

# Análise Numérica e Experimental de Bombas Ejetoras para sistemas de queima com Metano e Hidrogénio

Carlos Manuel de Bastos Ribeiro  
carlosmbribeiro@tecnico.ulisboa.pt

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal  
Outubro 2021

## Resumo

A presente dissertação tem como objetivo a análise numérica e experimental de uma bomba ejetora para sistemas de queima, a operar com metano e uma mistura de metano e hidrogénio. Este queimador funciona por arrastamento de ar e é semelhante a um fogão doméstico. A injeção de combustível provoca o arrastamento de ar ambiente e permite a mistura do reagente com o oxidante ao longo do tubo de mistura. Realizou-se um estudo numérico no software *Comsol Multiphysics* para verificar os principais componentes que afetam o comportamento destes sistemas de queima. Nas simulações executadas procedeu-se à análise dos principais parâmetros que mais afetam a quantidade de ar arrastado, entre os quais: diâmetro interno do tubo de mistura ( $D_T$ ), comprimento do tubo de mistura ( $L$ ), velocidade de injeção do combustível e o tipo de combustível utilizado. Verificou-se que o aumento do diâmetro interno do tubo influencia substancialmente a quantidade de ar arrastado, sendo esta tanto maior quanto maior for o diâmetro do tubo. Verificou-se também o comportamento adimensional da razão de equivalência em função da razão do comprimento do tubo sobre o diâmetro interno do tubo ( $L/D$ ), tendo-se concluído que para  $L/D > 6$  há um comportamento crescente e aproximadamente linear e que para  $2 < L/D < 6$  há um decréscimo abrupto na razão de equivalência. A adição de hidrogénio promove a redução da quantidade de ar arrastado, um ligeiro aumento da temperatura e a redução da emissão de poluentes.

Os resultados numéricos foram comparados com ensaios experimentais realizados através da espectroscopia, onde se obtiveram discrepâncias entre 3% e 8%. Na análise experimental verificou-se que o queimador tem o comportamento observado numericamente.

## Introdução

As condições de acesso a fogões domésticos nem sempre são as mais fáceis para muitas regiões rurais, desta forma, é extremamente importante procurar soluções mais vantajosas passíveis de serem executadas mais fácil e rapidamente. Uma das hipóteses passa pela utilização de uma bomba ejetora para sistemas de queima. Este sistema é fácil de operar e é passível de ser usado sem a necessidade de acesso a recursos de difícil acesso, uma vez que apenas são necessários um tubo com um suporte, combustível e um injetor conectado ao armazenamento do mesmo.

Assim, procura-se estudar a melhor combinação de fatores que influenciam o bom funcionamento do queimador principalmente: o comprimento do tubo ( $L$ ), o diâmetro do tubo ( $D_T$ ) (comparando a melhor razão entre o comprimento e o diâmetro do mesmo), a velocidade de injeção do combustível e também a influência da adição de hidrogénio ao combustível. Este último é um fator altamente preponderante para a transição dos combustíveis fósseis para energias mais verdes, mudança que

está a ser estudada afincadamente pelo estado português e por várias empresas portuguesas e que trará inúmeros benefícios, nomeadamente a nível económico e ambiental. Com estes parâmetros analisados, será possível obter uma configuração final para se poder construir um sistema seguro e funcional, capaz de produzir uma chama de pré-mistura.

Diversos estudos têm sido realizados para melhor entender o funcionamento de queimadores por arrastamento de ar. Estes sistemas possuem um funcionamento bastante simples, através da injeção de combustível com uma determinada velocidade inicial que arrasta ar para o interior do tubo. Os dois gases vão-se misturando ao longo do tubo até à saída do mesmo, onde deverá haver uma fonte de ignição para permitir a formação de uma chama. Pritchard et al.[1], começaram por elaborar um modelo teórico baseado na conservação de movimento e energia para calcular a quantidade de ar primário arrastado. Com esta análise foi possível verificar teoricamente quais os parâmetros que influenciam a quantidade de ar arrastado num queimador por arrastamento de

ar, entre os quais, o tipo e o caudal de combustível, a geometria do injetor e a do tubo. Mais tarde, Singh et al. [2], desenvolveram um modelo de elementos finitos para analisar a quantidade de ar arrastado em casos isotérmicos. Os resultados obtidos aproximaram-se bastante dos valores teóricos.

Apesar destes estudos serem um excelente alicerce na análise de queimadores por arrastamento de ar, possuem a contrapartida de terem sido examinados apenas em condições a frio (sem chama). Com isto, Namkhat e Jugjai [3] analisaram mais detalhadamente o comportamento destes queimadores, realizando testes com e sem chama. Verificaram que as geometrias do tubo e do injetor afetam bastante a quantidade de ar arrastado e que um dos principais fatores que a influencia é a taxa de variação de momento do combustível ( $\dot{M}_g$ ). Mais tarde, Namkhat e Jugjai [4] investigaram a influência da temperatura na quantidade de ar arrastado, através da testagem do pré-aquecimento da mistura de combustível e ar, variando a sua temperatura entre 50°C e 300°C. Verificaram que o progressivo aumento da temperatura leva à conseqüente redução de ar arrastado, efeito que é devido à expansão térmica e ao aumento da viscosidade.

