustra um dos 38 ejetores do queimador representado na figura 1.2, projetado para funcionar com propano.

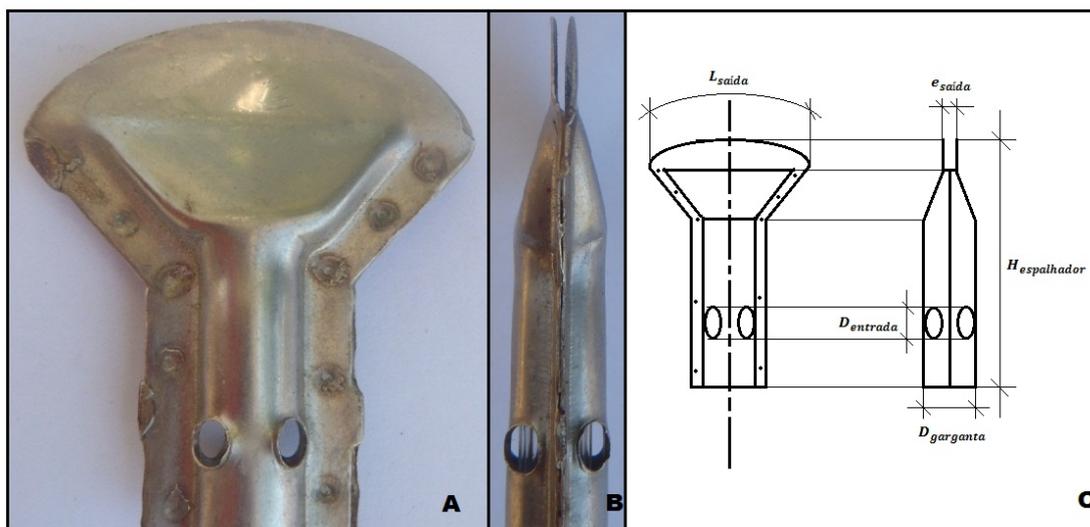


Figura 2.5: Sistema de queima. A- vista de frente, B- vista de lado, C- Representação esquemática das dimensões

designação	dimensão (mm)
$L_{saida}$	42
$e_{saida}$	1.8
$H_{espalhador}$	55.2
$D_{entrada}$	5
$D_{garganta}$	10

Tabela 2.1: Principais dimensões do estabilizador de chama

## 2.1.2 Potência do Queimador Utilizado

De acordo com a norma europeia EN-30 de 3/1998, a potência calorífica de um queimador de gás é a energia consumida por unidade de tempo correspondente ao produto do caudal mássico pelo poder calorífico superior do combustível.

Esta norma atesta também que a potência calorífica de um aparelho é determinada pelo fabricante e deve ser verificada pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{queim} = 0.278 \times \dot{m}_{comb} \times PCS \quad (2.1)$$

onde, o caudal mássico é expresso [kg/h], o PCS tem como unidades [MJ/kg] e o coeficiente 0,278 representa a conversão do caudal mássico para kg/s e do poder calorífico para kJ/kg. Para todos os cálculos assumiu-se o propano a 15°C e 1013 mbar - gás seco e poder calorífico superior PCS(propano)=50,37 MJ/kg.

## 2.2 Técnicas Experimentais

### 2.2.1 Medição do Campo de Velocidades - PIV

A técnica experimental PIV é uma técnica de diagnóstico não intrusiva que permite medir o campo de velocidades de um dado escoamento de fluídos. Esta técnica permite obter informação instantânea, não apenas para um determinado ponto no escoamento, mas para o campo de escoamento inteiro. De uma vista geral, o PIV consiste em iluminar um escoamento com partículas por dois planos de luz sucessivos provenientes de um laser, como pode ser observado na figura 2.6. Simultaneamente com o disparo do laser são captadas duas imagens por uma câmara Charge-Coupled Device (CCD), que são posteriormente correlacionadas para a realização do cálculo do campo de velocidades.



Figura 2.6: Imagem de um ensaio de PIV

A representação esquemática do sistema de PIV utilizado nos ensaios experimentais é apresentada na figura, de onde podem ser destacadas três áreas específicas: i) emissão de luz; ii) processamento de imagem iii) aquisição de imagens. O equipamento experimental associado a cada uma destas áreas é descrito abaixo.

#### Emissão de Luz

As partículas utilizadas como *seeding* exigem um certo nível de energia para reflectir a luz. Para fornecer essa energia e iluminar as partículas foi utilizado um laser pulsado Nd:YAG da Dantec Dynamics. A designação do laser deriva do material utilizado. Neste caso, sujeita-se um cristal yttrium-aluminium-garnet à energia de iões de Neodímio ( $Nd^{3+}$ ) para gerar um feixe de luz laser com um comprimento de onda de 532 nm. Este laser apresenta um output de energia máximo de 400 mJ e uma duração de pulso de 4 ms. Permite um intervalo de tempo entre pulsos mínimo de 10  $\mu$ s.

Observar que a espessura da folha de luz é uma questão importante nas medições de PIV. As folhas de

luz mais finas implicam uma redução de sinal em relação ao ruído, como existem menos partículas sendo iluminadas em outros planos - que iria introduzir pontos desfocados na imagem a ser processada. Por outro lado, deve ter-se em conta que quando a folha de luz é muito fina, menos partículas serão iluminadas nas duas imagens captadas, levando à perda de pares. De forma a controlar a espessura da folha de laser na zona que se pretende medir, o laser tem montada uma lente 80x80 High Power - 9080x8941 da Dantec Dynamics, que permitiu realizar as medidas com uma espessura da folha de laser com aproximadamente 1 mm.

### **Aquisição de Imagens**

As imagens são capturadas recorrendo a uma câmara Kodak Megaplug ES1.0, que utiliza um sensor CCD de múltipla camada com 1008x1018 pixéis sensíveis que converte fotões em electrões. Nas medidas de PIV efectuadas, a posição inicial das partículas é gravada na primeira camada e a posição final é gravada na segunda.

### **Processamento das Imagens**

O processamento das imagens fez-se através de um módulo de aquisição, o FlowMap 1500, que liga a câmara e o laser a um computador onde o software Flowmanager v4.71 é usado para processar dados. O FlowMap 1500 é responsável por realizar a sincronização entre a aquisição de imagens na câmara e o disparo do pulso de laser, permitindo assim o controlo do laser através do software instalado no computador. Após a aquisição de um conjunto de imagens, os dados correspondentes às partículas na primeira camada da imagem são correlacionados com as partículas presentes segunda. Para tal, dividem-se as imagens em diversas secções denominadas por Áreas de Interrogação, sendo calculado um vector de velocidade médio em cada uma.

### **Visão Geral Técnica do PIV**

Nas medições de PIV, vários factores devem ser considerados. Tendo em mente a importância de medições confiáveis, os seguintes parâmetros devem ser considerados com especial atenção: calibração, partículas marcadoras, tempo entre pulsos de laser, sobreposição da área de interrogação e o tipo de correlação escolhido de destino.

### **Calibração de Destino**

Enquanto as imagens estão sendo capturadas, os pontos no plano da folha de luz são convertidos em pontos no plano da imagem. Essa conversão é feita por modelos, que incluem um número de parâmetros que determinam o mapeamento da luz da folha-de-imagem para uma determinada configuração de gravação de imagem. Isto implica que o plano de luz e a câmara devem manter exactamente a mesma posição relativa entre eles, para cada sessão de medição, como uma maneira de garantir a focagem da câmara. Caso contrário, uma focagem de um plano paralelo à folha de luz poderia causar o aumento de ruído nas imagens adquiridas. Assim, a fim de colmatar este problema, a cada sessão de medição de PIV, devem ser tomados os seguintes passos:

1. Colocar o laser de tal modo que a folha de luz seja perpendicular à lente da câmara;
2. Montar um alvo de calibração no lugar correspondente da folha de luz, e focar a lente da câmara;
3. Por último, pode prosseguir-se com as medidas.

### Partículas Marcadoras

A finalidade do PIV é avaliar um campo de velocidade do fluxo, medindo o deslocamento de partículas marcadoras, num intervalo de tempo determinado. Por conseguinte, é importante entender como pode a escolha de partículas marcadoras afectar as medições. De acordo com a lei de Stokes, a velocidade induzida em pequenas partículas esféricas num determinado fluxo é dado por

$$V_p = a \times d_p^2 \times \frac{(\rho_p - \rho_f)}{(18 \times \mu)} \quad (2.2)$$

onde  $a$  é a aceleração do fluido,  $\rho_p$  e  $\rho_f$  são respectivamente as massas volumétricas da partícula e do fluido,  $d_p$  o diâmetro da partícula e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. Da lei de Stokes, é óbvio que quanto mais próximo o  $\rho_p$  for de  $\rho_f$ , menor é a influência das partículas no fluido circundante. Como PIV usa a velocidade da partícula para fazer as medições de escoamento, conclui-se que as partículas devem ter uma densidade semelhante à densidade do fluido no fluxo estudado. É igualmente importante que as partículas sejam de menor tamanho possível de modo a não afectarem o escoamento de forma significativa. Assim, para marcar o escoamento optou-se pela utilização de partículas pó talco, que segundo Raffel et al. [5] são apropriadas para escoamentos, possuindo um diâmetro característico médio de  $20 \mu\text{m}$ .

O ciclone foi o método escolhido para a dispersão das partículas no ar, como ilustrado na figura 2.7. Os ciclones são dispositivos cilíndricos em que os traçadores se encontram depositadas no seu interior, tendo uma secção de entrada de gás e outra de saída. A secção de entrada possui uma orientação tangencial à parede do ciclone, o que origina um efeito de swirl quando o gás é injectado, promovendo-se assim a mistura do gás com as partículas de pó talco. Posteriormente ocorre a saída do gás em conjunto com as partículas marcadoras.

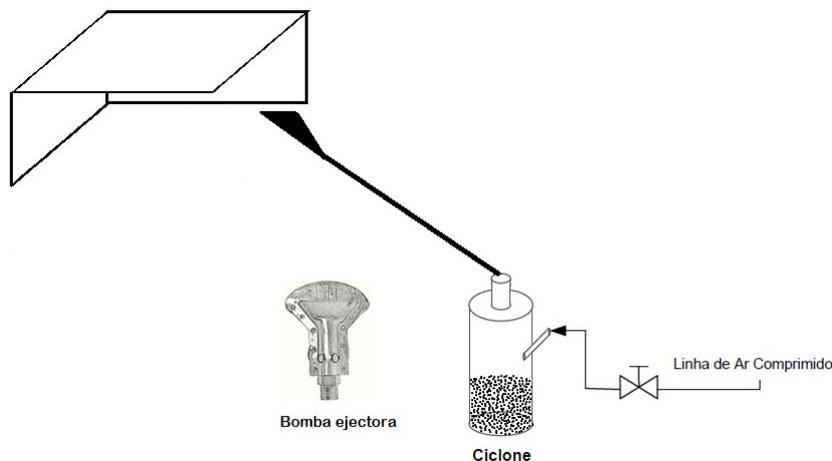


Figura 2.7: Esquema de introdução de *seeding* no escoamento de ar estudado pelo sistema de PIV

## Tempo Entre Pulsos

O tempo entre dois disparos consecutivos do laser,  $t_{pulsos}$ , tem de ser escolhido com rigor, pois longos intervalos de tempo podem fazer com que as partículas se desloquem tanto que saiam da janela de interrogação e intervalos demasiado curtos fazem com que as partículas se desloquem tão pouco que se torna difícil processar com rigor o seu deslocamento.

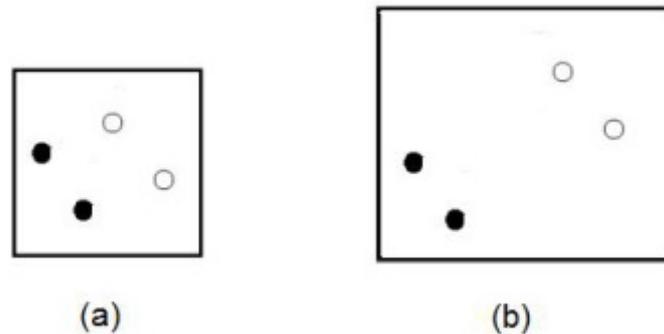


Figura 2.8: Adequação janela de interrogação ao intervalo de tempo entre pulsos de laser. Comparação entre uma situação com um dado intervalo de tempo entre pulsos,  $t_{pulsos}$  em (a), e um intervalo superior (b).

Deste modo, é importante adequar o intervalo de tempo entre disparos de laser ao tamanho das janelas de interrogação, conforme se observa na figura 2.8. É de notar que o tamanho das janelas de interrogação se encontra directamente associado ao número de vectores obtidos.

## Overlapping da Área de Interrogação

A fronteira entre janelas de interrogação constitui um problema no processamento dos dados. Mesmo que o tamanho das janelas de interrogação seja adequado à distância percorrida pelas partículas, existe grande probabilidade das partículas que se encontrem perto da fronteira da janela na primeira camada saírem da mesma na segunda. Para minorar esta perda de informação, é recomendável o uso de overlapping, ou seja, a sobreposição de janelas, de modo a que as partículas que se encontrem na de uma fronteira de uma janela não se encontrem também na fronteira da janela seguinte.

## Escolha da Correlação Matemática

A análise de PIV pode ser realizada usando uma de duas correlações matemáticas: a cross-correlation, em que as imagens capturadas pela câmara, registadas em duas camadas distintas, são posteriormente correlacionadas; ou a auto-correlation, em que as imagens obtidas aquando do primeiro e segundo pulsos de laser são sobrepostas, resultando na prática numa imagem com pares de partículas. A correlação usada foi a cross-correlation, pois é um método que permite mais facilmente a identificação das posições inicial e final de uma dada partícula, aumentando assim a fiabilidade dos resultados obtidos. Conforme é referido em Bastiaans [6], ao contrário do que acontece com a cross-correlation, o método de auto-correlation permite uma ambiguidade direccional das partículas, o que causa problemas a medir escoamentos sem um sentido dominante. Tendo em conta todos os parâmetros mencionados, e após a realização de alguns estudos de convergência em que se variou alguns destes factores, escolheram-se os parâmetros a usar.

Assim, os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

- Tempo entre pulsos de laser: 60  $\mu$ s;
- Janelas de Interrogação: 64 x 64 pixel;
- Overlapping: 50% x 50%;
- Correlação Matemática: cross-correlation;
- Pares de Imagens por cada medida: 100;
- Resolução dos resultados: 2 mm entre vectores.

### **Avaliação da Incerteza dos Resultados**

Como PIV envolve muitos fatores, existem alguns que podem gerar incerteza nos resultados. A aplicação da correlação matemática e a escolha das partículas marcadoras do escoamento já foram discutidas nesta tese. No entanto, é importante detalhar um pouco mais sobre o tema da avaliação de incerteza.

Separando os erros de avaliação do PIV em erros sistemáticos e residuais, os primeiros apresentam-se normalmente associados ao tipo correlação escolhida e aos parâmetros a ela associados: o tamanho das janelas de interrogação, o overlapping, e a filtragem dos vetores de ruído. Para minorar os erros associados à aplicação destes parâmetros, é importante realizar estudos de convergência de resultados e assim definir os parâmetros adequados a uma dada medição. Os erros residuais encontram-se normalmente associados ao diâmetro dos traçadores, que dada a reduzida dimensão da alumina são muito menores que os restantes erros apresentados. Para além disto, ruídos menores associados ao fundo das imagens capturadas também podem ter uma pequena influência nas medidas. Para evitar esse erro, antes de se aplicar a correlação matemática, a informação de fundo é subtraída às imagens captadas.

