



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Desenvolvimento de uma instalação
experimental, e sistema PIV, para o ensaio de
tubéiras de efeito Coanda com atuadores a
plasma**

Frederico Miguel Freire Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques

Covilhã, Junho de 2014

Agradecimentos

Um agradecimento especial para o meu orientador Prof. Doutor José Páscoa pela oportunidade concedida de realização deste trabalho e por toda a disponibilidade, apoio e dedicação prestados.

Agradeço também ao técnico João Correia por diversos contributos prestados ao longo da realização deste trabalho e também pela disponibilidade concedida.

Deixo também um profundo agradecimento ao Prof. Doutor António Espírito Santo pela programação do microcontrolador, feita num momento de especial necessidade, e por toda a disponibilidade sempre demonstrada.

Gostaria também de agradecer ao Prof. Doutor Francisco Brojo pela disponibilização do espaço que foi utilizado para a realização das atividades experimentais. Sem este apoio o trabalho não teria sido possível.

Aproveito ainda para agradecer aos meus colegas de investigação do ClusterDEM pelas diversas contribuições prestadas ao longo do trabalho e pela ajuda disponibilizada.

Agradeço à minha família e à minha namorada pelo apoio, incentivo e confiança nos meus objetivos.

APOIO OFICIAL

O trabalho teve ainda o apoio do Center for Mechanical and Aerospace Sciences and Technology, Unidade de I&D nº 151 da Fundação para a Ciência e Tecnologia, e enquadrou-se no âmbito das atividades do Projeto Europeu ACHEON, FP 7 Grant Number 309041.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivo o estudo experimental do comportamento do escoamento na geometria HOMER, em particular com o intuito de validar a capacidade desta geometria defletir o escoamento em função de um diferencial de caudais. Este trabalho fez parte integrante do Projeto Europeu ACHEON.

A geometria CAD 3D fornecida pelos restantes parceiros do projeto foi reproduzida, e montou-se uma instalação experimental que permitiu a realização de diferentes tipos de ensaios. Desenvolveu-se ainda, de raiz, um sistema de análise do escoamento baseado na técnica de medição PIV, o qual permitiu a obtenção do campo de velocidades do escoamento à saída da tubeira. Os resultados das medições PIV mostraram que a capacidade da tubeira HOMER em defletir o escoamento é fortemente afetada pelos efeitos 3D do escoamento.

Para reduzir a influência dos efeitos 3D do escoamento implementaram-se alhetas nas entradas de ar da tubeira. As alhetas mostraram-se eficazes na redução da influência dos efeitos 3D, nomeadamente reduzindo a velocidade tangencial, e permitiram a obtenção de melhores resultados para a deflexão do escoamento. Os resultados obtidos com e sem alhetas foram comparados e discutidos.

Testaram-se atuadores de plasma de DBD, que foram posteriormente implementados na superfície Coanda da tubeira HOMER, de modo a aumentar o ângulo de deflexão do escoamento. Os atuadores de plasma de DBD mostraram-se eficazes, contribuindo para maior adesão do escoamento à superfície Coanda e um conseqüente aumento do ângulo de deflexão máximo do escoamento. Foram captadas imagens da visualização do escoamento que permitiram comparar a deflexão do jato com e sem atuadores de plasma.

Os resultados deste trabalho experimental foram, ao longo do seu desenvolvimento, apresentados aos restantes parceiros do projeto.

Palavras-chave

Tubeira, controlo vetorial do escoamento, métodos experimentais, técnica PIV, atuadores a plasma, efeito de Coanda

Abstract

The objective of this dissertation was to study experimentally the behaviour of the flow in the HOMER geometry, particularly in order to assess the ability of this geometry to deflect the flow as a function of the ratio of two streams. This work was an integral part of the European project, ACHEON.

The 3D CAD geometry provided by the other project partners was manufactured, and built, in order to create an experimental setup allowing to perform different types of experiments. Further it was developed a system to analyse the flowfield based on the PIV technique. This allowed to obtain a mapping of the flow velocity in an plane at the outlet of the nozzle. The results of the PIV measurements showed that the ability of the HOMER nozzle to create the flow deflection is greatly affected by 3D flow effects.

In order to decrease the influence of the 3D flow effects several guide vanes were implemented at the inlet of the nozzle. These guide vanes were effective in reducing the 3D flow effects, by decreasing the tangential velocity component and allowing the achievement of much better results for flow deflection. The results obtained with and without guide vanes carefully compared.

DBD plasma actuators were tested and implemented in the Coanda surface of the HOMER nozzle, in order to increase the deflection angle of the flow. The DBD plasma actuators were effective, having increased the adhesion of the flow to the Coanda Surface, which was reflected on an increase of the maximum jet deflection angle. Images of the flow visualization were captured and used to compare the deflection angle with and without plasma actuators.

During the development of this work the achieved interim results were presented to the remaining partners of the project.

Keywords

Nozzle, vectorial flow control, experimental methods, PIV techniques, plasma actuators, Coanda effect

Índice

1. Introdução	1
1.1. Importância e enquadramento do tema	3
1.2. Objetivos da investigação	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Estudos referentes a tubeiras de efeito de Coanda	5
2.2. Controlo da camada limite usando atuadores a plasma de tipo DBD	6
2.2.1. Aplicação de atuadores DBD no controlo da camada limite	7
2.3. Sistemas de medição do escoamento de tipo PIV	10
3 Conceitos teóricos fundamentais	13
3.1. Controlo de escoamento	13
3.2. Efeito Coanda	14
3.3. Atuadores de plasma DBD	16
3.3.1. Atuação estacionária e não estacionária de atuadores a plasma DBD	18
3.4. Técnicas de medições PIV	19
3.4.1. Partículas marcadoras (<i>seeding particles</i>)	20
3.4.2. Fontes de luz	21
3.4.3. Captura de imagens para análise PIV	22
3.4.4. Processamento de imagens	22
4. Instalação experimental	24
4.1. Esquema da instalação	24
4.2. Desenvolvimento da instalação experimental	25
4.2.1. Construção da tubeira HOMER	25
4.2.2. Desenvolvimento e construção do pulverizador de partículas de tipo ciclone	30
4.2.3. Utilização de um anemómetro para verificação da velocidade nos turbo-ventiladores	31
4.2.4. Desenvolvimento do sistema PIV <i>Open Source</i>	32
4.2.5. Ensaio de atuadores a plasma de tipo DBD	37
4.2.6. Ensaio principais referentes ao controlo do escoamento na tubeira	37
4.3. Descrição e justificação do equipamento experimental	38
4.3.1. Definição da geometria da tubeira HOMER	38

4.3.2. Escolha dos turbo-ventiladores elétricos e sistema de controlo de velocidade PWM	38
4.3.3. Caracterização da câmara CCD usada para construir o sistema PIV <i>Open Source</i>	40
4.3.4. Sistema de geração do plano de luz laser	45
4.3.5. Instalação do pulverizador de partículas sólidas	46
4.3.6. Gerador de sinais para disparo de leituras PIV	47
4.3.7. Microcontrolador mbed NXP LPC 1768	48
4.3.8. Utilização do software HClmage Live para captação de imagens	49
4.3.9. <i>Software Open Source</i> de análise PIV (PIVlab)	49
4.3.10. Construção dos atuadores de Plasma do tipo DBD	50
4.3.11. Operacionalização do uso do PicoScope 6	51
5 Resultados experimentais	53
5.1. Resultados de medição da velocidade com anemómetro	53
5.2. Visualização do plasma e medição da tensão de alimentação	54
5.3. Análise do escoamento a partir de técnicas de medição PIV	56
5.4. Análise a partir da visualização do escoamento	62
6 Conclusão e trabalhos futuros	72
6.1. Conclusões	72
6.2. Trabalhos futuros	73
Referências Bibliográficas	75
Anexo I - Desenhos de execução das peças da tubeira HOMER	83
Anexo II - Imagens da construção da tubeira HOMER	98
Anexo III - Código de programação do microcontrolador mbed NXP LPC 1768	105
Anexo IV - Procedimento para medições PIV com HClmage Live e PivLab	106
Anexo V - Esquema de ligações do PVM500	113
Anexo VI - Artigos desenvolvidos durante a dissertação	114

Lista de Figuras

Figura 1.1: a) O avião militar Harrier, incluindo o detalhe da saída de uma das tubeiras (canto inferior direito). b) O avião militar Eurofighter Typhoon, incluindo o detalhe da tubeira orientável mecanicamente para provocar a deflexão do jato propulsor. Reproduzido de Páscoa et al. (2013).

Figura 1.2: Detalhe da patente do sistema HOMER. O diferencial de caudal entre as duas entradas (2-2'), em conjunto com a superfície de Coanda (6-6'), permite controlar o ângulo de saída do jato sem sistema mecânico. (Dumas et al., 2011)

Figura 3.1: Exemplo de aplicações de técnicas de controlo de escoamento. a) Sucção de camada limite por meios mecânicos (fonte: NASA Report SP-367). b) Geradores de vórtices aplicados na asa de um T-45 Goshawk [fonte: airpigz.com]).

Figura 3.2: Demonstração do efeito Coanda [fonte: ftvieira.wordpress.com].

Figura 3.3: Esquema de exemplificação do efeito Coanda (fonte: Trancossi, 2011)

Figura 3.4: Representação esquemática de um atuador de plasma DBD.

Figura 3.5: Representação esquemática do funcionamento de um atuador de plasma DBD (na esquerda representa-se a emissão de eletrões para o dielétrico e na direita o retorno desses eletrões).

Figura 3.6: Representação das formas de onda do sinal de alimentação para uma atuação estacionária e não estacionária de um atuador de plasma DBD.

Figura 3.7: Representação esquemática de uma instalação típica para análise PIV num túnel de vento (fonte: Raffel et al., 2007).

Figura 3.8: Diferentes tipos de densidade de partículas marcadoras: a) baixa densidade, b) densidade média e c) elevada densidade (fonte: Raffel et al., 2007).

Figura 3.9: Processamento de dados utilizando o método *cross-correlation* com um algoritmo FFT a) janelas de interrogação das imagens consecutivas b) realização do processamento neste caso pela implementação de um algoritmo FFT c) no domínio do *cross-correlation* a localização do pico corresponde ao deslocamento médio das partículas dentro das janelas de interrogação d) o deslocamento é convertido para o espaço físico proporcionando um vetor velocidade (fonte: Dabiri, 2014).

Figura 4.1: Esquema da instalação experimental com as ligações entre os vários equipamentos utilizados nos ensaios.

Figura 4.2: Vista explodida do desenho inicial 3D tendo em vista a construção da tubeira HOMER.

Figura 4.3: Diferentes fases estabelecidas, durante o planeamento da construção, com vista a materializar a tubeira HOMER usada nos ensaios experimentais.

Figura 4.4: Versão final do planeamento da construção da tubeira HOMER, em desenho 3D, com a junção de todas as partes.

Figura 4.5: Imagens de diferentes fases de construção da tubeira.

Figura 4.6: Construção da tubeira HOMER na fase final de execução.

Figura 4.7: Alhetas finas em acrílico, com a forma de cruz, são introduzidas na entrada dos jatos produzidos pelos dois turbo-ventiladores. As suas dimensões foram estabelecidas de acordo com as sugestões apresentadas em Das et al. (2013).

Figura 4.8: Diversas imagens recolhidas aquando da construção do ciclone, o qual funcionará como gerador de partículas sólidas.

Figura 4.9: O anemómetro, de tipo molinete, montado e preparado para a realização das medições de velocidade do ar, seleccionado para uma precisão de ± 0.01 m/s (esquerda). Medição da velocidade do escoamento na zona de entrada do ar na tubeira (direita).

Figura 4.10: Montagem experimental. São visíveis a tubeira HOMER (lado esquerdo), a câmara (canto inferior esquerdo), e o laser no respetivo suporte (canto superior direito)

Figura 4.11: Exemplo de imagem de calibração. É ligado o laser de forma a identificar o plano de medição e a escala graduada em milímetros é colocada exatamente sobre esse plano.

Figura 4.12: a) Funcionamento do modo PIV, a saída da câmara Trigger Enable Output (ativa a TTL low) indica que a câmara está a captar uma imagem, Esta informação é passada ao microcontrolador, que controla o período de ativação do plano de luz laser. b) Visualização, num osciloscópio, do sinal de saída do circuito com o microcontrolador e que ativa o plano de luz laser.

Figura 4.13: Circuito elétrico com o sistema utilizado para sincronização do laser, a resistência é de 150Ω , o transistor é um 2N5551. A saída Trigger Enable Output da câmara é ligada à entrada do microcontrolador.

Figura 4.14: Turbo-ventiladores utilizados nas atividades experimentais, depois de montados (direita) e antes de serem montados (esquerda) na tubeira.

Figura 4.15: a) Fonte de alimentação de 700W; b) Controlador eletrónico de velocidade; c) Regulador PWM; d) Fontes de alimentação e controladores ligados aos respetivos turbo-ventiladores

Figura 4.16: Visualização do sinal de saída do controlador PWM num osciloscópio (direita), quando é estabelecido um comprimento de pulso de 1,00 ms (esquerda).

Figura 4.17: Câmara Digital CCD C10600-10B Orca-R2 com lente C-mount OPT-MHR31214MCN, de 12 mm.

Figura 4.18: Unidade de controlo da câmara C10600-10B Orca-R2

Figura 4.19: Painel traseiro da CCU C10600-10B Orca-R2 : 1- Conetor para a câmara; 2- Conetor de entrada trigger; 3-Conetor interface IEEE1394b; 4-Saída de ar; 5- Entrada da tensão de alimentação; 6-Conetor Timing I/O, no qual se encontra o Trigger Enable Output.

Figura 4.20: Conetor Timing I/O com a respetiva identificação de pinos.

Figura 4.21: Esquema de operação dos sinais de saída disponíveis na unidade de controlo (fonte: Hamamatsu, 2013a).

Figura 4.22: Esquema do funcionamento da câmara no modo PIV (fonte: Hamamatsu, 2013a).

Figura 4.23: Laser que produz a folha de luz antes de ser montado (esquerda), e após a montagem no suporte da instalação experimental (direita).

Figura 4.24: Ensaio preliminar do pulverizador de partículas sólidas (esquerda), 1- Entrada de ar comprimido, 2- Saída de ar misturado com partículas de pó de talco. Gerador de partículas sólidas instalado na montagem experimental (direita).

Figura 4.25: Compressor de ar de 110 litros.

Figura 4.26: Gerador de sinais utilizado para iniciar a leitura de um par de imagens.

Figura 4.27: Microcontrolador mbed NXP LPC 1768 interligado com o circuito eletrónico referido na figura 4.13.

Figura 4.28: Layout do software HCLImage Live: 1- Painel lateral; 2- Mostrador de imagens; 3- Histograma

Figura 4.29: *Layout* do software *PIVlab*.

Figura 4.30: Atuador de plasma DBD produzido com fita de cobre e fita de kapton.

Figura 4.31: Fonte de alimentação PVM500 de alta tensão, e alta frequência, utilizada para alimentar os atuadores a plasma de tipo DBD.

Figura 4.32: PicoScope ligado ao computador para medição da tensão de alimentação de um atuador de plasma DBD.

Figura 4.33: *Secondary Ignition Pickup*, ferramenta do PicoScope utilizada para medição de frequência e tensão de alimentação dos atuadores de plasma DBD.

Figura 5.1: Forma de onda e medição da tensão, e da frequência, para atuador a plasma feito com fita de cobre e fita de kapton (500 μ s/div)

Figura 5.2: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 4,8 kVpp e 23,8 kHz. Valores obtidos usando o *PicoScope* com uma precisão de ± 0.001 kV e ± 0.01 kHz.

Figura 5.3: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 6 kVpp e a 23,8 kHz.

Figura 5.4: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 8 kVpp e a 23,8 kHz.

Figura 5.5: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 13 kVpp e a 23,8 kHz

Figura 5.6: Análise PIV, referente ao escoamento médio axial, para uma razão de velocidades igual a 1.

Figura 5.7: Velocidade média do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,24.

Figura 5.8: Velocidade média do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,48.

Figura 5.9: Velocidade média do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,72.

Figura 5.10: Perfil de velocidades para razão de velocidades igual a 1

Figura 5.11: Perfil de velocidades para razão de velocidades igual a 1,24

Figura 5.12: Atuadores de plasma de DBD colocados na superfície Coanda da tubeira HOMER

Figura 5.13: Forma de onda da tensão de alimentação dos dois atuadores de plasma de DBD (escala de 200 μ s/divisão)

Figura 5.14: Cálculo do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1.

Figura 5.15: Cálculo do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,24.

Figura 5.16: Cálculo do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,48.

Figura 5.17: Análise do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,72.

Fig.II-1: Imagens das diferentes fases de construção da tubeira.

Fig.III-1: Código de programação do microcontrolador mbed NXP LPC 1768

Figura IV-1: Painel lateral definido no separador de “Capture” a) permite selecionar o separador “Capture” b) permite visualizar imagens em tempo real c) permite definir o tempo de exposição d) permite definir modo de captura e) permite captar uma imagem.

Figura IV-2: Configurações do separador “Capture” para aquisição de imagens PIV a) em “External PIV Mode” b) velocidade da camara c) tempo de exposição d) ganho

Figura IV-3: Configurações do separador “Sequence” a) Tipo de captura b) Número de imagens pretendido c) Botão para iniciar a captura.

Figura IV-4: Formatos e tipos de sequência em que podem ser carregadas as imagens no PIVLab.

Figura IV-5: Painel de pré-processamento das imagens com os parâmetros utilizados neste trabalho.

Figura IV-6: Painel de configuração do algoritmo de análise PIV

Figura IV-7: Painel de calibração do PIVLab

Figura IV-8: Painel de Pós-processamento. É possível selecionar com o rato uma zona de pontos que corresponde às velocidades a esperar no resultado.

Figura IV-9: Campo de vetores de velocidade após o pós-processamento e a eliminação de vetores espúreos.

Figura V-1: Esquema de ligações da fonte de alimentação PVM 500

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Sinais de cada pino transferidos através do conector Timing I/O.

Tabela 5.1: Velocidade no ventilador (precisão ± 0.01 m/s) para diferentes larguras de pulso PWM.

Tabela 5.2: Casos de teste ensaiados usando a análise de escoamento com o sistema PIV.

Tabela 5.3: Casos de teste para análise de visualização de escoamento.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1.

Tabela 5.5: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,24.

Tabela 5.6: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,48.

Tabela 5.7: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,72.

Lista de Símbolos

μ	Viscosidade dinâmica
Δr	Deslocamento
Δt	Intervalo de tempo
A	Área
a	Aceleração
$D_{hidráulico}$	Diâmetro Hidráulico
D_i	Diâmetro da entrada
D_o	Diâmetro da saída
d_p	Diâmetro da partícula
E	Campo magnético
F_B	<i>Body force</i>
H_i	Altura da entrada
H_o	Altura da saída
p_∞	Pressão ambiente
$P_{hidráulico}$	Perímetro hidráulico
p_s	Pressão da superfície
Re	Número de Reynolds
U	Velocidade média
U_p	Velocidade média de uma partícula
α	Ângulo de deflexão
ϵ_0	Permissividade do meio
λ_D	Comprimento de Debye
ρ	Massa volúmica
Φ	Potencial elétrico

Lista de Acrónimos

ACHEON	Aerial Coanda High Efficiency Orienting-jet Nozzle
AFC	Active Flow Control
CCD	Charge Couple Device
CCU	Camera Control Unit
CID	Charge Injection Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DBD	Dielectric Barrier Discharge
DCC	Direct Cross-Correlation
ESC	Electronic Speed Controller
FFT	Fast Fourier Transform
FP7	Seventh Framework Programme of the European Union
HOMER	High-speed Orienting Momentum with Enhanced Reversibility
MPBA	Multi-barrier Plasma Based Actuator
PIV	Particle Image Velocimetry
PTV	Particle Tracking Velocimetry
PWM	Pulse-Width Modulation
SDBD	Single Dielectric Barrier Discharge
V/STOL	Vertical/Short Take-Off and Landing

Capítulo 1

Introdução

O trabalho aqui apresentado foi desenvolvido no âmbito do projeto ACHEON (Aerial Coanda High Efficiency Orienting-jet Nozzle). O projeto ACHEON é um projeto financiado pelo FP7 (Seventh Framework Programme of the European Union) e, neste caso, visa o desenvolvimento de uma tecnologia inovadora de propulsão para aplicação aeronáutica. Além do impacto nos sistemas de transporte aéreo, o desenvolvimento desta tecnologia permite a fertilização-cruzada com outras áreas de inovação industrial. O projeto ACHEON é gerido por um consórcio multidisciplinar composto por seis organizações, de quatro países europeus (Portugal, Itália, Inglaterra e Bélgica). Nestas seis organizações encontram-se quatro universidades (Universidade da Beira Interior, Università degli Studi di Modena e Reggio-Emilia, University of Lincoln e Vrije Universiteit Brussels), uma organização de transferência de investigação e tecnologia (Reggio Emilia Innovazione) e uma empresa (Nimbus).

O projeto explora a viabilidade de um novo sistema de propulsão para aeronaves. Neste pretendem-se superar as principais limitações dos sistemas convencionais, que se relacionam com o ângulo máximo de deflexão de jato propulsivo. Além das limitações próprias de um sistema mecânico, como o usado no Harrier e Eurofighter, figura 1.1. Este sistema propulsor baseia-se numa arquitetura específica e inovadora designada de HOMER (High-speed Orienting Momentum with Enhanced Reversibility) que foi patenteada pela Università degli Studi di Modena e Reggio-Emilia (Dumas et al, 2011), veja-se a figura. 1.2.

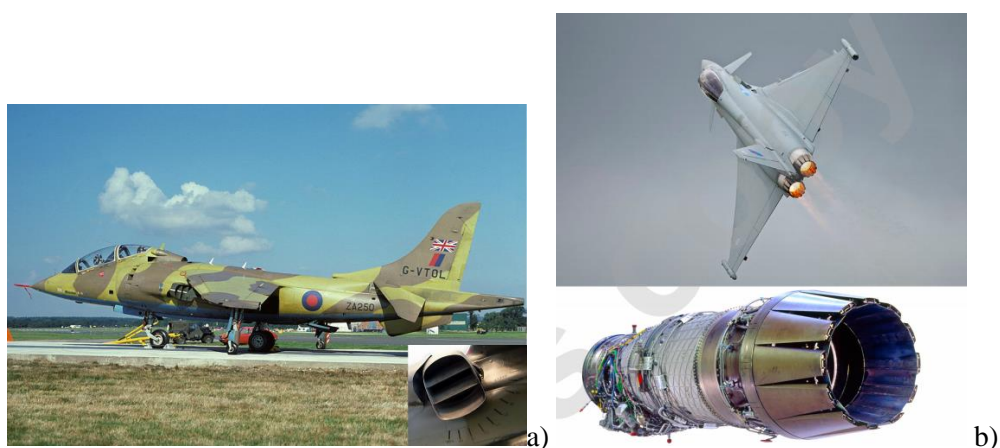


Figura 1.1: a) O avião militar Harrier, incluindo o detalhe da saída de uma das tubeiras (canto inferior direito). b) O avião militar Eurofighter Typhoon, incluindo o detalhe da tubeira orientável mecanicamente para provocar a deflexão do jato propulsor. Reproduzido de Páscoa et al. (2013)

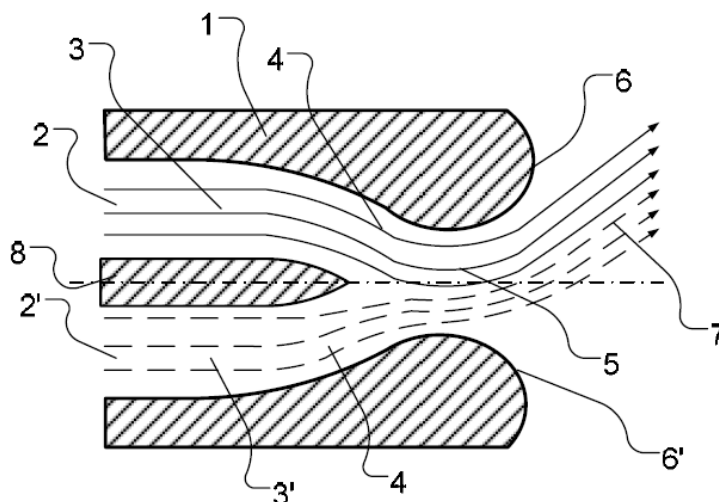


Figura 1.2: Detalhe da patente do sistema HOMER. O diferencial de caudal entre as duas entradas (2-2'), em conjunto com a superfície de Coanda (6-6'), permite controlar o ângulo de saída do jato sem sistema mecânico. (Dumas et al., 2011)

A principal vantagem do sistema propulsor ACHEON passa por produzir a vetorização da força propulsora apenas por efeito do diferencial de caudais, não sendo necessário recorrer ao movimento de partes mecânicas, veja-se o caso inverso na figura 1.1. O sistema de propulsão ACHEON envolve três efeitos físicos diferentes: Efeito de mistura de jatos de alta velocidade, efeito Coanda da adesão de um jato de alta velocidade a uma superfície convexa, e efeito Coanda controlado por campos electrostáticos usando atuadores a plasma. Os atuadores de tipo DBD (*Dielectric Barrier Discharge*) permitem a criação de um vento iónico que irá aumentar a quantidade de movimento do fluido junto da parede, e deste modo contribuir para controlar a camada limite.

Em face da elevada complexidade do escoamento é utilizado um sistema de *Particle Image Velocimetry* (PIV) que foi parcialmente desenvolvido na UBI. Este trabalho é de interesse geral, na medida em que mostra em detalhe como se pode desenvolver um sistema PIV de baixo custo e de aplicação simples.

O desenvolvimento do sistema de controlo da deflexão da tubeira HOMER pode ter aplicações em áreas multidisciplinares, como sejam a utilização em tubeiras de sistemas de pintura com jato vetorizado sem partes móveis. E, portanto, de muito maior rapidez de resposta em termos de velocidade de mudança do ângulo do jato em comparação com sistemas mecânicos tradicionais. Neste trabalho procurou estudar-se experimentalmente a arquitetura HOMER e verificar a sua viabilidade em termos de controlo de deflexão do jato de saída. Por outro lado, os atuadores de plasma de tipo DBD têm sido alvo de diversos estudos que têm comprovado a sua eficácia ao nível do controlo ativo da camada limite, embora nunca usados

anteriormente neste tipo de aplicação. Perante este cenário testaram-se atuadores de plasma, de tipo DBD, que foram implementados na zona de saída da superfície de Coanda do HOMER, em particular na tentativa de aumentar a capacidade de deflexão de jato acima do valor obtido somente pelo diferencial de caudal de entrada.

1.1. Importância e enquadramento do tema

Desde os primórdios da aviação que têm sido realizados inúmeros trabalhos de investigação e desenvolvimento na área das tecnologias V/STOL (Vertical/Short Take-Off and Landing). A realização desses trabalhos foi motivada pelas vantagens que as aeronaves de tecnologias V/STOL apresentam. Nestas vantagens destacam-se a redução de tempo necessário para o início de voo horizontal e a possibilidade de aterragem e descolagem em espaços mais reduzidos, não havendo a necessidade de pistas muito longas. Dentro deste tipo de aeronaves a melhor sucedida até ao momento, e a mais versátil, foi o helicóptero (Saeed, 2010).

No entanto os helicópteros apresentam um limite baixo ao nível da sua velocidade máxima de voo horizontal. Por outro lado os aviões V/STOL clássicos, como os apresentados na figura 1.1, apresentam problemas relacionados com o seu peso elevado que é originado pela implementação de elementos mecânicos móveis nas tubeiras dos jatos propulsores. Além de que os sistemas mecânicos apresentam a respetiva inércia, que condiciona a velocidade de reação em termos de mudança do ângulo do jato. Neste contexto surge o projeto ACHEON que propõe um novo conceito de propulsão baseado numa arquitetura de propulsão vetorial (Páscoa et al., 2013). Com esta arquitetura pretende-se criar um novo sistema de propulsão a partir do qual se consegue controlar a deflexão do jato sem recorrer a partes mecânicas móveis. O desenvolvimento com sucesso do sistema proposto apresenta grande importância para os aviões V/STOL, conseguindo superar os sistemas de propulsão tradicionais, pois não necessita de partes mecânicas móveis e deste modo permite reduzir significativamente o peso das aeronaves em questão.

1.2. Objetivos da investigação

O presente trabalho de investigação tem como objetivo fundamental contribuir para o conhecimento do escoamento na geometria HOMER, incluindo a análise do seu desempenho, tal como definida no Projeto Europeu ACHEON.

Tendo em vista o objetivo fundamental estabelecido, nesta dissertação, analisa-se experimentalmente a capacidade da arquitetura HOMER desenvolver diversos ângulos de deflexão. Os trabalhos permitem ainda considerar os efeitos 3D no escoamento, os quais podem introduzir problemas de desempenho da tubeira não previstos inicialmente. Estes trabalhos são desenvolvidos numa instalação experimental especialmente desenvolvida para o

efeito. Neste caso particular, e tendo em vista a necessidade de caracterizar quantitativamente o escoamento na tubeira, foi desenvolvido um sistema do tipo Particle Image Velocimetry (PIV) de tipo open-source.

O aumento da capacidade de controlo do ângulo do escoamento na saída da tubeira HOMER é feito usando atuadores a plasma. Estes atuadores, do tipo Dielectric Barrier Discharge (DBD), são aplicados na geometria e toda a sua instalação foi desenvolvida no decorrer deste trabalho. Durante o trabalho é determinado o efeito que estes atuadores têm sobre o valor do ângulo de deflexão máximo atingido pela tubeira.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. No presente capítulo apresenta-se uma introdução e enquadramento sobre o trabalho realizado, de forma a justificar o tema desta dissertação. No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura que engloba as diferentes temáticas estudadas no decorrer deste trabalho, situando o mesmo no âmbito do estado atual do conhecimento. O capítulo 3 descreve o substrato teórico que suporta o desenvolvimento do trabalho. Nesta abordagem teórico-analítica são explicados os conceitos associados controlo da camada limite, ao efeito Coanda, bem como os fundamentos da operação dos atuadores a plasma de tipo DBD. Na parte final deste capítulo são descritas os conceitos base que permitem o desenvolvimento do sistema de medição PIV. No capítulo 4 descreve-se todo o equipamento experimental utilizado, bem como os subsistemas desenvolvidos, assim como os procedimentos realizados para a obtenção dos resultados experimentais. De entre os subsistemas desenvolvidos destaca-se, nomeadamente, a tubeira em acrílico com a arquitetura HOMER, a construção de um gerador de partículas sólidas, o desenvolvimento do sistema PIV open-source, e a implementação dos atuadores DBD com o respetivo sistema de instrumentação. No capítulo seguinte (capítulo 5), apresentam-se exaustivamente os resultados experimentais obtidos e análise crítica dos mesmos. Por último, no capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões extraídas no decorrer deste trabalho e perspetivam-se os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo enquadra-se o trabalho no estado atual do conhecimento, focando as áreas referentes às tubeias de efeito de Coanda, o controlo de camada limite em particular usando atuadores do tipo DBD, e ainda o desenvolvimento de sistemas Particle Image Velocimetry.

2.1 Estudos referentes a tubeias de efeito de Coanda

Até ao momento realizaram-se diversos estudos sobre tubeias de efeito Coanda, bem como estudos fundamentais e aplicações onde surgem superfícies que reproduzem este efeito, tanto a nível bidimensional como tridimensional. Patankar & Sridhar (1972) realizaram dos primeiros testes com escoamentos Coanda tridimensionais. Estes autores investigaram em profundidade os efeitos tridimensionais de jatos turbulentos e incompressíveis ao longo de superfícies curvas, testaram casos com diferentes relações de aspeto da saída que conduz à superfície curva tridimensional, e descobriram que o ângulo de separação do escoamento aumenta com o raio de curvatura e com a razão de aspeto da secção de saída.

Os trabalhos foram desenvolvidos em diferentes áreas de aplicação. Por exemplo, Gregory-Smith & Gilchrist (1988) também estudaram escoamentos supersónicos em estruturas de paredes curvas, com um eixo simétrico de expansão no interior e com mecanismos de separação num designado *Coanda flare* (controlador de chama de efeito Coanda). *Coanda flare* é um dispositivo tridimensional, em forma de tulipa, que otimiza a combustão dos gases. Mais tarde, em 1991, Gregory-Smith e o seu colaborador Hawkins voltou a conduzir um estudo sobre o *Coanda flare*, tendo efetuado um estudo fundamental e obtido valores para velocidades médias e para as tensões de Reynolds. Este estudo volta a ter a sua continuação em Gregory-Smith & Senior (1994).

Juvet (1993) realizou uma extensa investigação sobre o controlo de escoamento num sistema com eixo de simetria, neste caso recorrendo a visualização com gerador de fumo e anemometria. No seu sistema utilizou dois escoamentos: um escoamento principal a sair por um bocal central de grande diâmetro e um escoamento secundário a sair por uma pequena abertura circular tangencial à superfície radial (superfície Coanda). Juvet descobriu que o sistema com eixo de simetria não é influenciado pelo efeito Coanda se não houver presença do jato secundário. O autor testou ainda diferentes casos com razões entre o jato principal e secundário, tendo concluído que para razões inferiores a 0,1 o jato principal apresenta uma baixa influência das superfícies Coanda, e que para razões superiores a 0,1 o jato principal é vetorizado na direção radial. Este sistema é inerentemente tridimensional.

Wing (1994) também estudou um sistema bidimensional, neste caso de vetorização da força na tubeira por intermédio de um jato principal e de um jato secundário que é defletido a partir de uma superfície Coanda. No entanto os resultados obtidos foram em grande parte insatisfatórios, segundo o autor, produzindo uma pequena deflexão máxima do jato de cerca de seis graus. Este autor concluiu que os resultados foram influenciados pela baixa quantidade de movimento do jato primário, e que a geometria da tubeira exigia uma melhor otimização que permitisse produzir ângulos de deflexão maiores.

Mais recentemente, Trancossi & Dumas (2011b) apresentaram a base teórica e a modelação numérica referente a uma patente com uma aplicação inovadora de efeito Coanda. Esta aplicação inovadora é formalmente designada de tubeira HOMER. E é aplicada num sistema duplo de propulsão (duas tubeiras) que produz um escoamento vetorizado controlável, permitindo uma mudança dinâmica da posição angular em função do caudal de dois escoamentos primitivos de entrada. A patente registada por estes autores pode ser usada para propulsão aeronáutica e também para outro tipo de aplicações industriais. Esta patente, em conjunto com o sistema de controlo por atuadores a plasma proposto pela UBI, forma a base do Projeto Europeu ACHEON.

2.2 Controlo da camada limite usando atuadores a plasma de tipo DBD

O controlo de escoamentos do tipo camada limite tem sido alvo de inúmeros estudos por parte dos investigadores da área da mecânica de fluidos. Em particular, durante as duas últimas décadas, têm sido propostas diversas soluções inovadoras para este problema (Yagiz et al., 2012). Em alternativa aos tradicionais sistemas de controlo de tipo passivo, ou baseados em sistemas eletromecânicos, foi sugerida a utilização de atuadores a plasma. De entre os mais populares destacam-se os atuadores do tipo de descarga sob barreira dielétrica (Dielectric Barrier Discharge - DBD). Estes dispositivos conseguiram ganhar grande popularidade quando apresentaram um bom comportamento no controlo ativo do escoamento na camada limite, o que permite obter um aumento da sustentação em perfis alares ou o controlo da separação de escoamento em outro tipo de geometrias (Zito et al., 2010). Todo este interesse resulta das características de desempenho que estes dispositivos apresentam como, por exemplo, a sua simplicidade, o seu baixo peso, e o baixo consumo de energia (Corke et al., 2010; Kotsonis & Veldhuis, 2010).

Os atuadores de tipo DBD são baseados na ação de um plasma. A designação “plasma” foi introduzida na literatura por Langmuir (1928) para designar uma região de descarga de gás eletricamente neutro. No entanto, com o passar do tempo, esta definição foi ampliada, sendo que atualmente a palavra “plasma” se refere a um sistema de partículas cujo comportamento coletivo é caracterizado por interações de Coulomb de longo alcance (Kunhardt, 2000).

Muitos estudos têm sido realizados sobre os diferentes sistemas que criam plasmas. Mas neste trabalho vamos focar essencialmente os autores que analisaram as características, comportamentos, funcionamento e aplicações de atuadores do tipo DBD. Enloe et al. (2004a, 2004b) estudaram os atuadores de plasma, em particular os de descarga sob barreira dielétrica, quanto à morfologia do plasma e quanto aos efeitos da geometria sobre o desempenho. Nestes estudos os autores apresentaram medições das características óticas, elétricas, e de quantidade de movimento produzida para diversos valores do ciclo de descarga do atuador. Estas medições foram discutidas e foi mostrado que a quantidade de movimento produzida pelo atuador depende diretamente da espessura do eletrodo exposto. Uma característica que será confirmada no decorrer deste trabalho.