Outro parâmetro relevante que afeta a quantidade de ar arrastado é a distância entre a saída do injetor e a entrada do tubo. Singh et al. [5], realizaram uma análise experimental focando-se na variação deste mesmo parâmetro, bem como na geometria do injetor. O resultado experimental mostra que, em geral, um injetor não-circular favorece a quantidade de ar arrastado, ocorrendo a exceção para tubos de mistura de pequenas dimensões. Verificou-se também que à medida que se afasta o injetor do tubo, a quantidade de ar arrastado aumenta.

Englobando todas as características mencionadas anteriormente e procurando desenvolver um método de análise mais preciso de uma bomba ejetora para sistemas de queima, Almeida et al. [6] criaram um modelo unidimensional de um queimador por arrastamento de ar, com o objetivo de manter baixas emissões de óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ). Este modelo assume que o combustível se mistura completamente com o ar arrastado e tem em conta os efeitos da impulsão e da combustão, assim como, é direcionado para sistemas de aquecimento de água domésticos. Com este estudo, concluíram que: (i) aumentando o diâmetro do tubo de mistura ( $D_T$ ) a quantidade de ar arrastado aumenta, (ii) aumentando o

diâmetro do injetor ( $D_i$ ) a quantidade de ar arrastado diminui, (iii) arredondando a entrada do tubo de mistura aumenta a quantidade de ar arrastado.

A adição de hidrogénio ao combustível a analisar traz diversas vantagens, nomeadamente a nível ambiental. Este tem sido vastamente estudado uma vez que se apresenta como uma alternativa menos poluente do que os combustíveis fósseis. No entanto, a combustão do hidrogénio possui características distantes dos hidrocarbonetos. O hidrogénio possui uma maior velocidade de chama, um maior intervalo de inflamabilidade, maior difusividade, menor densidade e requer menos energia que os hidrocarbonetos para se ignificar [12, 13].

Tabet et al. [10], focaram-se na análise da estrutura da chama numa mistura de hidrogénio-hidrocarboneto. Verificaram que o aumento de hidrogénio na mistura reduz a emissão de CO e  $\text{CO}_2$ , no entanto, implica um aumento das emissões de  $\text{NO}_x$ .

## Modelo Computacional

O modelo a simular foi implementado no software *Comsol Multiphysics*, programa de simulação de elevada qualidade que permite a criação da geometria, modelos físicos e malha de forma intuitiva. Na Figura 1 podem-se observar os principais parâmetros geométricos a variar: comprimento do tubo de mistura ( $L$ ), diâmetro interno do tubo de mistura ( $D_T$ ), espessura do tubo de mistura ( $t$ ).

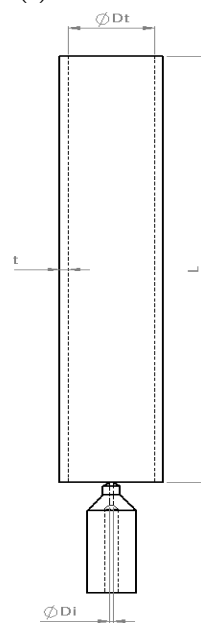


Figura 1 - Esquema simplificado do queimador a duas dimensões, com os principais parâmetros a analisar (implementado em CAD)

## Modelação Numérica

Após a definição da geometria, deve-se escolher os módulos físicos a implementar.

Neste estudo, o problema é representado pelo escoamento turbulento e reativo de diferentes espécies químicas a 2D. O queimador é analisado em estado estacionário e os fluidos constituintes comportam-se como gases ideais. Deste forma, são precisos 3 módulos que garantem a aproximação da realidade: Turbulent Flow  $k-\omega$  SST (correspondente ao modelo de escoamento turbulento), Transport of Concentrated Species (responsável pela reação química que ocorre no sistema) e Heat Transfer in Solids and Fluids (associado à transferência de calor provocada pela chama formada). O software permite depois a criação de duas interfaces que acoplam os modelos físicos: *Reacting Flow* (escoamento reativo, responsável pela interação dos módulos de escoamento turbulento e reação química) e *Non-Isothermal Flow* (responsável pelo agrupamento do escoamento turbulento com a transferência de calor).

Com estas condições, podem-se estabelecer as equações de conservação para sistemas reativos. Os fenómenos de combustão expressam-se, geralmente, através da aplicação dos princípios de conservação de massa, da quantidade de movimento e de energia [13]. Estas equações são complementadas pelas condições iniciais e de fronteira, bem como por relações constitutivas para processos a nível atómico (como, por exemplo, reações, difusão molecular e equações de estado) [14]. Conjugando esta informação, as equações podem ser expressas da seguinte forma [20, 21]:

- Conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.1)$$

- Conservação da quantidade de movimento:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \nabla \vec{\sigma} + \rho \vec{g} \quad (2.2)$$

- Conservação da fração de mistura ( $i = 1, \dots, N$ ):

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D^M Y_i) + \omega_i M_i \quad (2.1)$$

- Conservação da energia:

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} e) = \nabla \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot \vec{j}_q + q_R''' \quad (2.1)$$

Os possíveis modelos que mais se adequam ao estudo em questão são:  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  e  $k-\omega$  SST.

O modelo  $k-\varepsilon$  adequa-se a escoamentos livres, não sendo válido junto a paredes, pelo que se descarta este modelo para a simulação. O

modelo  $k-\omega$  é semelhante ao anterior, podendo ser aplicado junto à parede (sendo mais vantajoso para escoamentos internos. No entanto, estes modelos foram revistos, tendo-se criado um modelo que surge como a combinação dos dois, o modelo  $k-\omega$  SST. Este modelo conjuga o escoamento livre do  $k-\varepsilon$  com o modelo junto à parede do  $k-\omega$ , eliminando algumas falhas que ambos apresentam em separado. Já foi também analisado e comprovado que o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST apresenta resultados mais próximos dos dados experimentais do que os restantes modelos (para o problema em questão) [15].