## 2.2.2 Quimiluminiscência

A quimiluminiscência é a energia libertada sob a forma de radiação, por moléculas excitadas eletronicamente, quando regressam ao seu estado de energia menor. Quimiluminiscência nas chamas é especialmente interessante, porque as concentrações de moléculas excitadas vistas nas chamas excedem as concentrações de equilíbrio esperadas para a mesma temperatura sem reação química por várias ordens de magnitude. É possível deduzir a partir deste fato que moléculas excitadas não são apenas produzidas por excitação térmica, mas também são produzidos os produtos das reações. Desde que a quantidade de radiação, observada na chama, num determinado comprimento de onda, seja proporcional à concentração da molécula excitada associada, uma medição da radiação pode ser diretamente relacionada à concentração da molécula excitada.

### Sistemas de Formação de OH\*, CH\* e C2\*

A combustão de hidrocarbonetos apresenta, tipicamente, 500 passos, 300 a 400 no caso de metano/ar, de formação de espécies químicas, até à sua extinção. É no decorrer destas reações intermédias que ocorre a formação de espécies excitadas, sendo as mais comuns, na combustão de hidrocarbonetos, os radicais: OH\*, CH\*, C2\* e CO2\*. No entanto, informação precisa relativa à cinética química de quimiluminiscência é, ainda, difícil de obter. Entre outros, os, atualmente aceites, sistemas de formação de OH\*, CH\* e C2\* são respetivamente descritos por Haber [7] e Kojima [8]:

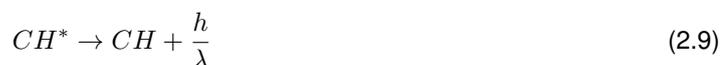
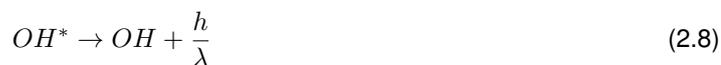


É importante mencionar que nem toda a energia em excesso, contida nas moléculas excitadas, é removida por radiação. Estas podem reagir com outras espécies ou, mais comumente, perder energia em colisões não reativas, sem emissão de luz, denominadas colisões de quenching, onde a eficiência deste mecanismo varia de molécula para molécula e muito frequentemente, apresenta forte dependência da temperatura [7]. A reação de quenching típica no caso do radical OH\*, colidindo com uma molécula genérica M, é dada por [7]:



A compreensão deste mecanismo, não foi ainda, no entanto, possível de alcançar, com precisão, quando se pretende estudar o consumo de CH\* [7], existindo, ainda, uma ausência de informação superior no caso

de  $C_2^*$ . São, porém, utilizadas, em alguns modelos, reações de quenching baseados em resultados empíricos. A parte observável refere-se à energia perdida por emissão espontânea, envolvendo apenas a espécie excitada. A reação é descrita pelas seguintes equações [7, 8]:



O comprimento de onda da radiação emitida é uma característica particular da molécula e uma determinada transição sofrida pela molécula. Quanto mais complexa a molécula, mais complexo é o seu espectro característico de radiação observado. Para algumas moléculas simples (diatómicas), o espectro apresenta um pico elevado e relativamente poucos e fracos picos secundários. Para moléculas complexas, o espectro de radiação observado aparece contínuo.  $OH^*$ ,  $CH^*$  e  $C_2^*$  são exemplos de moléculas que exibem um espectro simples com picos elevados, enquanto que  $CO_2^*$  é um exemplo de uma molécula com um espectro de radiação de aparência contínua. Na tabela da figura 2.9 são apresentados os comprimentos de onda da radiação emitida, bem como, o tempo de vida dos radicais excitados mais comuns na combustão de hidrocarbonetos.

A Figura 2.10 e Figura 2.11 representam espectros de chamas estequiométricas de pré-mistura, com ar, de metano e propano, respetivamente, onde, de acordo com a tabela da figura 2.9, é possível identificar os radicais excitados, cujos comprimentos de onda apresentam maiores intensidades.

A extinção de  $OH^*$ , bem como de  $CH^*$ , devido a estes reagirem com outras moléculas é considerada insignificante (Haber [7]).

Kojima [8] utilizou os mecanismos de reação descritos na tabela da figura 2.12 para simular a formação e extinção das espécies  $CH^*$ ,  $OH^*$  e  $C_2^*$ .

O valor das constantes A (fator pré-exponencial) e b (expoente da temperatura), assim como a energia de ativação são parâmetros empíricos sendo os valores, utilizados por Kojima et al. (2005), Apresentados na tabela da figura 2.12.

Radicais	Comprimento de onda [nm]	Tempo de vida [s]
$CH^*$	431,5	$5,6 \pm 0,6 \times 10^{-7}$
$C_2^*$	416; 466; 516,5 e 566	$1,7 \pm 0,2 \times 10^{-7}$
$OH^*$	306,4	$1,5 \times 10^{-6}$
$CH_2O^*$	395; 423	
$CO_2^*$	emissão contínua	

Figura 2.9: Características dos radicais excitados [7].

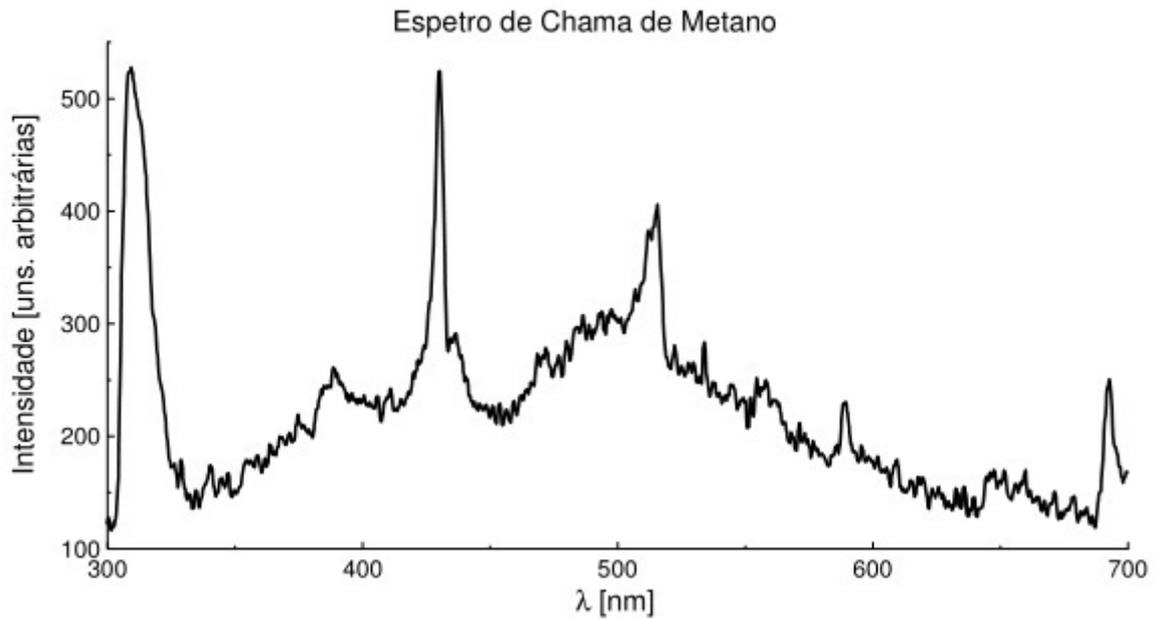


Figura 2.10: Espectro da luz emitida por uma chama de metano [7].

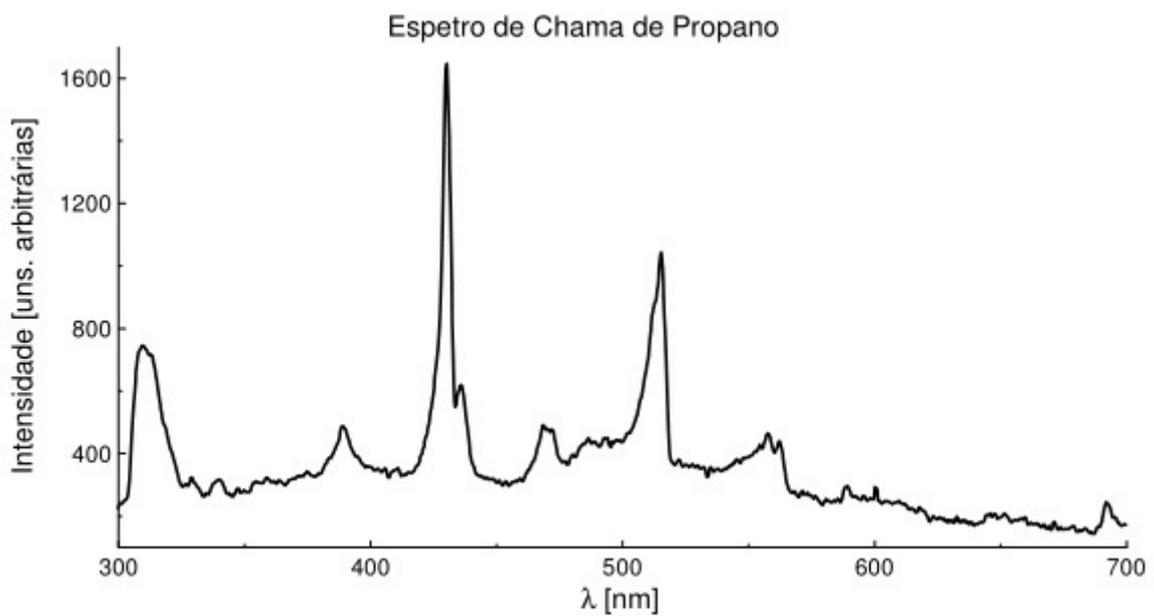


Figura 2.11: Espectro da luz emitida por uma chama de propano [7].

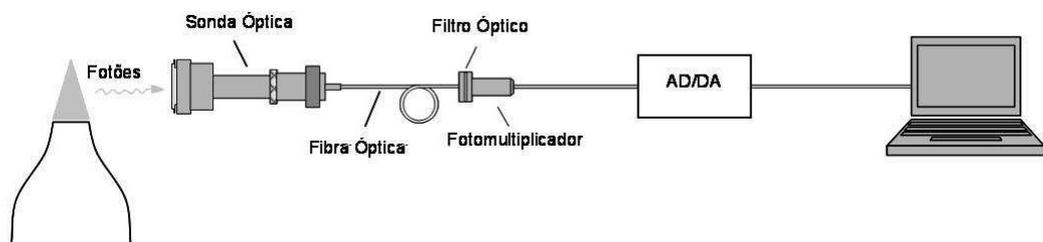
Reacção	$A$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$b$	$E_a$ [ $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ]
$\text{C}_2\text{H} + \text{O} = \text{CH}^* + \text{CO}$	$1,08 \times 10^{10}$	0	0
$\text{C}_2\text{H} + \text{O}_2 = \text{CH}^* + \text{CO}_2$	$2,17 \times 10^7$	0	0
$\text{CH}^* = \text{CH}$	$1,85 \times 10^3$	0	0
$\text{CH}^* + \text{N}_2 = \text{CH} + \text{N}_2$	$3,03 \times 10^{-1}$	3,4	$-1,60 \times 10^6$
$\text{CH}^* + \text{O}_2 = \text{CH} + \text{O}_2$	$2,48 \times 10^3$	2,14	$-7,20 \times 10^6$
$\text{CH}^* + \text{H}_2\text{O} = \text{CH} + \text{H}_2\text{O}$	$5,30 \times 10^{10}$	0	0
$\text{CH}^* + \text{H}_2 = \text{CH} + \text{H}_2$	$1,47 \times 10^{11}$	0	$5,70 \times 10^6$
$\text{CH}^* + \text{CO}_2 = \text{CH} + \text{CO}_2$	$2,40 \times 10^{-4}$	4,3	$-7,09 \times 10^6$
$\text{CH}^* + \text{CO} = \text{CH} + \text{CO}$	$2,44 \times 10^9$	0,5	0
$\text{CH}^* + \text{CH}_4 = \text{CH} + \text{CH}_4$	$1,73 \times 10^{10}$	0	$6,99 \times 10^5$
$\text{CH} + \text{O}_2 = \text{OH}^* + \text{CO}$	$3,25 \times 10^{10}$	0	0
$\text{OH}^* = \text{OH}$	$1,45 \times 10^3$	0	0
$\text{OH}^* + \text{N}_2 = \text{OH} + \text{N}_2$	$1,08 \times 10^8$	0,5	$-5,18 \times 10^6$
$\text{OH}^* + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}_2$	$2,10 \times 10^9$	0,5	$-2,02 \times 10^6$
$\text{OH}^* + \text{H}_2\text{O} = \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$5,92 \times 10^9$	0,5	$-3,60 \times 10^6$
$\text{OH}^* + \text{H}_2 = \text{OH} + \text{H}_2$	$2,95 \times 10^9$	0,5	$-1,86 \times 10^6$
$\text{OH}^* + \text{CO}_2 = \text{OH} + \text{CO}_2$	$2,75 \times 10^9$	0,5	$-4,05 \times 10^6$
$\text{OH}^* + \text{CO} = \text{OH} + \text{CO}$	$3,23 \times 10^9$	0,5	$-3,29 \times 10^6$
$\text{OH}^* + \text{CH}_4 = \text{OH} + \text{CH}_4$	$3,36 \times 10^9$	0,5	$-2,66 \times 10^6$
$\text{CH}_2 + \text{C} = \text{C}_2^* + \text{H}_2$	$7,50 \times 10^{10}$	0	0
$\text{C}_2^* = \text{C}_2$	$8,33 \times 10^3$	0	0

Figura 2.12: Mecanismos de reacção para as espécies excitadas  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  e  $\text{C}_2^*$  [8].

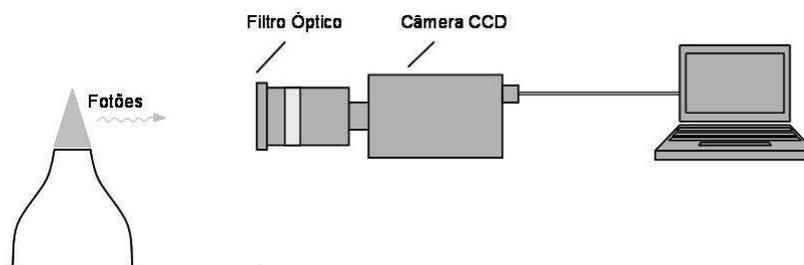
## Sistemas de Aquisição

Para quantificar a intensidade de radiação emitida por quimiluminescência é necessária a utilização de sistemas óticos de medição. O esquema genérico utilizado em coleção de luz é constituído por uma sonda ótica (lente colimadora, ótica de Cassegrain, câmara fotográfica), um seletor de comprimentos de onda (filtro de interferência, monocromador, espectrómetro) e um sensor de luz (fotomultiplicador, CCD). As configurações podem assim assumir as seguintes características:

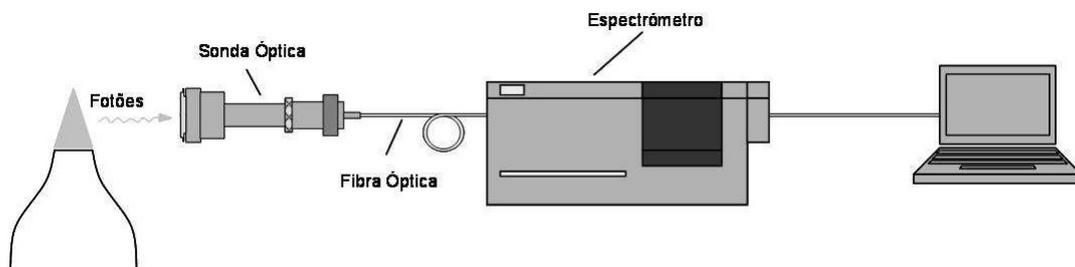
- Resolução temporal;
- Resolução espacial;
- Resolução espectral.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.13: Exemplos de sistemas utilizados para coleção de luz: a) resolução temporal; b) resolução espacial; c) resolução espectral.