Por outro lado, Forte et al. (2005) realizaram medições da velocidade instantânea induzida num escoamento por atuadores de plasma em ar à pressão atmosférica. Nestas medições utilizaram dois tipos diferentes de atuadores de plasma, atuadores de corrente contínua de descarga em coroa e atuadores de corrente alternada de descarga sob barreira dielétrica. Os atuadores foram testados para uma situação não estacionária, ou seja, foram testados em situação de início e paragem de descarga. Relativamente aos atuadores DBD, que são os que focamos neste trabalho, concluíram que se pode observar uma rápida aceleração quando a descarga é estabelecida, sendo que o valor médio da velocidade na camada limite próxima do eletrodo aumentou de 1,5 m/s para 5 m/s. Este trabalho permite ter um conhecimento sobre a quantidade de movimento transmitida ao fluido neutro pelo vento iónico.

Opaits et al. (2008) investigaram o funcionamento de atuadores de plasma de tipo DBD quando alimentados por formas de onda de tensão pulsada. Estes autores verificaram que as formas de onda pulsadas permitiam um desempenho similar às formas de onda sinusoidais, usadas convencionalmente para alimentar atuadores a plasma, e utilizando menores níveis de tensão. No presente trabalho são usadas formas sinusoidais, dado que o objeto do estudo é o desempenho dos DBD na tubeira e não otimização do consumo energético dos atuadores.

Thomas et al. (2009) realizaram uma investigação experimental, com vista a desenvolver um estudo paramétrico, com o intuito de otimizar a força produzida por atuadores de plasma de tipo SDBD (Single Dielectric Barrier Discharge). Estes autores descobriram que a utilização de dielétricos de maior espessura possibilita a utilização de maiores tensões no atuador, o que por sua vez aumenta a quantidade de movimento transferida entre o vento iónico e o ar. Descobriram ainda que utilizar dielétricos com constantes dielétricas de baixo valor também aumenta a quantidade de movimento transferida.

2.2.1 Aplicação de atuadores DBD no controlo da camada limite

Entre outros tipos de geometrias, uma das que tem sido estudada para aplicar atuadores a plasma é o cilindro sujeito a um escoamento de aproximação, tendo em vista o controlo ativo de escoamento na sua camada limite. Hyun & Chun (2003) investigaram a forma de controlo

da esteira num escoamento sobre um cilindro usando o vento iônico produzido por atuadores de tipo DBD. Este trabalho permitiu concluir, a partir da visualização do escoamento, que a formação do vento iônico afeta significativamente a estrutura da esteira no escoamento a jusante do cilindro. McLaughlin et al. (2004) foram mais longe e utilizaram um atuador de plasma, de tipo DBD, para manipular a separação do escoamento, e o comportamento da esteira, no escoamento em torno de um cilindro. A visualização do escoamento mostrou que os atuadores permitem alterar significativamente a separação do escoamento e o comportamento da esteira. Sung et al. (2006) mostraram, através de medições PIV e visualização do escoamento, diversos casos de alteração da separação no escoamento sobre um cilindro utilizando atuadores de tipo DBD. Kozlov (2010) também estudou o controle de escoamento na camada limite em torno de um cilindro. Este autor montou quatro atuadores de plasma sucessivos, de tipo DBD, sobre o modelo de cilindro e testou o seu comportamento num túnel de vento. Realizou também uma visualização do escoamento, a partir da qual concluiu que com os atuadores ativos há um efeito profundo sobre a estrutura do escoamento, a qual reduz substancialmente a região de separação do escoamento a jusante do cilindro.

À semelhança do controle de escoamento sobre um cilindro, também o controle do escoamento sobre um perfil alar tem motivado a realização de diversos estudos. Corke foi um dos autores que esteve envolvido em trabalhos sobre o controle da zona de separação de escoamento num perfil alar. Neste domínio em particular, Corke et al. (2002) realizaram o estudo *“Application of weakly-ionized plasmas as wing flow-control”*, que foi o seu primeiro trabalho relacionado com este tema e no qual utilizaram um atuador a plasma, de tipo DBD, aplicado na superfície de um perfil de asa. Estes autores concluíram que o atuador lhes permitiu aumentar o coeficiente de sustentação para toda a gama de ângulos de ataque testados.

Post & Corke (2004a) utilizaram um atuador de plasma para controlar a separação do escoamento sobre o bordo de ataque de um perfil alar, tendo-o colocado a oscilar de forma periódica de modo a variar o ângulo de ataque. Assim puderam testar o perfil de asa para diferentes ângulos de ataque e também para diferentes modos de funcionamento dos atuadores de plasma. Estes autores verificaram que, com os atuadores ligados, o escoamento passou a aderir mais à superfície. A eficácia desta adesão é dependente do tipo de funcionamento dos atuadores a plasma, bem como do ângulo de ataque. Puderam então concluir que a utilização de atuadores a plasma num perfil de asa permite aumentar o coeficiente de sustentação. Post & Corke (2004b, 2004c, 2006), Corke & Post (2005), Corke & Mertz (2006) e He et al. (2009) foram outros dos autores de trabalhos complementares sobre o controle do escoamento na camada limite, neste caso sobre um perfil de asa e utilizando atuadores de plasma DBD.

Sosa et al (2004), Sosa & Artana (2006) e Sosa et al (2007) apresentam trabalhos semelhantes aos de Corke, dado que também estudaram o controle de escoamento na camada limite num perfil de asa. No entanto estes autores utilizaram uma configuração de atuador geometricamente diferente. Por sua vez, Shcherbakov et al. (2000) também estudaram um perfil alar, sobre o qual montaram uma superfície de descarga de tipo DBD, o que lhes permitiu uma redução do coeficiente de resistência em até 5,3%. Roth (2003) estudou o efeito de atuadores DBD quando aplicados sobre a superfície de um perfil de asa NACA 0015, em particular para elevados ângulos de ataque e baixas velocidades, tendo concluído que o vento iônico produzido pelo plasma provoca uma maior adesão do escoamento à superfície, o que leva a um atraso do ponto de separação e a uma diminuição da esteira.

Para além de cilindros, e de perfis alares, também houve muitos outros modelos de geometria que foram objeto de estudo, e nos quais se observaram os efeitos da implementação de atuadores de plasma sobre o escoamento. Do et al (2007) utilizaram atuadores de plasma DBD na tentativa de retardar a separação do escoamento sobre um corpo com uma superfície inclinada de forma íngreme. O corpo utilizado foi constituído por uma placa plana ligada tangencialmente a metade de um cilindro e tendo a respetiva superfície inclinada. Colocaram quatro atuadores a plasma, de tipo DBD, na superfície da metade do cilindro em que se localiza o bordo de fuga. Analisaram diferentes tipos de atuadores a plasma, incluindo por DBD, e concluíram que é possível induzir sucção no escoamento de forma a atrasar a separação do escoamento sobre o corpo, sendo que os atuadores de tipo DBD são os mais eficientes.

Schatzman & Thomas (2010) realizaram um estudo experimental com vista a determinar o efeito de atuadores DBD no controle da separação da camada limite turbulenta. O modelo de geometria ensaiado era constituído por uma placa plana, onde se desenvolvia um escoamento do tipo camada limite, seguida de uma rampa convexa com curvatura constante. Os autores implementaram atuadores a plasma no modelo de teste e realizaram os ensaios num túnel de vento. Os resultados foram obtidos para um modo atuação estável, considerando o período de aplicação da tensão de alimentação, e um modo de atuação instável. Estes autores concluíram que ambos os métodos conduzem a efeitos observáveis sobre o escoamento na camada limite. Verificaram assim, que por efeito dos atuadores de plasma, há uma redução da espessura da camada limite turbulenta.

Catrakis (2012) também investigou o controle ativo do escoamento de ar, na região de separação, sobre um corpo cheio. O autor utilizou um corpo com a forma de um hemisfério e montou nesse corpo numa placa plana. Ele colocou os atuadores DBD na superfície do hemisfério e testou o hemisfério num túnel de vento, de modo a verificar o efeito dos atuadores. A partir da visualização das linhas do corrente em torno do corpo, o autor concluiu que ao ativar os atuadores reduz-se a região de separação do escoamento, pois o escoamento adere mais à superfície do hemisfério, e com isso atrasa-se o ponto de separação.

Morris et al (2005) testaram a capacidade de um atuador a plasma, de tipo DBD, para modificar o campo de escoamento em torno das pás de uma turbina, considerando baixa velocidade e uma geometria de cascata de pás retilínea. O atuador foi montado nas pás da turbina. Os resultados mostraram que a pressão nas pás, ou seja a carga, não é significativamente alterada pelos atuadores de plasma, no entanto o campo de escoamento sobre as pás pode efetivamente ser alterado de modo a controlar a camada limite.

Todos os estudos referidos anteriormente demonstram a capacidade dos atuadores a plasma para manipular os escoamentos, o que pode possibilitar a obtenção de melhores resultados a nível de desempenho do escoamento na camada limite. Perante esta grande influência dos atuadores de plasma, em particular na área de controlo de escoamento, têm sido também realizados trabalhos em que se testam novas configurações de atuadores, os quais otimizam a quantidade de movimento transferida entre o vento iónico e o ar neutro. Moreau et al (2008) testaram uma nova geometria de atuador de plasma, baseada num DBD com três eléctrodos. Estes autores testaram um novo dispositivo, o qual compreende um atuador a plasma clássico, de dois eléctrodos em geometria DBD e excitados por uma fonte de alta tensão AC, e mais um terceiro eléctrodo ao qual aplicaram uma alta tensão de tipo DC. Os autores concluíram que esta geometria permite aumentar o comprimento de descarga, que resulta do espaçamento entre os dois eléctrodos expostos, e permite ainda aumentar a velocidade máxima do vento iónico produzida, e isto sem um aumento assinalável do consumo de energia eléctrica. Esta geometria de DBD pode tornar-se muito interessante para utilização em aplicações de grande escala.

Durscher & Roy (2010) exploraram o conceito de atuador de plasma de “multi-barreira”, tendo em vista melhorar a quantidade de movimento transferida e aumentar o seu domínio de aplicação. Nesse sentido, estes autores testaram diferentes configurações de MPBA (Multi-barrier Plasma Based Actuator), e que basicamente consiste em extensões da configuração típica do atuador de plasma, de tipo DBD, mas incorporando várias camadas de material dieléctrico e diversos eléctrodos. Os autores verificaram que o atuador MPBA foi capaz de alcançar uma transferência de quantidade de movimento superior a dois de três modelos padrão avaliados. Verificaram ainda que, a nível de desempenho, a configuração de atuador MPBA superou significativamente todas as configurações padrão de atuador.

2.3 Sistemas de medição do escoamento de tipo PIV

Os sistemas de medição de tipo PIV (Particle Image Velocimetry) têm apresentado grande utilidade para a comunidade científica, tendo sofrido uma grande evolução ao longo dos anos. Lauterborn & Vogel (1984), assim como Adrian (1986,1991), escreveram artigos de revisão, hoje considerados fundamentais, nos quais apresentaram o desenvolvimento da técnica e

efetuaram uma compilação do conhecimento sobre a técnica PIV, e cujos desenvolvimentos fundamentais se deram em apenas uma década.

Foram Sutton et al. (1983) que propuseram, pela primeira vez, a ideia do uso do método *auto-correlation* com duas exposições por fotograma. Estes autores apresentaram assim um método melhorado para obtenção do campo completo das deformações de superfície de um material. As deformações foram determinadas por correlação numérica, e o esquema da correlação numérica por eles melhorado foi discutido em detalhe.

Hinsch (1993) analisou também as técnicas de medição PIV, dessa altura, do ponto de vista dos conceitos de ótica envolvidos nestes processos. Este trabalho revelou-se uma contribuição muito útil na compreensão dos aspetos teóricos referentes à conceção ótica do sistema PIV.

Westerwell (1993) utilizou técnicas de medição PIV para obter informação quantitativa bidimensional do campo de velocidades do escoamento. Esta obtenção de dados permitiu-lhe obter ainda outras características do escoamento, como sejam a vorticidade e a taxa de deformação, as quais se encontram diretamente relacionadas com a dinâmica das estruturas do escoamento. O autor concluiu que a implementação digital do método PIV reduz consideravelmente o tempo de processamento, apresentando-se como uma solução viável para o processamento de grandes quantidades de imagens PIV.

Grant (1997) discutiu a evolução do *Particle Image Velocimetry* desde as suas diversas origens, descrevendo a importância das diversas contribuições para o avanço do conhecimento, e a influência que tiveram na resolução de diferentes problemas. Neste trabalho o autor faz uma súpula sobre as diferentes implementações do sistema de iluminação, bem como sobre a captura e análise de imagem, para as diversas técnicas de medição PIV.

Entre outros, Forliti et al. (2000) quantificaram os erros e precisões inerentes aos sistemas de *digital particle image velocimetry*. Estes autores utilizaram imagens de vários deslocamentos uniformes para avaliar a incerteza associada a vários algoritmos de cálculo PIV. Descobriram que os erros, designados “de tendência” existem para todos os algoritmos testados e tendem a afetar os erros de precisão com que se calcula o campo de velocidades, além disso estes erros dependem dos gradientes de deslocamento presentes nas áreas de interrogação.

Mas esta preocupação com a precisão não era nova, pois já Keane et al. (1995) tinham proposto o conceito de “super resolução PIV”, o qual se refere a métodos de interrogação que melhoraram a resolução espacial, ficando esta muito acima da resolução conseguida com os algoritmos de correlação mais básicos. Neste método, designado de “super resolução PIV”, a resolução final da análise PIV é determinada considerando o mais pequeno dos espaços médios entre partículas e o deslocamento das partículas entre os pulsos de laser. Este método

combina a técnica de análise da correlação do grupo de partículas, de um local, com uma interrogação baseada no rastreamento de partículas. Os autores demonstraram ainda a fiabilidade do método proposto.

Atualmente a técnica de análise PIV começa a estar mais acessíveis para toda a comunidade científica, uma vez que já é possível a realização deste tipo de medições sem os elevados custos anteriormente associados a esta técnica. Exemplo disso é o estudo realizado por Ryerson & Schwenk (2012), os quais implementaram um sistema de análise PIV com componentes de elevada disponibilidade no mercado, tendo conseguido elevada precisão a um custo baixo (inferior a mil dólares).

Para realizar análises PIV a baixo custo existem atualmente diversos códigos de *software* gratuito disponíveis *online*. Alguns exemplos deste tipo de *software* são: PivLab (disponível em <http://pivlab.blogspot.pt/>), OpenPiv (disponível em <http://www.openpiv.net/>), JPIV (disponível em <http://www.jpiv.vennemann-online.de/>), mpiv (disponível em <http://www.oceanwave.jp/software/mpiv/index.php>), ou Gpiv (disponível em <http://gpiv.sourceforge.net/index.html>). Após analisar os diversos códigos, as suas limitações e funções de cálculo PIV, optou-se neste trabalho por usar essencialmente o PivLab.

Capítulo 3

Conceitos teóricos fundamentais

Neste trabalho analisou-se uma tubeira que permite controlar o ângulo de saída do escoamento usando o efeito de Coanda. Foram ainda utilizados atuadores de plasma de modo a aumentar o ângulo de saída do escoamento. A análise da capacidade de controlar a direção do escoamento na saída foi realizada recorrendo a técnicas de medição PIV. Esta técnica também foi implementada no decorrer deste trabalho. Como tal, torna-se importante fazer uma súmula dos conceitos teóricos fundamentais que possibilitam uma melhor compreensão do trabalho realizado.

3.1. Controlo de escoamento

Segundo Gad-el-Hak (2000) o controlo de escoamentos define-se como a tentativa de alterar o carácter, ou a disposição, de um dado campo de escoamento, sendo que o controlo de escoamentos não se encontra relacionado com o controlo do caudal do escoamento, o qual pode ser obtido, por exemplo, a partir de válvulas manuais ou automáticas. O controlo de escoamentos refere-se ao campo do escoamento, feito essencialmente por dois tipos de técnicas: as técnicas passivas de controlo de escoamento e as técnicas ativas de controlo de escoamento. As técnicas passivas de controlo do campo de escoamentos são muito utilizadas na indústria aeroespacial, uma vez que, na maioria dos casos, apresentam simplicidade de implementação, uma fácil manutenção, robustez e baixo custo. A utilização de geradores de vórtices nas asas de aeronaves são exemplos de técnicas passivas de controlo de escoamento. Estas são vulgarmente utilizadas em aeronaves com objetivo de evitar a perda de sustentação. Na figura 3.1-b) podemos ver estas técnicas aplicadas em aeronaves.

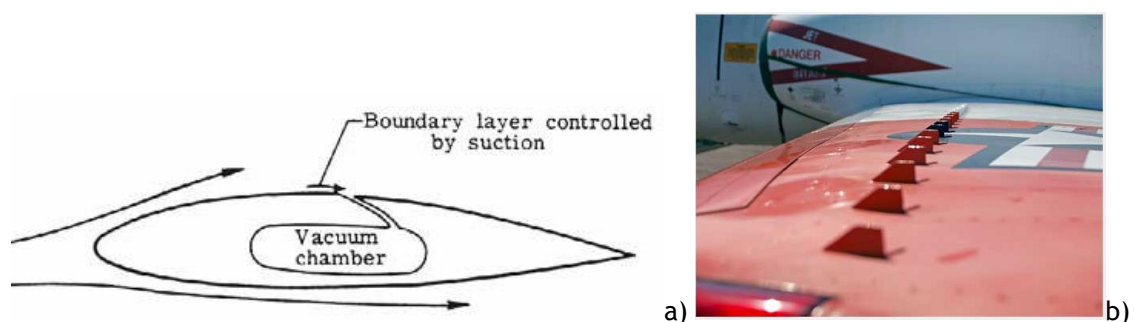


Figura 3.1: Exemplo de aplicações de técnicas de controlo de escoamento. a) Sucção de camada limite por meios mecânicos (fonte: NASA Report SP-367). b) Geradores de vórtices aplicados na asa de um T-45 Goshawck [fonte: airpigz.com]).

Relativamente ao controlo ativo de escoamentos, este requer a adição de energia ao escoamento, o que se pode conseguir recorrendo a um ventilador ou outro tipo de atuador, com o custo inerente, veja-se a Fig. 3.1-a). Este tipo de controlo de escoamentos oferece algumas vantagens a nível de desempenho, comparativamente às abordagens passivas. O controlo ativo de escoamentos pode ser desligado sempre que não seja necessário, e pode ainda ser adaptável a mudanças nas condições de voo. Ainda assim, e na generalidade, o controlo ativo de escoamento é mais difícil de implementar comparativamente a métodos passivos de controlo de escoamentos, pois este tipo de controlo requer um sistema que pode ser volumoso e pesado (Paul et al., 2013; Wang et al., 2012; Williams & MacMynowski, 2009;). Esta é a razão que está por detrás da utilização dos atuadores a plasma de DBD, que são leves e usam pouca energia.

3.2. Efeito Coanda

O efeito Coanda surgiu formalmente patenteado como “Device for Deflecting a Stream of Elastic Fluid Projected into an Elastic Fluid”, isto em 1936, pelo cientista romeno Henry Marie Coanda (Olivotto, 2010). Este efeito refere-se à tendência que um jato de fluido tem de aderir a um corpo sólido convexo, ou uma superfície adjacente, e de fluir ao longo desse corpo ou superfície. Este resultado surge em consequência de uma importante variação de pressão perpendicular às linhas de escoamento curvo (Houghton et al., 2013; Frunzulica et al., 2011; Miozi et al., 2010; Matsuo et al., 1998; Gilchrist & Gregory-Smith, 1988; Bevilaqua & Lee, 1984). Na figura 3.2 podemos visualizar a mudança da trajetória de um escoamento de água causada pelo efeito Coanda.



Figura 3.2: Demonstração do efeito Coanda [fonte: ftvieira.wordpress.com].

Na base deste conceito está o efeito pelo qual um jato colocado perto de uma superfície curva é atraído na direção dessa superfície, assim um escoamento curvo tem tendência a

permanecer unido a uma superfície curva e sofre ainda um arrastamento que é mais elevado para jatos cujo escoamento se proporcione sob superfícies curvas do que sob superfícies planas, característica esta que é contrariada pelo efeito desestabilizador da turbulência da parte externa do jato (Kim et al., 2006; Gregory-Smith & Gilchrist, 1987). Durante alguns anos o efeito Coanda foi muito utilizado para investigar, conceber e testar dispositivos de controlo de escoamento para aumento de sustentação, assim como para otimização de sistemas de propulsão de aplicações aeronáuticas (Miozzi et al, 2010).

Trancossi (2011) explica que a adesão pelo efeito Coanda é uma consequência direta do balanço de forças aplicadas a um elemento de fluido. Durante o movimento de adesão de Coanda o escoamento encontra-se sobre o efeito da força centrípeta e da pressão radial. Na figura 3.3 pode ver-se esquematicamente este efeito. Como o jato sai por uma abertura, a pressão entre o jato e o início da superfície curva é menor do que a pressão ambiente, devido à diferença de velocidade que resulta da interação do fluido com a parede. Havendo uma pressão inferior à atmosférica nessa zona o jato adere à parede curva, por efeito da pressão atmosférica exterior. Esta situação, no entanto, vai-se modificando. Pois que a pressão ao longo da superfície curva, molhada pelo jato, aumenta até igualar a pressão ambiente, sendo este o ponto de separação do fluido da parede curva.

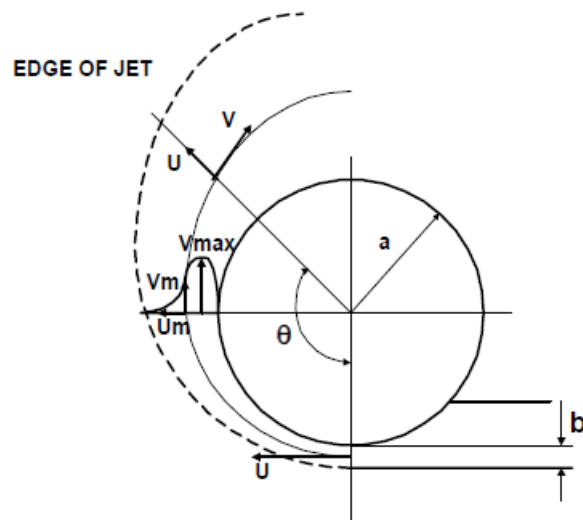


Figura 3.3: Esquema de exemplificação do efeito Coanda (fonte: Trancossi, 2011)

Assumindo que o escoamento é inicialmente invíscido, e pela análise da figura 3.3, obtém-se uma equação que deriva da equação de Bernoulli e que descreve a evolução da pressão:

$$p_0 = p_\infty - \frac{\rho \cdot U^2 \cdot b}{a}. \quad (3.1)$$

Em que ρ é a massa volúmica do fluido do jato, U é a velocidade média do jato, b a largura da abertura e a o raio da superfície curva, com p_∞ a pressão ambiente. Assim a pressão do fluido junto à parede, em escoamento invíscido, é inferior à pressão ambiente quando:

$$\frac{\rho.U^2.b}{a} \leq p_\infty. \quad (3.2)$$

Além deste efeito, e em escoamentos de fluido viscoso, a interação do jato fluido com a superfície curva, que está parada, leva a um aumento da espessura do jato ao longo da superfície de contato com uma diminuição da respetiva velocidade média, isto devido a um gradiente de pressão adverso. A velocidade média diminui enquanto que a pressão ao longo da superfície aumenta, até atingir a pressão ambiente. Quando $p_s = p_\infty$ (pressão da superfície igual à pressão ambiente) o escoamento separa-se da superfície curva. Portanto, os efeitos de origem invíscida contribuem para o efeito de Coanda, de acordo com o balanço de forças efetuado, mas os efeitos viscosos são uma causa principal da separação do jato da superfície curva.

3.3. Atuadores de plasma DBD

Os atuadores de plasma de DBD (Dielectric Barrier Discharge, descarga sob barreira dielétrica) apresentam características muito especiais, e que os têm tornado muito atraentes para o controlo ativo de escoamentos. Estes dispositivos são totalmente eletrónicos e não contêm partes mecânicas móveis, apresentam ainda um elevado tempo de resposta e têm uma massa muito baixa, consomem ainda pouca potência (Corke et al., 2007; Roth & Dai, 2006; Enloe et al., 2006; Corke & Matlis, 2000). A configuração de atuadores de plasma de DBD já foi alvo de muitos estudos e esta configuração é muito utilizada em aplicações industriais (Dong et al., 2008).

Os atuadores de DBD são constituídos por dois elétrodos separados por uma camada dielétrica. Um dos elétrodos fica coberto pela camada de material dielétrico e, pelo contrário, o segundo elétrodo fica exposto ao ar e no topo da camada de material dielétrico. Dadas estas condições, os elétrodos tomam a designação de elétrodo coberto e elétrodo exposto (Ferry, 2010; Kozlov & Thomas, 2009; Orlov 2006; Baughn et al., 2006; Font, 2006; Post, 2004). Os dois elétrodos são conectados a uma fonte de alimentação de corrente alternada, capaz de fornecer uma onda de alta tensão e elevada frequência, sendo que o elétrodo exposto é conectado ao polo positivo e o elétrodo coberto ao negativo (Ferry, 2010; Font et al., 2010; Corke et al., 2009; Orlov et al., 2008; Porter et al., 2007; Forte et al., 2007; Santhanakrishnan et al., 2006). A camada dielétrica pode ser qualquer tipo de material com propriedades isolantes, sendo que geralmente se utiliza em ambiente laboratorial fita de

Kapton, fita de Teflon, vidro de quartzo ou ainda cerâmica Macor. Como elétrodos é habitual usar-se fita de folha de cobre (Houser et al., 2013; Ferry, 2010). Na figura 3.4 podemos ver uma representação esquemática da configuração DBD de um atuador de plasma.

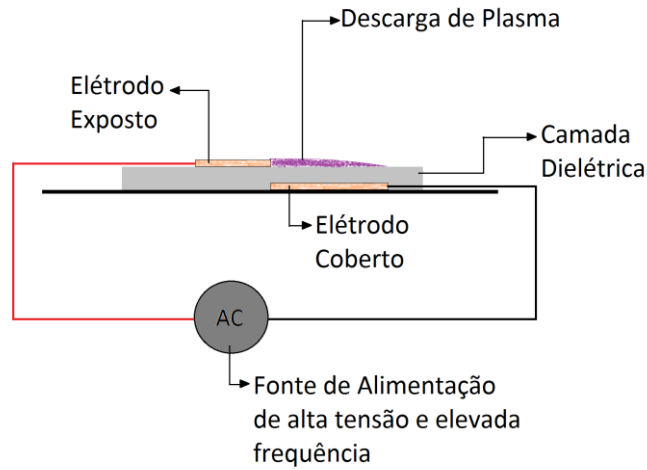


Figura 3.4: Representação esquemática de um atuador de plasma de DBD.

Quando a amplitude da forma de onda, de corrente alternada, que alimenta o atuador é suficientemente elevada, o ar ioniza localmente na zona em que o campo elétrico é maior, e deste modo os iões presentes são acelerados por efeito do campo elétrico presente, estes acabam por transferir quantidade de movimento para o ar neutro adjacente à superfície, criando assim um *vento iónico*. O efeito da transferência de quantidade de movimento proporcionado pelo ar ionizado na presença de um campo elétrico é comumente modelado na literatura por intermédio de uma força mássica (*body force*). (Cattafesta & Sheplak, 2011, Ferry, 2010; Mertz & Corke, 2009; He et al., 2009; Moreau, 2007; Thomas et al., 2006). Segundo Post & Corke (2005) esta força é proporcional à amplitude da tensão A.C. e ao volume de plasma, e é um vetor que segue o gradiente do campo elétrico. Deste modo, esta força por volume de plasma é um vetor cujo módulo é dado pela expressão:

$$F_B = \left(-\frac{\epsilon_0}{\lambda_D^2} \phi \right) \vec{E}. \quad (3.3)$$

Em que ϵ_0 é a permissividade do espaço vazio, λ_D é o comprimento de Debye, ϕ é o potencial elétrico, com \vec{E} o vetor de campo magnético. Este é dado por:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi. \quad (3.4)$$

Tal como se observa na figura 3.5, durante uma metade do ciclo da tensão alternada, em que esta progride para o pico negativo (lado esquerdo da figura 3.5), os eletrões deslocam-se do

elétrodo exposto para a superfície do dielétrico. Neste processo os eletrões colidem entre si e entre as moléculas neutras do ar. A acumulação de carga no dielétrico vai acabar por se equilibrar com o potencial da corrente alternada e, por conseguinte, a geração de plasma vai parar. Esta é uma característica dos atuadores de plasma DBD, que têm a capacidade de se auto limitarem. Na metade do ciclo seguinte, em que a tensão progride para o pico positivo (lado direito da figura 3.5), os eletrões são deslocados para trás para o elétrodo exposto. Deste modo voltam a colidir e a ionizar as partículas neutras, e por conseguinte formam novamente um plasma. O plasma é então formado e extinto duas vezes durante cada ciclo da onda da tensão alternada que alimenta o atuador (Ferry, 2010; Post & Corke, 2005). Este efeito é tão rápido, quando a frequência é da ordem de kHz, que não se nota visualmente.

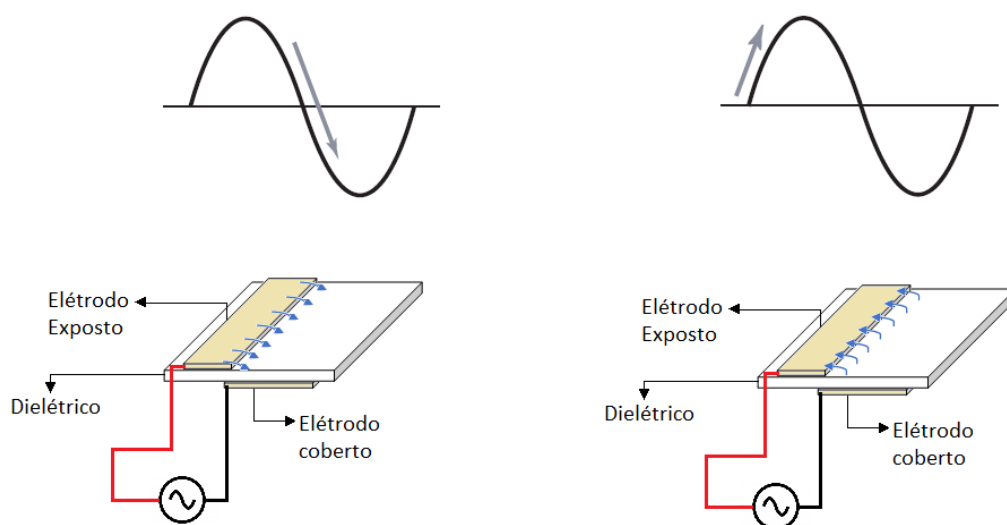


Figura 3.5: Representação esquemática do funcionamento de um atuador de plasma de DBD (na esquerda representa-se a emissão de eletrões para o dielétrico e na direita o retorno desses eletrões).

3.3.1. Atuação estacionária e não-estacionária de atuadores a plasma

Os atuadores de plasma de DBD podem atuar de forma estacionária ou não estacionária. No modo de atuação estacionária os atuadores de plasma DBD são alimentados de forma contínua com o respetivo sinal a.c. de alta tensão e alta frequência. Numa atuação não estacionária dos atuadores de plasma DBD, o sinal a.c. de alta tensão e alta frequência que alimenta os atuadores alterna entre estados em que se encontra ligado e desligado. Ou seja, o sinal de alimentação dos atuadores de plasma apresenta um *duty cycle* (ciclo de trabalho) que pode ser ajustado. Este modo de atuação pode ser muito útil na medida em que permite amplificar o efeito do atuador (Thomas et al., 2006; Post & Corke, 2005). Na figura 3.6 podemos ver a diferença entre as formas de onda do sinal de alimentação para uma atuação estacionária e para uma atuação não estacionária. Segundo a figura 3.6 e considerando $T1$ e $T2$ para uma atuação não estacionária, a frequência de excitação do sinal de alimentação do atuador é dada pela expressão (3.6) e o ciclo de trabalho é obtido a partir da expressão (3.7).

$$\text{Frequência_de_excitação} = \frac{1}{T1}, \quad (3.6)$$

$$\text{Duty_Cycle} = \frac{T2}{T1}. \quad (3.7)$$

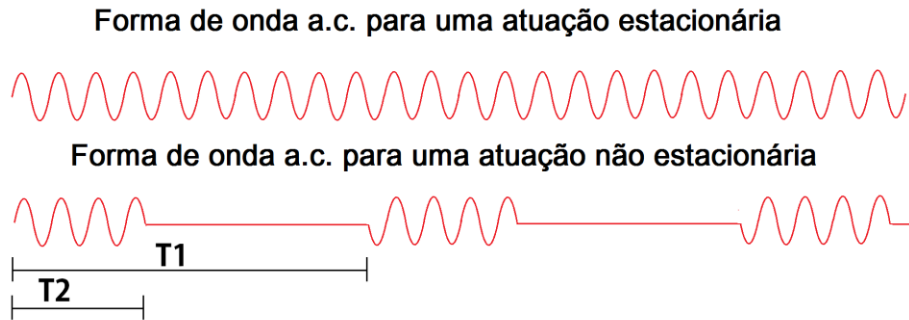


Figura 3.6: Representação das formas de onda do sinal de alimentação, para uma atuação estacionária e não-estacionária, de um atuador de plasma de DBD.

3.4. Técnicas de medição PIV

A técnica de medição PIV (particle image velocimetry) tem múltiplas versões. Qualquer delas permite obter a distribuição de velocidades no campo de escoamento, e baseiam-se no cálculo do deslocamento de partículas obtido a partir de um par de imagens que são captadas em instantes consecutivos de tempo. O princípio deste tipo de medição baseia-se em colocar partículas marcadoras no escoamento e iluminar o escoamento com uma única fonte de luz, cenário este que se encontra representado na figura 3.7.

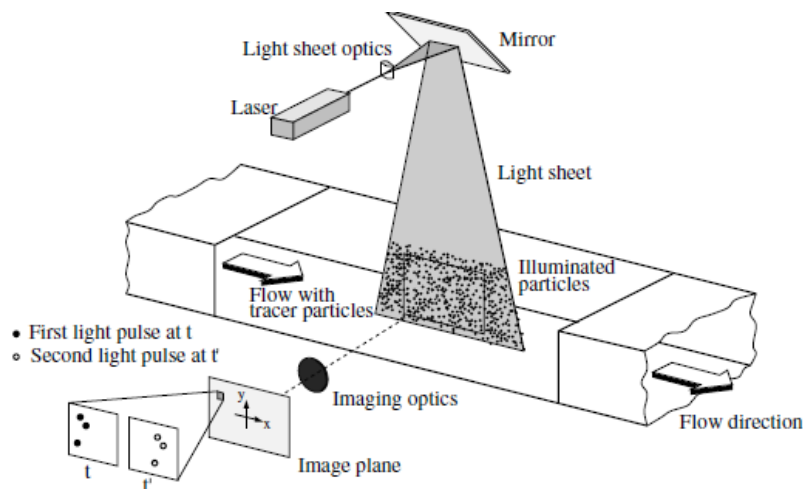


Figura 3.7: Representação esquemática de uma instalação típica para análise PIV em túnel de vento (fonte: Raffel et al., 2007).

A fonte de luz deve ser suficientemente forte e geralmente deve formar um plano de luz com uma intensidade de luz constante em toda a área iluminada. Quando as partículas marcadoras atravessam o plano de luz refletem a luz incidente tornando-se identificáveis. Utilizam-se câmaras de alta velocidade com vista a realizar a captura de duas imagens consecutivas das partículas. Posteriormente recorre-se a um *software* de análise PIV no qual se identificam o deslocamento das partículas entre um par de imagens e, pela relação que se apresenta na equação (3.8), realiza-se o cálculo das velocidades das partículas.

$$\vec{U}_p = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (3.8)$$

Em que \vec{U}_p é o vetor velocidade de cada partícula, $\Delta \vec{r}$ é o vetor deslocamento de cada partícula e Δt é o intervalo de tempo entre um par de imagens. Na análise das imagens o *software* utiliza áreas de interrogação que correspondem a divisões da área de medição total. Para cada uma das áreas de interrogação obtém-se um vetor médio da velocidade das partículas que se encontram nessa área de interrogação.

As partículas marcadoras têm de ser partículas que não perturbem as características do escoamento, pois só assim é que o comportamento das partículas marcadoras reflète na íntegra o comportamento do escoamento (Sanjuan et al., 2012; Ryerson & Schwenk, 2012; Jahanmiri, 2011; Bach et al., 2006).

3.4.1. Partículas marcadoras (*seeding particles*)

As partículas marcadoras são um elemento essencial nas medições PIV, pois são determinantes para a qualidade dos resultados finais. Assim, é fundamental que se faça uma boa escolha no que diz respeito a partículas marcadoras para que se possa medir com precisão a sua velocidade, e por conseguinte a velocidade do escoamento, o que implica que estas partículas não devem influenciar o escoamento e devem permitir uma boa reflexão da luz que sobre elas incide ao atravessarem o plano de luz. Uma vez que as partículas marcadoras são partículas aproximadamente esféricas e de pequenas dimensões, segundo a lei de Stokes, sabe-se que a velocidade que o escoamento induz nestas partículas é dada pela equação (3.9).

$$U_p = a d_p^2 \frac{\rho_p - \rho_f}{18\mu_f} \quad (3.9)$$

Em que a é a aceleração do fluido, d_p o diâmetro da partícula marcadora, ρ_p a massa específica da partícula marcadora, ρ_f a massa específica do fluido e μ_f a viscosidade

dinâmica do fluido (Fernandes, 2011). A partir desta equação verifica-se que a escolha das partículas marcadoras deve ser feita tendo em conta a massa específica do fluido do escoamento e a massa específica das partículas marcadoras, pois se estas massas específicas não forem semelhantes o escoamento perde a capacidade de indução de velocidade nas partículas.