## Condições físicas e de fronteira

Após a escolha mais adequada dos modelos a utilizar em cada módulo, é importante começar a definir o problema tendo em conta as condições fronteira e os domínios a utilizar. O domínio implementado tem uma dimensão de 20 cm x 60 cm, sendo normalmente aqui apresentado como um domínio simétrico, observando-se apenas metade do mesmo, com 10 cm de largura. Este domínio está dividido em 5 regiões: injetor, interior do tubo, parede do tubo, zona de reação e meio envolvente. Nas condições de entrada pode-se definir a velocidade de injeção, as frações mássicas de cada espécie injetada (neste caso apenas interessa injetar metano e hidrogénio) e as condições de pressão e temperatura a que o combustível é injetado. Nas condições laterais definem-se as interações com o meio envolvente. Em análises numéricas em softwares de simulação é bastante usual definirem-se estas condições como paredes, no entanto, é possível atribuir outras condições que melhor se enquadram no contexto do problema. Considera-se condições fronteira abertas aquelas que simulam a existência dum meio externo além do domínio, com as condições iguais àquelas definidas na fronteira. Assim, atribui-se uma pressão e temperatura nesta zona (que neste caso são 1 bar e 298 K, respetivamente) e a percentagem mássica dos componentes presentes no ar (23% de oxigénio). Por fim, no topo do domínio define-se uma saída de caudal para garantir que o escoamento flui nessa direção.

## Malha

O método dos elementos finitos é utilizado para a determinação de soluções de problemas físicos através da aproximação de modelos numéricos às equações diferenciais que

definem o problema. Esta resolução subdivide o domínio de um modelo em partes de menores dimensões (dependendo do problema e das condições impostas) designadas por elementos finitos. A grelha gerada pelo conjunto de elementos finitos é designada por malha.

Para uma análise mais eficiente e precisa é extremamente importante desenvolver uma malha que se adeque à geometria do problema, bem como às suas condições fronteira. Na elaboração da mesma há diversos aspetos a ter em conta: a melhor forma para dividir a geometria; o tipo de elemento adequado a cada geometria; o tamanho, a densidade e o número de elementos a definir em cada área e, por fim, a qualidade dos elementos gerados. É assim importante decidir de antemão o tipo de elementos a utilizar em cada região do modelo.

O software *Comsol Multiphysics* permite a criação de uma malha automática adequada às condições físicas definidas anteriormente, no entanto, atribui elementos de forma um pouco aleatória às diferentes geometrias, sendo que a maior parte dos elementos são triangulares e distribuídos livremente, não criando uma malha estruturada.

Desta forma, a malha criada automaticamente pelo software serve como um bom ponto de partida, embora não se torne suficientemente precisa nas regiões de detalhe de maior importância. Uma vez que o presente problema se trata de um escoamento reativo com transferência de calor, é importante definir as regiões que necessitam de maior precisão na geometria do modelo. A região correspondente ao tubo de mistura é a que requer mais atenção e detalhe. É de extrema importância analisar o escoamento à entrada do tubo, já que envolve a saída do jato de combustível a grandes velocidades e a entrada de ar que é arrastado devido à transferência de movimento. Ao longo do tubo existe escoamento turbulento que promove a mistura do ar com o combustível, pelo que é fundamental gerar uma malha bem estruturada e refinada nesta zona. À saída do tubo há a formação da chama que requer uma análise bastante pormenorizada devido às rápidas reações que naquela zona ocorrem. É também relevante salientar a atenção que deve ser dada às paredes do tubo e do injetor, zonas que necessitam de análise detalhada devido à existência da camada limite.

Considerando os pormenores anteriormente referidos, optou-se por definir a região do tubo (incluindo a parede) com elementos quadrangulares, formando uma grelha

estruturada e com uma distribuição dos elementos ao longo das arestas do tubo uniforme.

Junto à parede do tubo é indispensável refinar a malha, tarefa que é simplificada pela definição das arestas como camada limite (Figura 2).

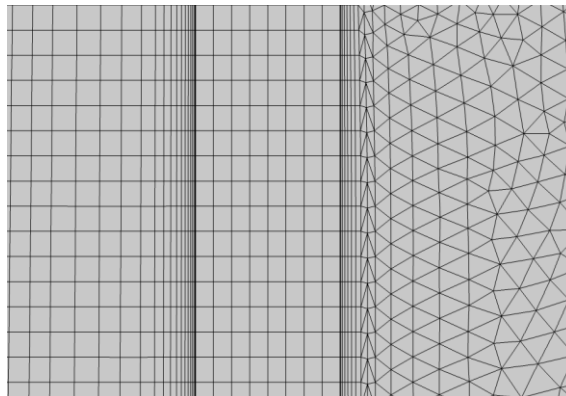


Figura 2 - Malha refinada junto à parede do tubo

Na zona correspondente à saída do tubo de mistura é necessário criar uma região mais densa, devido às rápidas reações que ali ocorrem e às pequenas dimensões relacionadas com a espessura da chama. Assim, refinou-se também esta zona.