Um dos primeiros sistemas utilizados para quantificar a intensidade de radiação emitida, figura 2.13a, consiste em coletar uma pequena área de luz, integrada ao longo de um volume cilíndrico, (recorrendo a lentes esféricas, espelhos, óticas de Cassegrain, fibras óticas ou combinações dos anteriores) no comprimento de onda da emissão do radical a ser analisado, utilizando, para esse fim, filtros de interferência ou monocromadores. O sinal luminoso é, em seguida, injetado num fotomultiplicador, induzindo uma diferença de potencial, V (DC), proporcional à intensidade de luz emitida pela fonte. Este sistema é caracterizado por uma rápida resposta no tempo, elevada resolução temporal, assim como uma elevada resolução espacial, dado que coleta, virtualmente, um ponto de luz.

Em alternativa, o dispositivo de captura de imagem pode ser do tipo fotográfico, Figura 2.13b, disponibilizando uma imagem integrada da zona de reação (sistema com resolução espacial 2D). A resolução temporal desta configuração é ainda reduzida, sendo necessário recorrer a câmaras de alta velocidade no sentido de melhorar a resposta no tempo. Porém a utilização deste equipamento requer a utilização de intensificadores de imagem, ampliando o ruído do sistema.

A utilização conjunta de imagens integradas numa área, com algoritmos de tomografia permite avaliar localmente uma propriedade escalar da reação. Diversos foram os autores que utilizaram a combinação destas duas técnicas para estudarem grandezas como: temperatura de chama, estrutura de chama, localização e formação de poluentes e calor libertado.

As duas configurações apresentadas podem ser algo limitativas, quando se pretendem estudar várias espécies químicas em simultâneo, visto a radiação captada ser referente, apenas, a um comprimento de onda. É possível analisar diversos radicais, utilizando apenas um sinal luminoso (sistemas com resolução espectral), Figura 2.13c. A luz coletada é decomposta em diversos comprimentos de onda fundamentais, através de um espectrómetro e projetada num sensor CCD, em que, cada pixel corresponde a um comprimento de onda específico. São notórias as vantagens deste sistema, porém o tempo de resposta associado é bastante elevado, sendo os resultados apresentados uma integração temporal do sinal captado.

No diagnóstico do sistema de queima, a utilização de técnicas, não intrusivas, representam uma mais valia, na medida em que, na generalidade dos casos, a resposta ao sinal é bastante rápida, permitindo monitorizar sistemas dinâmicos de uma forma mais precisa, quando comparada a outros sistemas, como tubos de Pitot, termopares, microfones, entre outros. Contudo, torna-se necessário conhecer as relações entre as intensidades das emissões de luz e as propriedades do escoamento, tais como: pressão, razão de equivalência, taxa de estiramento da chama, número de Reynolds, tipo de combustível, chamas de pré-mistura ou difusão, laminares ou turbulentas.

## Estudos e Aplicações da Quimiluminescência

Uma das principais aplicações da quimiluminescência reside na estimativa de razões de equivalência. Kojima [8] relacionou a razão ar/combustível de uma chama laminar de pré-mistura de metano/ar com as seguintes relações de intensidades de emissão:  $C_2^*/CH^*$ ,  $CH^*/OH^*$  e  $C_2^*/OH^*$ . Ikeda [9] utilizou as mesmas razões para determinar a razão de equivalência local em frentes de chamas turbulentas com pré-mistura de propano/ar, verificando que as correlações apresentadas para chamas laminares, Figura 2.14, se aplicam, com um erro de 5 %, a chamas turbulentas.

Porém a aplicação da técnica, necessita de um processo de calibração para a determinação quantitativa da razão de equivalência, em diferentes sistemas de aquisição, de queima e/ou diferentes condições, na medida em que, o sinal pode sofrer alterações relacionadas com a função de transferência do sistema (Kojima [8]), sem no entanto, invalidar as correlações já encontradas.

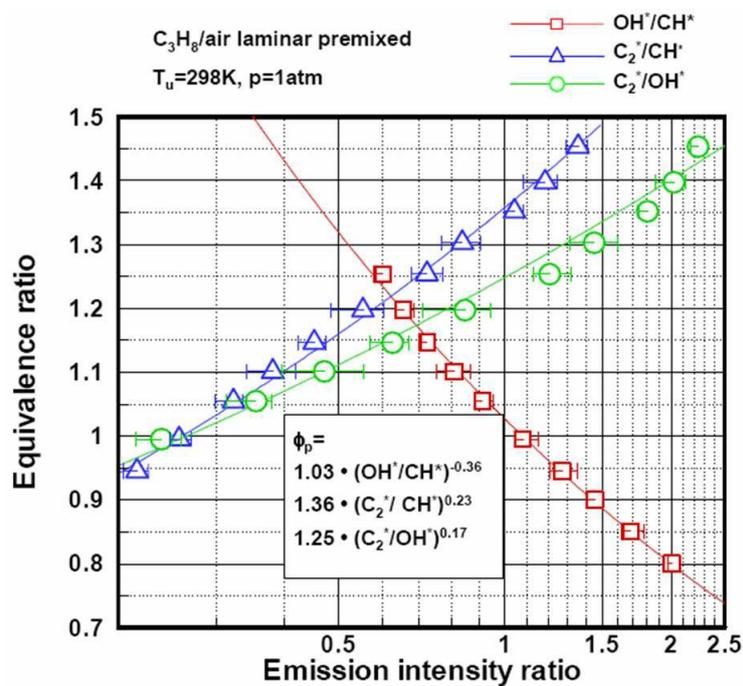


Figura 2.14: Correlação entre a intensidade de quimiluminescência e razão de equivalência, para chamas laminares de pré-mistura de propano/ar [8]

## Sistema de Aquisição Utilizado

O sistema utilizado para quantificar a intensidade de radiação emitida segue o código descrito por Trindade et al [10].

Concisamente, Trindade et al[10], apresenta uma forma de caracterizar as chamas de gás pré-misturado, chamas de metano/ar e propano/ar, usando informações incorporadas em imagens digitais obtidas por câmeras CCD convencionais, como uma ferramenta de monitorização para aplicações práticas.

A caracterização da chama utiliza um modelo de cor RGB como um relé do sensor de combustão para observação das emissões de quimiluminescência de  $CH^*$  e  $C_2^*$ . Estas emissões vinculam-se particularmente para valores médios de B e G, as suas taxas são dependentes de tipo de combustível. Um banco de dados de imagem foi obtido experimentalmente e através de um método de pós-processamento de MATLAB, foi gerado um modelo de calibração numérico de referência para detetar localmente  $\phi$ .

O modelo de interpretação permite a deteção da distribuição da razão de equivalência ao longo da frente de chama numa escala de  $\phi$  compreendida entre 0,8 e 1,4.

A imagem obtida pelo pós processamento do MATLAB, figura 2.15, apresenta 4 fases, ou seja, no canto superior esquerdo apresenta a imagem que se quer tratar, do lado oposto apresenta a zona selecionada para o estudo. No canto inferior esquerdo é apresentado um gráfico de densidade de probabilidade, ou seja, o número de pixéis nos vários valores de  $\phi$ . Por último no canto inferior direito é apresentado uma imagem que mostra a distribuição de  $\phi$  ao longo da zona selecionada.

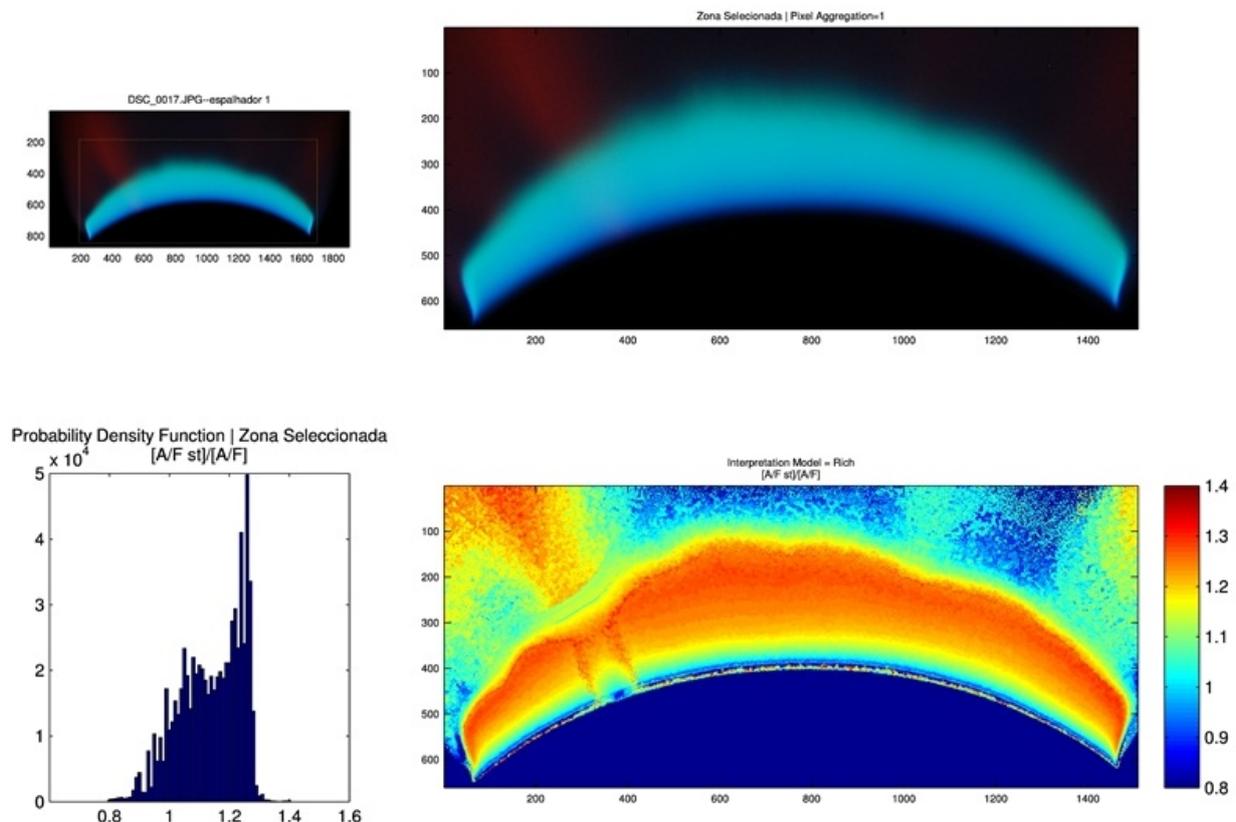


Figura 2.15: Imagem pós-processamento apresentada pelo MATLAB

## 2.3 Prodecimento Experimental PIV

### 2.3.1 Principais Opções Adoptadas em PIV

Para marcar o escoamento optou-se pela utilização de partículas de pó talco, não só por este deter um custo baixo mas também e como referido no subcapítulo 2.2.1, são apropriadas para escoamentos, possuindo um diâmetro característico médio de  $20 \mu\text{m}$ .

Na figura 2.7 pode verificar-se que as partículas de pó de talco, provenientes do ciclone, foram direcionadas, pelo meio de um tubo com um difusor na ponta, para uma caixa de canto. A finalidade da caixa de canto centra-se em reduzir a velocidade das partículas marcadoras, mantendo-as suspensas no ar. Esta caixa de canto foi colocada por cima do ejetor e desviado para a esquerda. Este desvio deve-se ao estudo do campo de velocidades do escoamento ocorrer com o ejetor a trabalhar nas condições de queima, aquecendo o ar à volta, criando correntes de ar quente junto da secção de arrastamento de ar.

Vários problemas apareceram com a formação de uma mistura homogénea do pó de talco com o ar. O problema mais críticos foi a falta de partículas dentro das áreas de interrogação para permitir a plena aplicação da correlação e conseguir uma suspensão, das partículas de pó de talco, com velocidades aproximadamente nulas. É de focar este último ponto devido ao facto de nos encontrarmos em escoamentos com velocidades inferiores a 0.5 m/s. Para contornar estes problemas, três soluções foram avaliadas:

1. Afastou-se a fonte dos marcadores da área de teste, resultando num aumento dos marcadores por área de interrogação. Esta solução fez com que as partículas de pó de talco cruzassem a área de interrogação adicionando uma componente da velocidade, segundo z, significativa na zona de arrastamento de ar, onde esperava-se apenas os valores de velocidade com componente x e y;
2. Aumentou-se a velocidade das partículas de pó de talco, provenientes do ciclone, para que estas chegassem à zona em estudo;
3. As soluções anteriores agravaram o problema de manter as partículas de pó de talco em suspensão com uma velocidade próxima do nulo, pelo que houve a necessidade de introduzir uma nova solução. Esta terceira solução passou por induzir um segundo escoamento de ar de baixo para cima, com uma velocidade o mais baixo possível para não afetar a zona de arrastamento de ar. Esta nova solução colmatou o problema de suspensão de partículas de pó de talco não alterando a concentração de partículas na zona de arrastamento de ar.

Novas soluções foram estudadas, sem êxito, passando a citar:

1. Colocou-se o cilindro do ciclone por baixo do ejetor com um difusor. Verificou-se problemas ao nível de concentração de partículas e componentes verticais de velocidade elevadas;
2. Colocou-se a caixa de canto lateral ao ejetor e incidiu-se o jacto das partículas de pó de talco paralelamente ao eixo da componente horizontal da velocidade. Apurou-se uma excelente concentração de partículas marcadoras mas com componentes horizontais de velocidade elevadas;
3. Embebeu-se as mãos com pó de talco, friccionando uma na outra. Verificou-se uma boa dispersão de partículas de pó de talco bem como velocidades de suspensão próximas do nulo, perdendo-se na fraca concentração das partículas junto à secção de arrastamento de ar. Este facto deve-se, como já confirmamos anteriormente, ao ar aquecido pelo queimador em seu redor criar correntes.

Na seção 2.2.1 é referida a importância de uma boa escolha da dimensão da área de interrogação e o tempo entre pulsos de laser para garantir resultados fidedignos para o campo de velocidades. Para isso, realizaram-se vários ensaios com diferentes tempos entre pulsos. De seguida, obtiveram-se os resultados, utilizando a correlação cross-correlation, para diversas áreas de interrogação. Se os resultados, para um determinado tempo entre pulsos e para as diferentes de áreas de interrogação, convergirem, o tempo escolhido é adequado à situação.

A Figura 2.16 exemplifica o procedimento para o caso das medições no ejetor. Nesta figura observa-se que, para o tempo entre pulsos de laser de  $40 \mu\text{s}$ , os resultados divergem para as duas áreas de interrogação testadas. Para o tempo entre pulsos de  $60 \mu\text{s}$  os resultados convergem para as diferentes áreas de interrogação, sendo este o tempo definido para a obtenção de todos os resultados de PIV.