Por outro lado a densidade de partículas marcadoras por imagem também é fundamental para a realização de uma análise PIV com qualidade. Na figura 3.8 podemos ver três tipos diferentes de densidade de partículas por imagem.

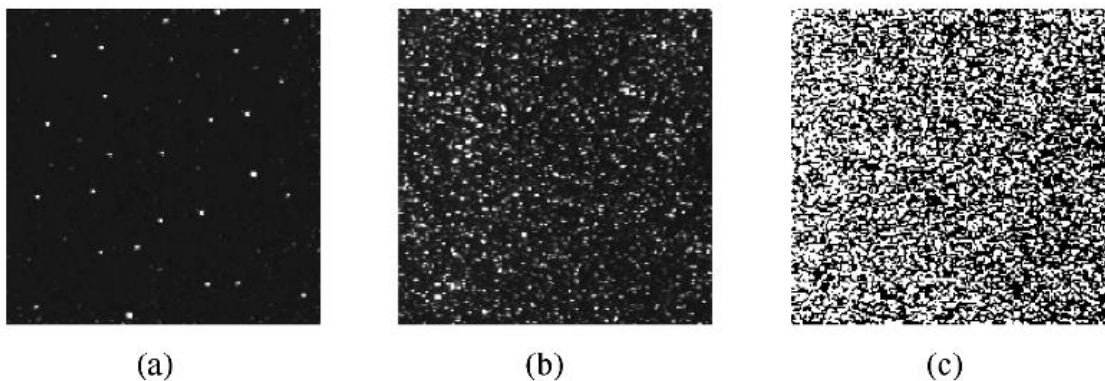


Figura 3.8: Diferentes tipos de densidade de partículas marcadoras: a) baixa densidade, b) densidade média e c) elevada densidade (fonte: Raffel et al., 2007).

No caso de existir uma baixa densidade de partículas marcadoras (Figura 3.8-a)) podem identificar-se as partículas individualmente na imagem. Neste caso para analisar o escoamento com base nesta densidade de partículas requerem-se métodos de rastreamento e, como tal, refere-se este tipo de análise como “PTV” (Particle Tracking Velocimetry). No caso de se ter uma densidade média de partículas marcadoras (Figura 3.8-b)) é possível identificar bem as partículas individualizadas. Mas, no entanto, não é possível realizar uma análise visual sobre o par de imagens. Este tipo de densidade de partículas marcadoras é o requerido para a aplicação de técnicas de análise PIV. No caso de elevada densidade de partículas marcadoras (Figura 3.8-c)) é impossível detetar as partículas individualizadas visto que, devido à elevada densidade, as partículas sobrepõem-se. Assim este tipo de situação não permite a realização de uma análise PIV correta (Raffel et al., 2007).

3.4.2. Fontes de luz

Os lasers são vulgarmente utilizados nas medições PIV como fontes de luz, uma vez que têm a capacidade para emitir uma luz monocromática com uma grande densidade de energia. Os feixes de laser podem ser facilmente convertidos em uma folha planar de luz, permitindo assim definir o plano de análise do escoamento do PIV. Os lasers podem funcionar de forma contínua ou, em muitos casos, têm também a capacidade de funcionamento em forma

pulsada. A grande vantagem do funcionamento em forma pulsada é que a duração dos pulsos pode ser muito pequena, podendo inclusive atingir apenas alguns nano-segundos. Estes intervalos de tempo extremamente curtos são conseguidos a partir de descargas de energia armazenadas no banco de condensadores. Deste modo este tipo de lasers torna-se ideal para medições PIV, porque eles armazenam e fornecem toda a sua potência exatamente no instante desejado (Jahanmiri,2011).

3.4.3. Captura de imagens para análise PIV

Atualmente a captura de imagens para análise PIV realiza-se com câmaras digitais. Este tipo de tecnologia permite captar imagens com elevada resolução em intervalos muito curtos e ainda disponibiliza imediatamente as imagens, fornecendo um feedback durante a gravação. Este tipo de câmaras, para análise PIV, são baseadas em sensores que na generalidade podem ser de três tipos: CCD (Charge Couple Device), CID (Charge Injection Device) ou CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).

Relativamente às câmaras baseadas em sensores CCD, estas são as câmaras mais utilizadas atualmente em análise PIV pois oferecem duas vantagens de grande importância. A primeira vantagem está relacionada com o facto de apresentarem maior resolução espacial e a segunda vantagem está relacionada com a arquitetura eletrónica que apresentam, sendo que a mesma câmara consegue dois registos de imagens espaçados temporalmente por microssegundos (Fernandes, 2011, Dabiri,2009; Raffel et al., 2007). Elas são ainda construídas com obturador eletrónico, eliminando as vibrações e atraso do obturador mecânico automático. As CMOS têm o problema de não conseguirem transferir a imagem de todos os píxeis do sensor no mesmo instante, pelo que deformam as imagens ligeiramente devido ao atraso. Por essa razão não são geralmente tão recomendadas para efetuar PIV.

3.4.4. Processamento de imagens

De modo a obter um campo de vetores bidimensional a análise é realizada por janelas de interrogação, que correspondem a áreas resultantes da divisão da área de medição. São as dimensões das janelas de interrogação que determinam a resolução espacial da medição. Ou seja o número de vetores velocidade num plano. As janelas de interrogação podem ser adjacentes entre elas ou podem sobrepor-se parcialmente com as janelas de interrogação adjacentes, situação esta que permite aumentar a resolução espacial.

Geralmente para o processamento de imagens PIV utiliza-se o método *cross-correlation*. Neste método a primeira e a segunda imagem que foram captadas em instantes consecutivos são guardadas separadamente e, posteriormente, processadas. Outro método PIV atualmente desenvolvido é o método de *auto-correlation*. Enquanto que no método *cross-correlation* cada imagem apresenta uma única exposição, no método *auto-correlation* uma única imagem apresenta as duas exposições que se pretendem analisar. Para qualquer um destes métodos o

deslocamento é obtido pela determinação do pico de correlação. No entanto o método *auto-correlation* apresenta algumas complicações e como tal o método *cross-correlation* é o mais utilizado atualmente. Este método encontra-se esquematizado na figura 3.9.

Inicialmente, e das imagens que foram capturadas consecutivamente, extraem-se $f(i,j)$ e $g(i,j)$ do mesmo local, usando as janelas de interrogação (figura 3.9-a). Depois é realizado o procedimento de *cross-correlation* entre duas janelas de interrogação obtidas de cada uma das imagens (figura 3.9-b).

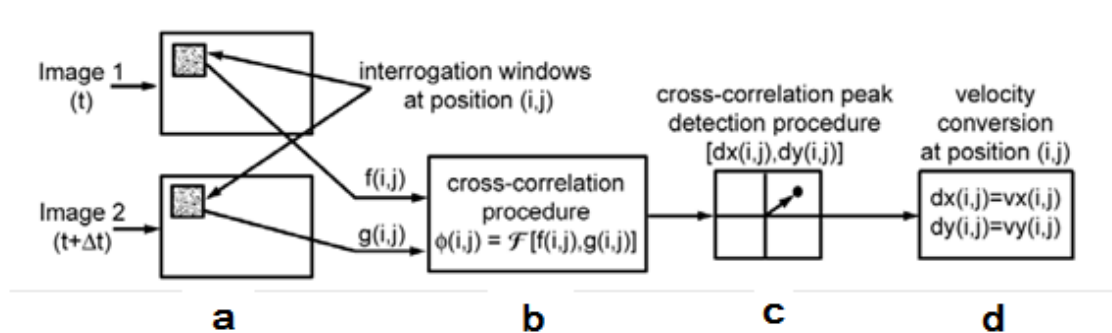


Figura 3.9: Processamento de dados utilizando o método *cross-correlation* com um algoritmo FFT a) janelas de interrogação das imagens consecutivas b) realização do processamento, neste caso pela implementação de um algoritmo FFT c) no domínio do *cross-correlation* a localização do pico corresponde ao deslocamento médio das partículas dentro das janelas de interrogação d) o deslocamento é convertido para o espaço físico proporcionando um vetor velocidade (fonte: Dabiri, 2014).

Na figura 3.8 exemplifica-se a utilização de um algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) mas também pode ser utilizado um algoritmo DCC (*Direct Cross-Correlation*). Deste procedimento resulta uma distribuição *cross-correlation* com o domínio de pixels das janelas de interrogação, e que apresentam um pico dominante que corresponde ao deslocamento das partículas designado por $[dx(i,j), dy(i,j)]$ (figura 3.9-c). O processamento acaba quando o deslocamento $[dx(i,j), dy(i,j)]$ é convertido em velocidade, a partir dos parâmetros de calibração (figura 3.9-d) (Dabiri, 2014).

Capítulo 4

Instalação experimental

A análise do escoamento na tubeira HOMER, incluindo os efeitos da operação dos atuadores a plasma, são o objetivo fundamental do presente trabalho. Nesse sentido foi desenvolvida, de raiz, uma instalação experimental e implementado um sistema de medição do escoamento PIV do tipo open-source. Neste capítulo descreve-se a conceção da instalação experimental e dos sistemas de aquisição de dados. Além da instalação experimental externa foi também construída uma versão transparente da tubeira com a geometria HOMER.

4.1. Esquema da instalação

Na figura 4.1 encontra-se representado um esquema da instalação experimental, incluindo as ligações mais relevantes entre os equipamentos utilizados nos ensaios.

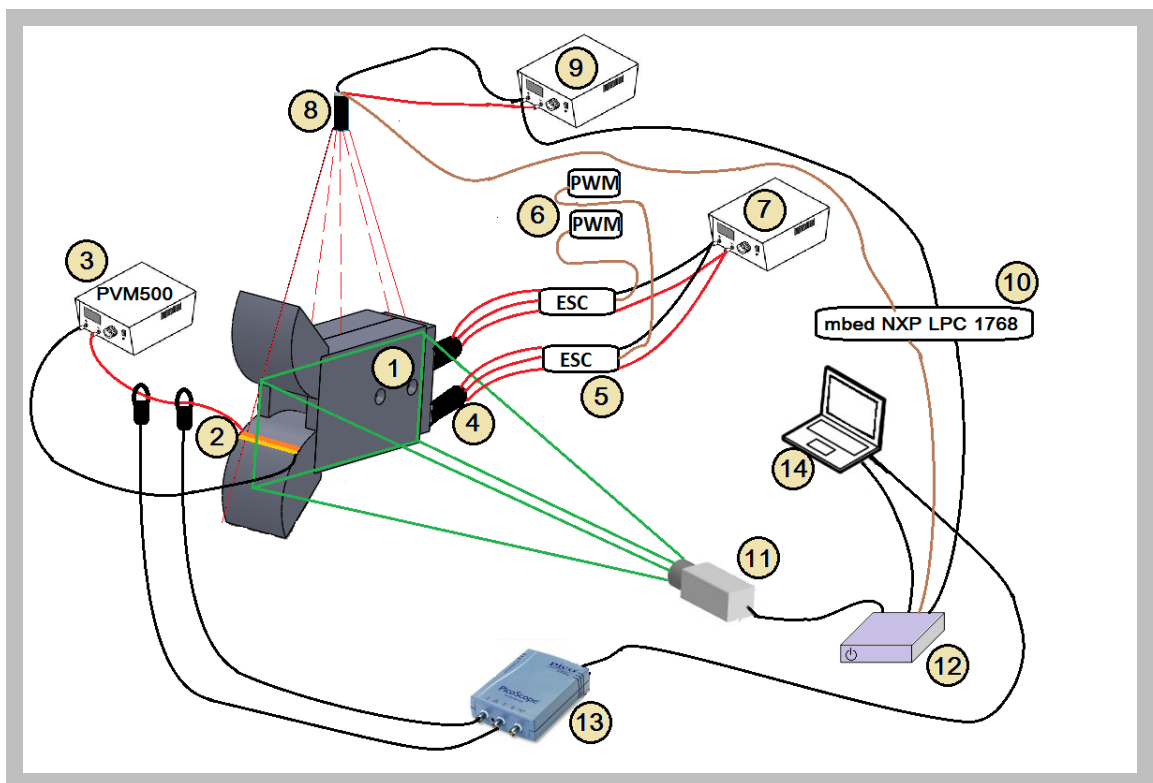


Figura 4.1: Esquema da instalação experimental com as ligações entre os vários equipamentos utilizados nos ensaios.

A figura 4.1 apresenta em (1) a tubeira HOMER, sendo este o sistema em estudo neste trabalho. Em (2) encontra-se representado o atuador de plasma, implementado na superfície

Coanda da tubeira HOMER de modo a aumentar o ângulo de deflexão do escoamento. O atuador de plasma é alimentado pelo gerador de alta-tensão alternada PVM500, que se encontra identificado em (3), e que é uma fonte de alimentação capaz de fornecer a alta tensão, necessária para ativar o DBD, com alta frequência.

Em (4) podem ver-se os turbo-ventiladores elétricos que servem para gerar os dois caudais de ar. Por outro lado, em (5) e (6) encontram-se os controladores eletrónicos de velocidade e os controladores PWM, respetivamente, a partir dos quais se realiza o controlo de velocidade dos turbo-ventiladores. Em (7) está representada uma fonte de alimentação de 600W, a qual fornece a energia necessária para o funcionamento dos turbo-ventiladores.

Em (8) encontra-se o laser que proporciona um plano de luz, e sobre o qual se realiza a visualização do escoamento. No ponto (9) identifica-se uma vulgar fonte de alimentação que alimenta o laser. Em (10) está representado o circuito com o microcontrolador mbed NXP LPC 1768, o qual controla os pulsos do laser. Em (11) está representada a câmara digital CCD C10600-10B ORCA-R2, a qual se encontra ligada à unidade de controlo representada em (12).

O ponto indicado como (13) identifica o PicoScope, este é um sistema que materializa um osciloscópio e que está preparado para captar altas tensões, a elevadas frequências, usando um sensor capacitivo. Com este sistema é possível a visualização da forma de onda da tensão elétrica que alimenta os atuadores DBD. Finalmente, em (14) está representado o computador através do qual se realiza o controlo do sistema de aquisição de dados, bem como o armazenamento das leituras.

4.2. Desenvolvimento da instalação experimental

Para a obtenção dos resultados experimentais, os quais compreendem a análise da ação de controlo do ângulo de escoamento na tubeira HOMER, e também a verificação do efeito dos atuadores a plasma de tipo DBD, foi necessário passar por diversas fases intermédias. Descrevemos agora todo o processo de desenvolvimento da instalação experimental, justificando as opções tomadas.

4.2.1. Construção da tubeira HOMER

No âmbito do projeto ACHEON têm sido desenvolvidas várias geometrias para a tubeira HOMER. Esse trabalho envolve um estudo paramétrico, e de otimização, com vista a encontrar as geometrias mais adequadas para a tubeira. Estes trabalhos ainda se encontram em desenvolvimento por parte dos diversos parceiros do Projeto Europeu ACHEON.

Tendo em vista o desenvolvimento do ensaio experimental foi utilizada uma das várias geometrias propostas pelo Consórcio. Procedemos, portanto, à construção da tubeira HOMER tal como indicado no Anexo I. A tubeira foi construída em acrílico, de modo a garantir a

transparência, e tendo em vista permitir a visualização do escoamento no seu interior. Idealizou-se a construção da tubeira a partir da montagem de cinco peças diferentes tal como exemplifica a figura 4.2.

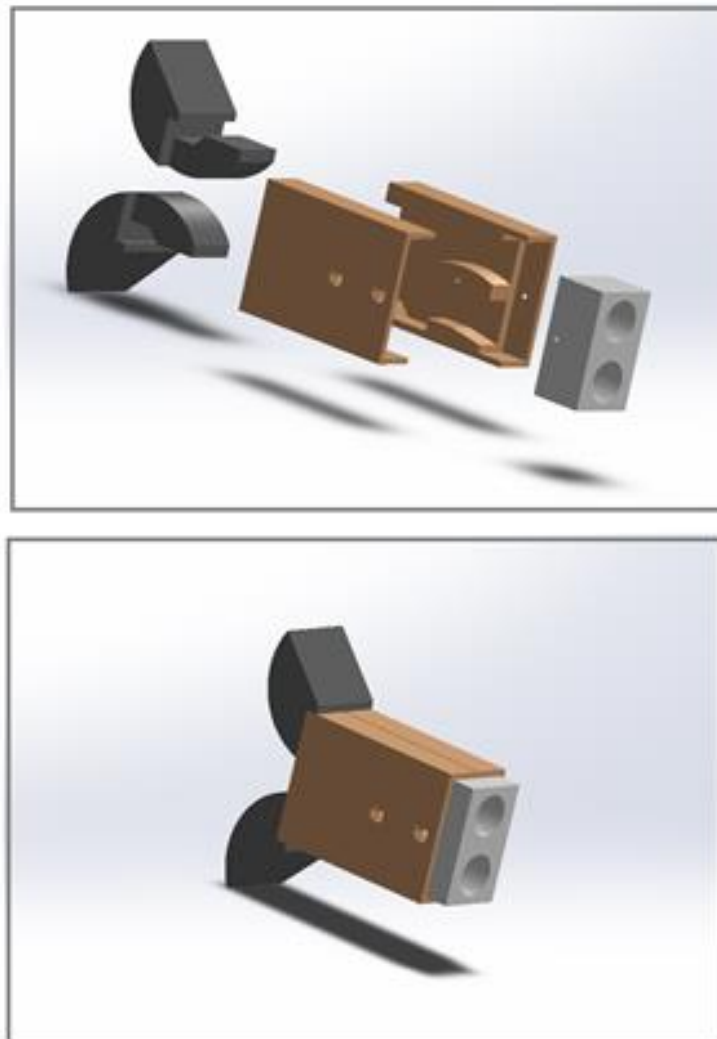


Figura 4.2: Vista explodida do desenho inicial 3D tendo em vista a construção da tubeira HOMER.

No entanto verificou-se, posteriormente, que para se realizar este tipo de construção o acrílico teria de ser maquinado e ficaria baço, o que impossibilitaria a visualização do escoamento no interior da tubeira. Foi então decidido realizar a construção com placas de acrílico e também policarbonato flexível para as superfícies de Coanda e superfícies internas de grande deformação.

Na figura 4.3 pode ver-se o planeamento 3D que foi realizado, este permitiu conceber uma metodologia de construção das diferentes partes da tubeira sem grande desperdício de material.

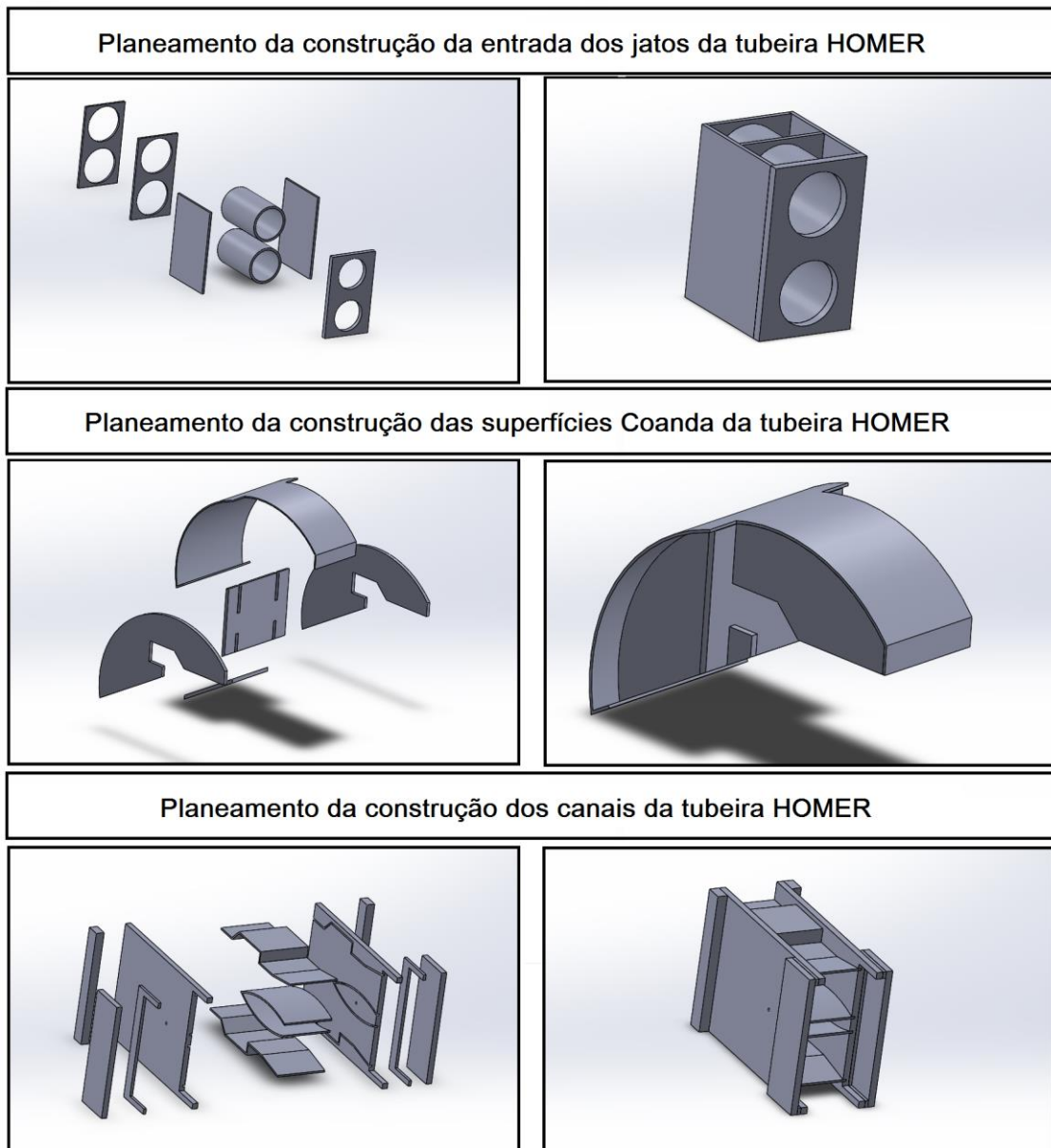


Figura 4.3: Diferentes fases estabelecidas, durante o planeamento da construção, com vista a materializar a tubeira HOMER usada nos ensaios experimentais.

Utilizando esta abordagem foi possível construir a tubeira sem necessidade de maquinar o acrílico, de modo a garantir a transparência da tubeira. O policarbonato foi utilizado em diversas partes da tubeira, uma vez que também é transparente, mas pelo facto de ser flexível possibilitou a reprodução de geometrias das paredes internas e das superfícies de Coanda.

A figura 4.4 mostra a versão final do planeamento da montagem das peças, referidas anteriormente, de modo a construir a tubeira HOMER.

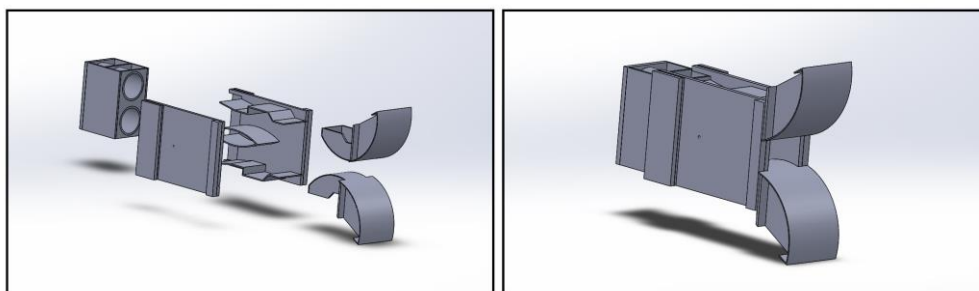


Figura 4.4: Versão final do planeamento da construção da tubeira HOMER, em desenho 3D, com a junção de todas as partes.

Para a construção da tubeira HOMER foram desenvolvidos desenhos de execução de todas as peças necessárias à montagem, os quais se encontram no anexo I. Na figura 4.5 podemos ver imagens de diferentes fases da construção da tubeira HOMER.

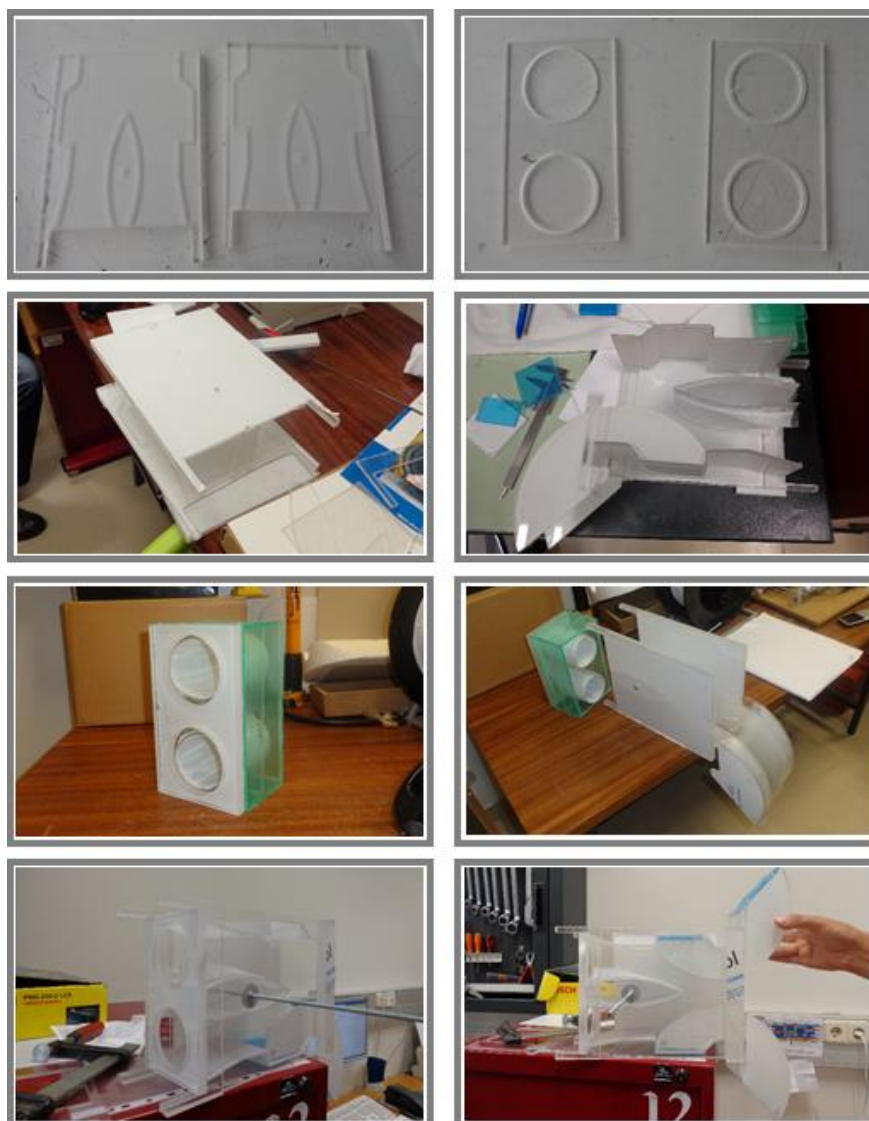


Figura 4.5: Imagens de diferentes fases de construção da tubeira.

No anexo II podem ver-se de forma melhor reproduzida estas imagens, juntamente com outras imagens tiradas durante a construção da tubeira. HOMER. Na figura 4.6 pode ver-se o resultado final após a construção da tubeira que vai ser ensaiada.

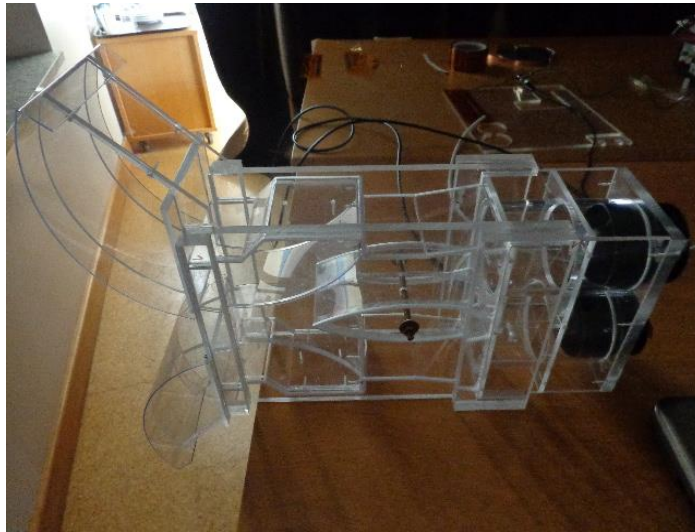


Figura 4.6: Construção da tubeira HOMER na fase final de execução.

Tal como já foi referido, os jatos de ar são gerados por dois turbo-ventiladores. No entanto, trabalhos anteriores têm demonstrado que o escoamento gerado por turbo-ventiladores não é completamente axial, sendo que a velocidade angular do escoamento é considerável e não pode ser desprezada (Hennissen, 1997). Segundo Das et al. (2013), a presença desta componente tangencial da velocidade no escoamento à entrada afeta consideravelmente a deflexão máxima que pode ser atingida pelo fluido usando a tubeira HOMER. Assim, na tentativa de reduzir a componente tangencial da velocidade do escoamento produzido pelos turbo-ventiladores, introduziram-se umas alhetas nas entradas dos jatos de ar. Estas alhetas consistem em finas placas de acrílico, em forma de cruz, as quais têm como objetivo oferecer resistência à componente tangencial da velocidade. A figura 4.7 mostra as alhetas implementadas nas entradas da tubeira.



Figura 4.7: Alhetas finas em acrílico, com a forma de cruz, são introduzidas na entrada dos jatos produzidos pelos dois turbo-ventiladores. As suas dimensões foram estabelecidas de acordo com as sugestões apresentadas em Das et al. (2013).

4.2.2. Desenvolvimento e construção do pulverizador de partículas de tipo ciclone

De modo a que o escoamento possa ser visualizado usando a folha de luz, gerada pelo laser, é necessário pulverizar o ar ambiente com partículas. Atendendo ao facto de irmos aplicar o sistema com atuadores a plasma, o qual é constituído por um meio condutor elétrico, foi decidido que o uso de geradores de fumo, com libertação parcial de óleo, não era adequado para efetuar a visualização. Assim, optou-se por usar pó talco que é isolante e deverá ter menos influência sobre o campo eletrostático gerado. Recorreu-se então a um gerador de partículas sólidas para misturar partículas de pó de talco com ar, tornando assim possível uma colocação uniforme de partículas de pó de talco no escoamento de ar, de forma a possibilitar uma adequada visualização do escoamento e facilitar a análise recorrendo a PIV. O ciclone, que funcionará como gerador de partículas sólidas, foi feito em tubo PVC. Na figura 4.8 podemos ver imagens da construção do gerador de partículas sólidas.



Figura 4.8: Diversas imagens recolhidas aquando da construção do ciclone, o qual funcionará como gerador de partículas sólidas.

Para a construção deste ciclone, que atuará como pulverizador de partículas sólidas, foram tidos em conta diversos fatores (Kalathoor, 2013). A entrada foi colocada a uma distância da base suficientemente grande para que o jato de ar, de entrada, adquira um movimento semelhante ao que ocorre num ciclone, antes de atingir a base onde se encontram as

partículas de pó de talco depositadas. De modo a garantir esse comportamento para o fluido dentro do ciclone foi aplicada a relação,

$$0,8H < H_i < 0,9H \quad (4.1)$$

Em que H é a altura total do gerador de partículas sólidas e H_i (*Height of inlet*) é a distância da entrada de ar lateral e tangencial em relação à base. O eixo da saída do gerador de partículas sólidas coincide com o eixo do gerador de partículas sólidas pois, deste modo, a mistura de ar com pó de talco é recolhida no centro do ciclone onde esta mistura se encontra mais uniformizada. A distância entre a saída e a base é menor que a distância entre a entrada e a base. Isto impede que o ar encontre logo a saída sem antes atingir a base do gerador de partículas sólidas. De modo a garantir este requisito teve de ser tida em conta a condição,

$$H_o \leq H_i - 1,5D_i \quad (4.2)$$

Em que H_o representa a distância entre a saída e a base, H_i a distância entre a entrada e a base e D_i o diâmetro da entrada do gerador de partículas sólidas. O diâmetro da saída tem de ser maior do que o diâmetro da entrada, de modo a que as partículas possam sair livremente e não haja aglomeração de partículas. Para assegurar este aspeto tomou-se em conta a condição,

$$D_o \approx 2D_i \quad (4.3)$$

Na Eq. 4.3 D_o corresponde ao diâmetro da saída e D_i ao diâmetro da entrada. A entrada apresenta uma inclinação e encontra-se tangencial em relação ao eixo do gerador de partículas sólidas, de modo a que o ar adira à superfície do gerador e ganhe o movimento circular desejado (Kalathoor, 2013).

4.2.3. Utilização de um anemómetro para verificação da velocidade nos turbo-ventiladores

A tubeira HOMER compreende dois turbo-ventiladores que irão criar um diferencial de caudal, de modo a dar origem à deflexão do escoamento desejada. O valor da velocidade máxima atingida à entrada da tubeira irá depender da curva característica dos ventiladores e das perdas de energia que ocorrem ao longo da tubeira. De modo a verificar quais eram os valores típicos de velocidade atingidos, na entrada, foi utilizado um anemómetro.

As velocidades dos turbo-ventiladores são impostas pelo comprimento do pulso PWM definido pelo utilizador nos controladores PWM, tal como já foi referido anteriormente. No presente trabalho pretende medir-se o campo de velocidades do escoamento 2D através da técnica de medição PIV, mas na fase preliminar é útil ter uma informação localizada dos valores da

velocidade envolvidos. Os quais são fundamentais para definir as características do intervalo entre imagens do sistema PIV. Assim realizou-se um pequeno teste aos ventiladores e com o qual se obtiveram os valores da velocidade do ar recorrendo a um anemómetro. Tal como se mostra na figura 4.9, utilizou-se então o anemómetro para medir a velocidade do ar que é sugado pelos turbo-ventiladores para o interior da tubeira HOMER.



Figura 4.9: O anemómetro, de tipo molinete, montado e preparado para a realização das medições de velocidade do ar, selecionado para uma precisão de ± 0.01 m/s (esquerda). Medição da velocidade do escoamento na zona de entrada do ar na tubeira (direita).

Embora com as deficiências associadas aos erros inerentes ao posicionamento do anemómetro, foi possível medir o valor da velocidade do escoamento para diferentes valores do comprimento de pulso PWM. Estes valores são fundamentais para verificar a gama de velocidades passível de ser ensaiada com esta instalação. De salientar-se, novamente, que este método de medição apresenta alguns erros de medição, uma vez que os valores apresentados pelo anemómetro eram muito instáveis e, além disso, estes valores dependem muito da posição do anemómetro em relação ao turbo-ventilador. No entanto foi uma forma expedita de obter a informação necessária com uma precisão aceitável.

4.2.4. Desenvolvimento do sistema PIV *Open Source*

Os elevados custos inerentes à aquisição de um sistema *Particle Image Velocimetry*, de tipo comercial, têm limitado bastante a utilização mais generalizada desta técnica. No entanto, hoje em dia, em face dos avanços ocorridos na tecnologia laser e de câmaras de vídeo já é possível desenvolver a custos controlados um sistema deste tipo. Atualmente estão também disponíveis vários códigos de análise PIV, desenvolvidos por Universidades no âmbito de teses de doutoramento, e que são distribuídos usando licenças *Open Source*. Foi após esta constatação que começou a ser desenvolvido o sistema PIV, dado que inicialmente e devido aos custos apenas tinha sido previsto fazer uma visualização qualitativa do campo de velocidades.

Um sistema PIV é composto, como referido no Capítulo 3, pelo subsistema de geração do plano de luz laser, pela câmara de vídeo/fotográfica e, finalmente, pelo *software* de aquisição e cálculo do campo do escoamento.

Após analisar a literatura sobre os sistemas PIV, e tendo em conta as características de resolução e a sensibilidade das câmaras utilizadas, foi adquirida uma câmara CCD que será descrita mais em detalhe na parte final do presente capítulo. A câmara estabelece ligação com o computador através de uma interface IEEE1394b, o que permite transferir rapidamente as imagens para o computador. Como tal, aplicou-se uma placa IEEE1394b no computador e instalou-se o respetivo controlador de vídeo DCAM-API, componentes estes que foram adquiridos com a câmara. Assim, após a instalação do *software HCImage Live* a câmara ficou apta para capturar imagens. Os detalhes referentes ao equipamento, nomeadamente as suas características técnicas e a razão de escolha, são descritos mais abaixo neste capítulo. Convém salientar que foi detetado um problema técnico no *software* de controlo da câmara. Tratou-se de um problema de programação dos tempos de aquisição entre imagens. Depois de replicar o problema, segundo instruções da UBI, a HAMAMATSU corrigiu o problema e enviou uma nova versão do *software*.