## Convergência de malha

Aquando da análise de problemas físicos através do método de elementos finitos é essencial lembrar que a precisão da solução está diretamente correlacionada com o tamanho da malha. À medida que a dimensão dos elementos diminui (convergindo para um modelo de tamanho infinito), a solução torna-se cada vez mais próxima do valor exato. No entanto, há diversos fatores que limitam o refinamento da malha. À medida que se reduz o tamanho dos elementos é necessário um maior poder computacional, envolvendo conseqüentemente mais custos para o processamento da simulação e causando um aumento exponencial do tempo de computação. Desta forma, é necessário encontrar um meio-termo entre a exatidão da solução e os recursos disponíveis para a análise do modelo. Surge assim o objetivo do refinamento da malha, onde se procura minimizar a diferença ("erro") entre a solução exata e a aproximação obtida pelo cálculo do software. Este erro deve ser definido pelo utilizador, podendo variar consoante o projeto e a física nele envolvida. Assim, a convergência não se pode considerar totalmente atingida, uma vez que se pode sempre refinar mais a malha. Deve-se sim atingir um valor aceitável para o problema

em questão. Para alcançar esta convergência é necessário comparar um determinado resultado de simulação para simulação, à medida que se vai refinando a malha (neste caso a evolução do caudal mássico de ar).

Por conseguinte, foram analisadas várias malhas consoante o tamanho de elementos definidos pelo programa e criou-se uma convergência de malha (Figura 3).

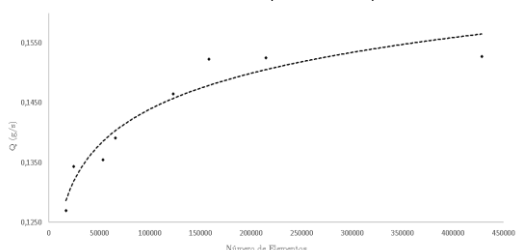


Figura 3 - Convergência de malha

Dependendo da região do domínio, os elementos possuem dimensões diferentes, sendo que, na primeira simulação, os maiores elementos possuem no máximo uma aresta com 5 mm (é de salientar que os maiores elementos se encontram na zona fronteira do domínio, tendo naturalmente dimensões maiores). Este primeiro estudo apresenta uma malha bastante grosseira com cerca de 15000 elementos, não mostrando um resultado de todo aceitável. Foram realizados sucessivos refinamentos diminuindo o tamanho dos elementos, até se atingir uma malha com elementos no programa denominados por extremamente finos. Estes elementos têm uma aresta máxima de 1 mm, resultando na malha mais refinada com cerca de 430000 elementos. Sendo o tempo de computação da malha mais refinada consideravelmente extenso, optou-se por não se refinar mais a mesma, processo que seria incompatível com o tempo disponível para a análise deste problema.

## Procedimento experimental

A validação experimental é extremamente relevante para a verificação dos resultados obtidos numericamente. Assim, procuram-se replicar alguns dos modelos analisados no *Comsol Multiphysics*, com o objetivo de verificar a correta implementação dos mesmos. Para tal, procedeu-se à análise espectroscópica de algumas das chamas formadas. A configuração experimental do queimador é bastante simples, conforme se pode observar na Figura 4



Figura 4 - Montagem experimental do queimador

Há a injeção de combustível através do tubo vermelho conectado ao injetor de bronze que, conseqüentemente, arrasta ar, formando uma chama no topo do tubo de mistura. Nesta zona, procede-se à leitura da composição da chama através da espectroscopia. O esquema do sistema experimental pode ser verificado esquematicamente (Figura 5) e a respetiva montagem real na Figura 6.

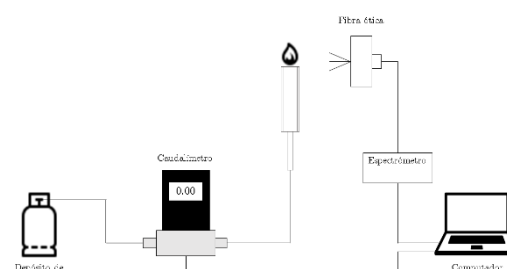


Figura 5 - Representação esquemática do sistema experimental

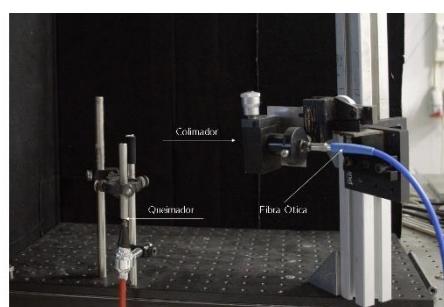


Figura 6 - Montagem experimental do queimador e da fibra ótica acoplada ao colimador

A espectroscopia tem sido usada a nível experimental para analisar a quimiluminescência de diferentes tipos de chamas, experiência através da qual se podem analisar diferentes propriedades, entre as quais a razão de equivalência. A quimiluminescência é a emissão de luz de espécies excitadas conseqüentes de uma reação química, pelo que é possível captar

o espectro destes mesmos radicais e comparar a sua presença numa chama. Para se obterem resultados precisos é necessário ter em consideração alguns aspetos: não deve haver luz de fundo, o que poderá perturbar os espectros emitidos pelos radicais, o feixe ótico deve estar alinhado com a base da chama (apontado para o topo do tubo de mistura) e minimamente distanciado do tubo (cerca de 20 cm).