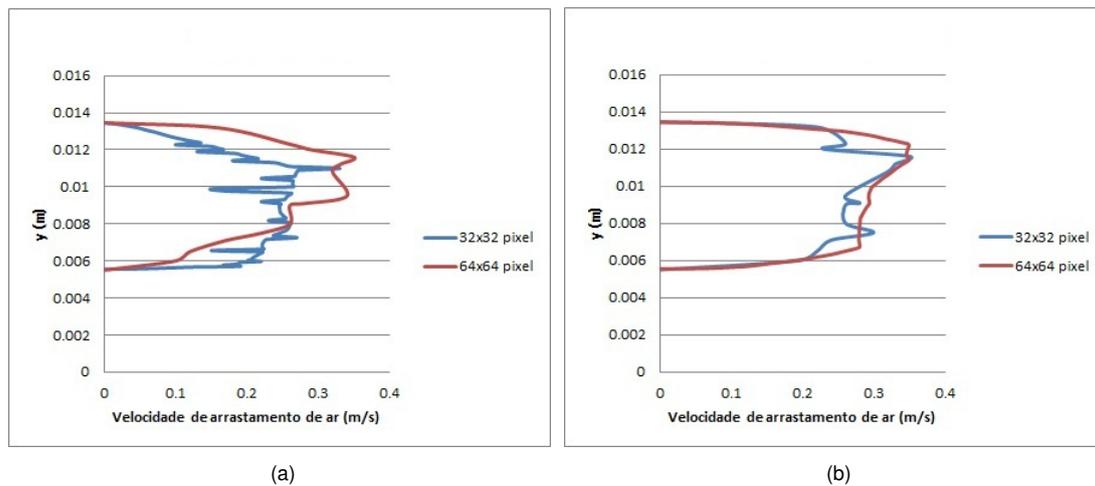


Figura 2.16: Perfis de velocidades para diferentes tempos entre pulsos: a)  $40 \mu\text{s}$ ; b)  $60 \mu\text{s}$ .

Optou-se, para pós-processamento de resultados, a selecção de áreas de interrogação de  $64 \times 64$  pixels, por permitir cálculos mais rápidos do que  $32 \times 32$  pixels, possuir menos variações de resultados e assegurar um razoável número de pontos de dados.

As medições foram realizadas para 100 pares de imagem. Depois de efectuada uma sessão de medições, o trabalho torna-se um processo contínuo com as seguintes etapas:

1. Fazer uma medição sem *seeding*, a fim de coletar informações de fundo e ruído;
2. Subtrair a imagem de fundo na imagem original;
3. Criar uma máscara na imagem, que abrange a imagem resultante da etapa anterior. É útil, por exemplo, para filtrar o efeito da reflexão da luz em componentes metálicos dos aparelhos, que iria introduzir ruído nos cálculos;
4. Aplicar a correlação cruzada para todas as imagens;
5. Aplicar uma faixa de velocidade que elimina vetores incertos;
6. Calcular a média dos dados, ou seja, no presente caso, a média dos 100 pares de imagem.

### 2.3.2 Escolha do Referencial para Tratamento de Dados PIV

A relação entre a velocidade de arrastamento de ar e o caudal mássico de propano foi obtida com base em perfis de velocidade, obtidos na fronteira de uma geometria circular com  $r = 4$  mm, na posição  $x_1 = 32.2$  mm e  $y_1 = 9.5$  mm, figura 2.17. Para alcançar a geometria ótima foi necessário ter em conta os seguintes aspetos:

1. Os furos de aspiração de ar primário descrevem uma calote esférica, como se pode observar na figura, pelo que, o escoamento não apresenta uma direção predominante;
2. O escoamento tridimensional conjugado com o aspeto 1 pode levar à fuga, do plano laser, das partículas junto ao furo ou a componente da velocidade perpendicular ao plano laser ser predominante;
3. As partículas ao escoarem-se para o interior do furo podem fugir das janelas de interrogação. A utilização da sobreposição (overlapping) das janelas de interrogação não colmata a perda de pares porque as partículas deixam de emitir luz. Neste caso o software Flowmanager v4.71 adultera os resultados, tomando como posição final uma outra partícula com dimensão e emissão de luz semelhantes;
4. As velocidades junto à fronteira dos furos não devem ser utilizadas pelas razões referidas nos aspetos 2 e 3;
5. A geometria deve intersectar na perpendicular o máximo de linhas de corrente, como se pode verificar na figura;
6. A velocidade é determinada pela norma das suas componentes axial e transversal.

Tendo em atenção os aspetos acima referidos, esta geometria foi a que mais se adequou para a obtenção dos perfis de velocidade nas várias medições de PIV, mantendo-se a sua localização e o raio.

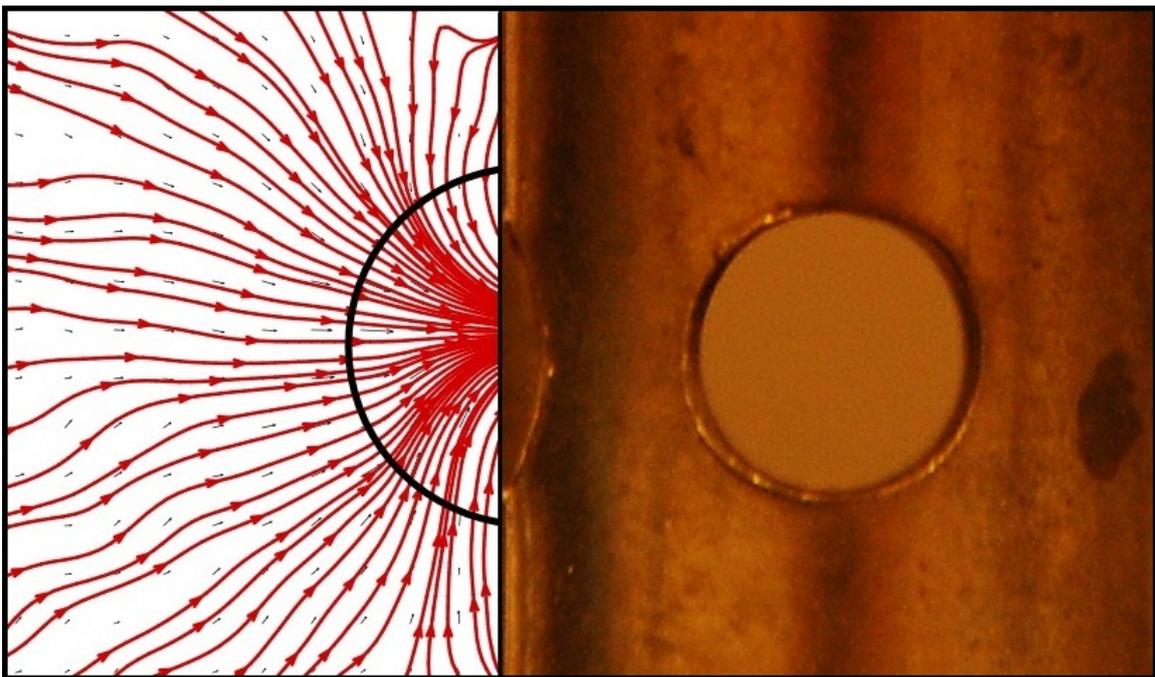


Figura 2.17: Escoamento de ar e geometria ótima

## Capítulo 3

# Apresentação dos Resultados e Discussão

### 3.1 Modelo Matemático

Uma das ideias principais sugeridas na realização deste trabalho é a análise das condições de queima do ejetor, sendo a determinação da razão de equivalência,  $\phi$ , a mais importante. A fim de prever a influência dos parâmetros geométricos do ejetor de combustível em  $\phi$ , utilizou-se um modelo teórico para a determinação do arrastamento de ar primário [1, 11]. As características de arrastamento de ar primário de um ejetor são estudadas com base em princípios simples de conservação de massa, momento e energia. As seguintes suposições são chamadas para simplificar a formulação analítica:

1. O escoamento é turbulento no tubo de mistura tal que não há nenhuma componente radial da velocidade, temperatura ou composição;
2. O ar é arrastado perpendicularmente ao eixo do tubo de mistura e não contribui, portanto, para nenhum momento axial. Isso não é inteiramente verdadeiro, no entanto em [1], considera que a aproximação é válida, porque qualquer aumento de força devido ao arrastamento axial de ar é compensado efetivamente pelo aumento da perda de carga e pelas perdas por fricção na garganta;
3. Fluxo é incompressível, isto é, a massa específica não é dependente da pressão. Esta é uma aproximação justa para as pressões utilizadas em queimadores domésticos. O efeito da temperatura também é ignorado;
4. A distribuição de pressão na cabeça do queimador é uniforme;
5. A câmara de combustão está à pressão atmosférica;
6. Flutuações da mistura ar/gás não queimado são negligenciados. Esta é uma suposição justa, exceto para taxas de baixo fluxo em tubos de mistura verticais.

Este modelo baseia-se em balanços de massa, momento e energia entre as diferentes secções de um sistema de queimador. A Figura 3.1 mostra um desenho esquemático do sistema queimador com as secções diferentes usadas no modelo de arrastamento de ar. O modelo é composto por 3 equações 3.2, 3.3 e 3.4 [12].

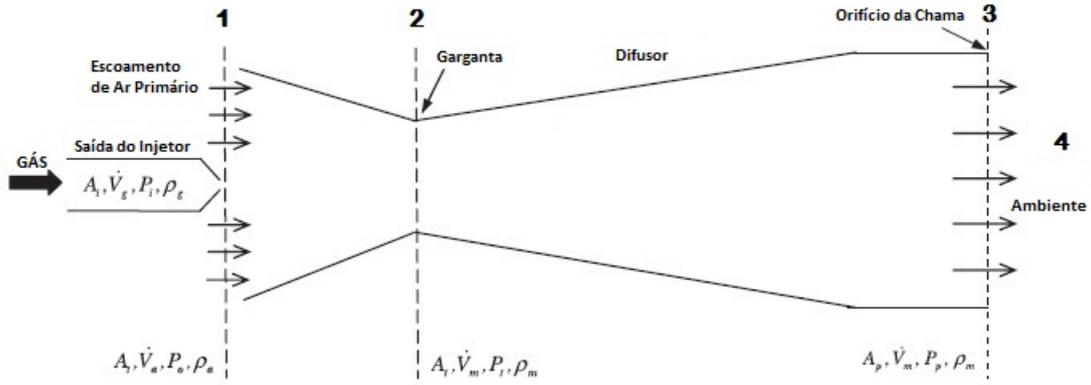


Figura 3.1: Esquema de arrastamento de ar num ejetor, [12].

O balanço de massa entre a entrada e saída do queimador é dado por:

$$\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb} = \dot{m}_{mist} \quad (3.1)$$

Balanço de forças entre a secção 1 e secção 2:

$$p_0 \times A_e + p_0 \times A_i + \frac{\dot{m}_{comb}^2}{\rho_{comb} \times A_i} + \frac{\dot{m}_{ar}^2}{\rho_{ar} \times A_e} = p_g \times A_g + \frac{\dot{m}_{mist}^2}{\rho_{mist} \times A_g} \quad (3.2)$$

Balanço de energia entre a secção 2 e secção 3:

$$p_g \times \rho_{mist} + \frac{1}{2} \times \frac{\dot{m}_{mist}^2}{A_g^2} = p_s \times \rho_{mist} + \frac{1}{2} \times \frac{\dot{m}_{mist}^2}{A_s^2} + \frac{1}{2} \times \frac{\dot{m}_{mist}^2}{A_g^2} \times k \quad (3.3)$$

onde  $k$  é um coeficiente de perda de carga entre a garganta e o difusor, expressa como uma fração da energia cinética no fim garganta, início do difusor.

Balanço de energia entre a secção 3 e a secção 4:

$$(p_s - p_0) \times \rho_{mist} = \frac{1}{2} \times \frac{\dot{m}_{mist}^2}{A_s^2 \times C d_s^2} \quad (3.4)$$

Para resolução do sistema de equações anterior necessitamos de introduzir a equação dos gases perfeitos que é dada pela equação:

$$p = \rho_m \times R_m \times T \quad (3.5)$$

Numa mistura gasosa,

$$R_m = \sum X_i \times R_i = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb}} \times R_{ar} + \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb}} \times R_{comb} \quad (3.6)$$

Substituindo a equação 3.6 em 3.5 obtemos,

$$\rho_m = \frac{p}{T} \times \left( \frac{1}{\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb}} \times R_{ar} + \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb}} \times R_{comb}} \right) \quad (3.7)$$

Da manipulação das equações anteriores é possível determinar e  $\dot{m}_a$  e conseqüentemente  $\phi$ .

Torna-se necessário saber como o modelo se comporta variando alguns termos. Uma das primeiras variações focou-se na área de entrada de ar, visto ser um parâmetro que facilmente se poderia modificar. Para tal, fixou-se, com igual valor, a área da garganta e da saída. De seguida variou-se a área de entrada de ar para valores em redor do valor fixado para as restantes áreas, e apurou-se como modificava a razão de equivalência. Verificou-se, que o modelo proposto por Jones [1], não se comporta bem com esta variação, atribuindo valores na ordem dos 0.01 para a razão de equivalência. Jones [1] supõe, desde o início da formulação, que a área de entrada de ar é igual em valor à área da garganta. Pelo que, como se pode verificar é uma suposição necessária.

De seguida apresenta-se os gráficos que mostram a evolução de  $\phi$ , assumindo que a área de entrada e da garganta são iguais, com as seguintes variações: diâmetro assumindo o queimador como um tubo em que os diâmetros da entrada, da garganta e da saída são iguais; diâmetro do injetor; diâmetro equivalente da saída; caudal mássico de combustível; coeficiente de perda de carga. Os valores das densidades de combustível e ar encontram-se na tabela 3.1. Todos os resultados obtidos tomaram  $Cd_s = 0.85$ . Os valores de perda de carga associada à descarga encontram-se entre 0.8 e 0.9, [1], e a sua variação não altera significativamente o valor dos caudais de ar arrastado e conseqüentemente  $\phi$ .

Na figura 3.2 demonstra-se como varia  $\phi$ , admitindo que o queimador é um tubo, com valores de diâmetro compreendidos entre 5 e 14 mm. Este gráfico foi obtido para um  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ ,  $k=0$ ,  $D_i = 0.45mm$ . Verifica-se que o aumento do diâmetro do tubo vai induzir um aumento do caudal de ar arrastado, para a mesma quantidade de combustível, tornando mais pobre a mistura.