O local para realizar a colheita de imagens usando um sistema PIV não deve ser iluminado, de modo a que a única fonte de iluminação seja a folha de luz laser intermitente (com o período entre imagens, e entre disparos do laser, seja dependente do valor máximo da velocidade que se pretende medir). O local para a realização dos testes foi devidamente escurecido, usando plástico preto opaco, de forma a tapar todas as entradas de luz exterior. Conseguiu-se com isto um local totalmente escuro e isento da interferência da luz exterior nas medições.

O laser foi selecionado e adquirido de forma a ter a potência necessária para iluminar as partículas de talco. Foi ainda considerada a sensibilidade da própria câmara de modo a garantir a qualidade das imagens. Na saída do laser está acoplado o sistema de óticas que permite transformar o raio numa folha de luz laser. Este foi colocado num suporte independente da mesa na qual se coloca a tubeira, de modo a evitar que seja afetado pelas vibrações causadas pelo funcionamento dos motores dos turbo-ventiladores. Do mesmo modo, também a câmara CCD foi colocada numa mesa independente da mesa principal onde se encontra a tubeira HOMER. O plano de luz gerado pelo laser foi fixado de forma a iluminar a zona de interesse onde se pretendia efetuar a medição. A figura 4.10 mostra este cenário.

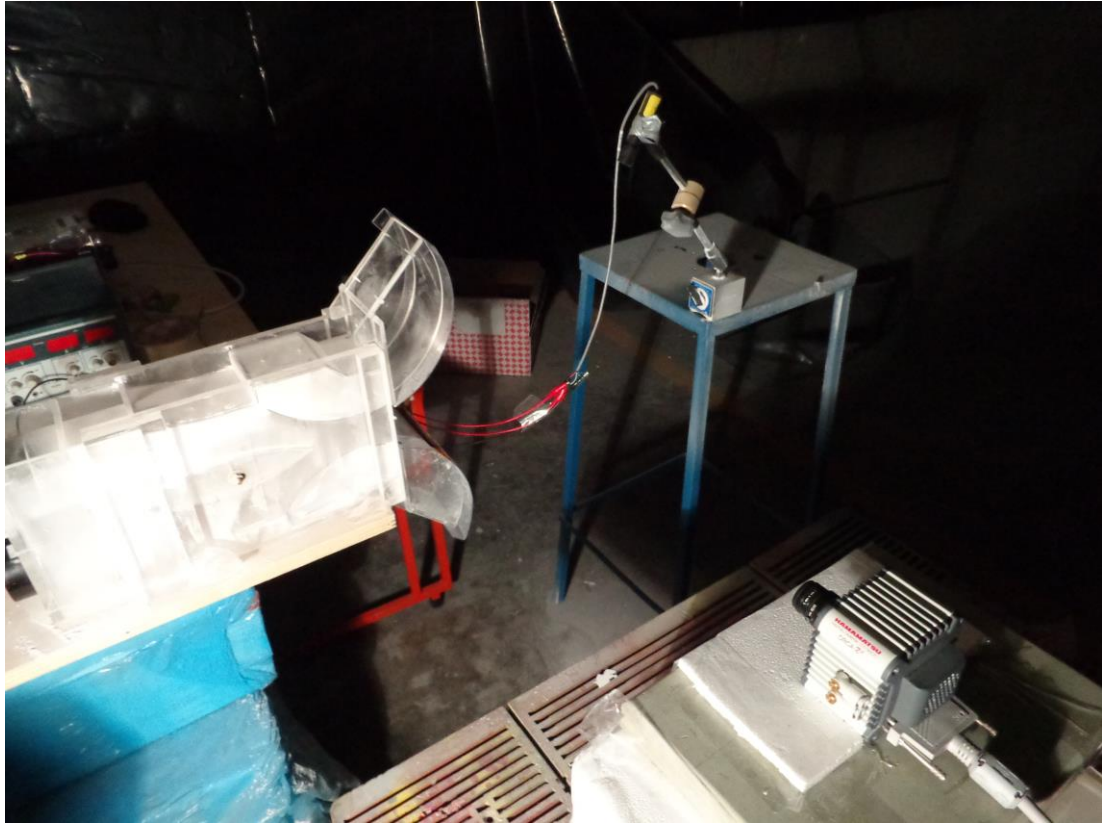


Figura 4.10: Montagem experimental. São visíveis a tubeira HOMER (lado esquerdo), a câmara (canto inferior esquerdo), e o laser no respetivo suporte (canto superior direito)

É necessário obter, antes de cada medição PIV, uma imagem de calibração onde se capta a imagem de uma escala milimétrica, tal como demonstra a figura 4.11. Esta imagem é posteriormente introduzida no *software* de análise PIV, de modo a estabelecer uma relação entre a escala em pixels da imagem captada e a escala dimensional do espaço real. Usando o *software* de cálculo PIV faz-se a marcação de dois pontos na imagem e define-se a distância real entre esses dois pontos. Por esse motivo é preferível que na imagem de calibração se represente uma escala milimétrica, de modo a que a distância real com que se efetua a calibração seja o mais precisa possível.

Na captura da imagem de calibração deve ter-se um cuidado especial com o correto posicionamento da escala milimétrica. Esta deve estar exatamente no mesmo plano em que é formado o plano de luz, e encontrar-se também perpendicular à câmara. Se a escala milimétrica não estiver à mesma distância da câmara a que está a folha de luz os resultados PIV terão erros apreciáveis.



Figura 4.11: Exemplo de imagem de calibração. É ligado o laser de forma a identificar o plano de medição e a escala graduada em milímetros é colocada exatamente sobre esse plano.

A calibração do *software* de cálculo PIV é realizada, não só pela introdução de uma distância real entre pixéis mas, também pela introdução do tempo entre o par de imagens em análise. Para a aquisição das imagens utilizou-se o modo PIV da câmara CCD, cujo funcionamento se encontra representado na figura 4.12-a). Neste modo a câmara pode realizar a primeira exposição (Exposure 1 na figura) durante apenas 50 μ s, mas a segunda exposição (Exposure 2 na figura) demora o tempo de leitura da primeira exposição, o que para o modo rápido de aquisição de imagem são aproximadamente 60 ms.

Para as velocidades que pretendemos analisar, de até 15 m/s, um tempo entre imagens de 60 ms é demasiado longo, e como tal as partículas que são captadas na primeira imagem já não são as mesmas que são captadas na segunda imagem. Ou seja, são tão rápidas que já saíram do plano de luz laser. Assim, torna-se necessário utilizar o laser em modo pulsado, pois deste modo e apesar de a câmara realizar a exposição durante 60ms (tempo em que o obturador está aberto), como o local é totalmente escuro, esta apenas recolhe informação visual durante o período de tempo em que o laser está ligado, neste caso 202 μ s. A figura 4.12-b) mostra o sinal utilizado para modular o laser, o nível *low* na entrada de controlo do laser indica que este deve ser ligado. O nível *low* da saída TTL da câmara indica que esta está a ler a imagem (canal Trigger Enable Output da câmara de vídeo), figura 4.12-b).

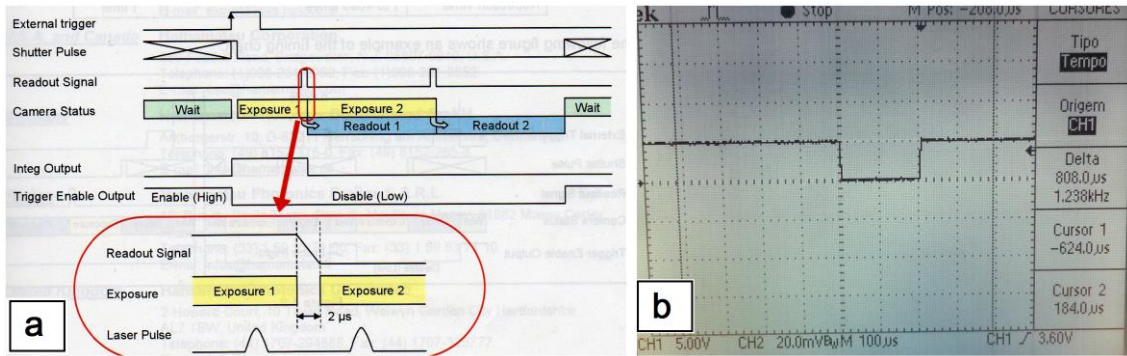


Figura 4.12: a) Funcionamento do modo PIV, a saída da câmara Trigger Enable Output (ativa a TTL *low*) indica que a câmara está a captar uma imagem, Esta informação é passada ao microcontrolador, que controla o período de ativação do plano de luz laser. b) Visualização, num osciloscópio, do sinal de saída do circuito com o microcontrolador e que ativa o plano de luz laser.

O sinal da figura 4.12-b) foi obtido a partir do circuito que se encontra esquematizado na figura 4.13.

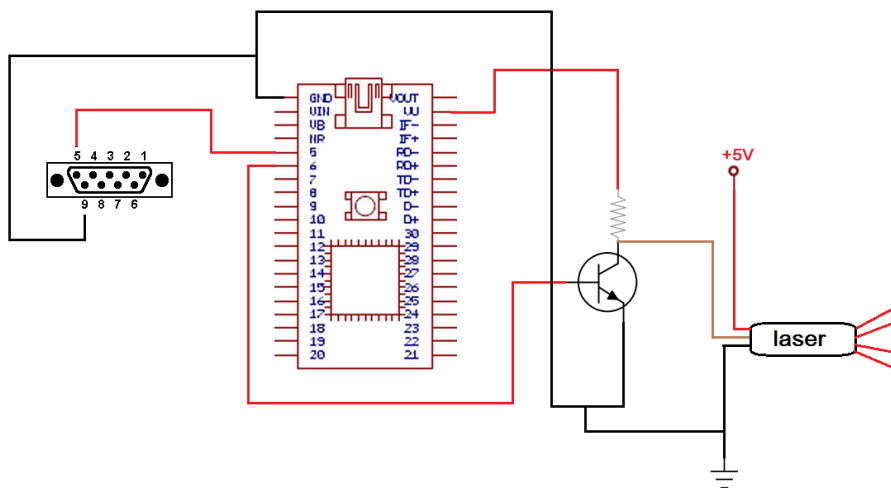


Figura 4.13: Circuito elétrico com o sistema utilizado para sincronização do laser, a resistência é de 150 Ω , o transistor é um 2N5551. A saída *Trigger Enable Output* da câmara é ligada à entrada do microcontrolador.

De forma a sincronizar o laser com as leituras das imagens utilizou-se o sinal *Trigger Enable Output*, cujo comportamento pode ser visto na figura 4.12-a). O circuito apresentado na figura 4.13 permite gerar o sinal representado na figura 4.12-b). O nível alto deste sinal corresponde a 5 V, tensão com a qual o laser fica completamente desligado. Quando o sinal *Trigger Enable Output* passa de nível alto a nível baixo, o sinal de saída do circuito com microcontrolador passa para 0 Volt durante 202 μ s. Deste modo, assim que a câmara inicia a aquisição de um par de imagens o laser liga-se com potência máxima durante 202 μ s. Estes 202 μ s foram estabelecidos tendo em conta que decidimos impor 100 μ s como tempo de

exposição, e desta forma o laser fica ligado durante os 100 μs da primeira exposição, seguem-se mais 2 μs que correspondem ao tempo que a câmara demora a iniciar a 2ª exposição, e ainda os 100 μs da segunda exposição. Assim, apesar de a câmara demorar aproximadamente 60 ms com o obturador aberto na segunda imagem, uma limitação de *hardware* ligada ao tempo de aquisição das imagens, na realidade a segunda exposição corresponde apenas a 100 μs , uma vez que é apenas nesse período de tempo que recebe a iluminação do laser. Assim, concluímos que o tempo entre um par de imagens é de 102 μs , sendo este o período de tempo que medeia entre o fim da primeira exposição/iluminação e o fim da segunda exposição/iluminação. Apesar de a câmara estar com o obturador aberto durante mais tempo ela não recebe qualquer informação luminosa em parte desse período, dado realizarmos a experiência numa sala escura.

4.2.5. Ensaio de atuadores a plasma de tipo DBD

Durante este trabalho, e também como parte do Projeto Europeu ACHEON, estava previsto o ensaio de atuadores a plasma. Estes atuadores, como referido anteriormente, criam um vento iónico que irá transferir quantidade de movimento com o ar neutro circundante, e dessa forma podem ser utilizados como sistemas ativos de controlo da camada limite.

Os atuadores foram aplicados nas superfícies de Coanda da tubeira HOMER, e pretendem contribuir para aumentar o ângulo de saída do escoamento. O atuador a plasma, composto por duas fitas de cobre e um material dielétrico entre elas, é alimentado por uma fonte de alta tensão alternada e de alta frequência. Inicialmente realizaram-se testes com atuadores de plasma nos quais se visualizou a formação de plasma e se mediu a tensão e a frequência de alimentação destes atuadores. Inicialmente foram feitos ensaios numa placa plana para ganhar experiência e sensibilidade aos parâmetros de controlo do plasma. Os resultados obtidos nestes ensaios permitiram decidir quais os materiais a utilizar, nomeadamente a espessura do dielétrico, de modo a utilizar a melhor solução quando aplicada nas superfícies de Coanda.

4.2.6. Ensaio principais referentes ao controlo do escoamento na tubeira

Cada um dos subsistemas foi sendo ensaiado em separado, de modo a ganhar experiência na sua utilização e a garantir que no final o sistema funcionaria como pretendido. Os ensaios finais foram realizados com vista à análise do controlo do escoamento recorrendo à geometria HOMER e incluindo os atuadores de plasma DBD. Esta análise do escoamento foi realizada a partir de medições PIV e de visualizações do escoamento. Não foi possível realizar medições PIV para situações de controlo de escoamento com atuadores de plasma DBD, uma vez que no nosso sistema PIV unicamente o laser pode iluminar o plano de escoamento. Ora, quando os atuadores estão em ação eles têm luminosidade própria que interfere com a aquisição da imagem.

4.3. Descrição e justificação do equipamento experimental

O objetivo principal da instalação experimental desenvolvida neste trabalho foi o de ensaiar a tubeira que foi construída segundo a geometria HOMER fornecida pelos parceiros do projeto ACHEON. Na montagem experimental foram utilizados diversos equipamentos, que incluem fontes de alimentação e sistemas de controlo e de aquisição de dados, estes encontram-se descritos nas secções seguintes.

4.3.1. Definição da geometria da tubeira HOMER

A tubeira HOMER, que é utilizada na atividade experimental, foi construída segundo a geometria fornecida pelos parceiros do projeto ACHEON (Trancosi & Dumas, 2011a). Esta tem como objetivo permitir o controlo sobre o ângulo de deflexão do jato de saída. Este jato é produzido por efeito do diferencial de caudal das duas entradas. A deflexão do escoamento na saída é obtida sem se recorrer a partes mecânicas móveis (Trancosi & Dumas, 2011b).

Esta arquitetura contém duas entradas pelas quais são introduzidos dois caudais de ar. Os dois jatos de ar são conduzidos por dois canais que se unem ligeiramente antes da saída. Esta configuração permite manter a direção do escoamento de saída, ou alterá-la, a partir do controlo da velocidade média dos dois caudais de entrada. O jato final irá continuar em linha reta alinhado com o eixo da tubeira se as velocidades dos dois jatos forem iguais, ou então, se as velocidades dos jatos forem diferentes, o jato final irá defletir aderindo à superfície Coanda adjacente ao jato de maior velocidade.

4.3.2. Escolha dos turbo-ventiladores elétricos e sistema de controlo de velocidade PWM

Como descrito anteriormente, a operação da tubeira HOMER requer dois caudais de ar na entrada, estes são gerados recorrendo a dois turbo-ventiladores. Os turbo-ventiladores utilizados nas atividades experimentais são apresentados na figura 4.14.

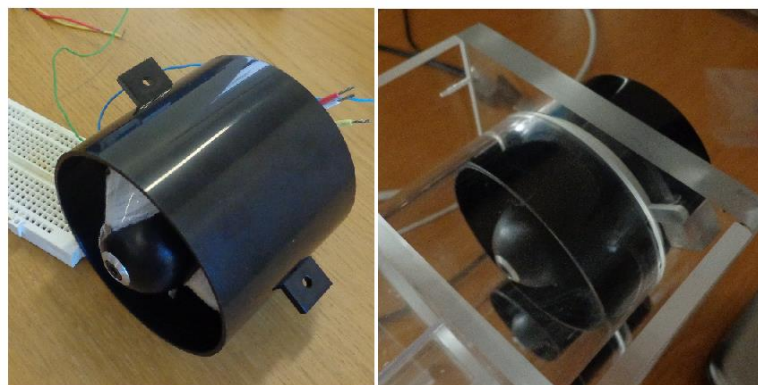


Figura 4.14: Turbo-ventiladores utilizados nas atividades experimentais, depois de montados (direita) e antes de serem montados (esquerda) na tubeira.

A seleção dos ventiladores foi feita tendo em conta as dimensões da tubeira e o valor mais elevado que era possível adquirir para o caudal de ventilação. Este tipo de ventiladores é usualmente usado em aeromodelos elétricos. Neste caso o equipamento usado foi: ventiladores *HET EDF 6904*, motor eléctrico *Typhoon EDF 4W*, controlador de velocidade 80A-Eco-6S ESC, gerador de pulsos *PWM Hobbyking LED Servo Tester*, e fonte de alimentação para os motores *Puls power supply SL 30*. A fonte de alimentação e restante equipamento de controlo foi escolhida com base nas características técnicas do motor. Este equipamento foi adquirido em duplicado para cada uma das entradas da tubeira.

Este tipo de turbo-ventiladores (*de 400 Watts*) atinge velocidades de rotação muito elevadas, podendo chegar às 30 000 rpm. Como tal, apresentam um elevado consumo de corrente eléctrica. Assim, os turbo-ventiladores são alimentados recorrendo a duas fontes de alimentação de 700 W, que podem fornecer uma tensão de corrente contínua (CC) de 24 V, ou de 28 V, e que são capazes de fornecer uma corrente de até 30 A. Neste caso a alimentação dos turbo-ventiladores foi feita a 24 V CC. O controlo da velocidade de rotação dos turbo-ventiladores é realizado com recurso a um controlador electrónico de velocidade (ESC, Electronic Speed Controller) e a um regulador PWM (Pulse Width Modulation). Na figura 4.15 podem ver-se estes equipamentos.

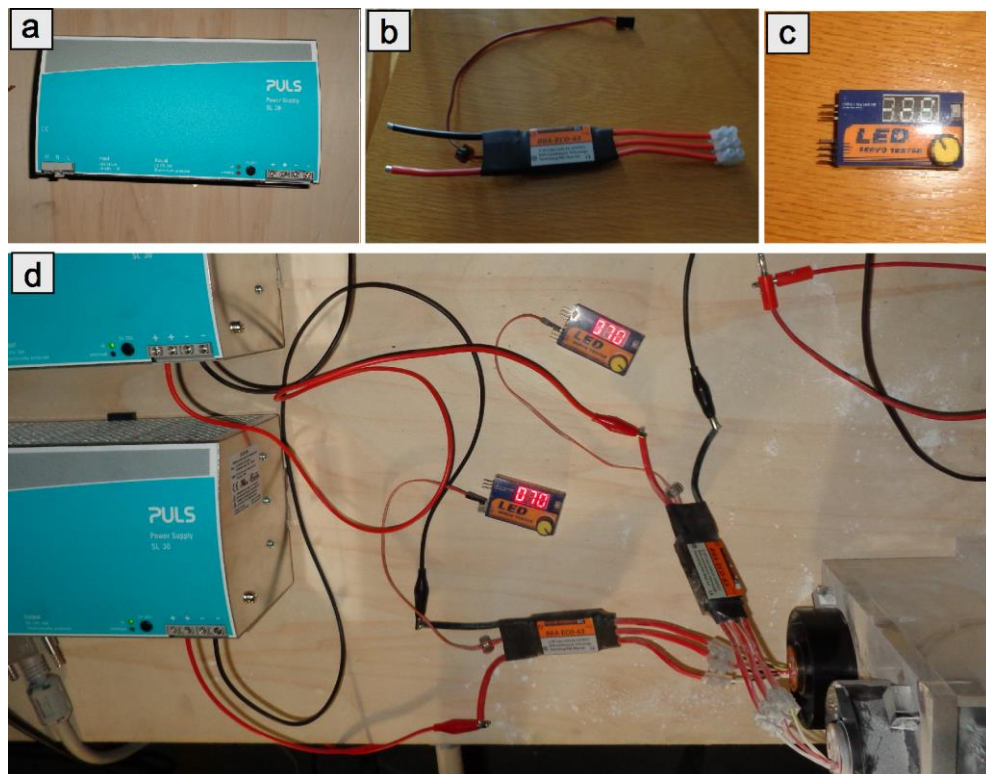


Figura 4.15: a) Fonte de alimentação de 700 W; b) Controlador electrónico de velocidade; c) Regulador PWM; d) Fontes de alimentação e controladores ligados aos respetivos turbo-ventiladores.

Nos controladores, ou reguladores, PWM podemos definir a largura de pulso em milissegundos. Assim, definimos o tempo em que o pulso produzido se encontra a nível alto (5 V). Estes controladores requerem uma tensão de alimentação compreendida entre os 4,8 V e os 6 V e geram um pulso como o que se pode visualizar na figura 4.16.

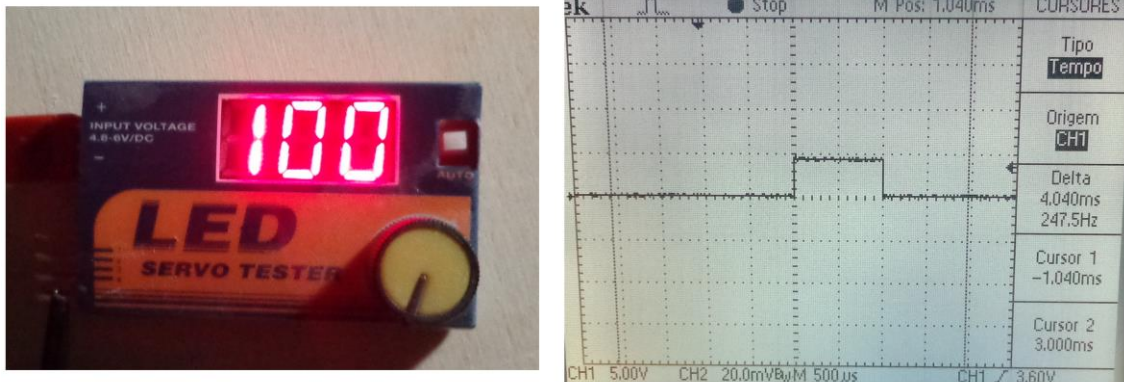


Figura 4.16: Visualização do sinal de saída do controlador PWM num osciloscópio (direita), quando é estabelecido um comprimento de pulso de 1,00 ms (esquerda).

4.3.3. Caracterização da câmara CCD usada para construir o sistema PIV

Open Source

Depois de efetuar uma revisão bibliográfica, neste caso sobre o estado da arte de sistemas PIV, identificou-se a relação características-preço dos equipamentos disponíveis no mercado. A solução que apresentou a melhor relação qualidade-preço foi a baseada na câmara digital CCD C10600-10B ORCA-R2. Esta câmara é apresentada na figura 4.17 acoplada a uma lente C-mount. Esta lente, de zoom e abertura variável mecanicamente, foi selecionada de forma a captar a imagem de um objeto com cerca de 25 cm de largura a uma distância de 30 cm, entre a câmara e o plano de luz laser. A caracterização e seleção da lente tiveram de ter em conta o tamanho do sensor CCD da câmara. A lente adquirida é uma OPT-MHR31214MCN, de 12mm, F1.4 rosca C.



Figura 4.17: Câmara Digital CCD C10600-10B Orca-R2 com lente C-mount OPT-MHR31214MCN, de 12 mm.

A interface entre a câmara CCD e o computador é feita usando a unidade de controlo da câmara (CCU) C10600-10B, representada na figura 4.18.



Figura 4.18: Unidade de controlo da câmara C10600-10B Orca-R2

Esta câmara CCD (charge-coupled device) é compacta e apresenta um elevado desempenho, contando com uma interface IEEE1394b de modo a atingir elevadas velocidades de transferência de informação entre a câmara e o computador. Esta câmara foi desenvolvida com o intuito de satisfazer exigências de elevada precisão e elevada qualidade de imagem, em particular para captação de imagem com finalidade científica ou industrial de precisão.

As imagens são captadas com alta resolução, apresentando 1344x1024 pixéis, e podem ser diretamente transferidas para o computador a partir da interface IEEE1394b, tanto na utilização do modo convencional de leitura como na utilização do modo de leitura de alta velocidade. Os pixéis das imagens são quadrados, o que facilita o processamento de imagem para obtenção de medições. Apresenta um modo de leitura de alta velocidade, de 28 MHz/pixel, para além do modo de leitura convencional de 14 MHz/pixel. Não necessita de obturador mecânico e apresenta um sistema de refrigeração a ar, ou a água, que permite estabilizar o desempenho da câmara (Hamamatsu, 2013a).

Na figura 4.19 pode ver-se a parte traseira da unidade de controlo da câmara C10600-10B ORCA-R2, e as respetivas entradas e saídas de que esta unidade dispõe.

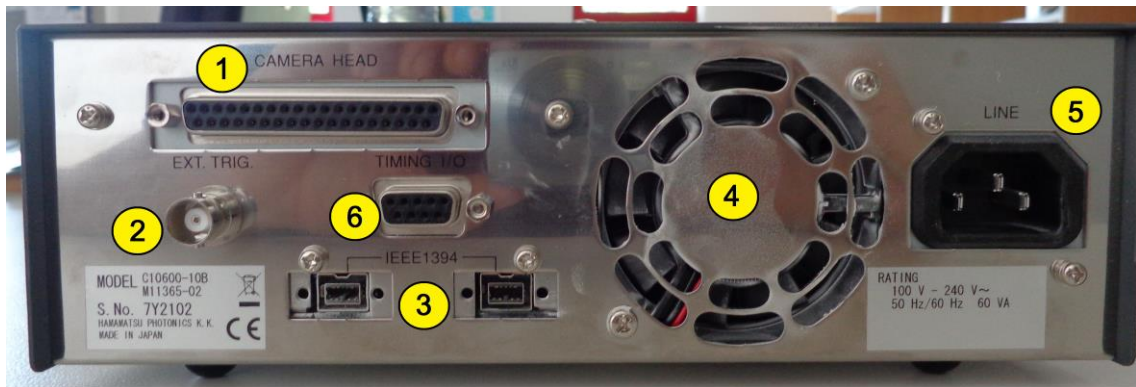


Figura 4.19: Painel traseiro da CCU C10600-10B Orca-R2 : 1- Conetor para a câmara; 2-Conetor de entrada trigger; 3-Conetor interface IEEE1394b; 4-Saída de ar; 5- Entrada da tensão de alimentação; 6- Conetor Timing I/O, no qual se encontra o Trigger Enable Output.

A unidade de controlo contém um conetor através do qual se estabelece a ligação com a câmara. Esta ligação é efetuada através de um cabo específico fornecido para este propósito. O conetor coaxial, de entrada trigger, serve para ativar o funcionamento da câmara a partir de um sinal exterior. A partir desta função é possível sincronizar a câmara com um sinal TTL sendo ativada na mudança de nível do sinal TTL. É possível ainda escolher a polaridade do sinal entre positiva e negativa. O conetor de interface IEEE1394b permite estabelecer a ligação entre a unidade de controlo e um computador. Para esse efeito o computador necessita ter uma placa IEEE1394b instalada. A saída de ar destina-se a garantir a refrigeração da unidade de controlo. A unidade de controlo apresenta ainda um conetor Timing I/O, no qual se encontra o Trigger Enable Output referido na figura 4.13, entre outros sinais de saída/entrada que se encontram sincronizados com a operação da câmara. Na figura 4.20 podemos ver exatamente este conetor com a respetiva numeração dos pinos.

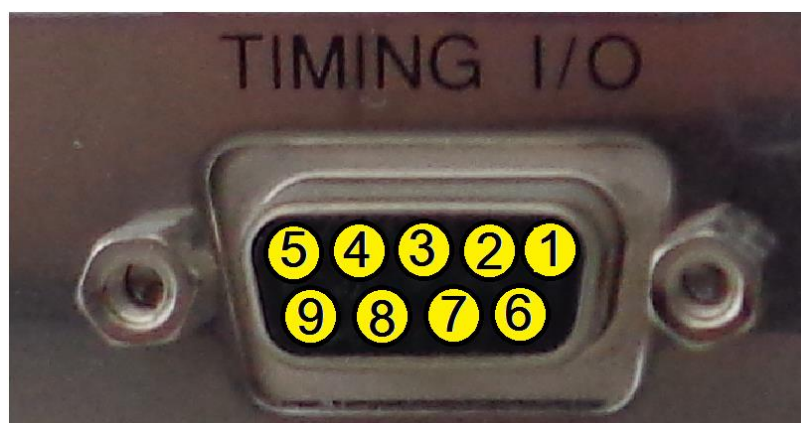


Figura 4.20: Conetor Timing I/O com a respetiva identificação de pinos.

A tabela 4.1 identifica os pinos com os sinais que são transferidos pela unidade de controlo usando este conetor.

Tabela 4.1: Sinais de cada pino transferidos através do conector Timing I/O.

Número do Pino	Sinal
1	(opcional)
2	(opcional)
3	Integ Out
4	Programmable Timing out
5	Trigger Ready Out
6	GND
7	GND
8	GND
9	GND

Por defeito, a unidade de controlo oferece três sinais diferentes nos pins 3, 4 e 5, os quais podem ser utilizados para sincronizar o laser com a captura de imagens. Opcionalmente podem usar-se mais dois sinais, nos pins 1 e 2, sincronizados com a captura de imagens efetuada pela câmara. Na figura 4.21 podemos ver as formas de onda destes sinais e a maneira como se encontram sincronizados com a câmara digital CCD C10600-10B ORCA-R2. Tal como se observa na figura 4.21, o sinal fornecido no pino 3 (Integ Out) passa para nível alto e mantém-se a nível alto durante o tempo em que a câmara faz a exposição. Quando a câmara está unicamente a fazer a leitura o sinal encontra-se a nível baixo. O sinal do pino 5 (Trigger Enable Output) emite um sinal simétrico ao do pin 3. Ou seja, o sinal passa para nível baixo e mantém-se a nível baixo durante o tempo em que a câmara faz a exposição. Quando a câmara está unicamente a fazer a leitura o sinal encontra-se a nível alto. O sinal do pino 4 (Programmable Timing Output) passa a nível baixo num determinado tempo depois do início da exposição. Este tempo pode ser programado, bem como o tempo em que o sinal se mantém a nível baixo. Assim, este sinal é definido por um atraso e uma duração. O atraso define o tempo após o início da exposição que o sinal demora a passar a nível baixo e a duração define o tempo em que o sinal se mantém a nível baixo.

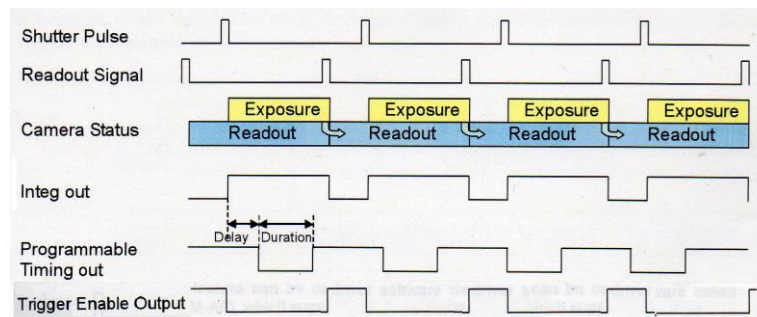


Figura 4.21: Esquema de operação dos sinais de saída disponíveis na unidade de controlo (fonte: Hamamatsu, 2013a).

Esta câmara conta com cinco modos diferentes de funcionamento, sincronizados a partir de um sinal externo, sendo que um desses modos de funcionamento foi escolhido como opção ao adquirir a câmara. Este modo opcional é o modo “PIV Function”, que foi especialmente desenvolvido para captura de imagens com vista a realização de uma análise PIV. Este modo de funcionamento permite a aquisição de imagens num intervalo de tempo muito curto. A figura 4.10 esquematiza o funcionamento da câmara na função PIV.

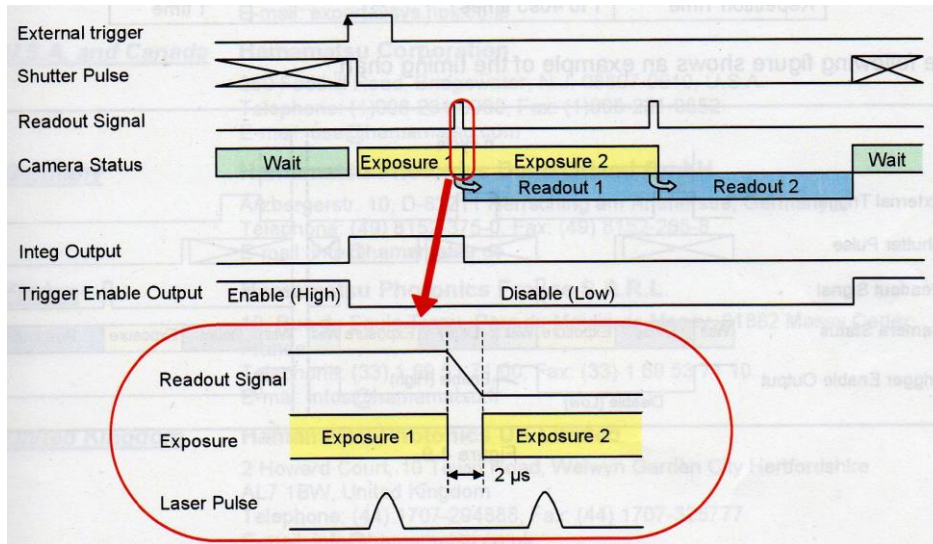


Figura 4.22: Esquema do funcionamento da câmara no modo PIV (fonte: Hamamatsu, 2013a).

Assim que é fornecido um impulso à câmara, a partir do sinal externo TTL, a câmara inicia a primeira exposição. A primeira exposição pode durar um período de tempo muito curto, sendo que o tempo mínimo de duração da primeira exposição é de 50 μs . Assim que termina a primeira exposição a câmara necessita apenas de 2 μs para iniciar a segunda exposição. Ou seja, 2 μs depois de acabar a primeira exposição a câmara inicia a segunda exposição, e ao mesmo tempo que realiza esta segunda exposição faz a leitura da primeira exposição. Dado que só pode realizar a leitura da segunda exposição quando terminar a leitura da primeira exposição, o tempo da segunda exposição tem de ser no mínimo igual ao tempo de leitura da primeira exposição, para que assim que termine a segunda exposição possa fazer a leitura da segunda exposição. Depois de efetuar a leitura da segunda exposição a câmara espera pela receção de um novo pulso de sinal externo, para iniciar a captação de um novo par de imagens.

Ao funcionar com o modo PIV a câmara pode captar pares de imagens, em períodos de tempo muito curtos, o que por sua vez possibilita a análise PIV de escoamentos com elevadas velocidades. A imagem final de cada exposição corresponde à informação que a câmara capta durante a exposição. O ambiente para a realização dos testes PIV tem ser totalmente escuro e o escoamento é unicamente iluminado pelo laser. Dado isto, durante o tempo de exposição a câmara apenas capta informação no período de tempo em que o laser se encontra ligado,

porque no restante período não há luz e como tal não há informação para captar. Perante isto, quando se pretende realizar medições PIV de escoamentos com elevadas velocidades deve utilizar-se um laser que funcione em modo pulsado de modo a fornecer um pulso de luz durante a primeira exposição, e um pulso de luz durante a segunda exposição.

Com este funcionamento, o tempo entre o par de imagens vai ser igual ao tempo entre os pulsos do laser visto que a câmara apenas pode recolher informação quando o laser emite os pulsos. Ou seja, independentemente do tempo que a exposição demora, o par de imagens refere-se unicamente ao período de tempo em que o laser ilumina o escoamento. Este procedimento permite a realização de análises PIV para escoamentos de alta velocidade uma vez que a câmara apenas demora 2 μ s entre a primeira exposição e a segunda exposição (Hamamatsu, 2013a).

4.3.4. Sistema de geração do plano de luz laser

A visualização do escoamento foi realizada recorrendo a um laser que cria um plano de luz na zona de saída do escoamento da tubeira. O objetivo é que o laser seja refletido pelas partículas marcadoras que são misturadas no escoamento, permitindo a visualização das partículas e por conseguinte do escoamento. Para este efeito é necessário que o local de realização dos testes experimentais seja totalmente escuro, para que não haja mais nenhuma fonte de luz. Deste modo, o escoamento é visualizado num plano, plano este que é criado pela folha de luz laser. O laser utilizado, que incorpora a ótica de geração do plano de luz, encontra-se representado na figura 4.23. Este laser, fornecido pela LASER2000, tem como referências 1 L2S-SL-660-130-S-A-60, SteamLine Laser System, Wavelength: typ. 660 nm, Diode power: 130 mW, Modulation: cw - 10 kHz, Optics 1 uniform line with 60° fan angle.