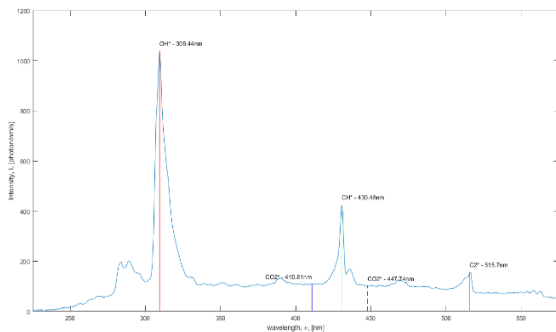


Figura 7 - Exemplo de espectro captado experimentalmente

## Resultados

### Influência da velocidade de injeção do combustível

Como referido anteriormente, o caudal de combustível é um dos parâmetros influenciadores na quantidade de ar arrastado, pelo que, fixando a geometria do injetor, a variação da velocidade do combustível irá impactar o caudal de ar primário [1]. Assim, mantendo as configurações do queimador ( $D_T = 10 \text{ mm}$ ,  $L = 150 \text{ mm}$ ,  $t = 1 \text{ mm}$ ), variou-se a velocidade do combustível injetado, tendo sido analisados três casos: 15 m/s, 30 m/s e 60 m/s. Os caudais de ar primário obtidos foram 0.0568 g/s, 0.1316 g/s e 0.2813 g/s, respetivamente. Este facto deve-se ao aumento da velocidade do combustível, que influencia a velocidade de ar adjacente. Uma maior velocidade de injeção implica uma maior transferência de movimento do combustível para o ar, levando a uma aceleração do ar adjacente e, conseqüentemente, a uma maior quantidade arrastada, o que implica uma redução da razão de equivalência. Na Figura 8 podem-se observar os campos de velocidade para os três caudais estudados.

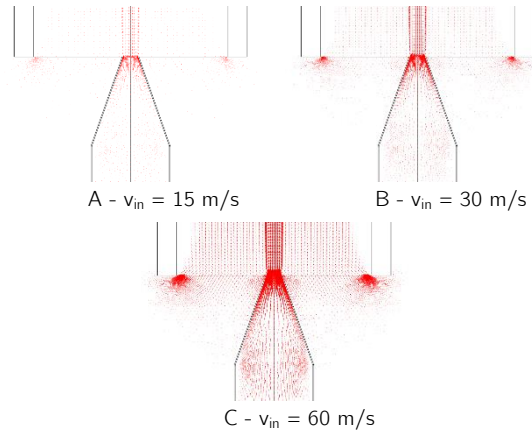


Figura 8 - Perfil dos vetores de velocidade

### Impacto do Diâmetro Interno ( $D_T$ ) do tubo de mistura

Procurando verificar o impacto do diâmetro interno do tubo de mistura, bem como o comportamento da razão de equivalência em função do rácio adimensional do comprimento do tubo de mistura sobre o diâmetro interno do tubo de mistura ( $L/D$ ), analisaram-se dois tubos com diâmetros diferentes, mantendo a espessura e o material dos mesmos. A razão de equivalência apresenta-se na Figura 9.

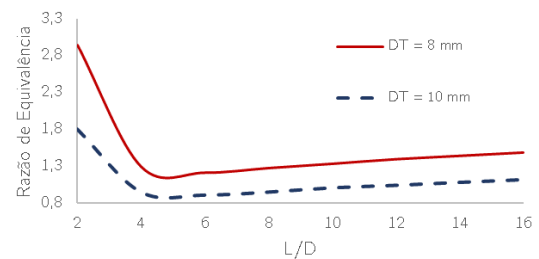


Figura 9 - Variação da razão de equivalência em função de  $L/D$  para dois diâmetros diferentes

Como é possível observar, o comportamento do queimador é bastante semelhante nos dois casos, pelo que se pode separar a razão  $L/D$  em duas secções:

**$0 < L/D < 5$ :** Onde há um decréscimo acentuado da razão de equivalência. À medida que se diminui a razão  $L/D$  (e, conseqüentemente, se diminui o comprimento do tubo de mistura), a razão de equivalência aumenta drasticamente, devido à rápida diminuição da densidade da mistura provocada pela expansão térmica.

**$5 < L/D < 16$ :** Em que o aumento da razão de equivalência é aproximadamente linear. Nesta região, o comprimento do tubo já é suficientemente elevado para transferir calor ao longo do seu comprimento, aumentando as forças de fricção dentro do mesmo, o que

contrária a sucção do ar, levando a uma menor quantidade de ar arrastado. Desta forma, à medida que o comprimento do tubo aumenta, aumenta também a área de contacto com a mistura de combustível e ar, permitindo uma quantidade maior de trocas de calor, levando a um maior aquecimento da pré-mistura. Este fenómeno foi verificado por Medeiros [16], aquando da análise dum sistema semelhante utilizando propano. Como era expectável, existe uma diferença abrupta na quantidade de ar arrastado, uma vez que apenas se variou a área de entrada do tubo de mistura. Mantendo o caudal de combustível fixo, este transfere a mesma quantidade de movimento para o ar nas redondezas e, tendo o tubo uma área de entrada superior, permite uma maior quantidade de entrada de ar.

## Influência do hidrogénio na temperatura da chama

De seguida, verifica-se o impacto do hidrogénio na temperatura da chama (Figura 10).