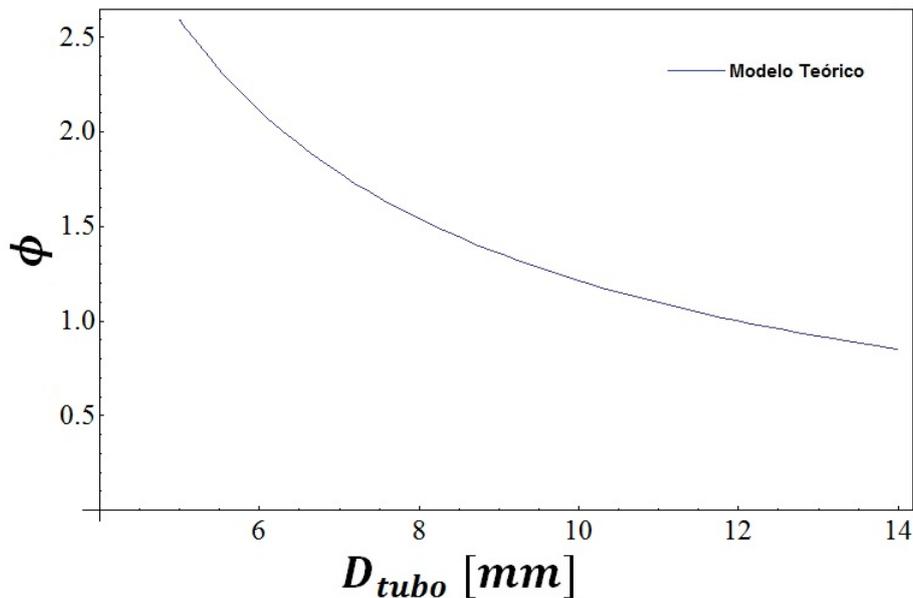


Figura 3.2: Variação de  $\phi$  com o diâmetro do tubo

Na figura 3.3 analisa-se como varia  $\phi$  com o diâmetro do injetor. Este gráfico foi obtido para um  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ ,  $k=0$ ,  $D_e = D_g = D_s = 10$  mm e variando o  $D_i$  entre 0.25 e 0.5 mm. O aumento do  $D_i$  vai diminuir a massa de ar arrastado e conseqüentemente tornar a mistura mais rica. A explicação para esta ocorrência deve-se ao facto de que para o mesmo caudal de combustível a velocidade de saída deste do injetor é menor, ou seja, existe uma redução na conversão da energia de pressão, a montante do injetor, em energia cinética, a jusante do injetor, materializando-se num menor arrastamento de ar.

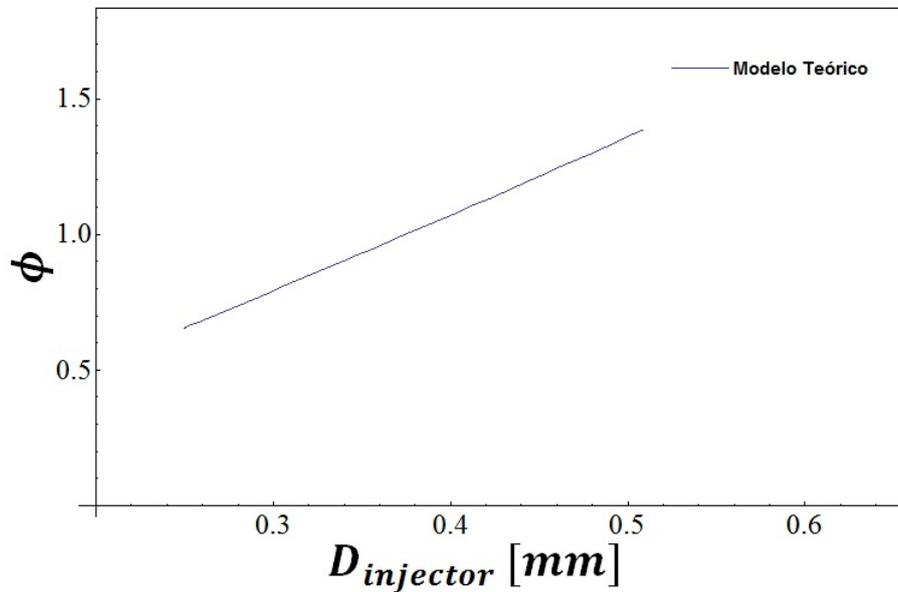


Figura 3.3: Variação de  $\phi$  com o diâmetro do injetor

A variação de  $\phi$  com o diâmetro equivalente da saída está representada no gráfico da figura 3.4. Este gráfico foi obtido para um  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ ,  $k=0$ ,  $D_i = 0.45$ ,  $D_e = D_g = 10$  mm e variando o  $D_s$  entre 7 e 14 mm. A razão de equivalência diminui à medida que a área de saída aumenta porque a perda de carga diminui proporcionalmente com o quadrado da velocidade, daí a sua evolução ser polonomial.

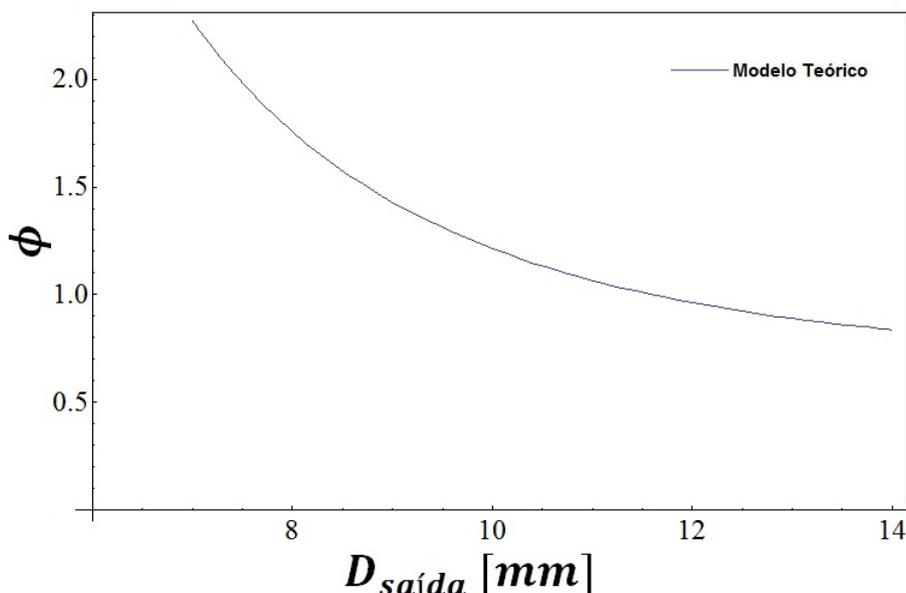


Figura 3.4: Variação de  $\phi$  com o diâmetro equivalente da saída

A variação do caudal do combustível não altera a razão de equivalência,  $\phi$ , como se pode observar no gráfico da figura 3.5. Este gráfico foi obtido para um  $D_i = 0.45$ ,  $k=0$ ,  $D_e = D_g = D_s = 10$  mm e variando  $\dot{v}_{comb}$  entre 0.1 e 1  $[\frac{L}{min}]$ .

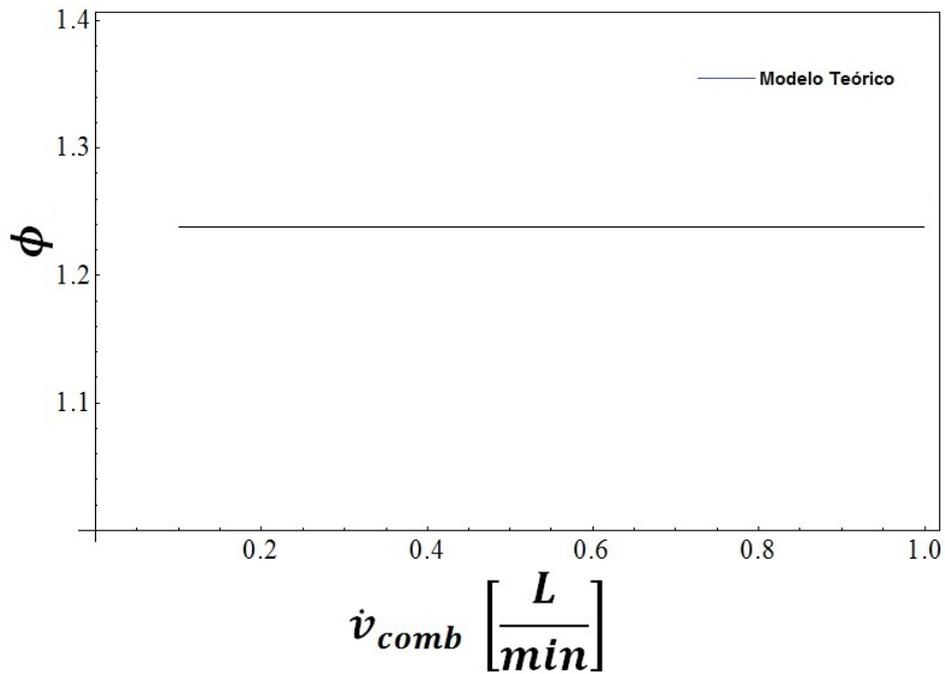


Figura 3.5: Variação de  $\phi$  com o caudal de combustível

A variação da perda de carga, entre a garganta e a saída do difusor, vai aumentar ligeiramente e de forma linear a razão de equivalência,  $\phi$ , como se pode verificar no gráfico da figura 3.6. Este gráfico foi obtido para um  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ ,  $D_i = 0.45$ ,  $D_e = D_g = D_s = 10$  mm e variando o  $k$  entre 0 e 1.

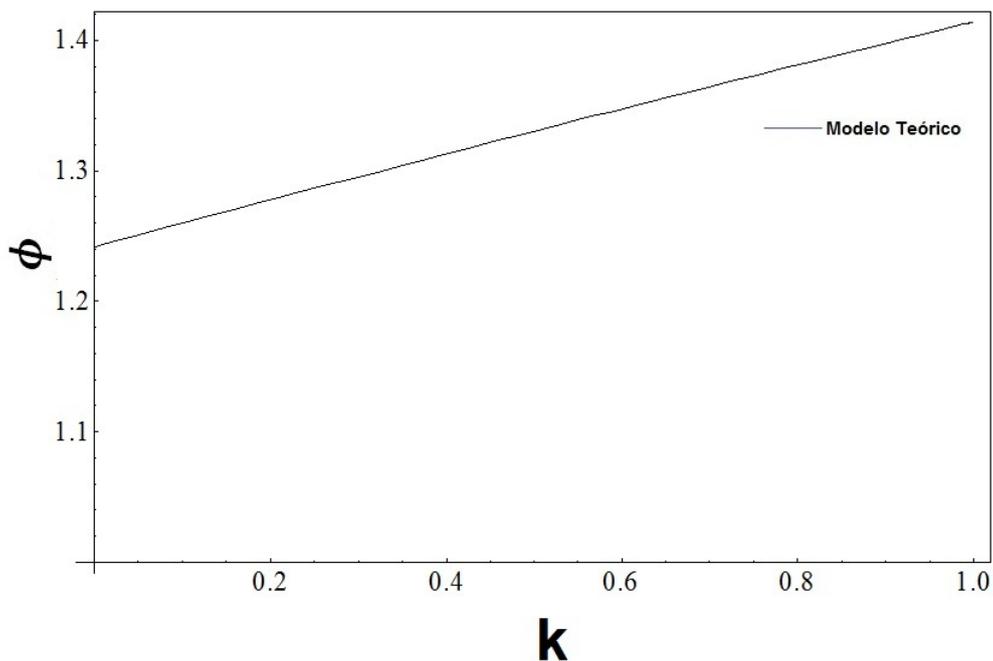


Figura 3.6: Variação de  $\phi$  com perda de carga

## 3.2 Resultados Experimentais PIV

Nesta secção estudou-se o comportamento do escoamento à entrada do ejetor através da técnica de PIV. Analisou-se o campo de escoamentos exterior, com o intuito de compreender o comportamento deste com a variação da velocidade do escoamento interior.

### 3.2.1 Determinação do Caudal de Ar Arrastado

Os valores apresentados na tabela 3.1 são utilizados nesta secção para determinação dos caudais de ar arrastado e razão de equivalência.

Área de entrada ( $A_e$ )( $m^2$ )	$7.56 \times 10^{-5}$
$\left(\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{air}}\right)_{st}$	15.606
$\rho_{fuel}(Kg/m^3)$	1.832
$\rho_{air}(Kg/m^3)$	1.210

Tabela 3.1: Valores da área de entrada, razão estequiométrica da mistura de ar/ propano, densidades do ar e propano

O gráfico da figura 3.7 representa a distribuição de velocidades na entrada do ejetor, para diferentes caudais de combustível. A velocidade apresenta uma distribuição irregular, ou seja, uma maior admissão pela parte superior do furo de entrada de ar. Esta irregularidade acentua-se para maiores caudais de alimentação de combustível.

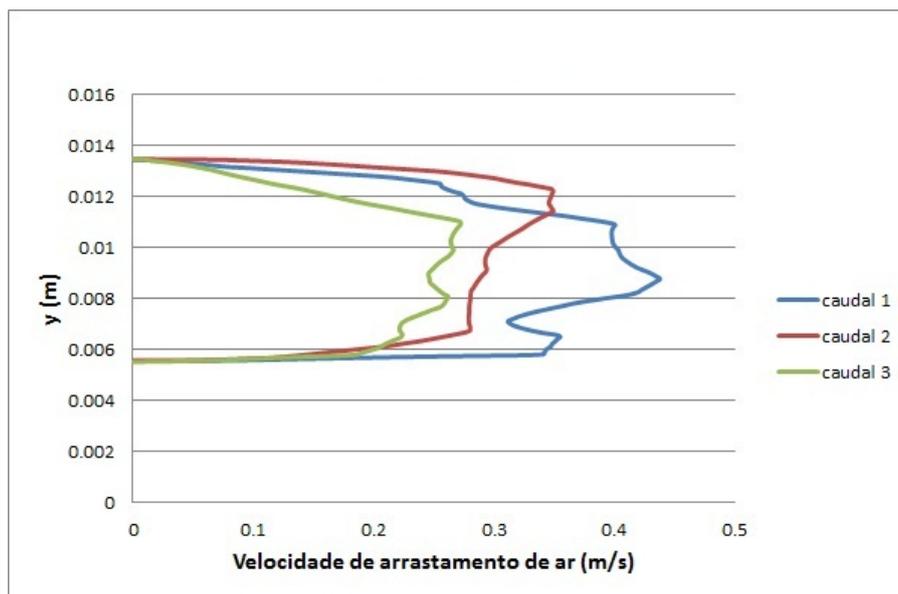


Figura 3.7: perfis de velocidade nas várias medições de PIV

Tomando-se os perfis de velocidades obtidos no gráfico da figura 3.7, é possível, através de uma integração na área, obter a taxa de fluxo volumétrico a passar através dos orifícios:

$$\dot{V} = \int_A v dA \quad (3.8)$$

A razão de equivalência da mistura ar-combustível é dada pela equação 3.9:

$$\phi = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}}\right)}{\left(\frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}}\right)_{st}} \quad (3.9)$$

Baseia-se no conhecimento caudal mássico de combustível injetado,  $\dot{m}_{comb}$ , e do caudal mássico de ar arrastado,  $\dot{m}_{ar}$ , que é determinado pelo integral dos perfis de velocidade, obtidos nas medições de PIV, para uma das 4 entradas. Admite-se que os 4 furos arrastam a mesma massa de ar.

Com base nas equações 3.8 e 3.9 obteve-se os resultados apresentados na tabela 3.2:

Designação	$\dot{m}_{comb}(Kg/s)$	Velocidade média (m/s)	$\dot{m}_{ar}(Kg/s)$	$\phi$
Caudal 1	$9.158 \times 10^{-6}$	0.215	$8.934 \times 10^{-5}$	1.60
Caudal 2	$1.221 \times 10^{-5}$	0.279	$1.159 \times 10^{-4}$	1.64
Caudal 3	$1.526 \times 10^{-5}$	0.333	$1.384 \times 10^{-4}$	1.72

Tabela 3.2: Valores da velocidade média e  $\phi$  do escoamento em redor do queimador.