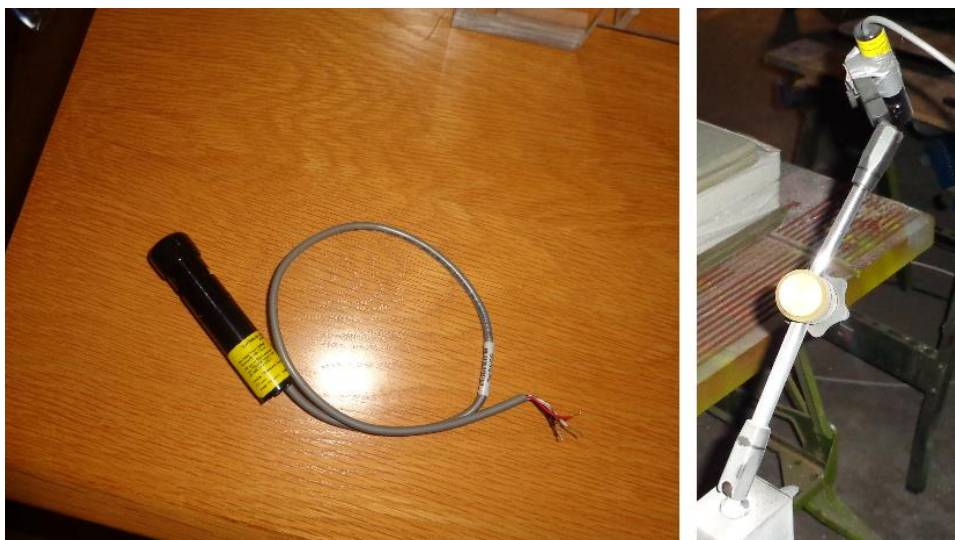


Figura 4.23: Laser que produz a folha de luz antes de ser montado (esquerda), e após a montagem no suporte da instalação experimental (direita).

O laser que produz a folha de luz é alimentado com uma tensão de 5 V e uma corrente de aproximadamente 250 mA. Possui ainda a possibilidade de ser modulado a partir de um sinal TTL, quer em frequência quer em intensidade da luz que emite (variando a tensão de modulação). Para este efeito, quando é fornecida uma tensão de 5 V ao cabo de modulação do laser, este desliga-se completamente e não emite qualquer luz e, pelo contrário, quando é fornecida uma tensão de 0 V ao cabo de modulação do laser, este atua com intensidade máxima de luz. Assim, a intensidade de luz do laser pode variar entre 100% com modulação a 0 V e 0% quando são aplicados 5 V (Osela, 2013).

4.3.5. Instalação do pulverizador de partículas sólidas

De modo a visualizar o escoamento de ar precisamos de um meio onde existam partículas sólidas. Idêntico requerimento existe para o estabelecimento da operação do sistema PIV. As partículas sólidas utilizadas foram partículas de pó de talco, estas são partículas brancas com um tamanho médio de 30 μm e que por isso permitem uma boa reflexão da luz que sobre elas incide, tendo pouca influência sobre o escoamento de ar (Fernandes, 2011; Bichal et al., 2009).

Utilizou-se o gerador de partículas sólidas do tipo ciclone, cuja construção foi acima apresentada, para introdução das partículas de pó de talco no escoamento que passa pela tubeira. O gerador de partículas sólidas apresenta uma forma cilíndrica e possui uma entrada na qual se injeta ar comprimido, e uma saída pela qual se pretende que saia a mistura de ar com partículas de pó de talco. A figura 4.24 ilustra o gerador de partículas sólidas no qual se encontram identificadas a entrada de ar comprimido e a saída de ar misturado com pó de talco.

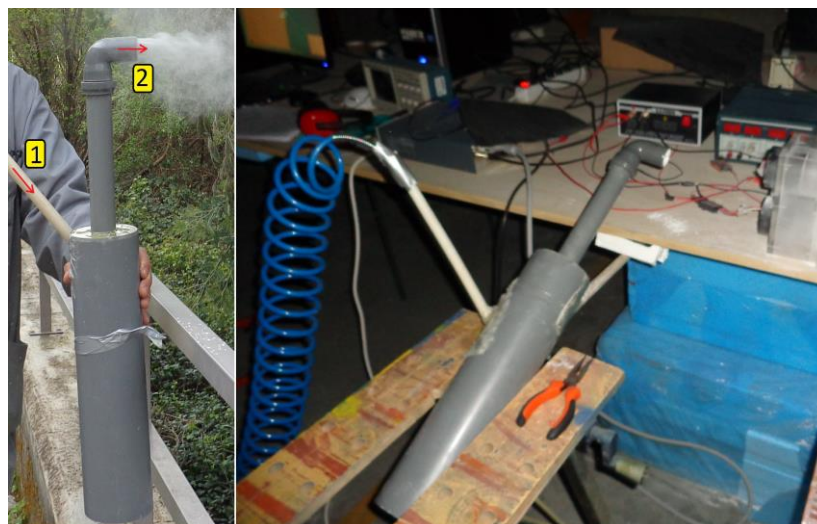


Figura 4.24: Ensaio preliminar do pulverizador de partículas sólidas (esquerda), 1- Entrada de ar comprimido, 2- Saída de ar misturado com partículas de pó de talco. Gerador de partículas sólidas instalado na montagem experimental (direita).

O pó de talco encontra-se previamente depositado na base do gerador de partículas sólidas, a entrada de ar está numa posição tangencial em relação ao eixo do gerador de partículas sólidas, o que causa um ciclone quando se injeta ar comprimido no interior do gerador de partículas sólidas, conduzindo à mistura do ar com as partículas marcadoras (Kalathoor, 2013).

O ar é comprimido por um compressor que pode ser visto na figura 4.25. Este compressor tem um reservatório de 110 L de volume. Visto que o reservatório é suficientemente grande para o fim desejado, o ar foi comprimido e automaticamente armazenado no reservatório, sempre e antes da realização de ensaios experimentais. Deste modo a abertura da válvula do compressor apenas era feita quando necessário, de modo a misturar as partículas de pó de talco no escoamento. A pressão do ar que é injetado no gerador de partículas sólidas esteve sempre dentro do intervalo entre 4 e 8 bar.



Figura 4.25: Compressor de ar de 110 litros.

4.3.6. Gerador de sinais para disparo de leituras PIV

O modo de funcionamento PIV da câmara necessita de um sinal TTL exterior que determine o início de aquisição de um par de imagens. Assim, sempre que recebe um pulso ela inicia a aquisição de um par de imagens e, quando acaba esta aquisição, espera por um novo pulso para realizar mais uma aquisição de um par de imagens. Esse sinal foi gerado a partir de um gerador de sinais de características genéricas e que se mostra na figura 4.26.



Figura 4.26: Gerador de sinais utilizado para iniciar a leitura de um par de imagens.

O gerador de sinais permite criar sinais de onda sinusoidal, triangular, ou quadrada, com amplitudes máximas de até 10 V e frequências máximas de 2 MHz.

4.3.7. Microcontrolador mbed NXP LPC 1768

Para realizarmos o controlo dos pulsos de laser utilizámos o microcontrolador que se encontra na figura 4.27, este circuito foi implementado de acordo com o circuito eletrónico apresentado na figura 4.13.

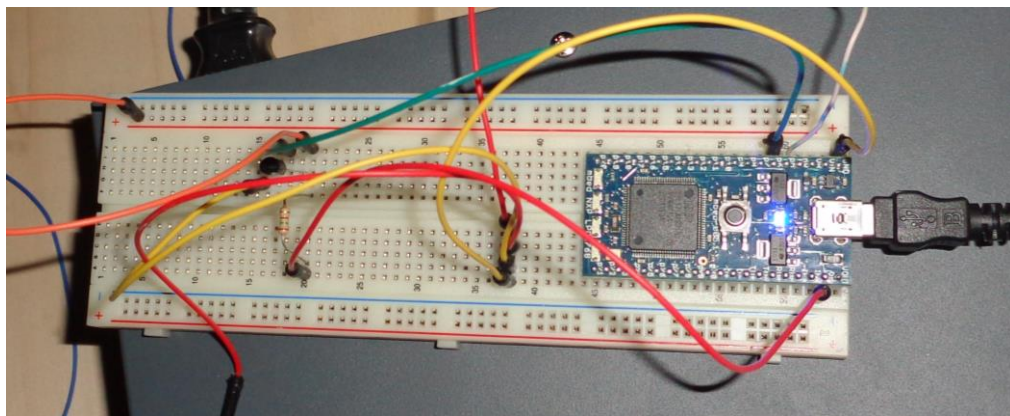


Figura 4.27: Microcontrolador mbed NXP LPC 1768 interligado com o circuito eletrónico referido na figura 4.13.

Este microcontrolador foi utilizado para alterar o sinal *Trigger Enable Output*, fornecido pela unidade de controlo da câmara, de modo a sincronizar o laser com a captura de imagens. Para além do microcontrolador utilizou-se também um transístor, a partir do qual se obteve o sinal com que se realiza a sincronização entre o laser e a câmara, de acordo com o circuito apresentado na figura 4.13.

4.3.8. Utilização do *software HCLImage Live para captação de imagens*

O *software HCLImage Live* foi o *software* utilizado para realizar a comunicação entre a câmara e o computador. Este *software* está otimizado para controlar e adquirir imagens de alta velocidade, alta resolução e grande sensibilidade fornecidas pelas câmaras *Hamamatsu* e usando o driver DCAM. O *HCLImage* proporciona as ferramentas necessárias para introduzir e definir as características referentes à aquisição de imagens, seu processamento e análise. Na figura 4.16 pode ver-se o layout do *HCLImage Live*.

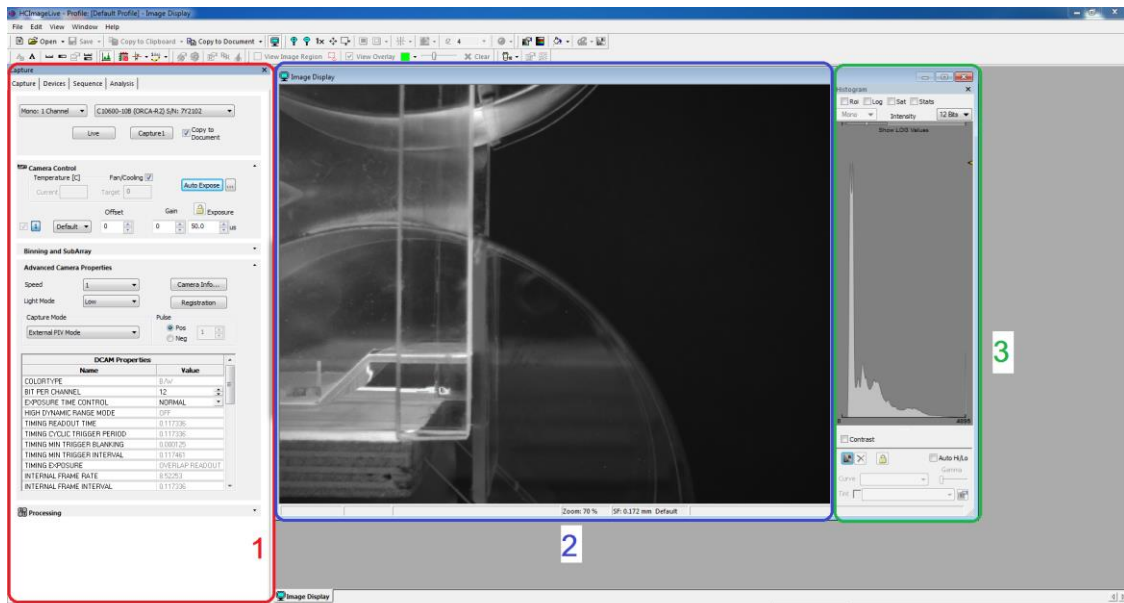


Figura 4.28: *Layout* do *software HCLImage Live*: 1- Painel lateral; 2- Mostrador de imagens; 3- Histograma

Tal como se pode observar na figura 4.28 o *layout* do *HCLImage Live* encontra-se dividido em três secções, o painel lateral, o mostrador de imagem e o histograma. O painel lateral fornece diversos controlos do sistema ao utilizador, sendo composto por quatro subsecções: *Capture*, *Devices*, *Sequence* e *Analysis*. O painel mostrador de imagens exhibe em tempo real as imagens que estão a ser adquiridas. Este painel torna-se muito útil, uma vez que oferece ao utilizador um *feedback* durante a aquisição. Por último, o painel histograma mostra a distribuição de intensidade de luz captada nas imagens, o que permite identificar imagens com diferentes qualidades de iluminação (Hamamatsu, 2013b).

4.3.9. *Software Open Source* de análise PIV (PIVlab)

O código PIVlab é um *software open-source* que permite realizar análises PIV. Este, não só calcula a distribuição de velocidades usando um par de imagens como também permite obter, visualizar e exportar vários parâmetros campo de escoamento (Thielicke & Stamhuis, 2005). Na figura 4.29 pode ver-se o *layout* do *software* PIVlab.

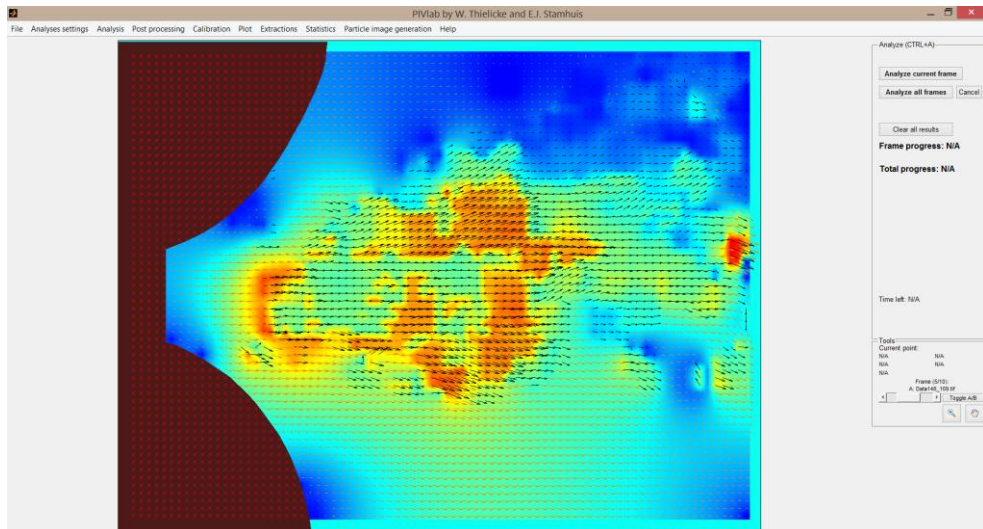


Figura 4.29: Layout do software PIVlab.

Este *software* funciona como uma *toolbox* do *Matlab*, no entanto apresenta um ambiente de trabalho gráfico próprio e independente do ambiente de trabalho do *Matlab*. Suporta formatos de imagem de tipo .bmp, .jpg, ou .tif, e possui uma função de pré-processamento da imagem que permite melhorar a análise de um par de imagens. Possibilita ainda a realização de análises PIV por intermédio de dois algoritmos diferentes, o algoritmo DCC (*direct cross correlation*) e o *Multi pass window deformation*. O *software* apresenta também uma função de calibração, a qual permite introduzir uma distância de referência e um tempo entre imagens. Existe ainda uma função de validação de vetores, que permite remover os vetores que apresentam valores afastados da gama média esperada para a velocidade do campo de escoamento.

4.3.10. Construção dos atuadores de plasma do tipo DBD

Os atuadores de DBD foram feitos a partir de fita de cobre, como elétrodo, e de kapton como camada dielétrica. Na figura 4.30 pode ver-se um atuador de plasma montado na superfície Coanda da tubeira HOMER.

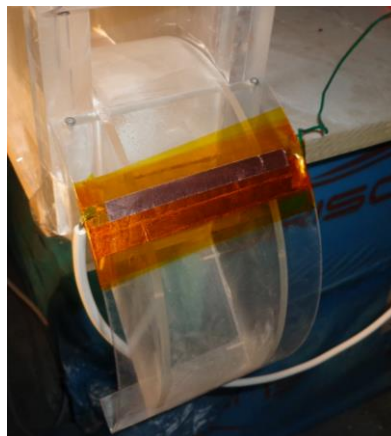


Figura 4.30: Atuador de plasma DBD produzido com fita de cobre e fita de kapton.

Tal como já foi referido, os atuadores de plasma DBD requerem uma corrente alternada de alta tensão, e alta frequência, para criarem a zona de ionização do ar vulgarmente designada de plasma. Para esse efeito utilizou-se uma fonte de alimentação de alta tensão e alta frequência designada de PVM500, a qual pode ser vista na figura 4.31.



Figura 4.31: Fonte de alimentação PVM500 de alta tensão, e alta frequência, utilizada para alimentar os atuadores a plasma de tipo DBD.

O PVM500 é uma fonte de alimentação fabricada pela *Information Unlimited* e capaz de produzir uma tensão alternada de até 20 kVpp, com uma frequência compreendida entre 20 kHz e 50 kHz. A corrente fornecida por esta fonte de alimentação é baixa, podendo ir até 10 mA. A potência desta fonte de alimentação é de aproximadamente 200 W. Esta permite ainda o fornecimento de um sinal de alimentação alternado periódico sinusoidal, ou injetar outro determinado ciclo de trabalho (Information Unlimited, 2013; Catrakis et al, 2012).

4.3.11. Operacionalização do uso do PicoScope 6

O PicoScope é um equipamento que torna um vulgar computador numa poderosa ferramenta de diagnóstico, funcionando como um osciloscópio. É geralmente usado em diagnóstico automóvel para a deteção de erros em sensores, atuadores e circuitos eletrónicos de injeção e controlo que se encontram nos veículos atuais. Possui uma grande variedade de sensores e de pontas de prova que se podem usar com o mesmo. Na figura 4.32 pode ver-se o PicoScope conectado ao computador para medição da tensão alimentação de um atuador de plasma DBD.



Figura 4.32: PicoScope ligado ao computador para medição da tensão de alimentação de um atuador de plasma DBD.

Para a medição da frequência e da tensão de alimentação dos atuadores de plasma, de tipo DBD, utilizou-se um acessório do PicoScope designado de *Secondary Ignition Pickup*. Este acessório permite medir altas tensões e apresenta ainda a vantagem de que não necessita ser ligado diretamente ao cabo no qual se pretende obter a forma de onda e respetivas características (Pico Technology, 2008). Na figura 4.33 pode ver-se este acessório que foi utilizado para a obtenção da forma de onda da tensão de alimentação dos atuadores de plasma DBD. Trata-se de um sensor de tipo capacitivo.



Figura 4.33: *Secondary Ignition Pickup*, ferramenta do PicoScope utilizada para medição de frequência e tensão de alimentação dos atuadores de plasma DBD.

Capítulo 5

Resultados experimentais

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos diferentes ensaios experimentais. É ainda feita uma discussão desses resultados. Deste modo, apresentam-se e discutem-se os valores da medição preliminar da velocidade do escoamento com um anemómetro, os testes usando atuadores de plasma de tipo DBD, e ainda os resultados da deflexão de jato com a tubeira HOMER com e sem atuadores de plasma ativos.

5.1. Resultados de medição da velocidade com anemómetro

Utilizou-se um anemómetro para medir a velocidade do ar que é sugado pelos ventiladores montados na tubeira HOMER para os diferentes tempos de pulso PWM. A tabela 5.1 resume os resultados obtidos neste teste experimental.

Tabela 5.1: Velocidade no ventilador (precisão +- 0.01 m/s) para diferentes larguras de pulso PWM.

Comprimento de Pulso (ms)	Velocidade (1º ensaio) (m/s)	Velocidade (2º ensaio) (m/s)	Velocidade média dos ensaios (m/s)
0,75	3,20	4,09	3,645
0,80	5,30	5,88	5,590
0,85	6,70	7,15	6,925
0,90	7,30	8,55	7,925
0,95	8,50	9,23	8,865
1,00	9,30	11,10	10,200
1,05	9,75	12,23	10,990
1,10	10,20	12,84	11,520
1,15	10,80	13,22	12,010
1,20	12,85	13,47	13,160
1,25	13,60	13,70	13,650
1,30	13,60	13,55	13,575
1,35	13,80	14,18	13,990
1,40	14,30	14,62	14,460
1,45	14,30	14,80	14,550
1,50	14,50	14,80	14,650

Perante os valores obtidos verificou-se que os ventiladores podem cobrir uma gama de velocidades entre 4 m/s a 15 m/s, nas duas entradas. Desta forma foi possível ter uma ideia do valor da velocidade média esperada no jato de saída. O que é importante para definir os parâmetros de processamento no sistema PIV. Verificou-se ainda que a tubeira induz muitas perdas no escoamento, pois os ventiladores permitem obter velocidades muito superiores quando se fizeram ensaios em escoamento livre. Ainda assim a gama de velocidades que é possível reproduzir na tubeira ACHEON adequa-se aos testes experimentais que se pretendem realizar.

5.2. Visualização do plasma e medição da tensão de alimentação

Uma vez que se pretendeu implementar os atuadores de plasma na superfície Coanda da tubeira HOMER fizeram-se testes com vista a perceber melhor o seu funcionamento e como deveriam ser implementados. Nos testes iniciais construíram-se os atuadores de plasma com elétrodos de fita de cobre (0.5 mm) e com dielétrico de fita de kapton (0.1 mm). Testaram-se vários atuadores feitos com 3 e 4 camadas de fita de kapton. No entanto estes atuadores apresentaram algumas debilidades. A fita de kapton era muito fina, sendo que 4 camadas de fita de kapton tinham uma espessura muito inferior a 1 mm, e deste modo apenas era possível medir aos terminais do atuador uma tensão máxima de 8 kVpp, a 23 kHz. A figura 5.1 mostra a visualização da forma de onda da tensão, a medição da frequência, e da tensão pico-a-pico. Estes valores foram obtidos com o *PicoScope*.



Figura 5.1: Forma de onda e medição da tensão, e da frequência, para atuador a plasma feito com fita de cobre e fita de kapton (500 μ s/div)

Para além de apenas se atingir uma tensão máxima de 8 kVpp, estes atuadores ainda apresentavam outra debilidade, pois não aguentavam esta descarga durante muito tempo. Devido à fina espessura da fita de kapton era muito difícil colocar as 4 camadas de kapton

sem que estas não apresentassem pequenas bolhas de ar entre elas. Devido a isto, num curto período de tempo, o kapton acabava por furar nessas zonas e o atuador entrava em curto-circuito.

Uma vez que as superfícies Coanda da tubeira foram feitas em policarbonato, material isolante, decidiu-se testar um atuador de plasma feito de elétrodos de fita de cobre e usar o policarbonato como dielétrico. O policarbonato tem uma espessura de 1 mm, e neste caso atingiram-se tensões mais elevadas do que com os atuadores feitos com kapton como dielétrico. Ainda assim, para estas tensões mais elevadas, ao fim de algum tempo o policarbonato também começava a derreter e permitia a passagem de corrente do elétrodo exposto para o elétrodo coberto. Finalmente testaram-se atuadores de plasma sobrepondo policarbonato e kapton unidos como dielétrico. Ou seja, testaram-se atuadores cujo dielétrico era constituído pela camada de policarbonato sobreposta a duas camadas de kapton. Deste modo conseguiu-se atingir aos terminais dos atuadores tensões de até 13 kVpp, sem que a camada dielétrica furasse num período de tempo razoável. Utilizando então um atuador de plasma com a camada dielétrica constituída por policarbonato e kapton, visualizou-se finalmente a formação do plasma para as diferentes tensões de alimentação. Na figura 5.2 pode-se ver o atuador de plasma alimentado por uma tensão de 4,8 kVpp, a 23 kHz.



Figura 5.2: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 4,8 kVpp e 23,8 kHz. Valores obtidos usando o *PicoScope* com uma precisão de ± 0.001 kV e ± 0.01 kHz.

Ao ser aplicada uma tensão de 4,8 kVpp, com uma frequência de 23,8 kHz, ao atuador de plasma de DBD pode ver-se que o plasma começa a formar-se. No entanto ainda não se apresenta de uma maneira uniforme. Nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam-se as visualizações referentes aos vários estágios de formação do plasma, para a mesma frequência, com tensões de 6 kVpp, 8 kVpp e 13 kVpp respetivamente.

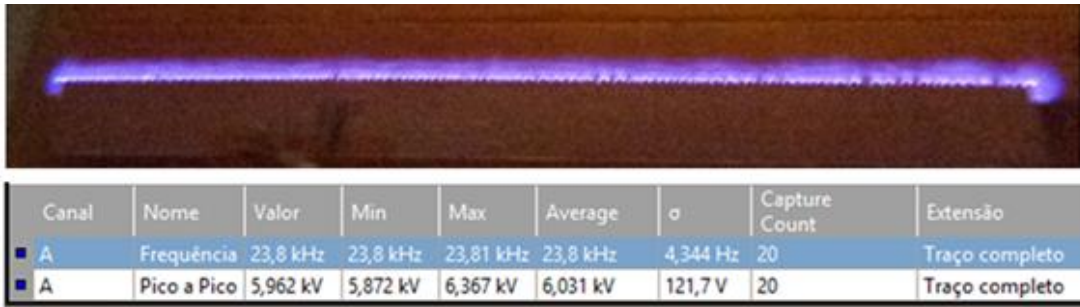


Figura 5.3: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 6 kVpp e a 23,8 kHz.

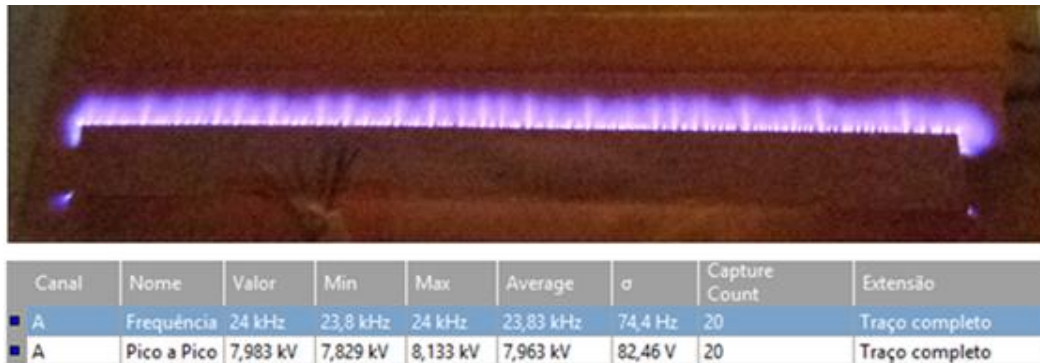


Figura 5.4: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 8 kVpp e a 23,8 kHz.

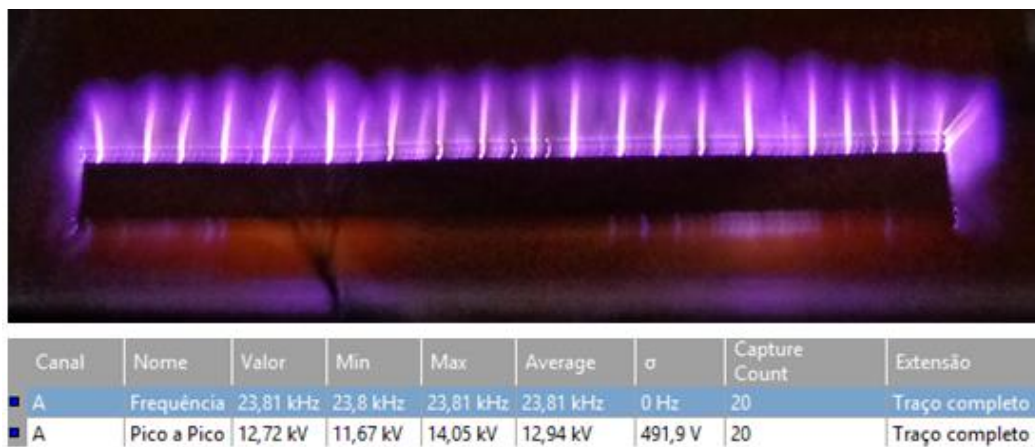


Figura 5.5: Atuador de Plasma de DBD alimentado a 13 kVpp e a 23,8 kHz

Tal como se verifica pelas imagens, à medida que se aumenta a amplitude da tensão a zona de formação de plasma torna-se maior, sendo que para uma tensão de 13 kVpp o plasma apresenta uma largura compreendida entre 10 a 20 mm.

5.3. Análise do escoamento a partir de técnicas de medição PIV

A tubeira foi testada para diferentes razões de velocidades, primeiro de forma preliminar usando o anemómetro. As razões de diferencial de velocidade foram definidas pelos tempos

de comprimento de pulso PWM, considerando que a velocidade até determinado comprimento de pulso aumenta quase linearmente.

Perante as velocidades de escoamento que se pretendem reproduzir, e para se obter uma análise de escoamento por técnicas PIV, foi necessário utilizar o laser em modo pulsado. Para a obtenção de resultados por este modo de funcionamento o plano de medição apenas pode ser iluminado pelo laser. Assim, não foi possível realizar este tipo de medições com os atuadores de plasma ativos, pois estes emitem luz quando em funcionamento. Na tabela 5.2 resumem-se as condições experimentais em cada um dos ensaios realizados com análise PIV.

Tabela 5.2: Casos de teste ensaiados usando a análise de escoamento com o sistema PIV.

	Razão entre velocidades	Comprimento de Pulso Ventilador 1 (ms)	Comprimento de Pulso Ventilador 2 (ms)
Sem alhetas nas entradas dos ventiladores	1,00	0,75	0,75
	1,24	0,75	0,93
	1,48	0,75	1,11
	1,72	0,75	1,29
Com alhetas nas entradas dos ventiladores	1,00	0,75	0,75
	1,24	0,75	0,93
	1,48	0,75	1,11
	1,72	0,75	1,29

A análise do controlo de escoamento, e a medição da deflexão causada pelo diferencial de caudal, foi realizada para duas situações distintas: com alhetas nas entradas dos ventiladores e sem alhetas nas entradas dos ventiladores. Como foi referido no capítulo 4, durante a construção da tubeira implementaram-se duas placas planas em forma de cruz nas entradas dos ventiladores, as quais designámos de alhetas, e que têm como objetivo reduzir a componente tangencial da velocidade nas duas entradas, e por conseguinte permitir obter o controlo de escoamento desejado. Pretende-se assim verificar a capacidade de controlo do escoamento com e sem as alhetas, de modo a concluir se com elas há algum efeito notório sobre o desempenho da tubeira. Como o escoamento do jato de saída é não estacionário, os resultados finais foram obtidos calculando a média de 10 análises de um par de imagens (i.e. cada análise obtida por duas fotografias). As imagens foram captadas com um tempo de exposição de 100 μ s e o tempo entre imagens é de 102 μ s. No entanto o tempo entre um par de imagens é muito superior a este, sendo de aproximadamente 60 ms. Dado isto, as imagens PIV resultantes da média de 10 pares de imagens, referem-se ao valor médio do campo do escoamento obtido durante um período de aproximadamente 600 ms. A figura 5.6 mostra a análise PIV do escoamento para velocidades iguais dos jatos de entrada.

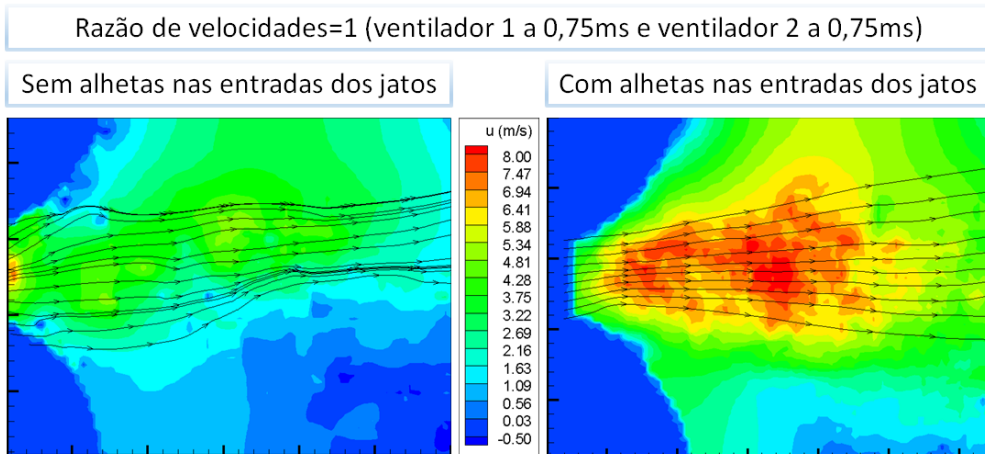


Figura 5.6: Análise PIV, referente ao escoamento médio axial, para uma razão de velocidades igual a 1.

A figura 5.6 mostra a velocidade axial à saída da tubeira e as linhas de corrente do escoamento. Pela análise desta figura verifica-se que o escoamento apresenta comportamento diferente com e sem alhetas. As linhas de corrente do escoamento apresentam-se muito mais estáveis no teste com alhetas do que no teste sem alhetas. Tal como se esperava, e para o caso de duas entradas com o mesmo caudal, o escoamento não deflete e permanece praticamente alinhado ao eixo da tubeira, sendo que este efeito se encontra mais evidente no teste com alhetas. As amplitudes de velocidade axial no teste sem alhetas são inferiores às amplitudes de velocidade axial no teste com alhetas, o que evidencia existir uma maior velocidade tangencial no teste sem alhetas uma vez que as velocidades dos jatos eram iguais em ambos os casos. Assim sendo, verifica-se que as alhetas contribuem para a diminuição da velocidade tangencial, e aumento da axialidade do escoamento, tal como se pretendia.

Na figura 5.7 encontram-se os resultados do campo de velocidade média, usando PIV, para um escoamento com uma razão de velocidades de 1,24.

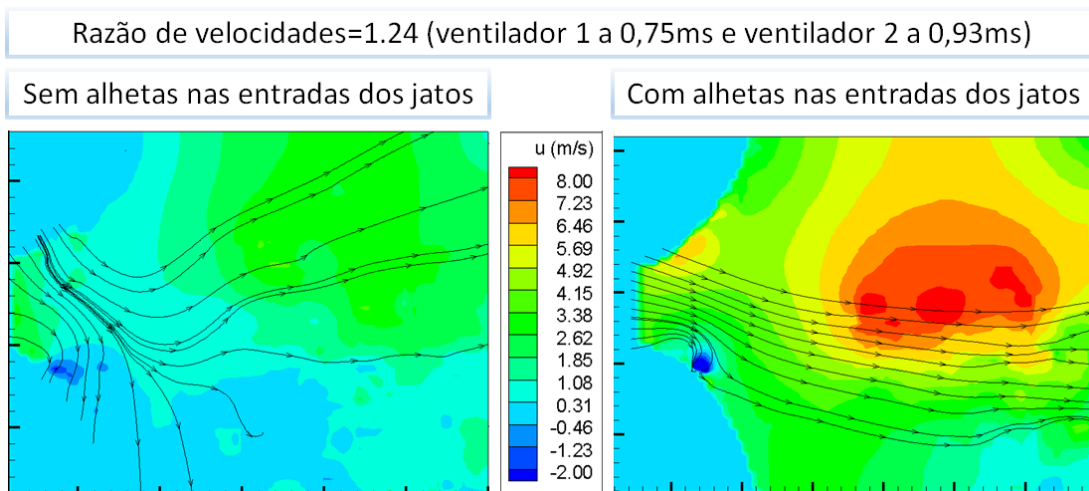


Figura 5.7: Velocidade média do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,24.

Para o teste sem alhetas o escoamento apresenta um comportamento muito instável que segue diversas trajetórias, enquanto que para o teste com alhetas o escoamento segue uma trajetória mais linear. Tal como se esperava, o escoamento apresenta uma deflexão para baixo, uma vez que a velocidade do jato inferior era superior à velocidade do jato superior. À semelhança dos resultados relativos a uma razão de velocidades igual a 1, as gamas de velocidade axial para o escoamento sem alhetas são inferiores às gamas de velocidade axial para o escoamento com alhetas, o que comprova a existência de uma maior componente tangencial das velocidades no escoamento sem alhetas. A instabilidade que se verifica no escoamento, sem alhetas, deve-se à existência de uma elevada componente tangencial da velocidade, e deste modo, no momento em que os jatos se encontram, em vez de aderirem à superfície Coanda misturam-se e não adquirem o efeito de deflexão desejado.

Na Figura 5.8 apresentam-se os resultados do campo de velocidade média, usando PIV, para um escoamento com uma razão de velocidades de 1,48.