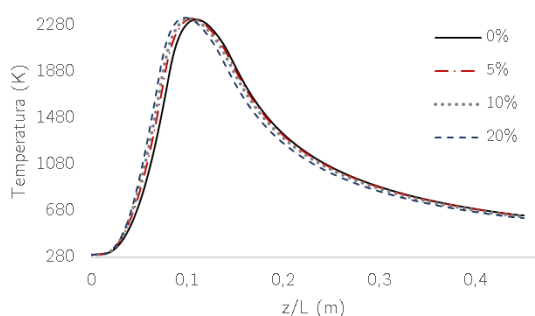


Figura 10 - Variação da temperatura ao longo do eixo de axissimetria

Como o hidrogénio apresenta uma densidade bastante baixa e uma grande difusividade, a adição do mesmo torna-se um fator extremamente importante uma vez que promove uma maior interação entre o combustível e o ar, melhorando a mistura dos mesmos ao longo do tubo. Sendo o hidrogénio mais reativo que o metano, a sua combustão é mais rápida, o que promove um consumo mais rápido dos reagentes. Assim, o aumento da concentração de  $H_2$  promove um decréscimo do comprimento da chama, fenómeno que se pode verificar pelos picos de temperatura na figura acima apresentada. Com maiores concentrações de hidrogénio, o máximo da temperatura desloca-se para a esquerda (valores observáveis no gráfico), representando uma chama de menor comprimento. A reação de combustão do hidrogénio envolve uma quantidade de energia

libertada superior à dos hidrocarbonetos, pelo que a temperatura da chama tende a aumentar com o aumento da concentração de hidrogénio, tal como se verifica nos resultados apresentados.

## Influência do hidrogénio na emissão de poluentes

Relativamente à quantidade de dióxido de carbono emitido observa-se uma queda do mesmo, como seria esperado (Figura 11).

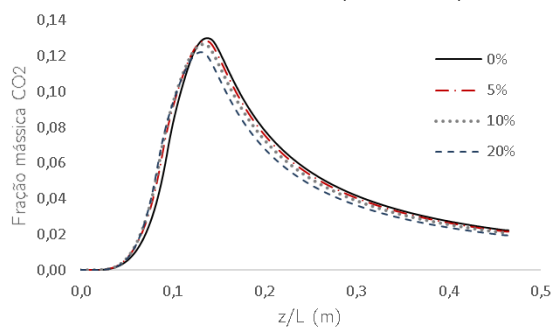


Figura 11 - Evolução da fração de  $CO_2$  em função da % de  $H_2$

A sua posição axial sofre também um decréscimo devido à elevada difusividade do hidrogénio, uma vez que esta característica promove a rapidez a que ocorre a reação.

Verifica-se este comportamento sempre que se aumenta a percentagem de hidrogénio presente no combustível, já que o enriquecimento do hidrogénio promove a mistura de combustível e oxidante, otimizando assim a produção de  $CO_2$  e  $CO$  [15]. Esta diminuição justifica-se pela substituição dos átomos de carbono pelos átomos de hidrogénio no combustível.

## Impacto do hidrogénio na razão de equivalência

Para verificar a influência de hidrogénio na quantidade de ar arrastado simularam-se queimadores com diferentes misturas de metano e hidrogénio

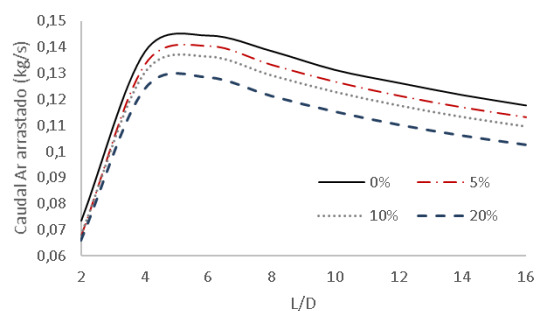


Figura 12 - Variação do caudal de ar arrastado para diferentes concentrações de hidrogénio

O queimador mantém o seu comportamento em termos de caudal arrastado, possuindo um máximo entre  $4 < L/D < 6$ . À medida que se aumenta a percentagem de hidrogénio na mistura verifica-se uma redução do ar arrastado, facto explicado pela diminuição da densidade do combustível com o acréscimo de hidrogénio. O caudal de combustível injetado diminui progressivamente com a diminuição da densidade da mistura, transferindo menos movimento para o ar das vizinhanças, arrastando assim uma menor quantidade. Apesar da quantidade de ar arrastado diminuir com o aumento de hidrogénio, observa-se um comportamento inesperado na razão de equivalência obtida para cada mistura.

Tal como se pode observar na Figura 13, a adição de hidrogénio promove uma redução da razão de equivalência, embora seja uma diferença muito baixa, pelo que a diferença da quantidade de ar arrastado não é suficiente para compensar a variação da razão de combustível sobre ar estequiométrico para as diferentes misturas.

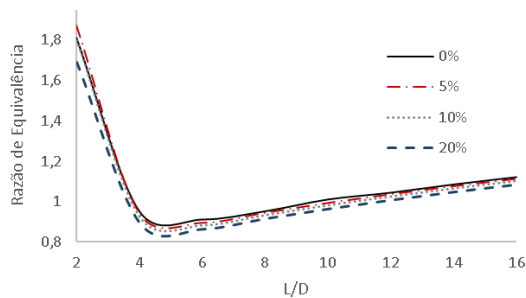


Figura 13 - Variação da razão de equivalência em função de L/D para diferentes concentrações de hidrogénio

O comportamento do queimador com a mistura de metano e hidrogénio mantém-se igual, apresentado uma descida acentuada entre  $2 < L/D < 5$  e um crescimento aproximadamente linear entre  $5 < L/D < 16$ . Verifica-se novamente que estes sistemas de queima mantêm o comportamento independentemente do combustível utilizado

## Resultados experimentais

Em seguida podem-se observar 3 chamas a operar nas mesmas condições, variando apenas a percentagem de hidrogénio na mistura (entre 0 e 20%).