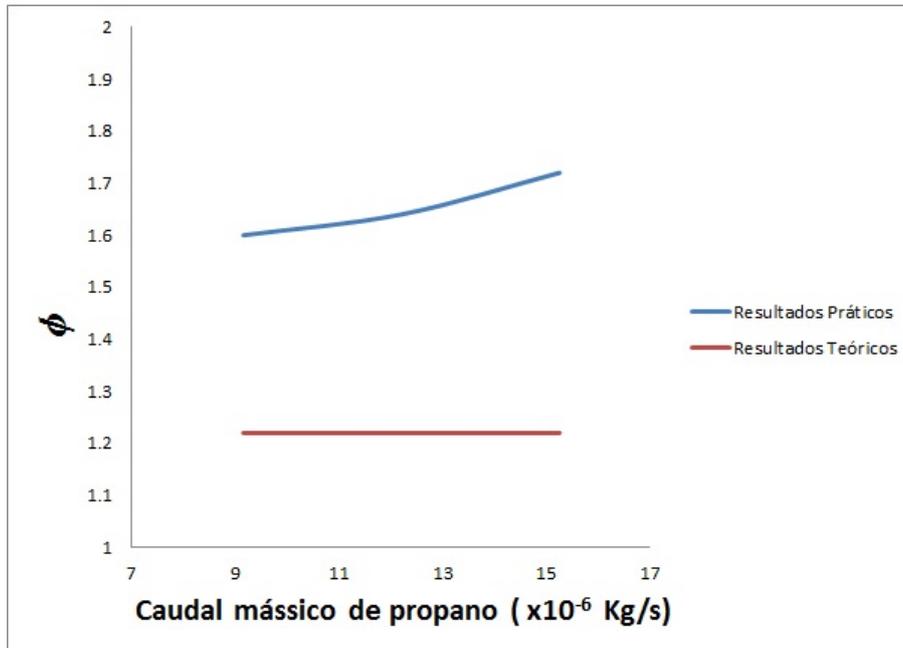


Figura 3.8: Evolução de  $\phi$  com o caudal mássico de combustível

Observa-se, no gráfico da figura 3.8, que existe uma diferença entre os valores obtidos no PIV e os obtidos no modelo teórico. Os resultados PIV mostram um aumento da razão de equivalência, valores compreendidos entre 1.6 e 1.72, com o aumento de caudal de combustível. A razão de equivalência, no modelo teórico, não varia com o caudal de combustível, mantendo um valor de 1.23, para o ejetor estudado e  $k=0$ . Esta discrepância de valores pode ser explicada por vários fatores:

1. As partículas marcadoras, pó de talco, não serem a escolha adequada para escoamentos a baixa velocidade;
2. O método utilizado para formação de *seeding* não ser o apropriado;
3. Todos os tópicos apresentados na secção 3.2.2, na escolha do referencial.

### 3.3 Resultados de Quimiluminiscência

Nesta secção, avalia-se, numa primeira fase, a gama de funcionamento do ejetor, verificando-se, visualmente, o retorno de chama e separação de chama, figura 3.9. De seguida efectua-se um estudo para determinar a variação da mistura ar/combustível ao longo da chama, figura 3.10.

Numa segunda fase, avalia-se a influência da variação de três parâmetros: o caudal mássico de combustível; a área de saída do ejetor; e a área de entrada de ar. Assim, registaram-se imagens das chamas de misturas de  $C_3H_8/ar$  no ejetor em estudo, para a variação de cada um destes parâmetros. Nas figuras 3.13, 3.16 e 3.18 são apresentadas as chamas de misturas de  $C_3H_8/ar$  em função da variação de  $\dot{m}_{comb}$ ,  $A_s$  e  $A_e$ , respectivamente. Ainda nesta fase, vai-se determinar  $k$ , coeficiente de perda de carga entre a garganta e o difusor, recorrendo-se aos resultados práticos da figura 3.13 e ao modelo teórico.

#### 3.3.1 Visualização das Chamas

É importante analisar a forma típica das chamas no ejetor para o combustível em estudo. O queimador em análise contém uma válvula com 3 posições de funcionamento: alimentação fechada, potência mínima e potência máxima. Nesta subsecção verifica-se se estas posições estão dentro dos limites de estabilidade da chama, ou seja, se não existe retorno de chama, quando o queimador funciona na potência mínima, ou separação de chama, quando o queimador funciona na potência máxima, figura 3.9.

Através da figura 3.9, é possível estabelecer uma relação para a variação da forma e do comprimento das chamas, com o aumento do caudal de combustível. Verificou-se que, tipicamente, estas evoluem em forma de arco e aumentam o seu comprimento de acordo com a relação  $V_P/S_L$ , em que  $V_P$  é a velocidade característica do escoamento à saída do queimador, e  $S_L$  é a velocidade de propagação de chama laminar.

O caudal mássico de combustível, debitado por ejetor, na potência mínima, é próximo do apresentado na figura 3.9 com  $\dot{m}_{comb} = 16.44 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . Este valor encontra-se razoavelmente afastado do caudal de retorno de chama, identificado na figura 3.9 com  $m = \dot{m}_{comb} = 10.98 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . Relativamente ao funcionamento do queimador na potência máxima, valor próximo do apresentado na figura 3.9 com  $\dot{m}_{comb} = 43.92 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ , pode visualizar-se que a chama se encontra estável e afastada dos valores para o qual se começa a identificar separação de chama a meio da secção de saída do difusor,  $\dot{m}_{comb} = 49.38 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . É de destacar e comentar a forma como ocorre a separação de chama, como se pode visualizar na figura 3.9, a meio da saída do difusor. Este fenómeno ocorre devido a existir uma maior perda de carga nas laterais, o que leva a uma afluência do escoamento para o interior, maior  $V_P$ , onde existe uma menor perda de carga. O retorno de chama inicia-se nas laterais do difusor, como explicado anteriormente, devido às velocidades,  $V_P$ , serem menores.

Neste contexto, pode dizer-se que a chama encontra-se dentro dos limites de estabilidade para as gamas de funcionamento do queimador.

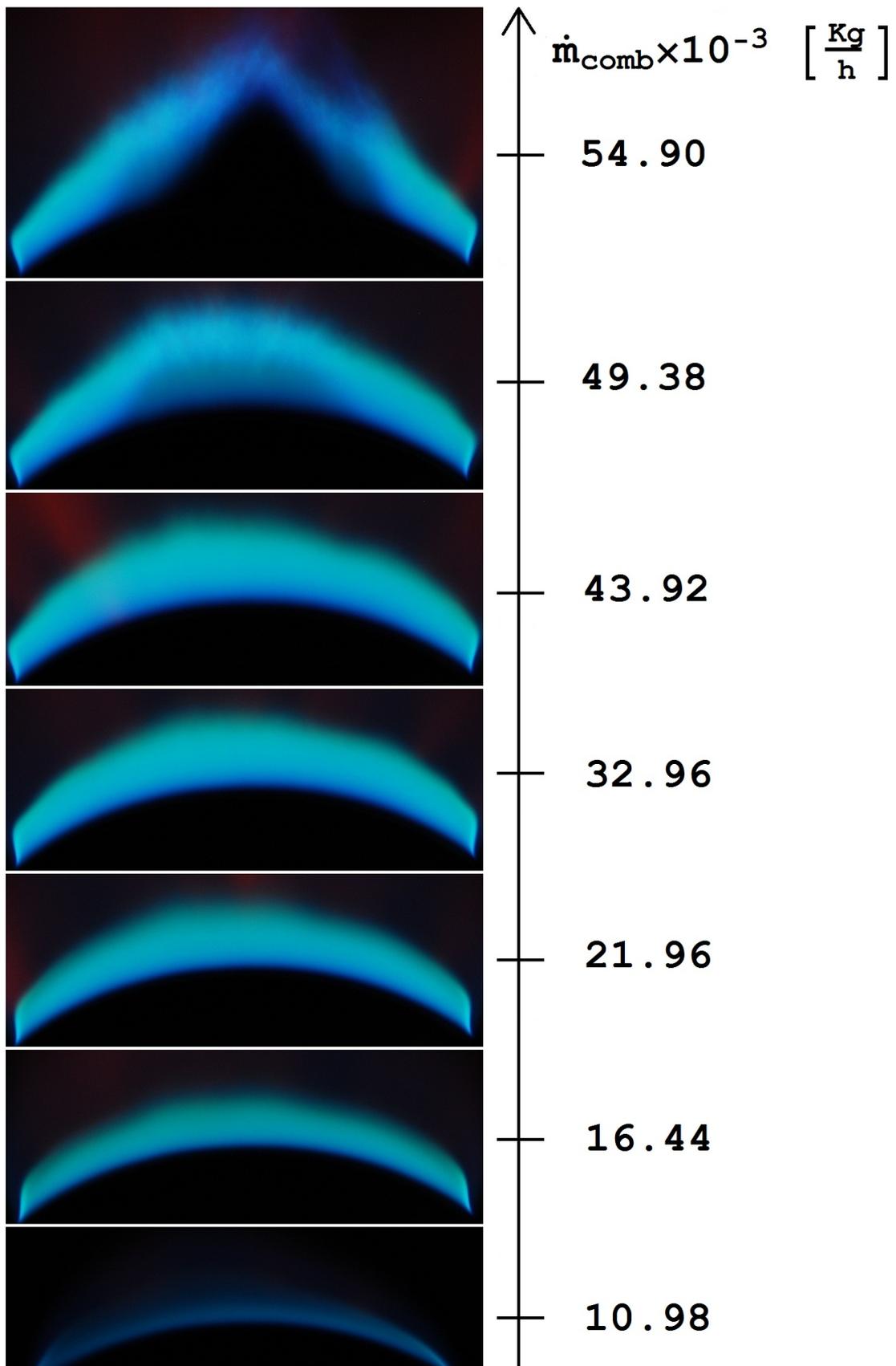


Figura 3.9: Evolução da chama com o aumento do caudal de combustível

Como se pode visualizar na figura 3.10, a razão de equivalência varia entre valores de 1.26 e 1.28. Na parte central do ejetor, este valor mantém-se constante,  $\phi=1.26$ , e com uma mistura muito homogénea. Nas partes laterais da saída do ejetor a mistura apresenta uma mistura heterogénea, sendo o valor médio da razão de equivalência de 1.28. Este facto deve-se à secção de saída não ser uniforme e convergir para um ponto. Como verificámos no modelo, a razão de equivalência aumenta com a perda de carga. Na figura 3.11 é apresentado um gráfico com a variação da razão de equivalência ao longo da chama, sendo a posição 1 a secção mais à esquerda e assim sucessivamente.

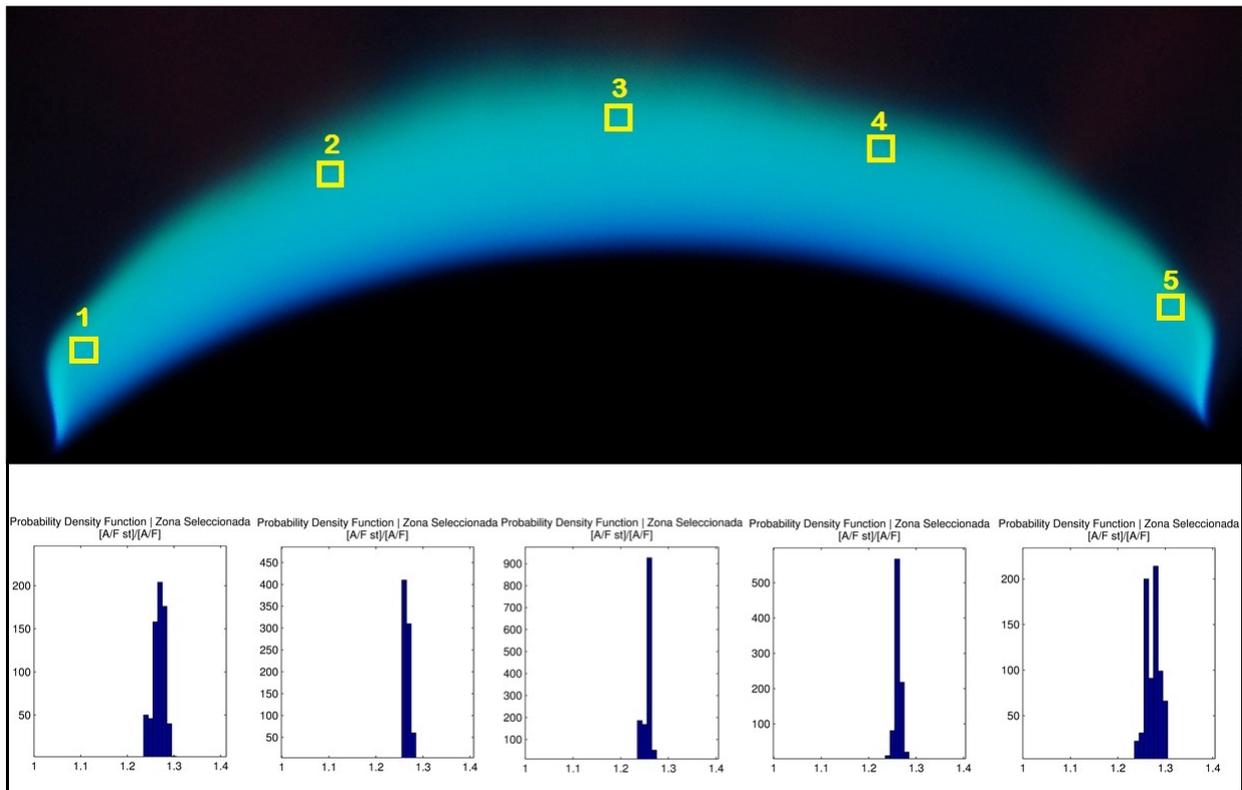


Figura 3.10: Variação de  $\phi$  ao longo da chama para  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} \left[ \frac{kg}{h} \right]$

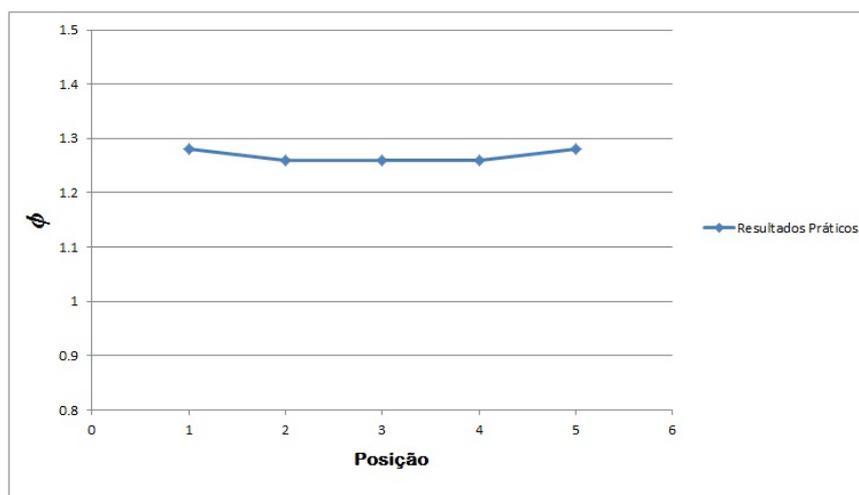


Figura 3.11: Variação de  $\phi$  ao longo da chama

### 3.3.2 Análise de Imagens

#### Varição do Caudal de Combustível

A variação da razão de equivalência com o caudal mássico pode observar-se na figura 3.13. O gráfico da figura 3.12 compila os resultados obtidos no tratamento das fotos, modelo teórico com perda de carga nula e com perda de carga ajustada aos resultados obtidos experimentalmente.