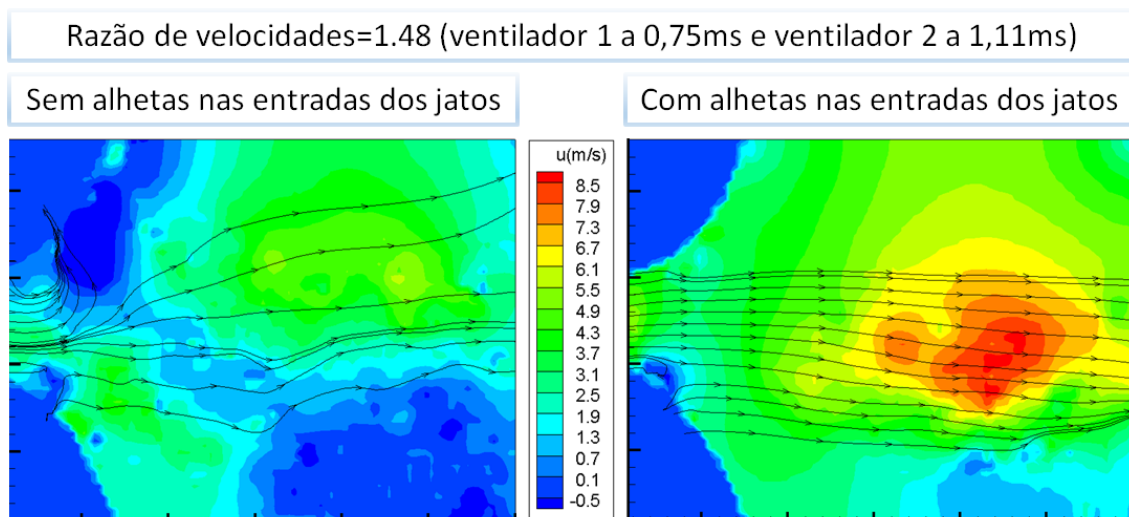


Figura 5.8: Velocidade média do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,48.

Tal como nos ensaios anteriores, neste caso para uma razão de velocidades de 1,48 também se torna bastante evidente o efeito das alhetas. Estas melhoram, em muito, o comportamento do escoamento reduzindo a sua turbulência de grandes escalas. Para a análise do escoamento com alhetas verifica-se uma ligeira deflexão do escoamento mas, ainda assim, não é muito evidente. Este resultado contraria o que se esperava em relação ao anterior.

A figura 5.9 mostra os resultados da velocidade média, usando PIV, para um escoamento com uma razão de velocidades de 1,78.

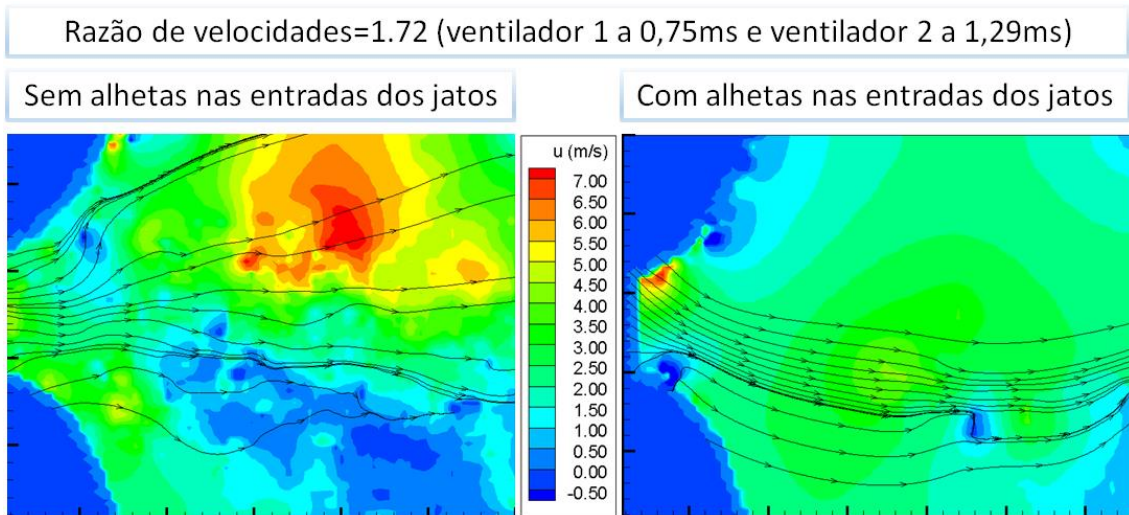


Figura 5.9: Velocidade média do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,72.

Para uma razão de velocidades de 1,72 mais uma vez se verifica que no teste sem alhetas o escoamento apresenta muita turbulência e não apresenta o efeito de deflexão desejado, novamente devido à influência do elevado valor da componente tangencial da velocidade. Na análise do escoamento com alhetas é visível a deflexão das linhas de corrente do escoamento, para baixo, tal como se pretendia. A partir das análises de diferentes razões de velocidade do escoamento verificou-se que a deflexão do jato não aumentou, à medida que se aumentou a razão de velocidades. Isto acontece porque as alhetas não reduzem totalmente a velocidade tangencial do escoamento, e à medida que se aumenta a velocidade do jato inferior, aumenta-se também a componente tangencial da velocidade que vai afetar a deflexão do escoamento.

Para as razões de velocidade de 1 e de 1,24 traçaram-se também os perfis de velocidades do escoamento, os quais se podem ver na figura 5.10 e 5.11.

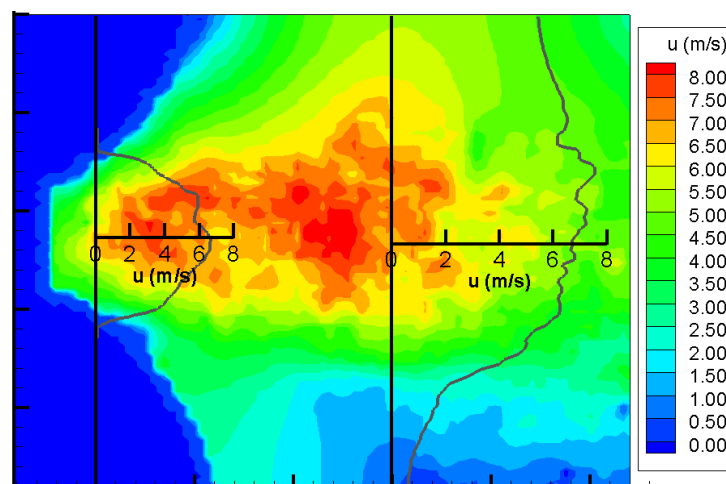
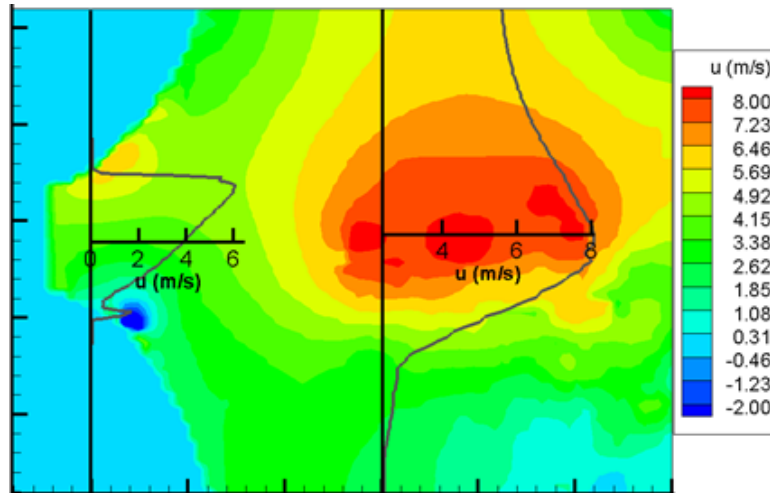


Figura 5.10: Identificação do perfil de velocidades para o ensaio com razão de velocidades igual a 1.



5.11: Identificação do perfil de velocidades para o ensaio com razão de velocidades igual a 1,24.

Estas imagens permitem verificar que as velocidades são superiores perto do eixo de simetria da tubeira. Tendo em atenção os ensaios efetuados considerou-se importante obter o número de Reynolds para o escoamento na tubeira. O número de Reynolds é dado por,

$$Re = \frac{\rho U D_{hidráulico}}{\mu} \quad (5.1)$$

Em que ρ é a massa específica do fluido, U é a velocidade do escoamento, μ a viscosidade dinâmica do fluido e $D_{hidráulico}$ o diâmetro hidráulico da tubeira obtido pela expressão,

$$D_{hidráulico} = \frac{4A}{P_{molhado}} \quad (5.2)$$

Em que A é a área da secção transversal da tubeira e $P_{molhado}$ o perímetro molhado da tubeira. Segundo Fox et al. (2009), para condições de pressão atmosférica e a 20°C temos que $\rho_{ar} = 1,21 \text{ kg/m}^3$ e $\mu_{ar} = 1,81 \times 10^{-5}$. Considerando uma velocidade típica à saída da tubeira de 8 m/s obtemos um $Re = 3,6 \times 10^4$, o que indica que o escoamento se processa em regime turbulento como visualizado.

5.4. Análise a partir da visualização do escoamento

Na tentativa de aumentar o ângulo de deflexão máximo conseguido com o diferencial de velocidades implementaram-se atuadores de plasma de DBD na superfície de Coanda. Os atuadores de plasma DBD foram feitos com elétrodo de fita de cobre e com kapton e policarbonato como dielétrico. Assim, para a realização de testes com atuadores de plasma de DBD colocaram-se dois atuadores na superfície Coanda da tubeira, de modo a que o escoamento adira melhor à superfície, possibilitando um eventual aumento do ângulo de deflexão do escoamento. A figura 5.12 mostra os dois atuadores de plasma que foram montados na superfície Coanda da tubeira.

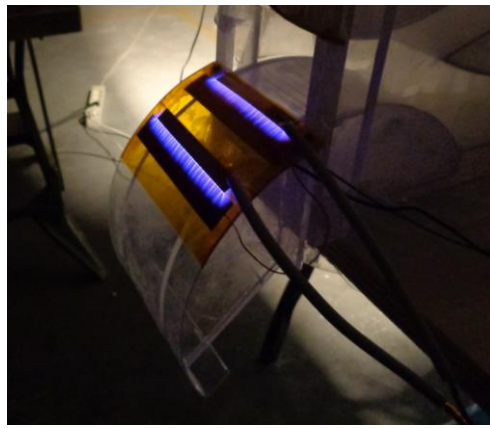


Figura 5.12: Atuadores de plasma de DBD colocados na superfície Coanda da tubeira HOMER

Os atuadores de plasma foram alimentados com uma tensão de aproximadamente 12 kVpp e a uma frequência de aproximadamente 23 kHz. A figura 5.13 mostra a forma de onda da tensão de alimentação dos dois atuadores obtida a partir do *PicoScope*.

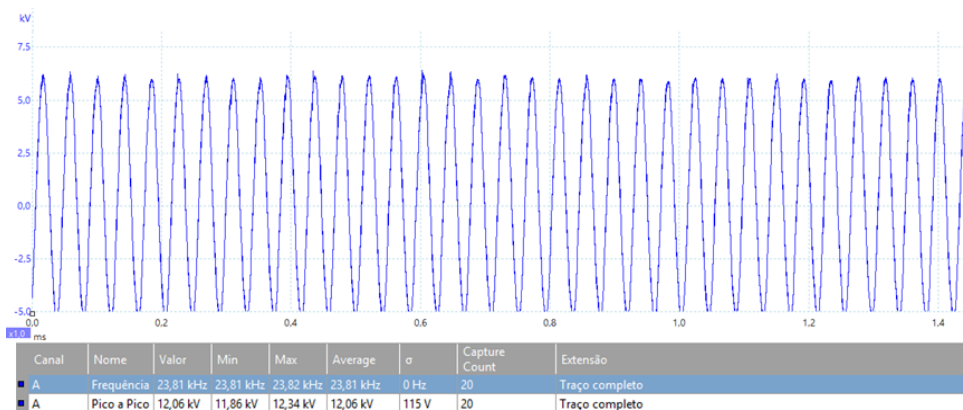


Figura 5.13: Forma de onda da tensão de alimentação dos dois atuadores de plasma de DBD (escala de 200 μ s/divisão)

Como referimos anteriormente, o sistema PIV necessita que a única fonte de luz seja o laser (folha de luz). Assim, não foi possível efetuar uma análise PIV para o caso do escoamento com os atuadores de plasma ligados, dado que estes emitem luz. Optou-se, neste caso, por fazer uma análise recorrendo apenas a uma visualização qualitativa do escoamento e realizaram-se as situações de teste resumidas na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Casos de teste para análise de visualização de escoamento.

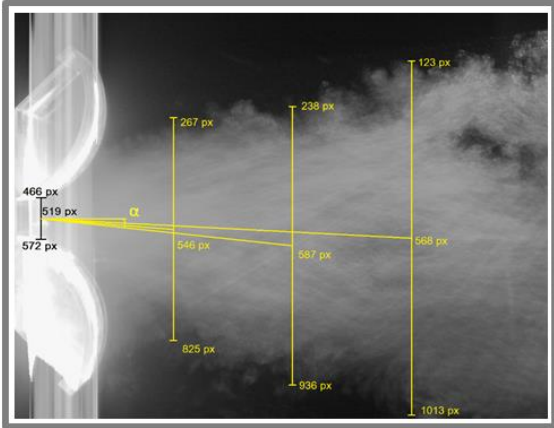
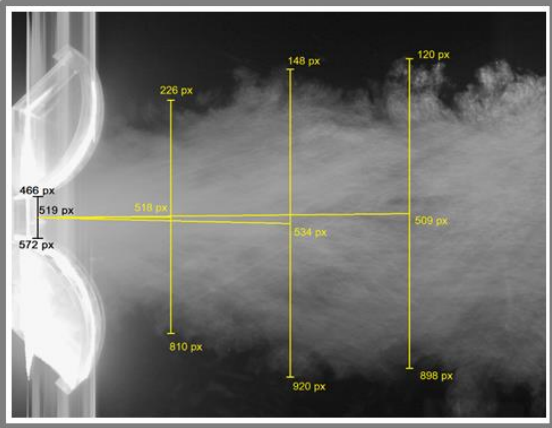
	Razão entre velocidades	PWM Ventilador 1 (ms)	PWM Ventilador 2 (ms)
Com atuadores de plasma DBD desligados	1,00	0,75	0,75
	1,24	0,75	0,93
	1,48	0,75	1,11
	1,72	0,75	1,29
Com atuadores de plasma DBD ligados	1,00	0,75	0,75
	1,24	0,75	0,93
	1,48	0,75	1,11
	1,72	0,75	1,29

As imagens da visualização do escoamento foram captadas com uma exposição de aproximadamente 60 ms. Para a medição do ângulo de deflexão do escoamento definiu-se um ponto de referência, igual para todas as imagens, que se encontra a 519 pixéis do topo da imagem e a 67 pixéis da lado esquerdo da imagem. Traçaram-se 3 retas por imagem com a amplitude do escoamento nos respetivos pontos. As retas foram traçadas a 400 pixéis, 700 pixéis e 1000 pixéis de distância da margem esquerda de cada uma das imagens. Para cada uma das retas calculou-se o seu ponto médio e mediu-se o ângulo de deflexão que esta faz com o ponto de referência ao ponto médio de cada uma das retas. Analisaram-se 3 imagens para cada um dos testes realizados, imagens estas que correspondem ao comportamento do escoamento durante um período de aproximadamente 180 ms. Na figura 5.14 apresenta-se a análise ao escoamento para uma razão de velocidades igual a 1.

Razão de velocidades=1 (ventilador 1 a 0,75ms e ventilador 2 a 0,75ms)

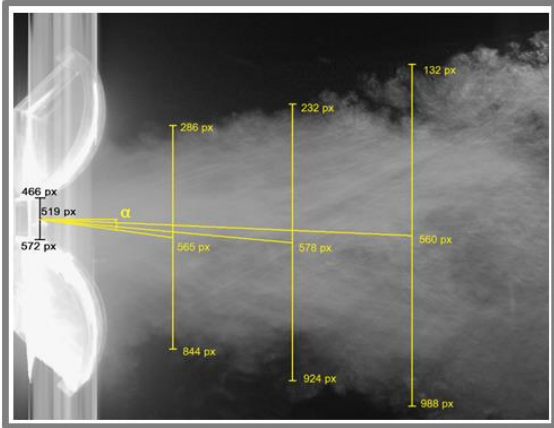
Atuadores Desligados

Atuadores Ligados



$\alpha_1 = -0,17^\circ$; $\alpha_2 = 1,36^\circ$; $\alpha_3 = -0,61^\circ$

$\alpha_1 = 4,64^\circ$; $\alpha_2 = 6,13^\circ$; $\alpha_3 = 3,01^\circ$



$\alpha_1 = 0,17^\circ$; $\alpha_2 = -0,91^\circ$; $\alpha_3 = 3,07^\circ$

$\alpha_1 = 7,86^\circ$; $\alpha_2 = 5,32^\circ$; $\alpha_3 = 2,52^\circ$



$\alpha_1 = 1,72^\circ$; $\alpha_2 = 1,36^\circ$; $\alpha_3 = 2,09^\circ$

$\alpha_1 = 6,68^\circ$; $\alpha_2 = 3,98^\circ$; $\alpha_3 = 4,23^\circ$

Figura 5.14: Cálculo do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1.

Os resultados obtidos a partir da análise da visualização do escoamento foram resumidos na tabela 5.4. Foram calculados os ângulos de deflexão médios para o teste com atuadores DBD ligados e para o teste com atuadores DBD desligados.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1.

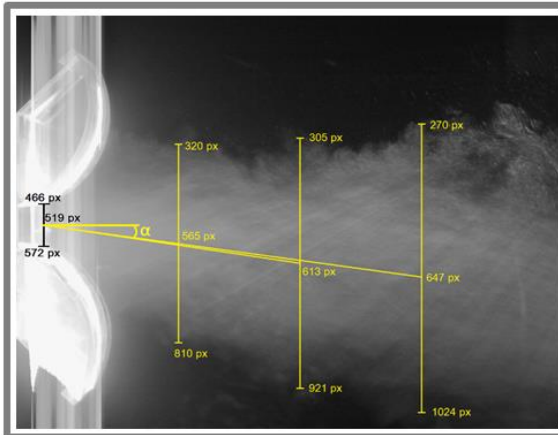
Razão de velocidades = 1		Ângulos Medidos	Ângulo de deflexão médio
Com atuadores de plasma DBD desligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = -0.17^\circ$	$\alpha = 0.90^\circ$
		$\alpha_2 = 1.36^\circ$	
		$\alpha_3 = -0.61^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 0.17^\circ$	
		$\alpha_2 = -0.91^\circ$	
		$\alpha_3 = 3.07^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 1.72^\circ$	
		$\alpha_2 = 1.36^\circ$	
		$\alpha_3 = 2.09^\circ$	
Com atuadores de plasma DBD ligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 4.64^\circ$	$\alpha = 4.93^\circ$
		$\alpha_2 = 6.13^\circ$	
		$\alpha_3 = 3.01^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 7.86^\circ$	
		$\alpha_2 = 5.32^\circ$	
		$\alpha_3 = 2.52^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 6.68^\circ$	
		$\alpha_2 = 3.98^\circ$	
		$\alpha_3 = 4.23^\circ$	

Estes resultados mostram que, para uma situação em que o escoamento deveria permanecer alinhado ao eixo da tubeira, se ligarmos os atuadores de plasma o escoamento adere à superfície de Coanda onde eles estão aplicados, apresentando uma deflexão de aproximadamente 5° . No teste com atuadores de plasma desligados o ângulo de deflexão encontra-se muito próximo do zero teórico. O valor experimental não é exatamente zero devido aos erros aleatórios presentes, que não podem ser evitados. Estes erros apenas podem ser minimizados, que foi o que fez recorrendo à média de 9 medições.

Na figura 5.15 apresentam-se as análises de visualização do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,24.

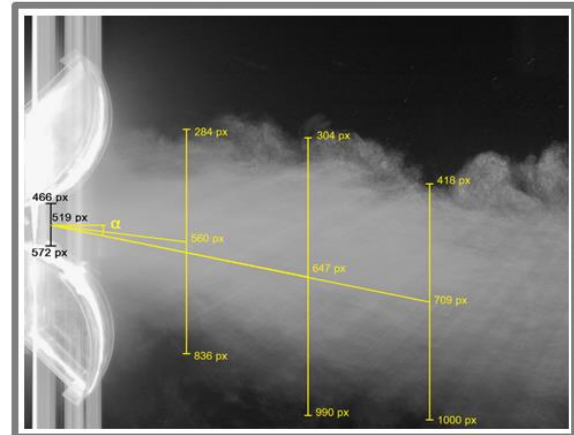
Razão de velocidades=1,24 (ventilador 1 a 0,75ms e ventilador 2 a 0,93ms)

Atuadores Desligados

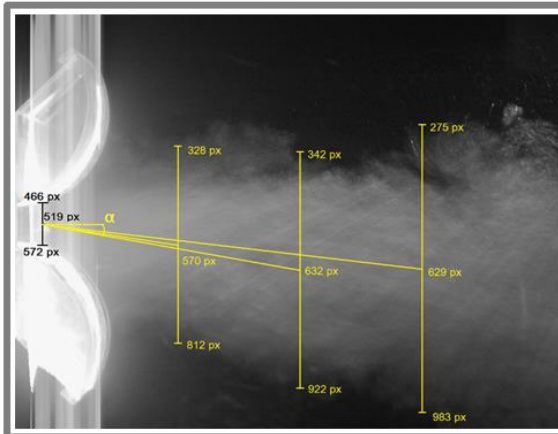


$\alpha_1 = 7,86^\circ$; $\alpha_2 = 8,45^\circ$; $\alpha_3 = 7,81^\circ$

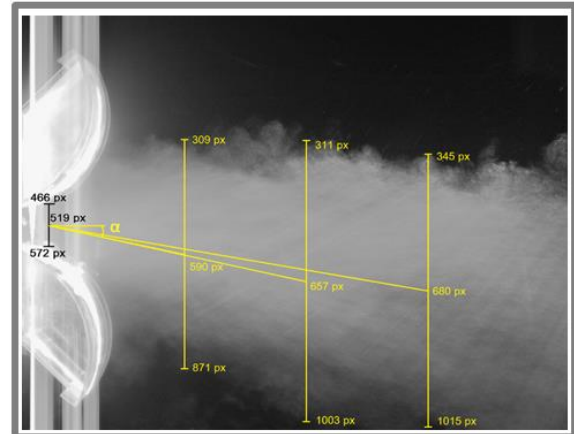
Atuadores Ligados



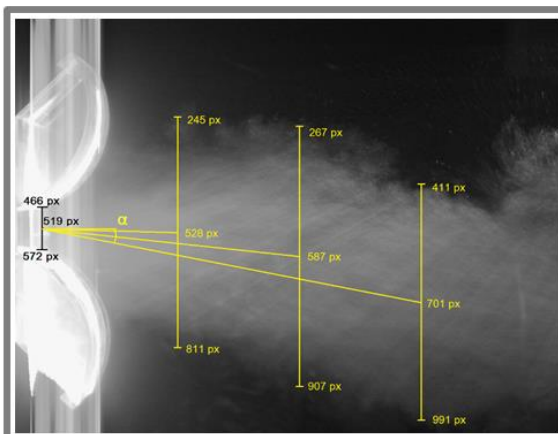
$\alpha_1 = 7,01^\circ$; $\alpha_2 = 11,43^\circ$; $\alpha_3 = 11,51^\circ$



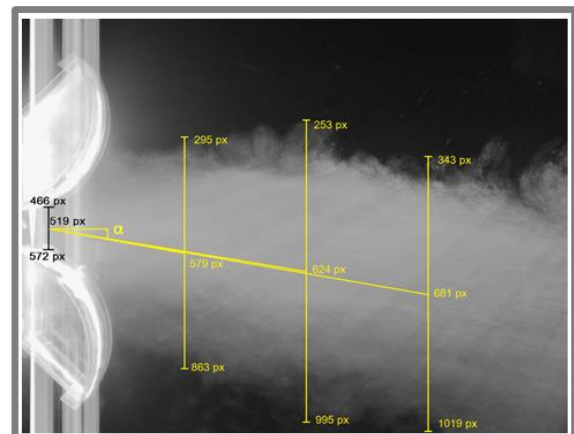
$\alpha_1 = 8,71^\circ$; $\alpha_2 = 10,12^\circ$; $\alpha_3 = 6,72^\circ$



$\alpha_1 = 12,04^\circ$; $\alpha_2 = 12,30^\circ$; $\alpha_3 = 9,79^\circ$



$\alpha_1 = 1,55^\circ$; $\alpha_2 = 6,13^\circ$; $\alpha_3 = 11,04^\circ$



$\alpha_1 = 10,21^\circ$; $\alpha_2 = 9,42^\circ$; $\alpha_3 = 9,85^\circ$

Figura 5.15: Cálculo do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,24.

A partir da análise da visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,24, obtiveram-se os resultados que se apresentam na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,24.

Razão de velocidades = 1.24		Ângulos Medidos	Ângulo de deflexão médio
Com atuadores de plasma DBD desligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 7.86^\circ$	$\alpha = 7.60^\circ$
		$\alpha_2 = 8.45^\circ$	
		$\alpha_3 = 7.81^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 8.71^\circ$	
		$\alpha_2 = 10.12^\circ$	
		$\alpha_3 = 6.72^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 1.55^\circ$	
		$\alpha_2 = 6.13^\circ$	
		$\alpha_3 = 11.04^\circ$	
Com atuadores de plasma DBD ligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 7.01^\circ$	$\alpha = 10.40^\circ$
		$\alpha_2 = 11.43^\circ$	
		$\alpha_3 = 11.51^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 12.04^\circ$	
		$\alpha_2 = 12.30^\circ$	
		$\alpha_3 = 9.79^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 10.21^\circ$	
		$\alpha_2 = 9.42^\circ$	
		$\alpha_3 = 9.85^\circ$	

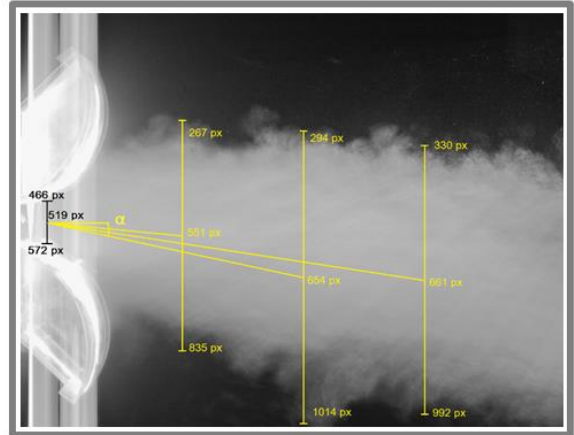
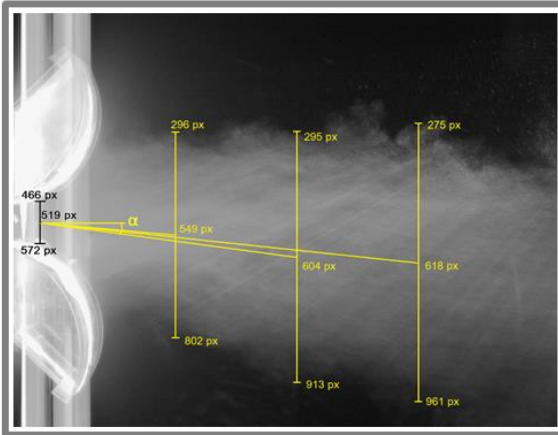
O escoamento com uma razão de velocidades igual a 1,24 apresenta um ângulo de deflexão médio de $7,60^\circ$, neste caso com atuadores de plasma de DBD desligados, enquanto que com atuadores de plasma de DBD ligados o ângulo médio é de $10,40^\circ$. Assim, mostra-se que os atuadores de plasma aumentaram o ângulo de deflexão em cerca de 3° . A semelhança da situação anterior, os atuadores de plasma mostram-se eficazes no aumento da adesão do escoamento à superfície Coanda.

A figura 5.16 expõe os resultados da visualização do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,48.

Razão de velocidades=1,48 (ventilador 1 a 0,75ms e ventilador 2 a 1,11ms)

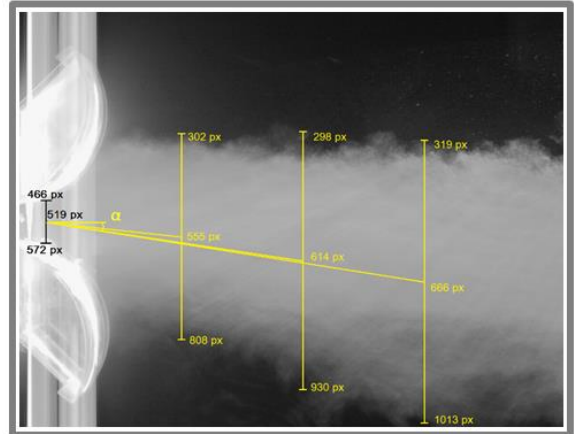
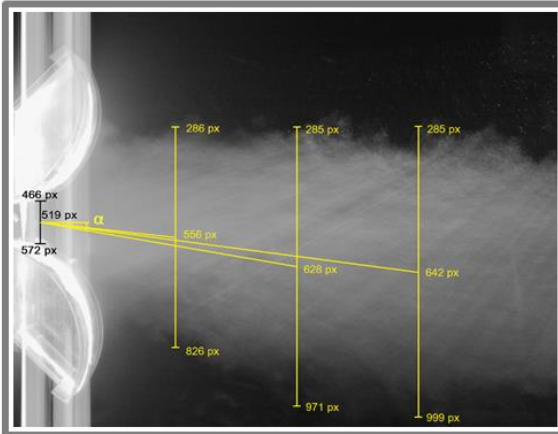
Atuadores Desligados

Atuadores Ligados



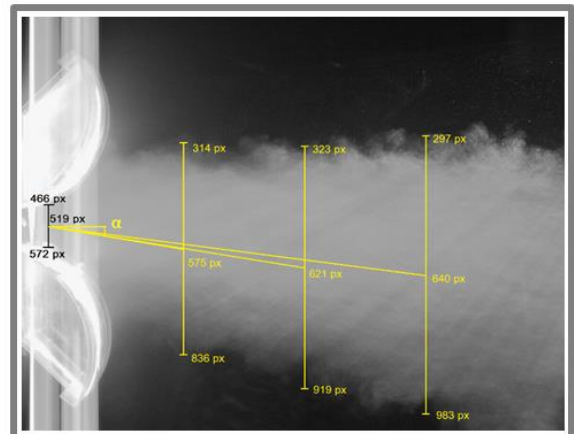
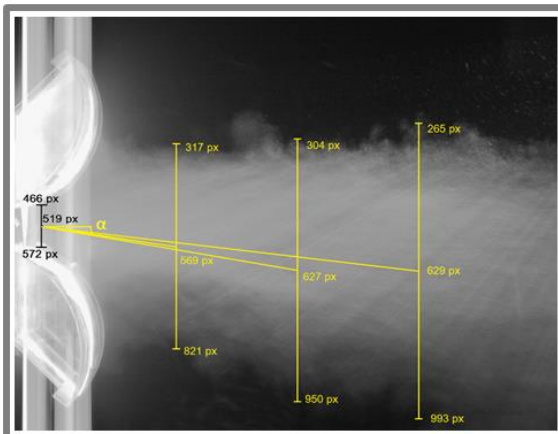
$\alpha_1= 5,15^\circ$; $\alpha_2= 7,65^\circ$; $\alpha_3= 6,06^\circ$

$\alpha_1= 5,51^\circ$; $\alpha_2= 12,04^\circ$; $\alpha_3= 8,65^\circ$



$\alpha_1= 6,34^\circ$; $\alpha_2= 9,77^\circ$; $\alpha_3= 7,51^\circ$

$\alpha_1= 6,17^\circ$; $\alpha_2= 8,54^\circ$; $\alpha_3= 8,95^\circ$



$\alpha_1= 8,54^\circ$; $\alpha_2= 9,68^\circ$; $\alpha_3= 6,72^\circ$

$\alpha_1= 9,55^\circ$; $\alpha_2= 9,15^\circ$; $\alpha_3= 7,39^\circ$

Figura 5.16: Cálculo do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,48.

Pela análise da visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,48, obtiveram-se os resultados que se apresentam na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,48.

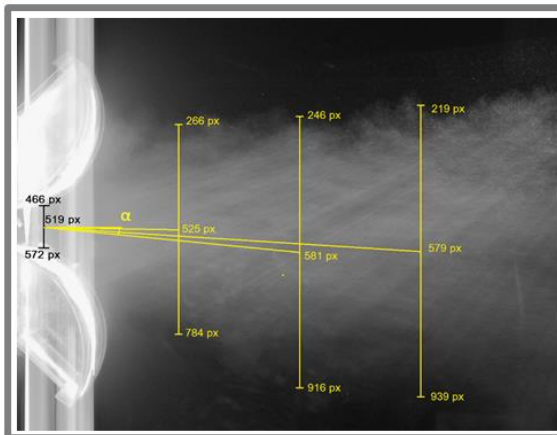
Razão de velocidades = 1.48		Ângulos Medidos	Ângulo de deflexão médio
Com atuadores de plasma DBD desligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 5.15^\circ$	$\alpha = 7.49^\circ$
		$\alpha_2 = 7.65^\circ$	
		$\alpha_3 = 6.06^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 6.34^\circ$	
		$\alpha_2 = 9.77^\circ$	
		$\alpha_3 = 7.51^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 8.54^\circ$	
		$\alpha_2 = 9.68^\circ$	
		$\alpha_3 = 6.72^\circ$	
Com atuadores de plasma DBD ligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 5.51^\circ$	$\alpha = 8.44^\circ$
		$\alpha_2 = 12.04^\circ$	
		$\alpha_3 = 8.65^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 6.17^\circ$	
		$\alpha_2 = 8.54^\circ$	
		$\alpha_3 = 8.95^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 9.55^\circ$	
		$\alpha_2 = 9.15^\circ$	
		$\alpha_3 = 7.39^\circ$	

Neste caso, a razão de velocidades é de 1,48, superior à mostrada na tabela 5.5, o que fazia prever um maior ângulo de deflexão médio, tanto com atuadores de plasma DBD ligados como com eles desligados, no entanto tal não se verificou porque as alhetas não são totalmente eficazes na redução da velocidade tangencial, caso a componente tangencial seja maior do que no caso anterior. Assim, a velocidade tangencial prejudica o efeito de deflexão pretendido e o escoamento deflete ligeiramente menos que na situação de teste anterior. Ainda assim, mostra-se mais uma vez que os atuadores de plasma DBD permitem aumentar o ângulo de deflexão do escoamento.

Na figura 5.17 podem ver-se as análises do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,72.

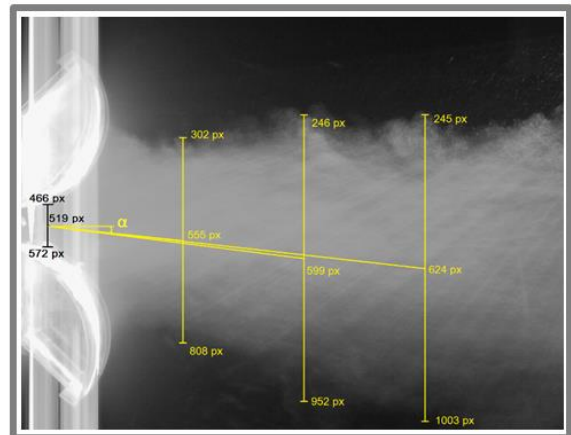
Razão de velocidades=1,72 (ventilador 1 a 0,75ms e ventilador 2 a 1,29ms)

Atuadores Desligados

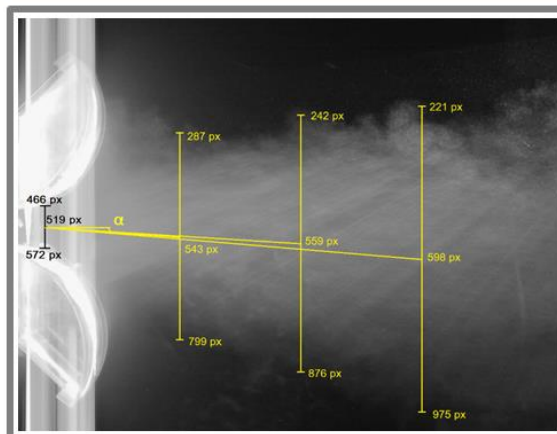


$\alpha_1 = 1,03^\circ$; $\alpha_2 = 5,59^\circ$; $\alpha_3 = 3,68^\circ$

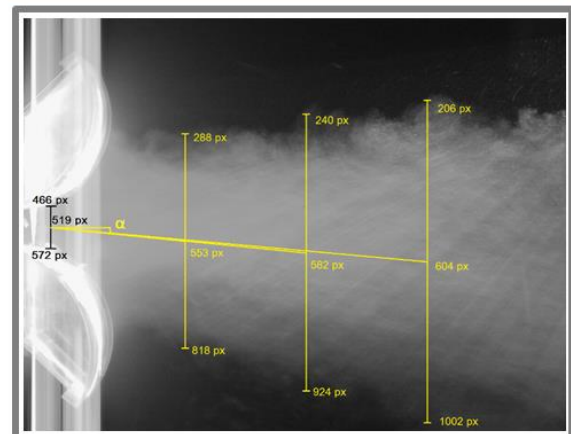
Atuadores Ligados



$\alpha_1 = 6,17^\circ$; $\alpha_2 = 7,20^\circ$; $\alpha_3 = 6,42^\circ$



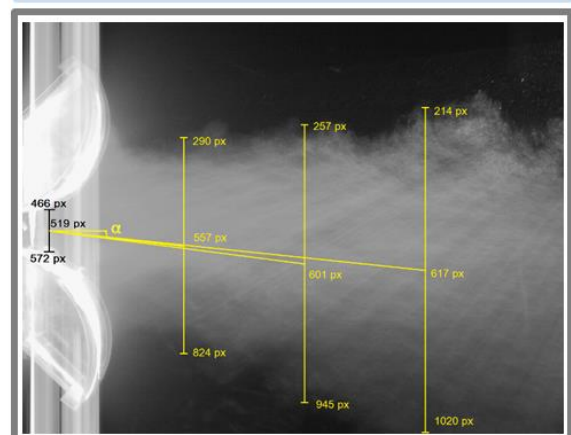
$\alpha_1 = 4,12^\circ$; $\alpha_2 = 3,62^\circ$; $\alpha_3 = 4,84^\circ$



$\alpha_1 = 5,83^\circ$; $\alpha_2 = 5,68^\circ$; $\alpha_3 = 5,21^\circ$



$\alpha_1 = 2,75^\circ$; $\alpha_2 = 4,61^\circ$; $\alpha_3 = 3,62^\circ$



$\alpha_1 = 6,51^\circ$; $\alpha_2 = 7,38^\circ$; $\alpha_3 = 6,00^\circ$

Figura 5.17: Análise do ângulo de deflexão do escoamento para uma razão de velocidades igual a 1,72.