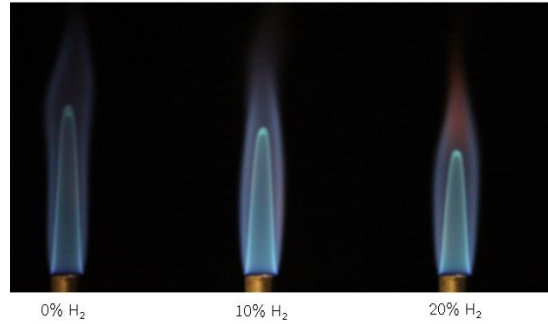


Figura 14 - Chamas formadas para diferentes misturas de combustível

Como se pode verificar, há uma redução do tamanho das chamas à medida que se aumenta a percentagem de hidrogénio na mistura, fenómeno explicado pela rápida reação química do hidrogénio e elevada difusividade.

## Comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos

Verificando inicialmente a influência da velocidade de injeção (Figura 15), observa-se um comportamento semelhante em ambos os casos.

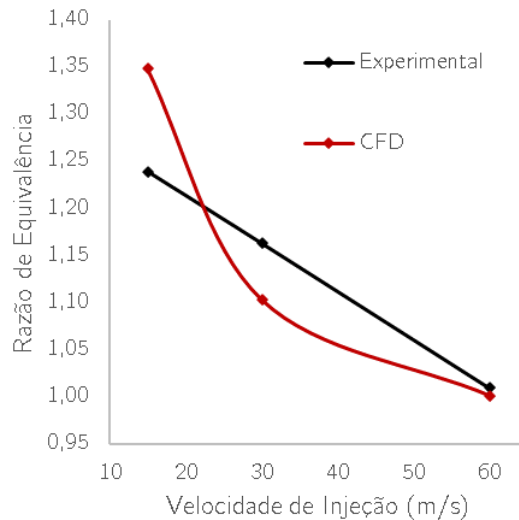


Figura 15 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais para diferentes velocidades de injeção

O erro máximo neste caso foi de 8%, confirmando-se que à medida que se aumenta a velocidade de injeção também se aumenta a quantidade de ar arrastado.

Variando a razão L/D para uma velocidade fixa (30 m/s), obtiveram-se os seguintes resultados:



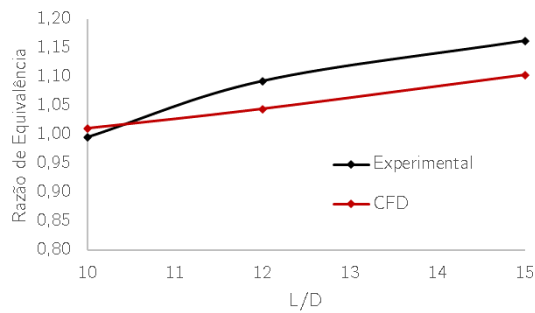


Figura 16 - Comparação dos resultados experimentais com os numéricos para a razão de equivalência em função de L/D

Pode-se observar na Figura 16 a proximidade dos valores obtidos quer nos ensaios experimentais quer nos ensaios numéricos (com um erro médio aproximado de 3%). Repara-se no crescimento da razão de equivalência alcançado anteriormente, apesar desta variação não ser tão linear como a que foi obtida numericamente. A região linear do modelo numérico assume um comportamento mais ideal, não estando sujeita a perturbações e efeitos temporários que possam existir aquando dos ensaios experimentais.

Comparando a adição de hidrogénio à mistura de combustível, confirma-se o aumento da quantidade de ar arrastado conforme se observa na Figura 17.

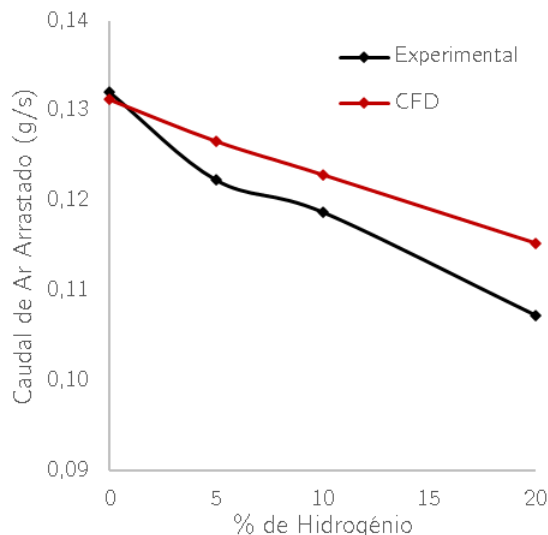


Figura 17 - Comparação dos resultados numéricos com os experimentais de caudal de ar arrastado em função da percentagem de hidrogénio

No entanto, verifica-se uma ligeira discrepância entre a razão de equivalência obtida, uma vez que os resultados experimentais são ligeiramente superiores aos numéricos (Figura 18).