Verifica-se, na figura 3.13, que a razão de equivalência sofre uma variação diminuta, tomando valor de 1.25 para o caudal de propano mais baixo e de 1.26 para o caudal intermédio e mais elevado. Perante estes resultados podemos validar o modelo, na medida em que a razão de equivalência não varia com o caudal de combustível.

Nesta fase, calibrou-se o modelo, para tornar a sua resposta mais credível e perto das condições funcionamento do ejetor em estudo. Para isto, variou-se a perda de carga,  $k$ , entre a garganta e o difusor, até atingir o valor, para a razão de equivalência, de 1.26. Tomou-se este valor por ser a média dos resultados obtidos. Chegou-se a um valor de  $k=0.17$ , como se pode verificar no gráfico da figura 3.12. Utilizou-se este valor, no modelo teórico, para confrontar todos os resultados obtidos experimentalmente em Quimiluminescência.

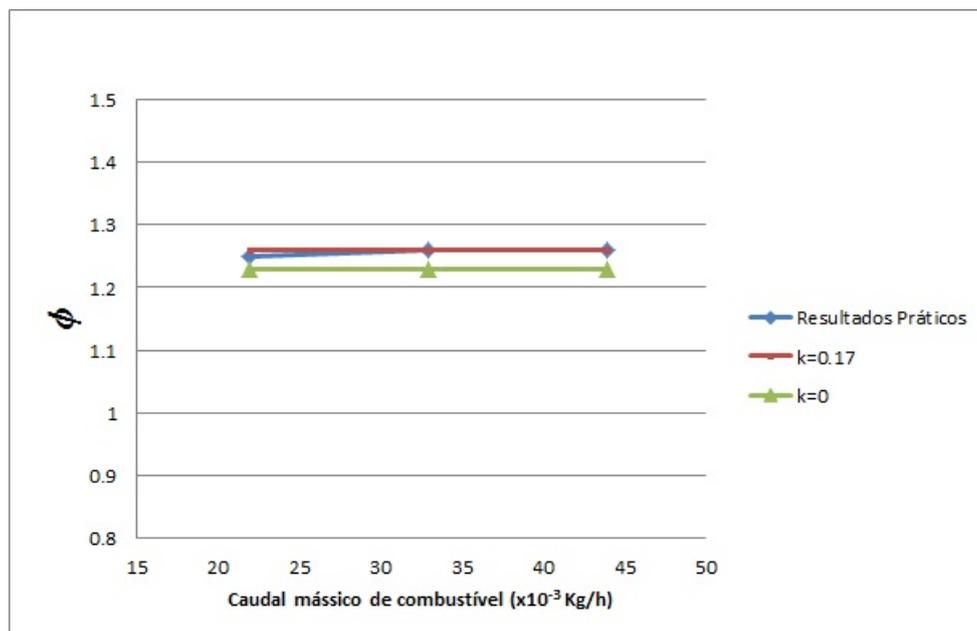
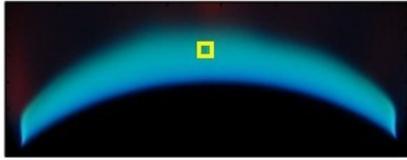
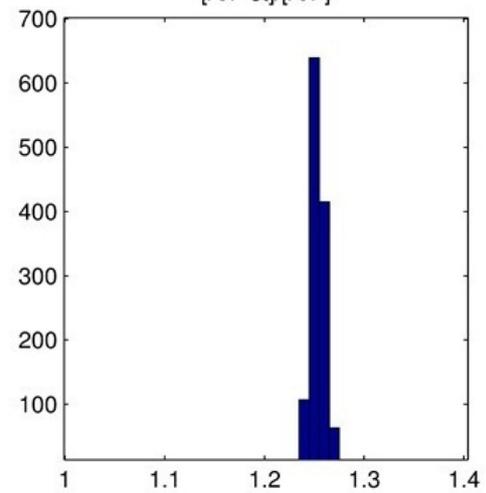


Figura 3.12: Variação de  $\phi$  com o caudal de combustível

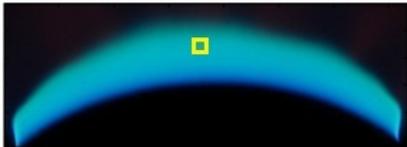
$$\dot{m}_{\text{comb}} = 21.96 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$



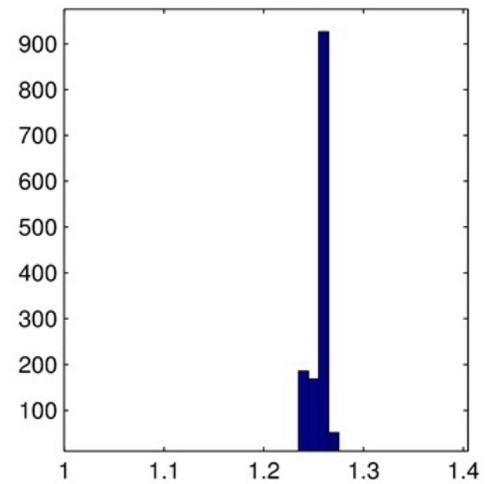
Probability Density Function | Zona Seleccionada  
[A/F st]/[A/F]



$$\dot{m}_{\text{comb}} = 32.94 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$



Probability Density Function | Zona Seleccionada  
[A/F st]/[A/F]



$$\dot{m}_{\text{comb}} = 43.92 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$



Probability Density Function | Zona Seleccionada  
[A/F st]/[A/F]

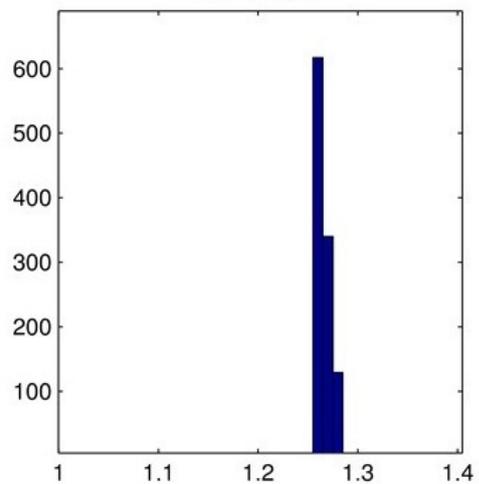


Figura 3.13: Variação de  $\phi$  com o caudal de combustível

## Varição da Área de Saída

Esta subsecção é das que merece maior relevo, no âmbito de resultados experimentais de Quimiluminescência, visto a sua manipulação estar ao alcance de qualquer pessoa. A manutenção destes queimadores é efetuada nas Oficinas Gerais de Materiais de Engenharia (OGME). A manutenção efetuada é seguidamente enumerada:

- Limpeza dos componentes, como por exemplo remoção de ferrugens, decapar tinta antiga e aplicar-lhe uma nova, etc;
- Troca de componentes danificados, economicamente não reparáveis, como por exemplo vedantes, válvulas, injetores, espalhadores, tubos de alimentação, etc.

No final testam o equipamento, em condições de funcionamento, e procedem a uma calibração. Este processo é visual e foca-se nos seguintes aspetos: eliminar pontas amarelas; não ocorrer retorno nem separação de chama nas duas posições de funcionamento do queimador, potência mínima ou máxima. O ajustamento passa pela modificação da área de saída do ejetor, ou seja, recorrendo a uma chave de fendas para aumentar e um alicate para diminuir.

Neste ensaio foi utilizado um ejetor diferente, com características físicas idênticas ao anterior, porque como já referimos anteriormente o processo para modificação da área de saída é arcaico e poderia danificar o ejetor. Tornou-se necessário saber a resposta deste em condições normais, registando-se uma razão de equivalência com o valor de 1.20, Anexo B, diferente do ejetor anterior que apresentava  $\phi=1.26$ .

Como se pode verificar na figura 3.14, a configuração da saída do ejetor não permite obter o valor exato da sua área, por métodos tradicionais, ou seja, paquímetro. Contudo o paquímetro foi a ferramenta utilizada para obtenção de um valor de espessura média.



Figura 3.14: Configuração da saída do difusor

A figura 3.16 mostra a evolução da razão de equivalência,  $\phi$ , com a variação da área de saída, mantendo o mesmo caudal mássico de combustível,  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . O gráfico da figura 3.15 compara os valores obtidos na figura 3.16 com os valores obtidos no modelo. A alteração da área de saída foi cuidadosa mas arcaica, recorrendo ao uso de uma chave de fendas, tentando manter uma uniformidade relativamente à distância entre as paredes da saída do ejetor. O registo destas áreas torna-se necessário no âmbito da comparação com o modelo teórico. Para obtenção dos resultados, primeiramente, reduziu-se a área de entrada e foi-se aumentando até se verificar retorno de chama.

Observa-se, na figura 3.16, que a altura de chama vai diminuindo à medida que vamos aumentando a área de saída. Visualiza-se o aparecimento de pontas amarelas nas áreas de saída inferiores, vindo a desaparecer quando esta se aproxima da área da garganta e entrada de ar,  $A_g = 7.854 \times 10^{-6} [m^2]$ , e desaparecendo completamente para valores superiores.

Verifica-se que, após a redução de área de saída do difusor, o ejetor passa a trabalhar numa gama de razão de equivalência média de 1.21. Com o aumento da área ocorre inicialmente uma subida de  $\phi$  para um valor de 1.22, vindo sempre em queda ligeira até atingir  $\phi=1.18$ , na abertura máxima possível. Apura-se, perante estes resultados, que o ejetor é "insensível", em termos médios, à alteração da área de saída. Contudo esta alteração tem consequências na qualidade da mistura, apresentando-se heterogénea, como se pode verificar na figura 3.16, onde se encontra valores de razão de equivalência compreendidos entre 1.15 e 1.25, na pequena secção estudada. A análise de secções maiores poderia alargar este intervalo.

Esperava-se, de acordo com o modelo, que esta redução de área aumenta-se a razão de equivalência,  $\phi$ , porque a introdução desta perda de carga iria-se refletir numa diminuição de caudal de ar arrastado.

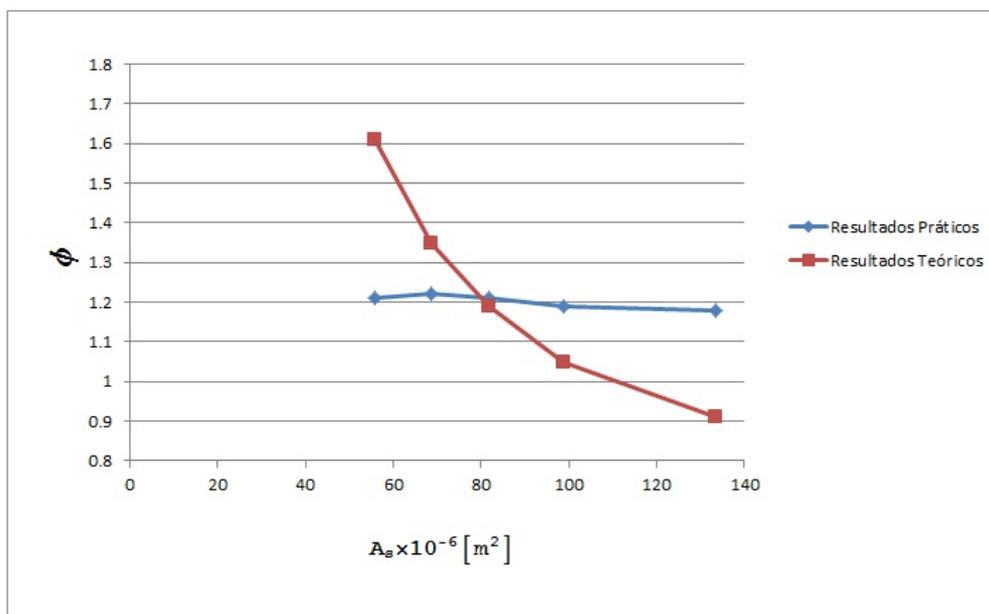


Figura 3.15: Variação de  $\phi$  com a área de saída

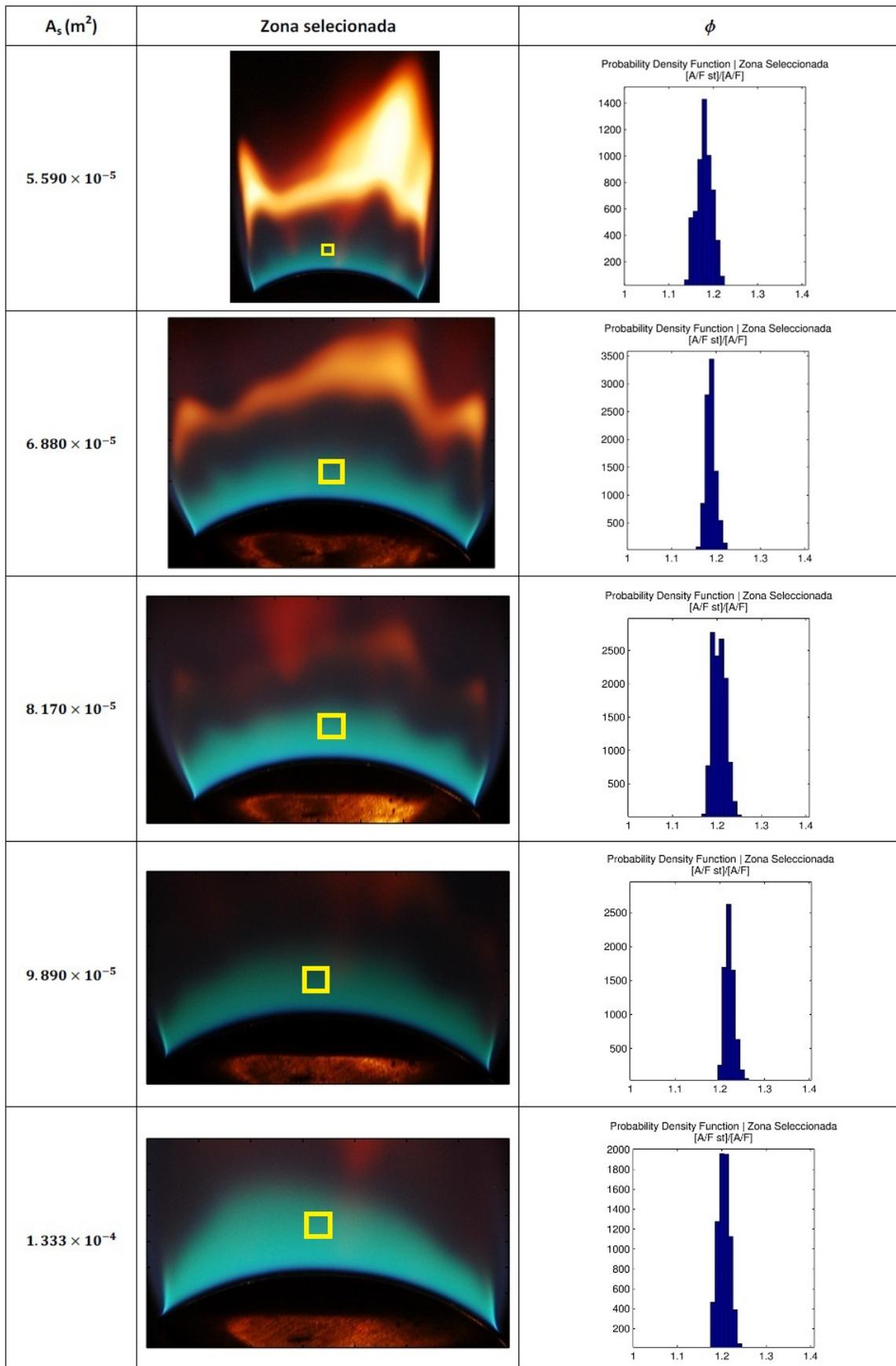


Figura 3.16: Variação de  $\phi$  com a área de saída

## Varição da Área de Entrada

No modelo descrito não foi possível apresentar uma resposta à variação da área de entrada de ar. Contudo tornou-se necessário, via experimental, encontrar uma resposta a esta variação.