Os resultados obtidos da análise do escoamento, para uma razão de velocidades igual a 1,72, encontram-se organizados na tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados obtidos para o teste de visualização do escoamento, e para uma razão de velocidades igual a 1,72.

Razão de velocidades = 1.72		Ângulos Medidos	Ângulo de deflexão médio
Com atuadores de plasma DBD desligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 1.03^\circ$	$\alpha = 3.76^\circ$
		$\alpha_2 = 5.59^\circ$	
		$\alpha_3 = 3.68^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 4.12^\circ$	
		$\alpha_2 = 3.62^\circ$	
		$\alpha_3 = 4.84^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 2.75^\circ$	
		$\alpha_2 = 4.61^\circ$	
		$\alpha_3 = 3.62^\circ$	
Com atuadores de plasma DBD ligados	Primeira Imagem	$\alpha_1 = 6.17^\circ$	$\alpha = 6.27^\circ$
		$\alpha_2 = 7.20^\circ$	
		$\alpha_3 = 6.42^\circ$	
	Segunda Imagem	$\alpha_1 = 5.83^\circ$	
		$\alpha_2 = 5.68^\circ$	
		$\alpha_3 = 5.21^\circ$	
	Terceira Imagem	$\alpha_1 = 6.51^\circ$	
		$\alpha_2 = 7.38^\circ$	
		$\alpha_3 = 6.00^\circ$	

Tal como já se tinha verificado nos testes efetuados com uma razão de velocidades igual a 1,48, também aqui se verifica que à medida que se aumenta a razão de velocidades o ângulo de deflexão que se obtém é menor. Isto acontece porque a velocidade tangencial aumenta e as alhetas tornam-se incapazes de reduzir eficazmente esta componente da velocidade do escoamento. Devido a isso os jatos de ar misturam-se e não reproduzem de forma tão eficaz o efeito de deflexão. Ainda assim, os atuadores de plasma DBD continuam a mostrar-se eficazes no aumento do ângulo de deflexão do escoamento.

Capítulo 6

Conclusão e trabalhos futuros

No presente capítulo apresentam-se as conclusões retiradas com a realização deste trabalho e fazem-se ainda sugestões referentes a possíveis trabalhos futuros de continuação desta investigação.

6.1. Conclusões

A presente dissertação enquadrou-se no âmbito dos trabalhos experimentais referentes ao Projeto Europeu ACHEON. Como parte das tarefas desse projeto foi caracterizado o escoamento na tubeira HOMER, analisou-se ainda o benefício da aplicação de atuadores de plasma de DBD, designadamente verificando se estes permitem um aumento do ângulo de deflexão máximo do escoamento na tubeira.

Os ensaios com atuadores de plasma de DBD permitiram verificar que a camada de dielétrico tem uma grande influência no seu desempenho, tanto a nível de durabilidade como a nível da tensão máxima atingida aos terminais do atuador. Após a experiência obtida com DBD's feitos de diferentes camadas de dielétrico concluiu-se que a melhor opção passa pela utilização de um dielétrico misto composto por camadas de policarbonato e fita de kapton.

O resultado das análises PIV demonstrou que, a capacidade da tubeira em defletir o escoamento é fortemente afetada pela componente tangencial da velocidade que é produzida pelos turbo-ventiladores. Esta componente da velocidade contribui para a mistura entre os dois escoamentos iniciais e impede o aumento da deflexão no jato de saída. A implementação de alhetas, em forma de cruz, nas duas entradas de ar da tubeira minimiza a componente tangencial da velocidade, o que contribui para reduzir o efeito negativo que esta velocidade apresenta sobre o desempenho do dispositivo. Com as alhetas o jato de saída é mais estável e são obtidos valores mais elevados para a deflexão do escoamento.

Verificou-se que a tubeira HOMER permite efetivamente realizar uma deflexão do ângulo do escoamento à saída. No entanto esta tubeira introduz perdas muito elevadas, o que indica que o seu interior necessita de ser otimizado, uma vez que as velocidades do escoamento na entrada da tubeira faziam prever maiores gamas de velocidades à saída. Em particular atendendo ao caudal máximo medido quando os turbo-ventiladores estavam fora da tubeira.

Durante este trabalho foi concebido um sistema PIV de tipo *Open Source*. Foi feito um trabalho de seleção, e compatibilização, dos diferentes componentes necessários à

implementação do sistema PIV. Nesta fase de desenvolvimento foi ainda detetado um *bug* no *software* de aquisição e controlo da câmara de vídeo, o qual foi relatado à empresa. Esta, após efetuar a devida correção enviou uma nova versão do *software*. O sistema de medição PIV, de tipo *Open Source*, foi implementado com êxito e revelou-se uma ferramenta fundamental para analisar quantitativamente o campo de escoamento da geometria em estudo.

Assim, a técnica de medição PIV mostrou-se uma forma eficaz de obter um mapeamento vetorial da velocidade do escoamento à saída da tubeira. O que permitiu ainda o cálculo computacional das respetivas linhas de corrente do escoamento, bem como a representação gráfica dos seus perfis de velocidade. No entanto, e para o caso específico do presente trabalho, concluiu-se que o sistema de PIV implementado é incompatível com os atuadores de plasma de DBD. Quando estes estão ativos, a luz emitida durante a formação do plasma interfere com a luminosidade produzida pela folha de luz laser. Assim, apenas foi possível efetuar um estudo qualitativo, baseado em visualização de escoamento, para os casos em que os atuadores a plasma estavam ligados.

As imagens de visualização do escoamento permitiram verificar quantitativamente, usando o PIV, que a tubeira HOMER deflete o jato de saída e atinge um valor máximo de $7,6^\circ$, sem os atuadores a plasma ligados. Os atuadores de plasma de DBD mostraram-se eficazes no aumento da deflexão do jato, quando aplicados na superfície de Coanda, contribuindo para um aumento do ângulo de deflexão em todas as condições de teste realizadas. Com a implementação de atuadores de plasma de DBD conseguiu-se obter um ângulo máximo de deflexão do jato de $10,40^\circ$. A análise das imagens de visualização do escoamento permitiu ainda concluir que as alhetas, implementadas na entrada, não são completamente eficazes na sua ação de redução da componente tangencial da velocidade. Pois que com o aumento da razão de velocidades, do escoamento diferencial de entrada, o ângulo de deflexão diminui ao invés de aumentar.

6.2. Trabalhos futuros

Numa perspetiva de prosseguir com este trabalho, nomeadamente no que diz respeito à tubeira HOMER, seria útil estudar novas soluções que permitam uma eficaz redução da componente tangencial da velocidade produzida pelos turbo-ventiladores. Para além disso, seria de todo o interesse estudar a influência do número de atuadores de plasma de DBD que são aplicados na superfície Coanda da tubeira, bem como o seu posicionamento. Outro ponto de interesse seria a realização de testes com diferentes configurações de atuadores de plasma. Até ao momento foram sempre colocados transversalmente ao escoamento, mas também podem ser colocados na direção do escoamento.

Além das questões referentes ao escoamento na tubeira, com e sem atuadores a plasma, um outro aspecto desta dissertação foi o desenvolvimento do sistema PIV. Como verificámos não foi possível usar a medição PIV para o caso em que os atuadores a plasma estavam ativos. Seria, portanto, muito interessante conseguir implementar um sistema PIV que permitisse a obtenção de resultados com os atuadores de plasma de DBD ativos. A solução para este problema pode ser de duas formas. A primeira seria adquirir uma câmara capaz de ter tempos de exposição e transferência de dados da ordem dos 100 μ s, em lugar dos atuais milissegundos, em contínuo. Pois nesse caso o obturador eletrónico só ficaria aberto o tempo equivalente ao do pulso de luz laser, e a luminosidade do DBD não teria um efeito tão significativo. Esta opção tem um custo muito elevado. A segunda opção passa por filtrar a luminosidade, deixando apenas passar o comprimento de onda do laser. Para tal terá de se garantir que o comprimento de onda do laser não consta do espectro de luz emitida pelo DBD. O custo deste sistema é mais baixo.

Referências Bibliográficas

- Adrian, R.J.: “Multi-point Optical Measurements of Simultaneous Vectors in Unsteady Flow - A Review”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.7 n.º 2 (1986), pp. 127-145
- Adrian, R.J.: “Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.23 (1991), pp. 261-304
- Bach, W.; Mohwald, K.; Engl, L.; Drobler, B.; Hartz, K.: “Particle Image Velocimetry in thermal Spraying”, *Advanced Engineering Materials*, Vol.8 n.º7 (2006), pp. 650-653
- Baughn, J.W.; Porter, C.O.; Peterson, B.L.; McLaughlin, T.E.; Enloe, C.L.; Font, G.I.; Baird, C.: “Momentum Transfer for an Aerodynamic Plasma Actuator with an Imposed Boundary Layer”, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2006-168, 9-12 Janeiro 2006, Reno, Nevada
- Bevilaqua, P.M.; Columbus, O.H.; Lee, J.D.: “Design of Supersonic Coanda Jet Nozzle”, *AIAA 22nd Aerospace Sciences Meeting*, n.º 84-0333, 9-12 Janeiro 1984, Reno, Nevada
- Bichal, A.; Altman, A.; Briones, A.M.; Stouffer, S.: “Comparative Study of Three Flow Diagnostic Techniques Applied to a Nearbody Flowfield”, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, n.º 2009-884, 5-8 Janeiro de 2009, Orlando, Florida
- Catrakis, H.J.: “Pulsed Plasma Arrays for Turbulence Control”, University of California, 2012
- Cattafesta, L.N.; Sheplak, M.: “Actuators for Active Flow Control”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 43 (2011), pp. 247-272
- Corke, T.C.; Matlis, E.: “Phased Plasma Arrays for Unsteady Flow Control”, *American Institute of Aeronautics & Astronautics*, 2000
- Corke, T.C.; Jumper, E.J.; Post, M.L.; Orlov, D.; McLaughlin, T.E.: “Application of Weakly-ionized Plasmas as Wing Flow-control Devices”, *American Institute of Aeronautics & Astronautics*, 2002
- Corke, T.C.; Post, M.L.: “Overview of Plasma Flow Control: Concepts, Optimization, and Applications”, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2005-563, 10-13 Janeiro 2005, Reno, Nevada
- Corke, T.C.; Mertz, B.: “Plasma Flow Control Optimized Airfoil”, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2006-1208, 9-12 Janeiro 2006, Reno, Nevada
- Corke, T.C.; Post, M.L.; Orlov, D.M.: “SDBD Plasma Enhanced Aerodynamics: Concepts Optimization and Applications”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 43 (2007), pp. 193-217
- Corke, T.C.; Post, M.L.; Orlov, D.M.: “Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications”, *Experiments in Fluids*, Vol. 46 (2009), pp. 1-26

- Corke, T.C.; Enloe, C.L.; Wilkinson, S.P.: “Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.42 (2010), pp. 505-529
- Dabiri, D.: “Digital Particle Image Thermometry/Velocimetry: A Review”, *Experiments in Fluids*, Vol.46 (2009), pp. 191-241
- Dabiri, D.: “Cross-Correlation Digital Particle Image Velocimetry - A Review”, *Department of Aeronautics and Astronautics*, 2014
- Das, S. S.; Páscoa, J.; Trancosi, M.; Dumas, A.: “Solving Operational Effects produced by 3D Flows on the Novel ACHEON system”, *Journal of Scientific and Industrial Research*, (2013) (Em revisão)
- Do, H.; Kim, W.; Mungal, M.G.; Cappelli, M.A.: “Bluff Body Flow Separation Control Using Surface Dielectric Barrier Discharges”, *45th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2007-939, 8-11 Janeiro 2007, Reno, Nevada
- Dong, B.; Bauchire, J.M.; Pouvesle, J.M.; Magnier, P.; Hong, D.: “Experimental Study of a DBD Surface Discharge for the Active Control of Subsonic Airflow”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41 (2008), pp. 1-9
- Dumas, A.; Trancossi, M.; Giuliani, I.; Madonia, M.: “Ugello capace di deviare in modo dinâmico e controllabile un getto sintético senza parti meccaniche in movimento e suo sistema di controllo”, IT. Patent N. re2011A000065, 2011
- Durscher, R.; Roy, S.: “Novel Multi-Barrier Plasma Actuators for Increased Thrust”, *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, n.º 2010-965, 4-7 Janeiro 2010, Orlando, Florida
- Enloe, C.L.; McLaughlin, T.E.; VanDynken, R.D.; Kachner, K.D.: “Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology”, *AIAA Journal*, Vol. 42 n.º3 (2004a), pp. 589-594
- Enloe, C.L.; McLaughlin, T.E.; VanDynken, R.D.; Kachner, K.D.: “Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects”, *AIAA Journal*, Vol. 42 n.º3 (2004b), pp. 595-604
- Enloe, C.L.; McLaughlin, T.E.; Font, G.I.; Baughn, J.W.: “Parameterization of Temporal Structure in the Single-Dielectric-Barrier Aerodynamic Plasma Actuator”, *AIAA Journal*, Vol. 44 n.º 6 (2006), pp. 1127-1136
- Fernandes, B.M.M.: “Estudo Experimental do Escoamento a Jusante das Rodas e Estator de Uma Turbina Wells Biplano Através de Particle Image Velocimetry”, *Instituto Superior Técnico*, 2011
- Ferry, J.W.: “Thrust Measurement of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator and Power Requirements for Aerodynamic Control”, *Missouri University of Science and Technology*, 2010
- Font, G.I.: “Boundary-Layer Control with Atmospheric Plasma Discharges”, *AIAA Journal*, Vol. 44 n.º44 (2006), pp. 1572-1578

- Font, G.I.; Enloe, C.L.; McLaughlin, T.E.: "Plasma Volumetric Effects on the Force Production of a Plasma Actuator", *AIAA Journal*, Vol. 48 n.º9 (2010), pp. 1869-1874
- Forliti, D.J.; Strykowski, P.J.; Debatin, K.: "Bias and Precision Errors of Digital Particle Image Velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol.28 (2000), pp. 436-447
- Forte, M.; Leger, L.; Pons, J.; Moreau, E.; Touchard, G.: "Plasma Actuators for Airflow Control: Measurement of the Non-Stationary Induced Flow Velocity", *Journal of Electrostatics*, Vol. 63 (2005), pp. 929-936
- Forte, M.; Jolibois, J.; Pons, J.; Moreaus, E.; Touchard, G.; Cazalens, M.: "Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity: Application to Airflow Control", *Experiments in Fluids*, Vol. 43 (2007), pp. 917-928
- Fox, R.W.; Pritchard, P.J.; McDonald, A.T.: "Introdução à Mecânica dos Fluidos", Livros Técnicos e Científicos Editora, 7ª edição, 2009
- Frunzulica, F.; Dumirache, A.; Dumirescu, H.; Preoru, O.: "Flow Control of Separating Boundary Layer on the Coanda Surface", *4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)*, n.º 612, 2011
- Gad-El-Hak, M.: "Flow Control: "Passive, Active and Reactive Flow Management", *Cambridge University Press*, 2000
- Gilchrist, A.R.; Gregory-Smith, D.G.: "Compressible Coanda Wall Jet: Predictions of Jet Structure and Comparison with Experiment", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 9 n.º3 (1988), pp. 286-295
- Grant, I.: "Particle Image Velocimetry: A Review", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 211 (1997), pp. 55-76
- Gregory-Smith, D.G.; Gilchrist, A.R.: "The Compressible Coanda Wall Jet - An Experimental Study of Jet Structure and Breakaway", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 8 n.º2 (1987), pp. 156-164
- Gregory-Smith, D.G.; Hawkins, M.J.: "The Development of an Axisymmetric Curved Turbulent Wall Jet", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 12 n.º 4 (1991), pp. 323-330
- Gregory-Smith, D.G.; Senior, P.: "The Effects of Base Steps and Axisymmetric on Supersonic Jets Over Coanda Surfaces", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.15 n.º 4 (1994), pp. 291-298
- Hamamatsu: "Digital CCD Camera C10600-10B Instruction Manual", 2013a
- Hamamatsu: "HCLImage Live - User's Guide version 4.1.6", 2013b
- He, C.; Corke, T.C.: "Plasma Flaps and Slats: An Application of Weakly Ionized Plasmas Actuators", *Journal of Aircraft*, Vol. 46 n.º 3 (2009), pp. 864-873
- Hennissen, J.; Temmerman, W.; Berghmans, J.; Allaert, K.: "Modelling of Axial Fans for Electronic Equipment", *Thermal Management of Electroni Systems II*, (1997), pp. 309-318

- Hinsch, K.D.: “Particle Image Velocimetry”, *Speckle Metrology*, (1993), pp. 235-323
- Houghton, E.L.; Carpenter, P.W.; Collicott, S.H.; Valentine, D.T.: “Aerodynamics for Engineering Students”, *Elsevier*, 6ª Edição, 2013
- Houser, N.M.; Gimeno, L.; Hanson, R.E.; Goldhawk, T.; Simpson, T.; Lavoie, P.: “Microfabrication of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 201 (2013), pp. 101-104
- Hyun, K.T.; Chun, C.H.: “The Wake Flow Control Behind a Circular Cylinder Using Ion Wind”, *Experiments in Fluids*, Vol. 35 (2003), pp. 541-552
- Information Unlimited: “PVM500/DIDRIVE10 Hydrogen and Chemical Production, Corona Cell and Plasma and Dielectric Driver Instructions”, 2013
- Jahanmiri, M.: “Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications”, *Chalmers University of Technology*, 2011
- Juvet, P.J.D.: “Control of High Reynolds Number Round Jets”, *Stanford University*, 1993
- Kalathoor, S.P.: “Solid Particle Seeding Using Cyclone Gas Flow for Optical Flow Visualization: Design Parameters to be Considered”, *Advances in Aerospace Science and Applications*, Vol. 3 n.º2 (2013), pp. 57-64
- Keane, R.D.; Adrian, R.J.; Zhang, Y.: “Super-resolution Particle Imaging Velocimetry”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 6 (1995), pp. 754-768
- Kim, H.D.; Rajesh, G.; Setoguchi, T.; Matsuo, S.: “Optimization Study of a Coanda Ejector”, *Journal of Thermal Science*, Vol. 15 n.º 4 (2006), pp. 331-336
- Kotsonis, M.; Veldhuis, L.: “Experimental Study on Dielectric Barrier Discharge Actuators Operating in Pulse Mode”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 108 n.º 113304 (2010), pp. 1-9
- Kozlov, A.V.; Thomas, F.O.: “Active Noise Control of Bluff-Body Flows Using Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators”, *15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, n.º 2009-3245, 11-13 Maio 2009, Miami, Florida
- Kozlov, A.V.: “Plasma Actuators for Bluff Body Flow Control”, *University of Notre Dame*, 2010
- Kunhardt, E.E.: “Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure Nonequilibrium Plasmas”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 28 n.º1 (2000), pp. 189-200
- Langmuir, I.: “Oscillations in Ionized Gases”, *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, Vol. 14 (1928), pp. 627-637
- Lauterborn, W.; Vogel, A.: “Modern Optical Techniques in Fluid Mechanics”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.16 (1984), pp. 223-244
- Matsuo, S.; Setoguchi, T.; Kudo, T.: “Study on the Characteristics of Supersonic Coanda Jet”, *Journal of Thermal Science*, Vol. 7 n.º 3 (1998), pp. 165-175

- McLaughlin, T.E.; Munska, M.D.; Vaeth, J.P.; Dauwalter, T.E.; Goode, J.R.: "Plasma-Based Actuators for Cylinder Wake Vortex Control", *2nd AIAA Flow Control Conference*, n.º 2004-2129, 28 Junho -1 Julho 2004, Portland, Oregon
- Mertz, B.E.; Corke, T.C.: "Time-Dependent Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Modeling", *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, n.º 2009-1083, 5-8 Janeiro 2009, Orlando, Florida
- Miozzi, M.; Lalli, F.; Romano, G.P.: "Experimental Investigation of a Free-Surface Turbulent Jet with Coanda Effect", *Experiments in Fluids*, Vol. 49 (2010), pp. 341-353
- Moreau, E.: "Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40 (2007), pp. 605-636
- Moreau, E.; Sosa, R.; Artana, G.: "Electric Wind Produced by Surface Plasma Actuators: A New Dielectric Barrier Discharge Based on a Three-Electrode Geometry", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41 n.º 115204 (2008), pp. 1-12
- Morris, S.C.; Corke, T.C.; VanNess, D.; Stephens, J.; Douville, T.: "Tip Clearance Control Using Plasma Actuators", *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2005-782, 10-13 Janeiro 2005, Reno, Nevada
- Olivotto, C.: "Fluidic Elements Based on Coanda Effect", *Incas Bulletin*, Vol. 2 n.º 4 (2010), pp. 163-172
- Opaits, D.F.; Neretti, G.; Zaidi, S.H.; Shneider, M.N.; Miles, R.B.; Likhanskii, A.V.; Macheret, S.O.: "DBD Plasma Actuators Driven by a Combination of Low Frequency Bias Voltage and Nanosecond Pulses", *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2008-1372, 7-10 Janeiro de 2008, Reno, Nevada
- Orlov, D.M.: "Modelling and Simulation of Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators", *University of Notre Dame*, 2006
- Orlov, D.M.; Font, G.I.; Edelstein, D.: "Characterization of Discharge Modes of Plasma Actuators", *AIAA Journal*, Vol. 46 n.º 12 (2008), pp. 3142-3148
- Osela: "StreamLine Laser System Instruction Manual version 1.1", 2013
- Páscoa, J.C.; Dumas, A.; Trancossi, M.; Stewart, P.; Vucinic, D.: "A Review of Thrust-Vectoring in Support of a VTOL Non-Moving Mechanical Propulsion System", *Central European Journal of Engineering*, Vol. 3 n.º 3 (2013), pp. 374-388
- Patankar, U.M.; Sridhar, K.: "Three-Dimensional Curved Wall Jets", *Journal of Basic Engineering*, (1972)
- Paul, A.R.; Joshi, S.; Jindal, A.; Maurya, S.P.; Jain, A.: "Experimental Studies of Active and Passive Flow Control Techniques Applied in a Twin Air-Intake", *The Science World Journal*, Vol. 2013 (2013), pp. 1-8
- Pico Technology: "Quick Start Guide", 2008

- Porter, C.O.; McLaughlin, T.E.; Enloe, C.L.; Font, G.I.; Roney, J.; Baughn, J.W.: “Boundary Layer Control Using a DBD Plasma Actuator”, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2007-786, 8-11 Janeiro 2007, Reno, Nevada
- Post, M.L.; Corke, T.C.: “Separation Control Using Plasma Actuators Dynamic Stall Control on an Oscillating Airfoil”, *2nd AIAA Flow Control Conference*, n.º 2004-2517, 28 Junho - 1 julho 2004a, Portland, Oregon
- Post, M.L.; Corke, T.C.: “Separation Control Using Plasma Actuators - Stationary & Oscillating Airfoils”, *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2004-841, 5-8 Janeiro 2004b, Reno, Nevada
- Post, M.L.; Corke, T.C.: “Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators”, *AIAA Journal*, Vol. 42 n.º 11 (2004), pp. 2177-2184
- Post, M.L.: “Plasma Actuators for Separation Control on Stationary and Oscillating Airfoils”, *University of Notre Dame*, 2004
- Post, M.L.; Corke, T.C.: “Flow Control with Single Dielectric Barrier Plasma Actuators”, *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, n.º 2005-4630, 6-9 Junho de 2005, Toronto, Ontario Canada
- Post, M.L.; Corke, T.C.: “Separation Control Using Plasma Actuators: Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil”, *AIAA Journal*, Vol. 44 n.º 12 (2006), pp. 3125-3135
- Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S.; Kompenhans, J.: “Particle Image Velocimetry: A Practical Guide”, *Springer*, 2^a Edição, 2007
- Roth, J.R.: “Aerodynamic Flow Acceleration Using Paraelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma”, *Physics of Plasmas*, Vol. 10 n.º 5 (2003), pp. 2117-2126
- Roth, J.R.; Dai, X.: “Optimization of the Aerodynamic Plasma Actuator as an Electrohydrodynamic (EHD) Electrical Device”, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, n.º 2006-1203, 9-12 Janeiro de 2006, Reno, Nevada
- Ryerson, W.G.; Schwenk, K.: “A Simple, Inexpensive System for Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) in Biomechanics”, *Journal of Experimental Zoology*, Vol. 317 n.º 2 (2012). pp. 127-140
- Saeed, B.: “Exploring the Aerodynamic Characteristics of a Blown Annular-Wing for V/STOL Aircraft”, *Brunel University*, 2010
- Sanjuan, C.; Sánchez, M.N.; Enríquez, R.; Celemín, M.R.H.: “Experimental PIV Techniques Applied to the Analysis of Natural Convection in Open Joint Ventilated Facades”, *Energy Procedia*, Vol. 30 (2012), pp. 1216-1225
- Santhanakrishnan, A.; Jacob, J.D.; Suzen, Y.B.: “Flow Control Using Plasma Actuators and Linear/Annular Plasma Synthetic Jet Actuators”, *3rd AIAA Flow Control Conference*, n.º 2006-3033, 5-8 Junho 2006, San Francisco, CA
- Schatzman, D.; Thomas, F.O.: “Turbulent Boundary-Layer Separation Control with Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators”, *AIAA Journal*, Vol. 48 n.º 8 (2010), pp. 1620-1634

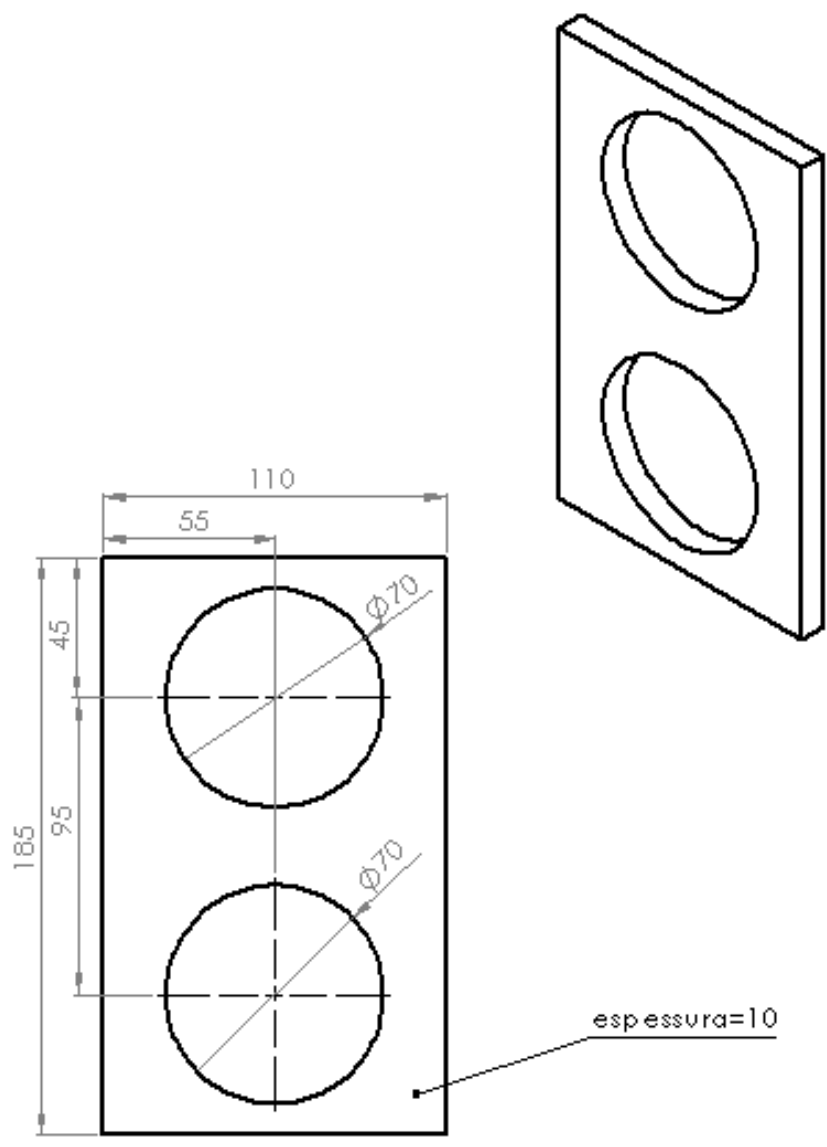
- Shcherbakov, Y.V.; Ivanov, N.S.; Baryshev, N.D.; Frolovskij, V.S.; Syssoev, V.S.: “Drag Reduction by AC Streamer Corona Discharges Along a Wing-Like Profile Plate”, *31st AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, n.º 2000-2670, 19-22 Junho de 2000, Denver, CO
- Sosa, R.; Moreau, E.; Touchard, G.; Artana, G.: “Stall Control at High Angle of Attack with Periodically Excited EHD Actuators”, *35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, n.º 2004-2738, 28 Junho -1 Julho de 2004, Portland, Oregon
- Sosa, R.; Artana, G.: “Steady Control of Laminar Separation Over Airfoils with Plasma Sheet Actuators”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 64 (2006), pp. 604-610
- Sosa, R.; Artana, G.; Moreau, E.; Touchard, G.: “Stall Control at High Angle of Attack with Plasma Sheet Actuators”, *Experiments in Fluids*, Vol. 42 (2007), pp. 143-167
- Sung, Y.; Kim, W.; Mungal, M.G.; Cappelli, M.A.: “Aerodynamic Modification of Flow Over Bluff Objects by Plasma Actuation”, *Experiments in Fluids*, Vol. 41 (2006), pp. 479-486
- Sutton, M.A.; Wolters, W.J.; Peters, W.H.; Ranson, W.F.; McNeil, S.R.: “Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method”, *Image and Vision Computing*, Vol. 1 n.º 3 (1983), pp. 133-139
- Thielicke, W.; Stamhuis, E.: “PIVlab- Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for Matlab”, 2005
- Thomas, F.O.; Kozlov, A.; Corke, T.C.: “Plasma Actuators for Bluff Body Flow Control”, *3rd AIAA Flow Control Conference*, n.º 2006-2845, 5-8 Junho de 2006, San Francisco, California
- Thomas, F.O.; Corke, T.C.; Iqbal, M.; Kozlov, A.; Schatzman, D.: “Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control”, *AIAA Journal*, Vol. 47 n.º 9 (2009), pp. 2169-2178
- Trancossi, M.; Dumas, A.: “ACHEON: Aerial Coanda High Efficiency Orienting-jet Nozzle”, *SAE Technical Paper*, n.º 2011-01-2737, 2011a
- Trancossi, M.; Dumas, A.: “Coanda Synthetic Jet Deflection Apparatus and Control”, *SAE Technical Paper*, n.º 2011-01-2590, 2011b
- Trancossi, M.: “An Overview of Scientific and Technical Literature on Coanda Effect Applied to Nozzles”, *SAE Technical Paper*, n.º 2011-01-2591, 2011
- Trancossi, M.; Dumas, A.; Das, S.S.; Páscoa, J.: “Design Methods of Coanda Effect Nozzle with Two Streams”, *Incas Bulletin*, Vol. 6 n.º1 (2014), pp. 83-95
- Wang, L.; Luo, Z.; Xia, Z.; Liu, B.; Deng, X.: “Review of Actuators for High Speed Active Flow Control”, *Science China Technological Sciences*, Vol. 55 n.º8 (2012), pp. 2225-2240

- Westerweel, J.: "Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application", *Delft University Press*, 1993
- Williams, D.R.; MacMynowski, D.G.: "Brief History of Flow Control", *Fundamentals and Applications of Modern Flow Control*, Vol. 231 (2009), pp. 1-20
- Wing, D.J.: "Static Investigation of Two Fluidic Thrust-Vectoring Concepts on a Two-Dimensional Convergent-Divergent Nozzle", *National Aeronautics and Space Administration*, 1994
- Yagiz, B.; Kandil, O.; Pehlivanoglu, Y.V.: "Drag Minimization Using Active and Passive Flow Control Techniques", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 17 (2012), pp. 21-31
- Zito, J.C.; Arnold, D.P.; Durscher, R.J.; Roy, S.: "Investigation of Impedance Characteristics and Power Delivery for Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators", *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, n.º 2010-964, 4-7 Janeiro de 2010, Orlando, Florida

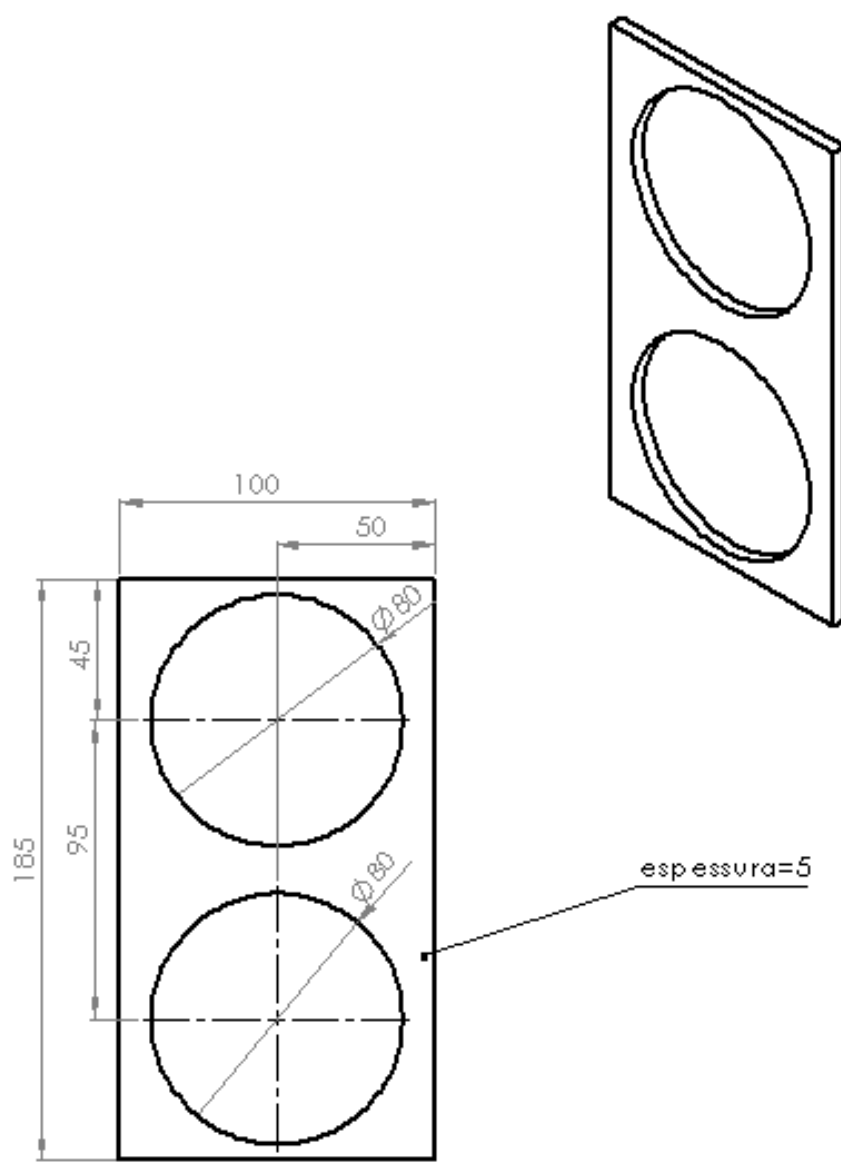
Anexo I

Desenhos de execução das peças da tubeira HOMER

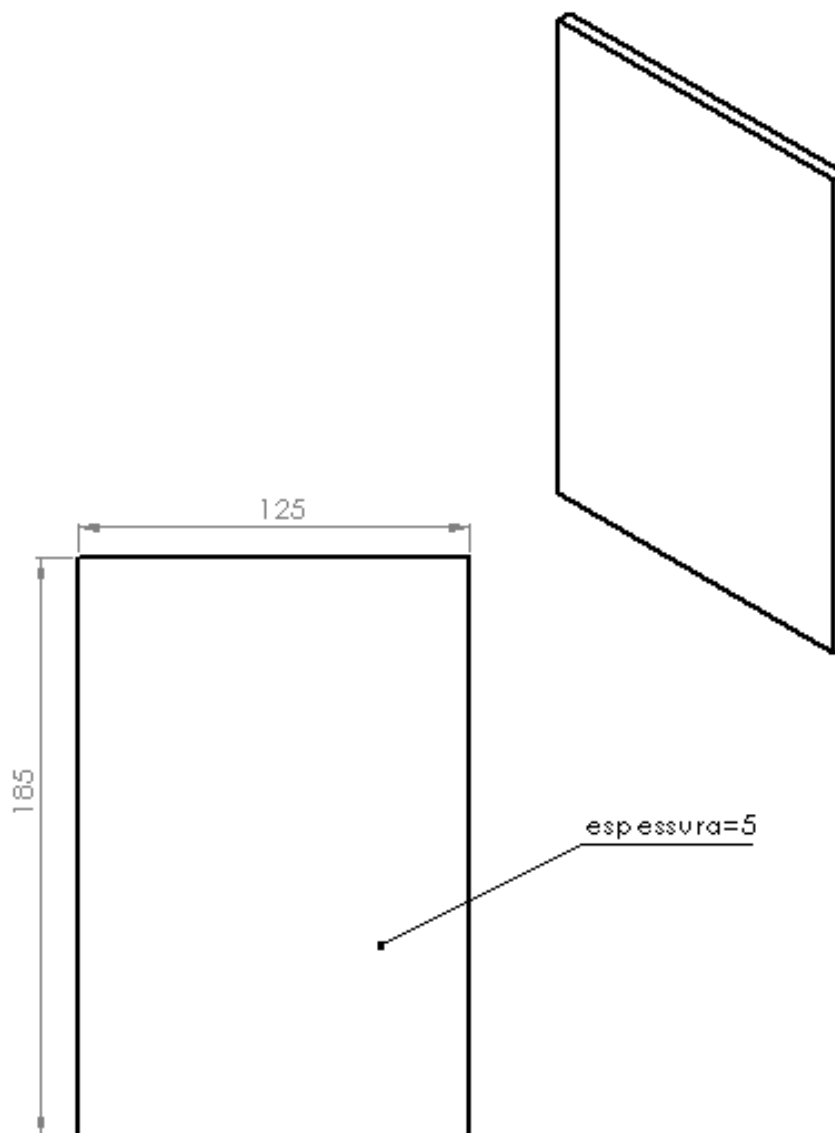
Seguidamente apresentam-se os desenhos de execução realizados para cada uma das peças constituintes da tubeira HOMER.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ANGLES:		FINISH:		OTHER AND SURFACE SHARP EDGES:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
						A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$			
NAME	SIGNATURE	DATE				REV			
DRAWN									
CHECKED									
APPROVED									
WFO									
D.A.		MATERIAL		DWG NO		Inlet 2		A4	
		WEIGHT		SCALE		SHEET 2 OF 14			