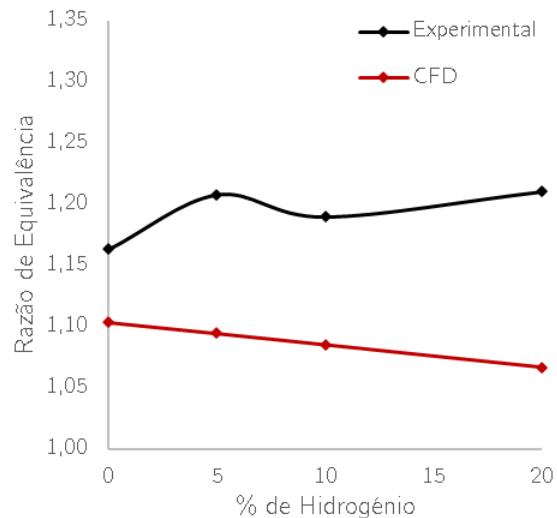


Figura 18 - Comparação dos resultados numéricos com os experimentais da razão de equivalência em função da percentagem de hidrogénio

## Conclusão

Após a análise ao trabalho elaborado, tiraram-se diversas conclusões relativamente ao comportamento destes queimadores por arrastamento de ar:

- A quantidade de ar arrastado aumenta com o aumento do caudal de combustível.
- A variação do comprimento do tubo de mistura influencia largamente a quantidade de ar arrastado em comprimentos pequenos (normalmente até 5 vezes o valor do diâmetro interno do tubo), onde se atinge um máximo de ar arrastado para L/D igual a 5.
- Para comprimentos superiores a 5 vezes a dimensão do tubo, a quantidade de ar arrastado diminui de forma aproximadamente linear. Quanto maior for o diâmetro interno do tubo, menor é a variação de ar arrastado nesta região linear (ou seja, pode-se aumentar progressivamente o comprimento do tubo de mistura que a quantidade de ar arrastado não varia substancialmente).
- O tipo de material do tubo de mistura tem uma influência bastante insignificante na quantidade de ar arrastado.
- O queimador possui um comportamento idêntico para diferentes tipos de combustíveis (a variação da razão de equivalência em função de L/D apresenta um decréscimo acentuado semelhante até um L/D igual a 5, aumentado posteriormente de forma aproximadamente

- linear), neste caso, metano e mistura de metano com hidrogénio.
- A adição de hidrogénio promove o crescimento da temperatura da chama (embora num queimador de pequenas dimensões, a variação não seja muito acentuada).
  - A adição de hidrogénio influencia o tamanho da chama, quanto maior a percentagem de hidrogénio, menor o comprimento da chama.
  - A presença de hidrogénio aumenta a quantidade de vapor de água libertado na combustão e diminui a emissão de poluentes (neste caso, apenas se verificou a emissão de CO<sub>2</sub>), razão pela qual é uma excelente alternativa para o meio ambiente e um substituto com enorme potencial dos combustíveis fósseis.

## Referências

- [1] R. Pritchard, J. Guya, and N. Connor, *Handbook of industrial gas utilization: engineering principles and practice*. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1977.
- [2] G. Singh, T. Sundarajant, and U. Shet, "Entrainment and mixing studies for a variable density confined jet.," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 35, no. 2, pp. 205–224, 1999.
- [3] A. Namkhat and S. Jugjai, "Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments," *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1701–1708, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.12.020.
- [4] A. Namkhat and S. Jugjai, "Prediction of Total Equivalence Ratio for a Self-Aspirating Burner," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 4709128, no. 662, p. 4709111, 2011.
- [5] G. Singh, T. Sundararajan, and K. A. Bhaskaran, "Mixing and Entrainment Characteristics of Circular and Noncircular Confined Jets," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 125, no. 5, pp. 835–842, Sep. 2003, doi: 10.1115/1.1595676.
- [6] A. L. M. de S. Almeida, R. Marques Laranjeira, L. M. P. Monteiro, A. dos Santos, and E. Caetano Fernandes, "1D model for a low NO ejector-pump like burner," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 100, pp. 171–192, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.07.011.
- [7] A. Choudhuri, "Combustion characteristics of hydrogen–hydrocarbon hybrid fuels," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 25, no. 5, pp. 451–462, May 2000, doi: 10.1016/S0360-3199(99)00027-0.
- [8] F. COZZI and A. COGHE, "Behavior of hydrogen-enriched non-premixed swirled natural gas flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 6, pp. 669–677, May 2006, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.05.013.
- [9] Y. Lafay, B. Renou, G. Cabot, and M. Boukhalfa, "Experimental and numerical investigation of the effect of H<sub>2</sub> enrichment on laminar methane-air flame thickness," *Combustion and Flame*, vol. 153, no. 4, pp. 540–561, 2008, doi: 10.1016/j.combustflame.2007.10.002.
- [10] F. Tabet, B. Sarh, and I. Gökalp, "Hydrogen-hydrocarbon turbulent non-premixed flame structure," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 5040–5047, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.083.
- [11] COMSOL Multiphysics, "CFD Module User 's Guide," p. 598, 2016, [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>.
- [12] COMSOL Multiphysics, "Heat Transfer Module - User's guide," 2015, [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>.
- [13] P. Coelho and M. Costa, "Equações de conservação para sistemas reactivos," in *Combustão*, Edições Orion, 2007, pp. 123–162.
- [14] D. Veynante and L. Vervisch, "Turbulent combustion modeling," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 28, no. 3, pp. 193–266, 2002, doi: 10.1016/S0360-1285(01)00017-X.
- [15] Z. Riahi, I. Hraiech, J. C. Sautet, and S. Ben Nasrallah, "Numerical investigation of turbulent combustion with hybrid enrichment by hydrogen and oxygen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 4, pp. 3316–3326, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.151.
- [16] M. L. M. M. Medeiros, A. dos Santos, and E. C. Fernandes, "Mathematical modelling and experimental study of an ejector burner," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 130, p. 110482, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110482.