Nesta secção modificou-se a área de entrada de ar, como se pode verificar na figura 3.18, executando-se, primeiramente, uma redução desta. Para se obter esta redução, recorreu-se à ajuda de papel de alumínio para fechar os furos de entrada, registando valores com dois furos opostos fechados e um furo fechado. Como se pode verificar, foi-se aumentando gradualmente a área de entrada efetuando-se, numa segunda fase, aumentos de diâmetro, de todos os furos de entrada de ar, na proporção de 0.25 em 0.25 mm. Executou-se aumentos até atingir o diâmetro de 6mm por furo, este patamar foi imposto por características físicas, ou seja, sobreposição dos furos. Os ensaios foram executados para o mesmo caudal mássico de combustível,  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ .

No gráfico da figura 3.17 apresenta-se duas fases distintas, a redução e o aumento da área de entrada de ar, em relação às características físicas do ejetor,  $A_e = 7.854 \times 10^{-6} [m^2]$ . Observa-se, numa primeira fase, que a redução da área de entrada traduz-se numa diminuição da razão de equivalência, ou seja, num aumento do caudal de ar aspirado, passando do valor  $\phi=1.26$ , sem modificação de área, para  $\phi=1.23$ , com dois furos fechados. Numa segunda fase, verifica-se que o aumento da área de entrada exprime-se num aumento da razão de equivalência,  $\phi=1.30$ . Verifica-se, na figura 3.18, que com a alteração da área, de entrada de ar, a mistura torna-se cada vez mais heterogénea, tanto na redução como no aumento.

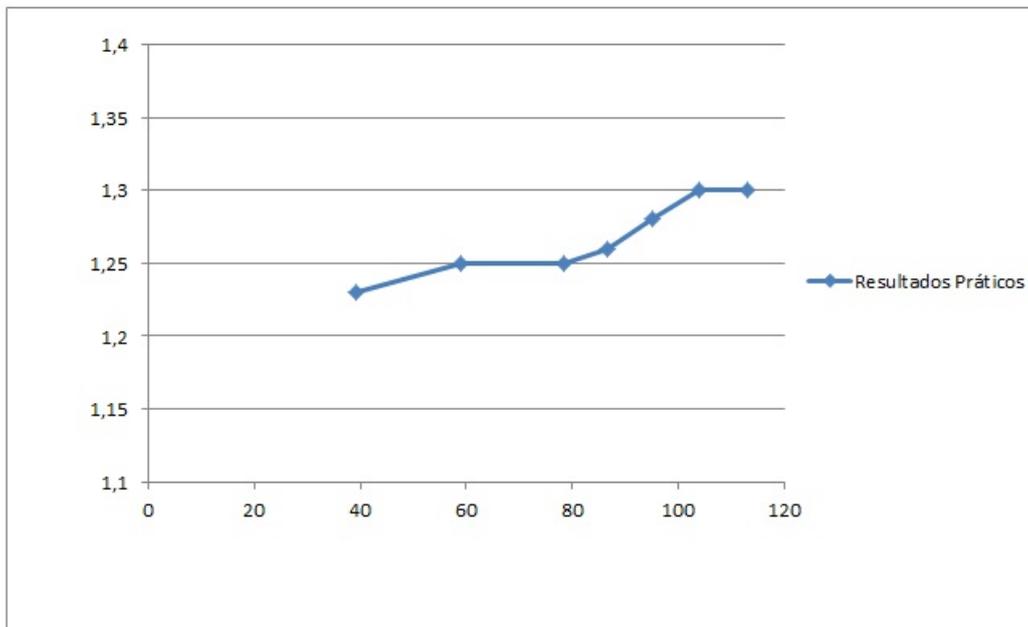


Figura 3.17: Variação de  $\phi$  com a entrada de ar

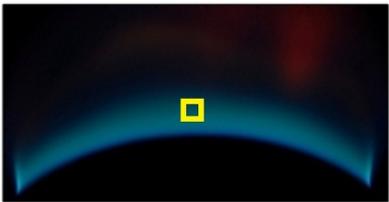
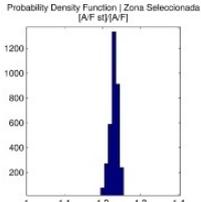
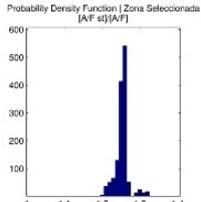
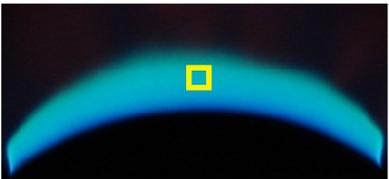
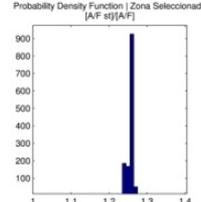
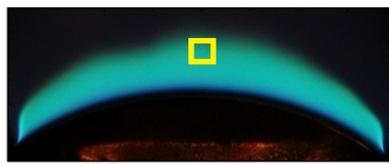
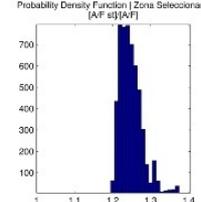
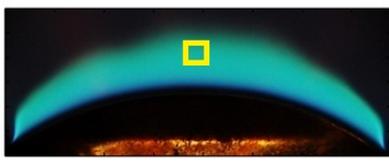
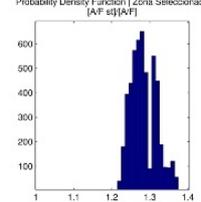
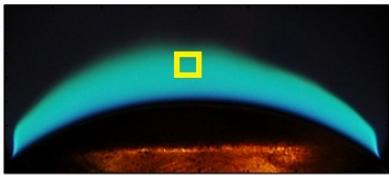
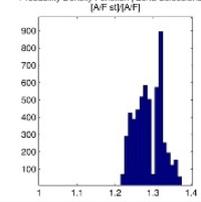
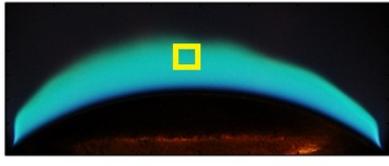
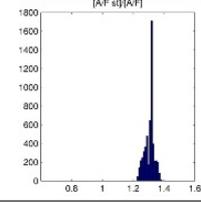
$A_e$ (m <sup>2</sup> )	Zona selecionada	$\phi$
$3.937 \times 10^{-5}$ (2 furos fechados)		
$5.890 \times 10^{-5}$ (1 furo fechado)		
$7.854 \times 10^{-5}$ (sem alteração)		
$8.659 \times 10^{-5}$ (D <sub>r</sub> =5.25 mm)		
$9.503 \times 10^{-5}$ (D <sub>r</sub> =5.50 mm)		
$1.039 \times 10^{-4}$ (D <sub>r</sub> =5.75 mm)		
$1.131 \times 10^{-4}$ (D <sub>r</sub> =6.00 mm)		

Figura 3.18: Variação de  $\phi$  com a entrada de ar

## Capítulo 4

# Conclusão

Neste presente trabalho compreendeu-se e avaliou-se o mecanismo de arrastamento de ar de um ejetor, que faz parte integrante de um conjunto de 38 ejetores, de um queimador de uma Marmita.

A partir da alteração do caudal de combustível, foi possível visualizar-se a zona de estabilidade da chama, ou seja, zona compreendida entre o retorno e separação de chama. Verificou-se que o retorno de chama ocorre para  $\dot{m}_{comb} = 10.98 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . E a separação de chama para  $\dot{m}_{comb} = 49.38 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . O queimador, na potência mínima e máxima, 8 e 22 KW, debita  $\dot{m}_{comb} = 16.44 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$  e  $\dot{m}_{comb} = 43.92 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ , respetivamente, por ejetor. Conclui-se que o queimador funciona dentro dos limites de estabilidade de chama.

Verificou-se, através dos ensaios de PIV, que o arrastamento de ar, nos furos de admissão, não é simétrico. Observa-se, através dos perfis de velocidades, uma maior admissão pela parte superior do furo de entrada de ar. Esta irregularidade acentuou-se para maiores caudais de alimentação de combustível.

Nos ensaios experimentais de Quimiluminescência verificou-se que a razão de equivalência sofre uma variação diminuta com a variação do caudal de combustível, valores compreendidos entre 1.25 e 1.26. Do lado oposto, os ensaios de PIV, mostraram uma variação significativa com o aumento do caudal de combustível, registando-se um  $\phi=1.6$ , para  $\dot{m}_{comb} = 32.97 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ , e  $\phi=1.72$ , para  $\dot{m}_{comb} = 54.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$ . O modelo matemático mostra que a razão de equivalência é independente do caudal de combustível. Neste contexto e tendo-se em conta os resultados experimentais de Quimiluminescência, conclui-se que a razão de equivalência é independente do caudal de combustível e o modelo apresenta uma boa resposta a esta alteração.

Para baixos escoamentos as partículas de pó de talco não são bons marcadores para obtenção de resultados de PIV. Verifica-se que a pequena diferença nas densidades, entre o pó de talco e o ar, tem um peso elevado nos valores de velocidade, ou seja, existe uma maior discrepância entre a velocidade de escoamento de ar e a de pó de talco.

Conclui-se, através de ensaios de Quimiluminescência, que o ejetor trabalha com uma razão de equivalência de 1.26. A partir deste valor, ajustou-se o modelo matemático, alterando a perda de carga,  $k$ , entre a garganta e a saída do difusor, chegando-se a um valor de  $k=0.17$ .

Verificou-se, através de uma análise ao longo da chama, que esta apresenta uma mistura mais rica nas saídas laterais do difusor, porque a área de saída converge nas extremidades do ejetor, e como já se

verificou  $\phi$  aumenta ligeiramente com a diminuição da área de saída.

Observou-se que o ejetor mostra-se "insensível" a alterações da área de saída e de entrada de ar, em relação ao valor médio da razão de equivalência. Observando-se uma ligeira diminuição de  $\phi$  com o aumento da área de saída e um aumento ligeiro de  $\phi$  com o aumento da área de entrada de ar. Contudo observa-se que as misturas de ar/combustível são mais homogêneas quando as áreas de entrada, da saída e da garganta têm valores próximos.

Visualizou-se que a altura de chama vai diminuindo à medida que vamos aumentando a área de saída. Observou-se o aparecimento de pontas amarelas nas áreas de saída inferiores, vindo a desaparecer quando esta se aproxima da área da garganta e entrada de ar,  $A_g = 7.854 \times 10^{-6} [m^2]$ , e desaparecendo completamente para valores superiores.

Concluiu-se que as alterações efectuadas pioraram o funcionamento do ejetor, em termos da homogeneidade da mistura e no aparecimento de pontas amarelas. Observou-se que o ejetor apresenta um bom funcionamento para uma proximidade entre os valores das áreas de entrada, garganta e saída. A redução da área de saída diminuiu o caudal de combustível para o qual ocorre separação de chama. A situação inversa, aumento da área de saída, agravou o retorno de chama, para baixos caudais de combustível.

# Bibliografia

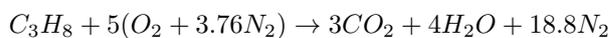
- [1] H. Jones, *The application of combustion principles to domestic gas burner design*, B. Gas, Ed. London, 2005.
- [2] C. LIAO, "Gas ejector modeling for design and analysis," Master's thesis, Texas A&M University, 2008.
- [3] S. He, Y. Li, and R. Wang, "Progress of mathematical modeling on ejectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1760–1780, 2009.
- [4] S. WATANAWANAVET, "Optimization of a high-efficiency jet ejector by computational fluid dynamics software," Master's thesis, Texas A&M University, 2005.
- [5] M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry-A Practical Guide*, Springer, Ed. Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] R. J. Bastiaans, *Cross-correlation piv; theory, implementation and accuracy, 2000*. ISBN: 90-386-2851-X.
- [7] L. C. Haber, "An investigation into the origin, measurement and application of chemiluminescent light emissions from premixed flames," Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [8] J. Kojima, Y. Ikeda, and T. Nakajima, "Basic aspects of oh, ch, and c2 chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames," *Combustion and Flame*, vol. 140, pp. 34–45, 2005.
- [9] Y. Ikeda, T. Kurahashi, N. Kawahara, and E. Tomita, "Temperature measurements of laminar propane/air premixed flame using detailed oh\* spectra intensity ratio," in *12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 12-15 July. Lisboa, Portugal, 2004*.
- [10] T. P. Trindade, E. C. Fernandes, and J. M. Sanches, *Color Image Processing as a Monitoring Tool in Gas Combustion Systems*, I. S. de Engenharia de Lisboa (ISEL) and I. S. T. (IST), Eds., 2012.
- [11] F. M. White, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, Ed. Fourth Edition.
- [12] A. Namkhat and S. Jugjai, "Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments," *Energy*, vol. 35, pp. 1701–1708, 2010.



# Anexo A

## Cálculo de Razão Estequiométrica de Ar/Propano em Massa

A reação estequiométrica do propano no ar pode escrever-se do seguinte modo:

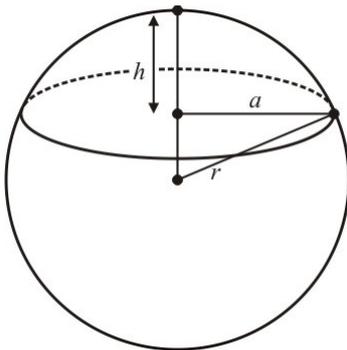


A razão estequiométrica ar/combustível para o propano é dada por:

$$\left(\frac{m_{ar}}{m_{prop}}\right)_{esteq} = \frac{5(M_{O_2} + 3.76M_{N_2})}{M_{prop}} = \frac{5(32 + 3.76 \times 28)}{44} = 15.6 \text{ (Kg de ar/Kg de } C_3H_8)$$

## Cálculo da Área Superficial de uma Calote Esférica

Uma calota esférica, em geometria, é a parte de uma esfera cortada por um plano.



Conhecendo-se o raio da esfera, **r**, e a altura da calota, **h**, a área superficial é dada por:

$$A = 2 \times \pi \times r \times h$$



# Anexo B

A imagem obtida pelo pós processamento do MATLAB para ejetor utilizado no ensaio de variação da área de saída. Resultados obtidos para  $\dot{m}_{comb} = 32.94 \times 10^{-3} [\frac{kg}{h}]$  e sem alteração das suas características físicas.