UNITS DIMENSIONS SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		TOLERANCES: SURFACE FINISH THREADS ANGLES		DIPS AND BEVEL SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
						A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$			
DRAWN		SIGNATURE		DATE		BY			
CHECKED									
APPROVED									
MTC									
D.A.				MATERIAL		DWG NO		A4	
						Inlet 3			
				WEIGHT		SCALE		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
FOTRAHCS:
LINEAR
ANGULAR

TOLERANCE

SHARP AND
BEFORE SHARP
EDGES

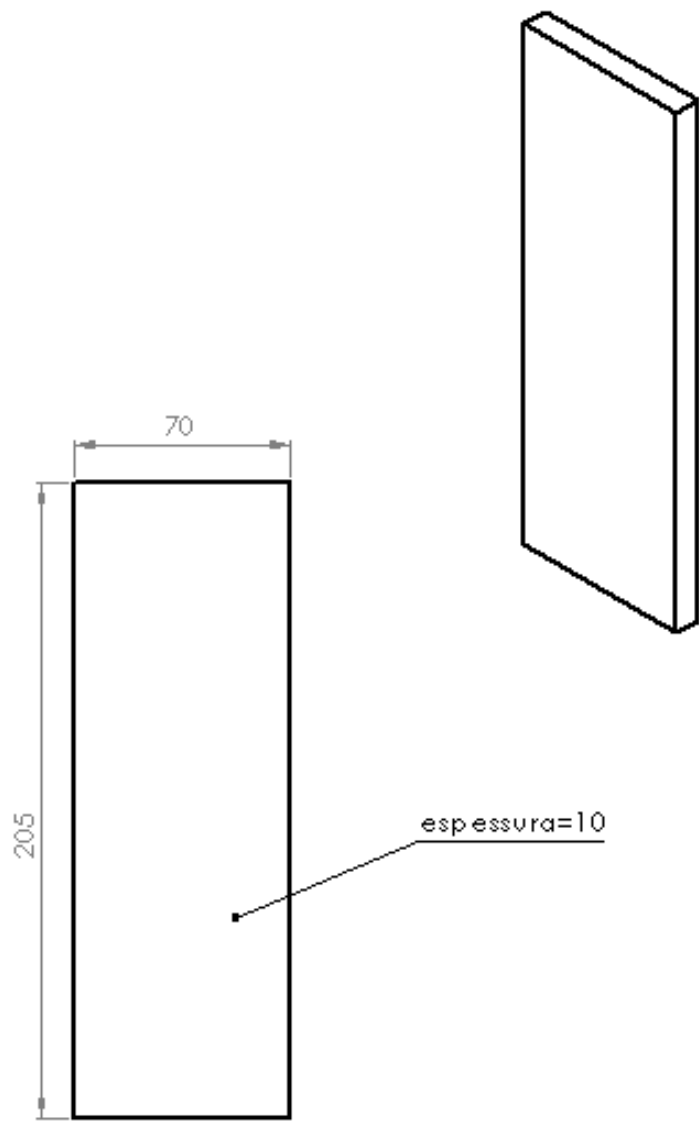
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

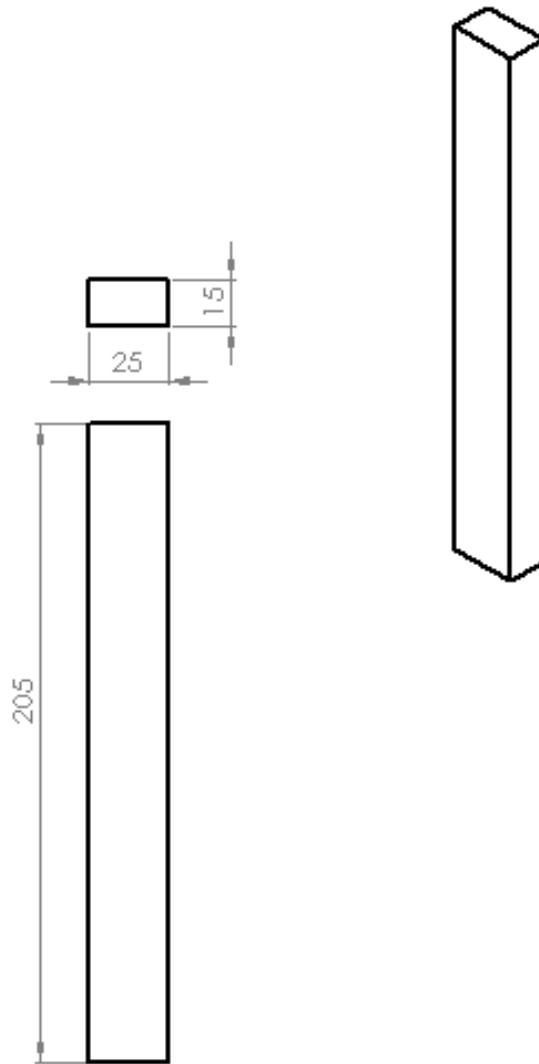
A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DESIGN					
CHECK					
APPROV					
MFG					
QA					

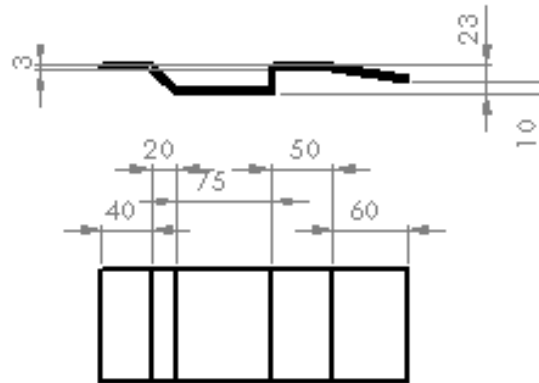
MATERIAL		DWG NO		Inlet 4	A4
WEIGHT		SCALE			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: FRACTIONS: DECIMALS: ANGLES:		FINISH:		DIPS AND BEVEL SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
						A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$			
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE			MATERIAL			
CHECKED									
APPROVED									
DATE									
				MATERIAL		DWG NO		Part 1	
				MATERIAL		SCALE 1:1		A4	
				MATERIAL		SCALE 1:1		SHEET 2 OF 14	



UNITS DIMENSIONS SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR ANGULAR				TOLERANCE AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		TYPICAL	
						A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$			
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE			MATERIAL			
CHECKED									
APPROVED									
WFO									
Q.A.						DWG NO	Part 2		A4
						SCALE	SHEET # OF 1		



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA
MATERIAL

IND

DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA
MATERIAL

CONJUNTO DE DESENHO

EXERCÍCIO

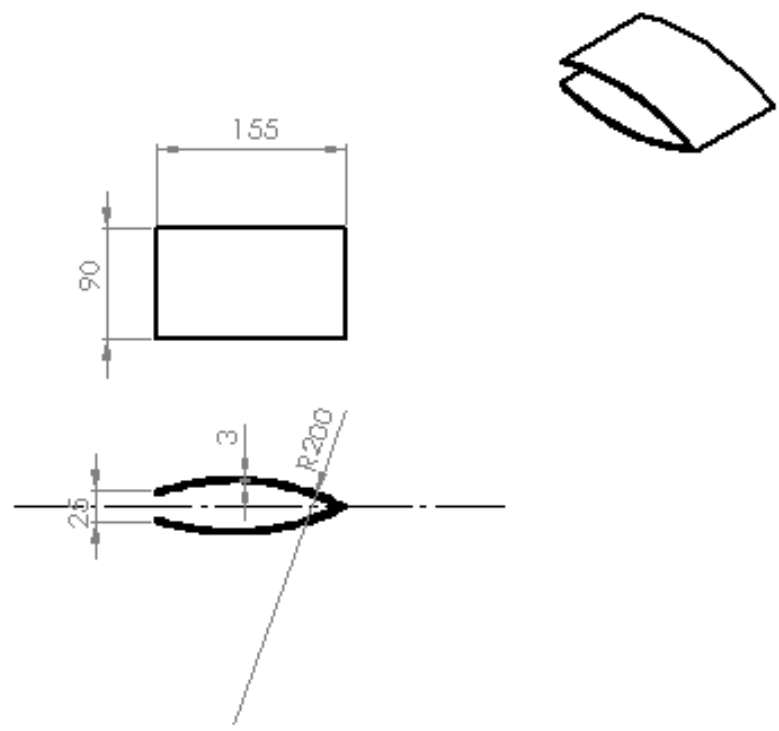
A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$

DATA	DESENHADO	REVISADO	PROF.	DISCIPLINA

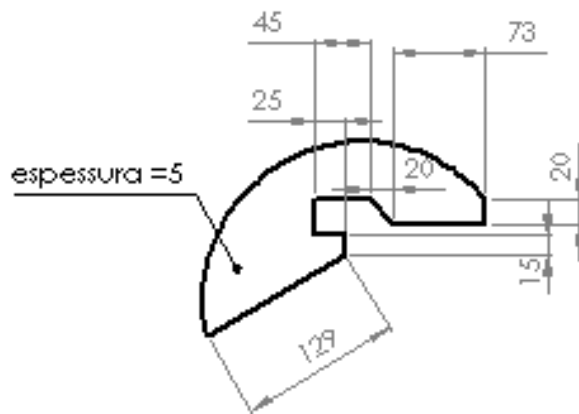
PROF.	
DISCIPLINA	
EXERCÍCIO	
DATA	
PROF.	
DISCIPLINA	
EXERCÍCIO	
DATA	

Part 5

A4



UNITS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH: TOLERANCES: HORIZONTAL ANGULAR						A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$	
	NAME	DESIGNED	DATE			MFG	
DRAWN							
CHECKED							
APPROVED							
WFO							
Q.A.				MATERIAL	DWG NO	Part 6	
						A4	
				WEIGHT	SCALE	SHEET 10 OF 14	



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
 INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

NOME

DISCIPLINA DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

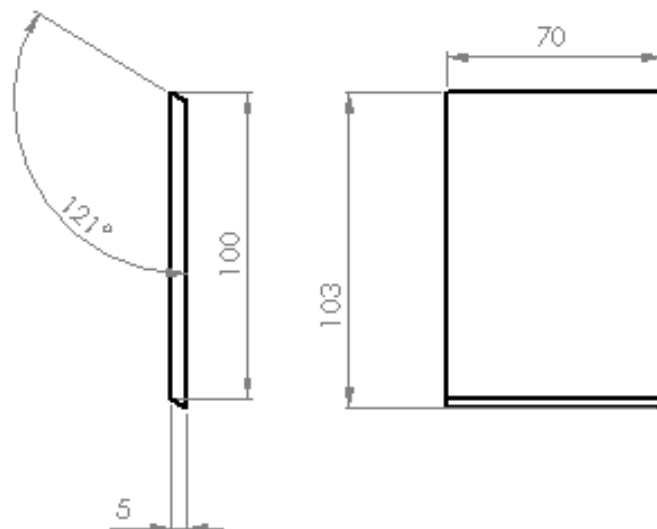
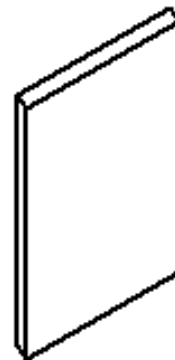
PROFESSOR RESPONSÁVEL

RAZÃO

A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$

	NOME	RAZÃO	DATA
ALUNO			
PROFESSOR			
ASSISTENTE			
VIC			
CA			

TÍTULO		NÚMERO	
Round 1		A4	
FECHA		PROFESSOR	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH
TOLERANCES:
FRACTIONS
DECIMALS

FINISH

OTHER AND
REFER SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

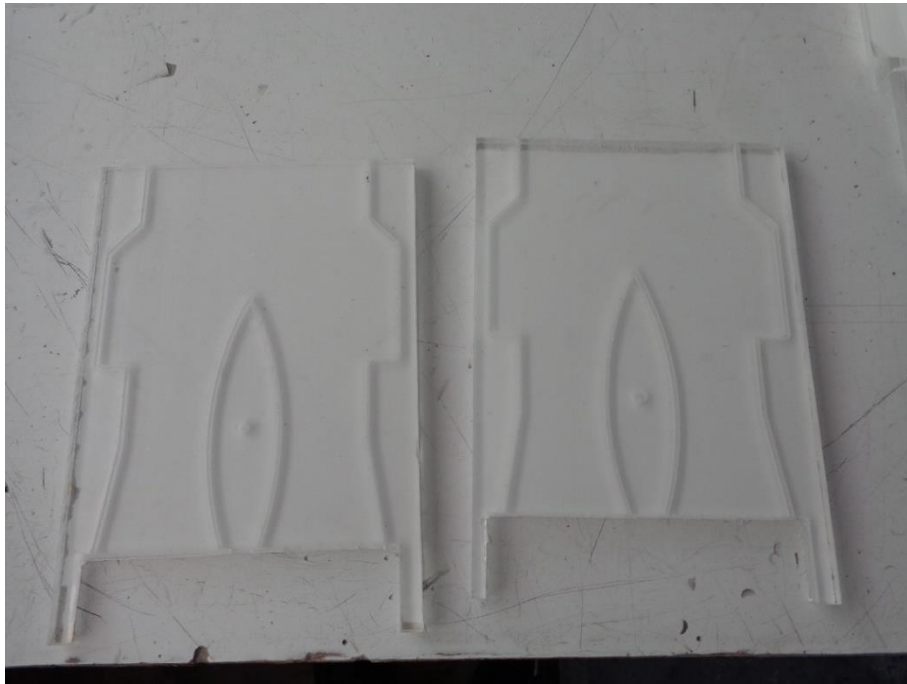
A tolerância de todas as dimensões é de $\pm 0,5$

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DESIGN					
CHECK					
APPROV					
MFG					
QA					

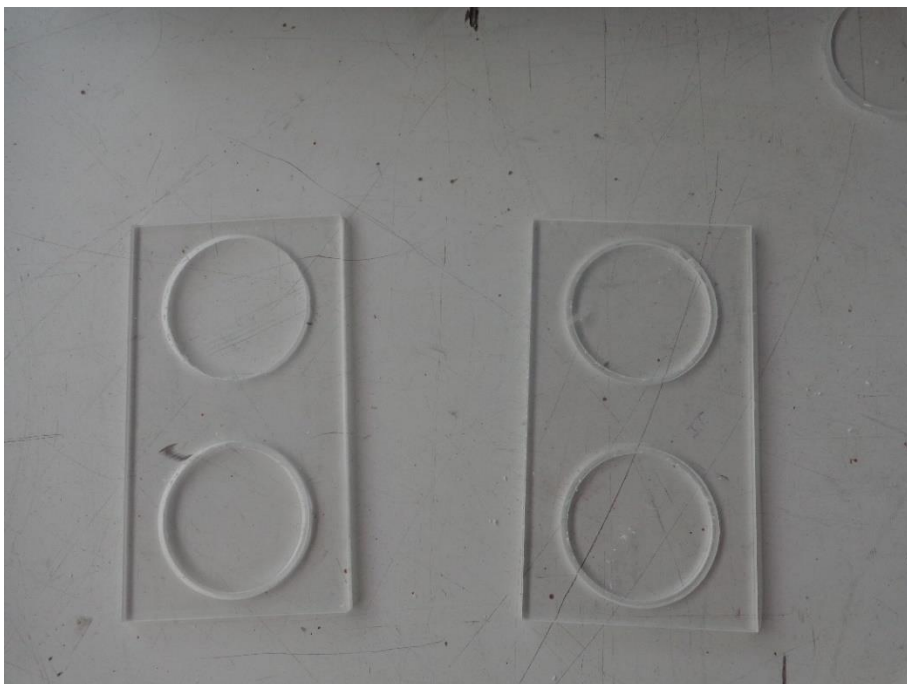
REV	
DWG NO	Round 4
SCALE	
SHEET 14 OF 14	A4

Anexo II

Imagens da construção da tubeira HOMER



a)



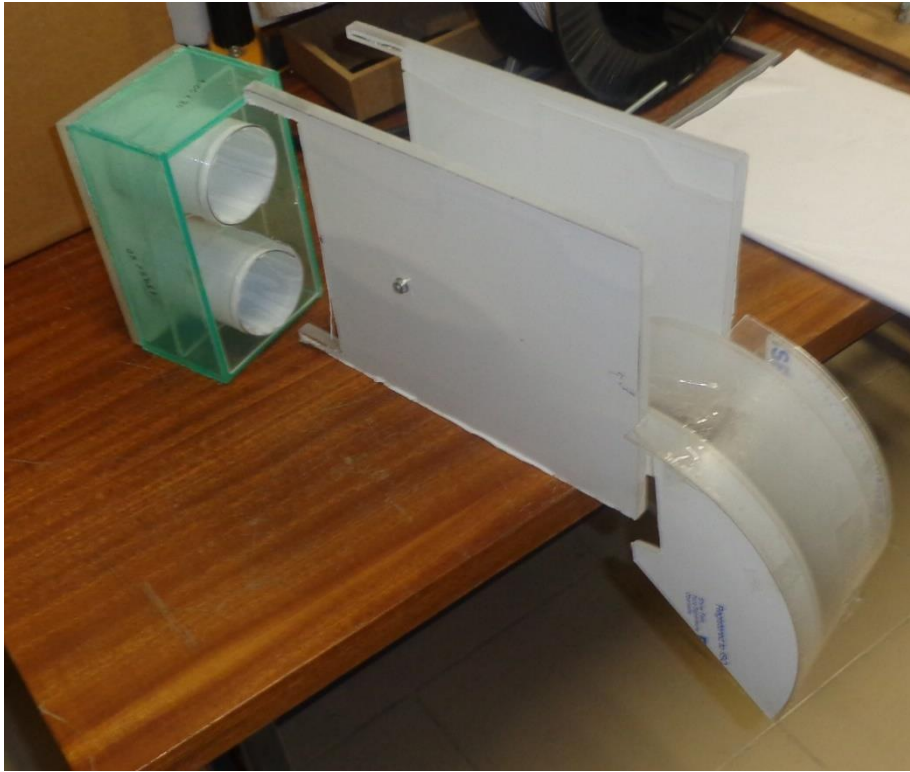
b)



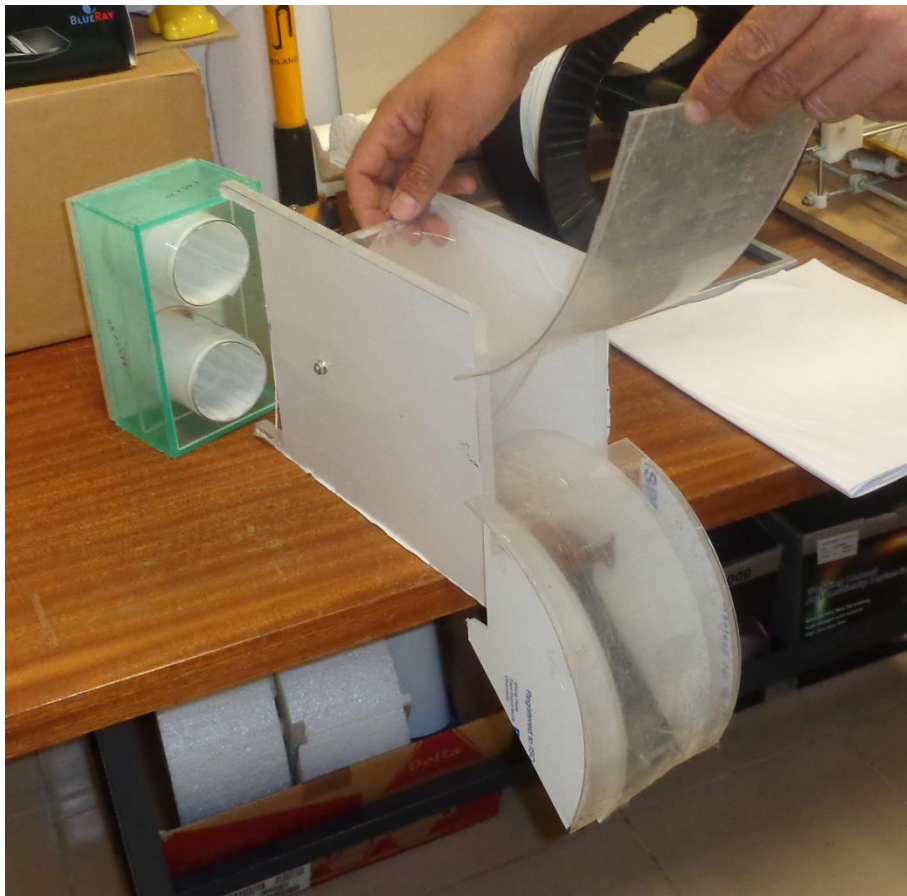
c)



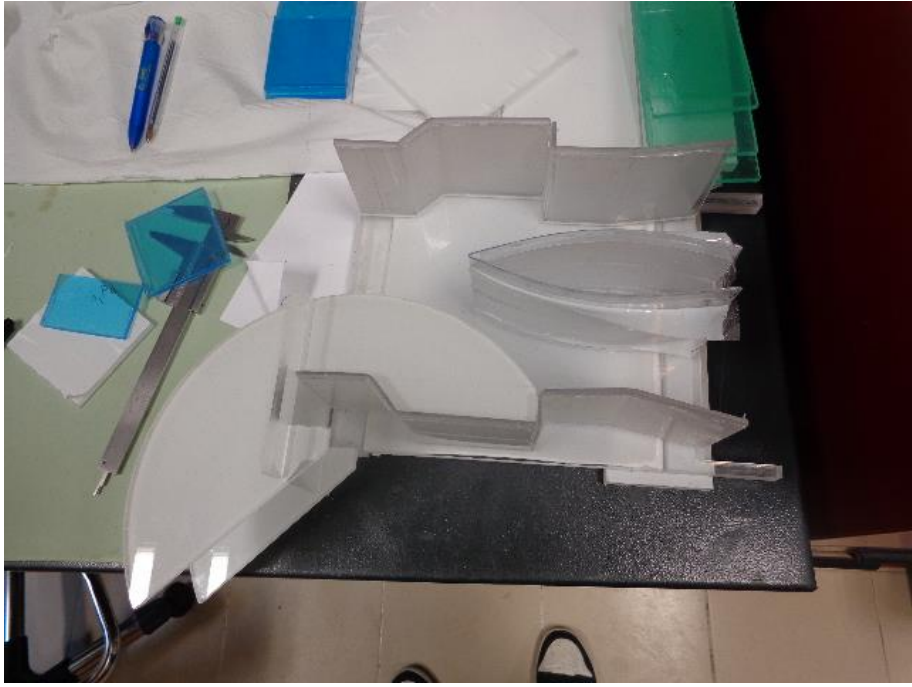
d)



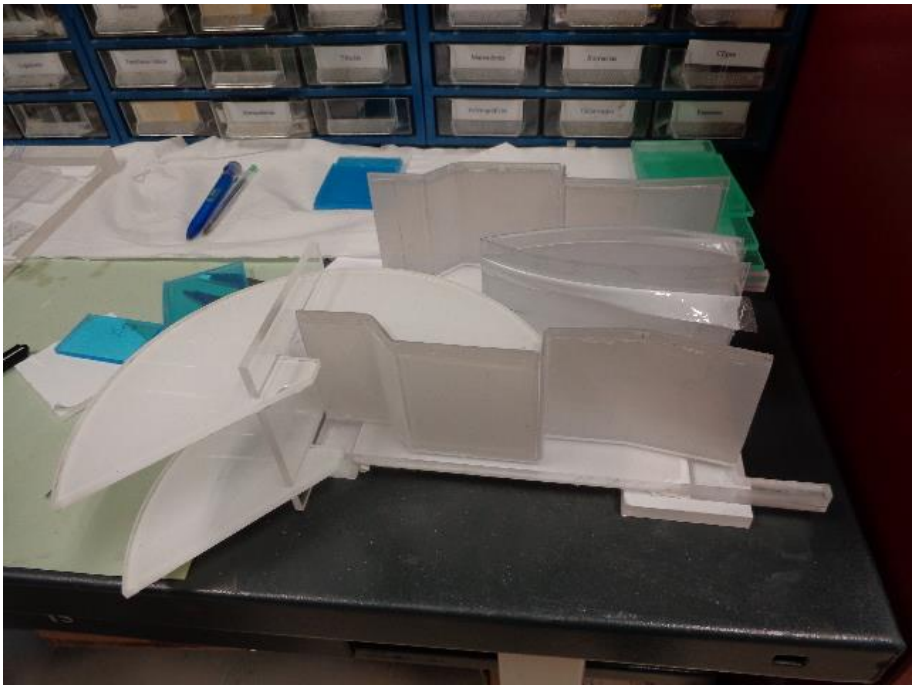
e)



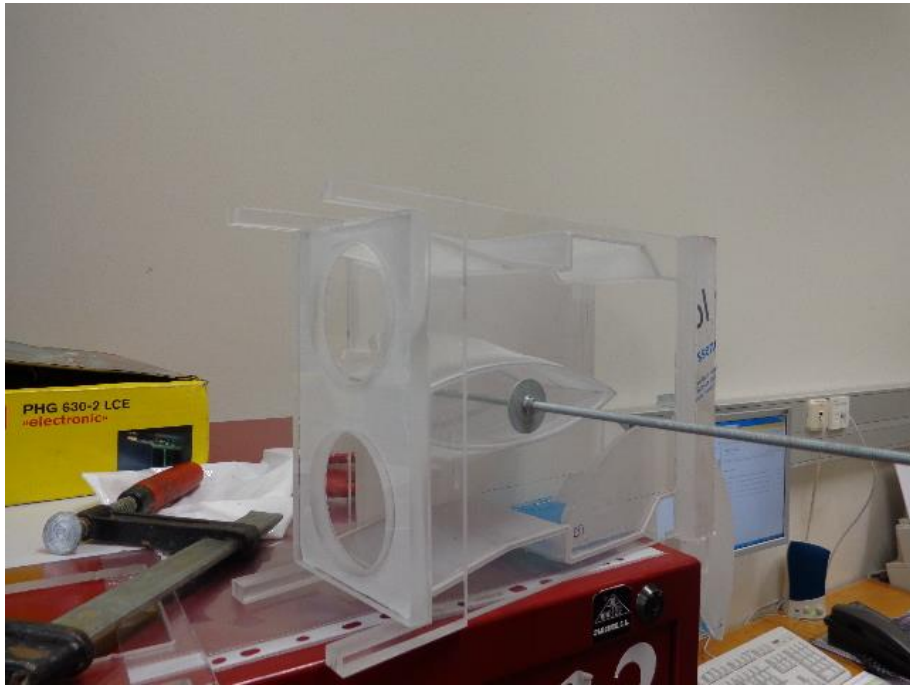
f)



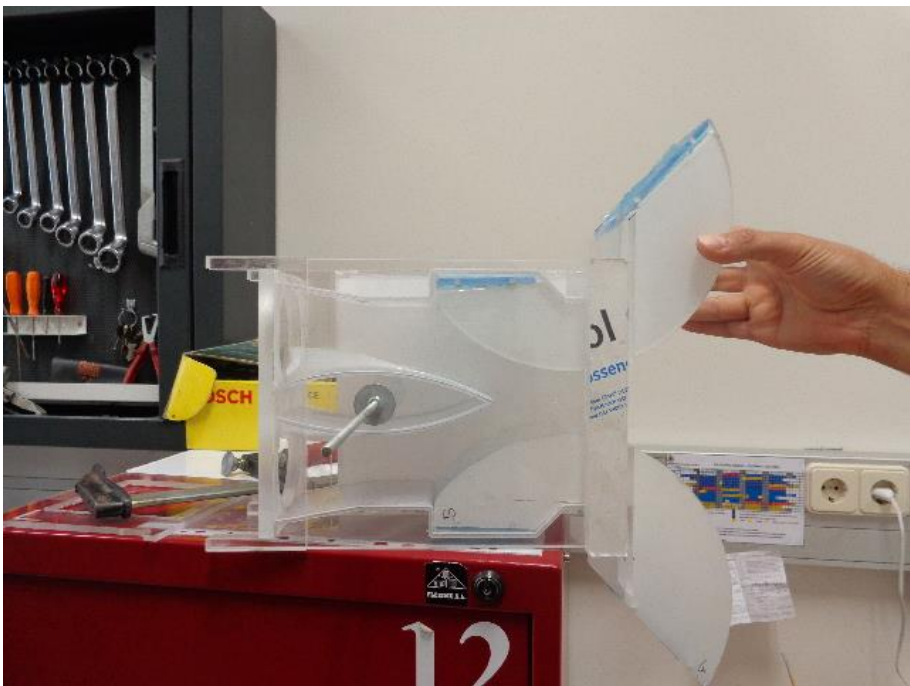
g)



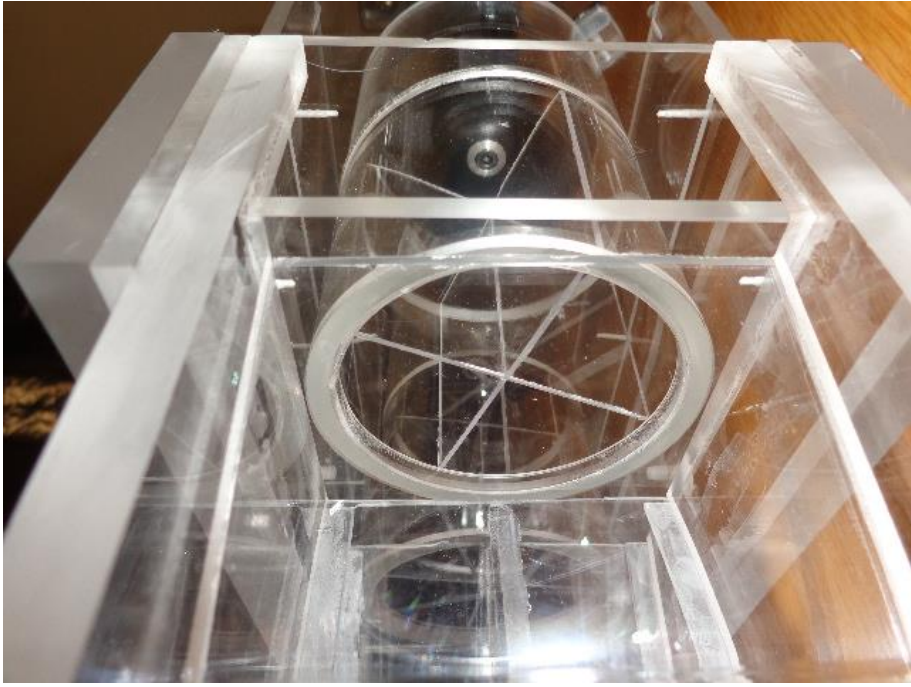
h)



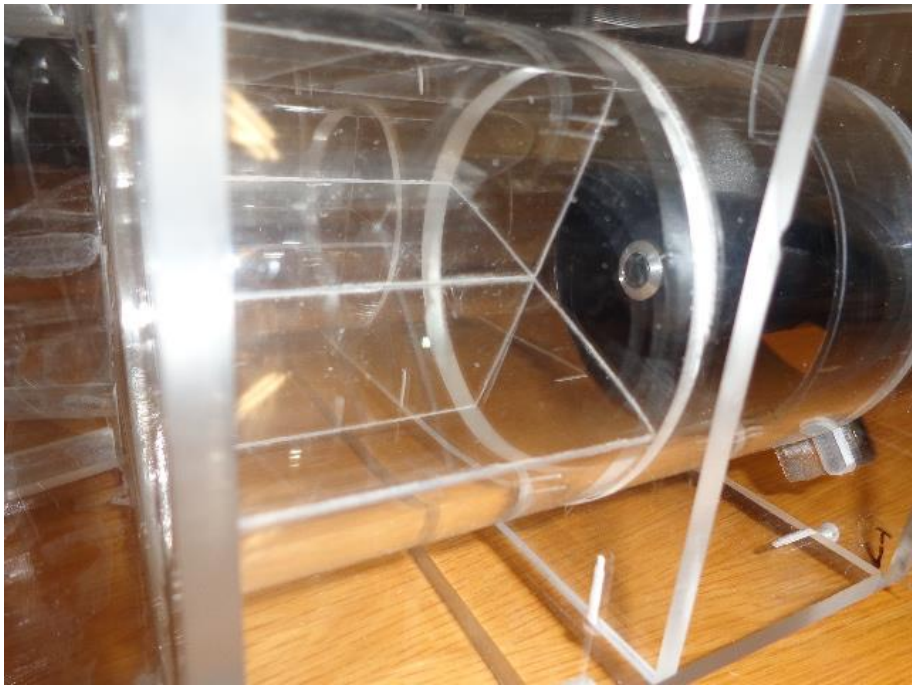
i)



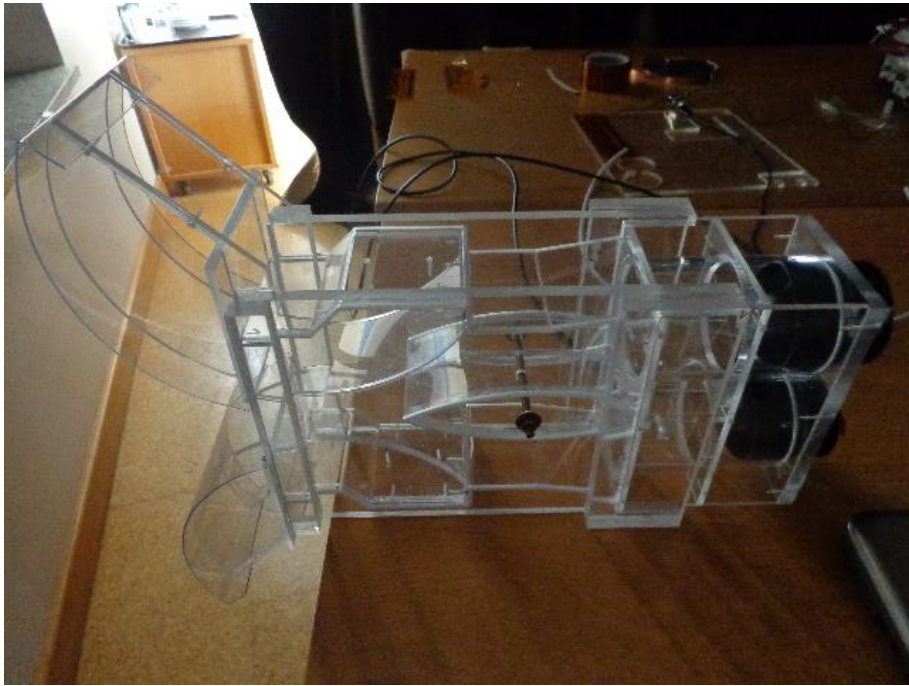
j)



k)



l)



m)

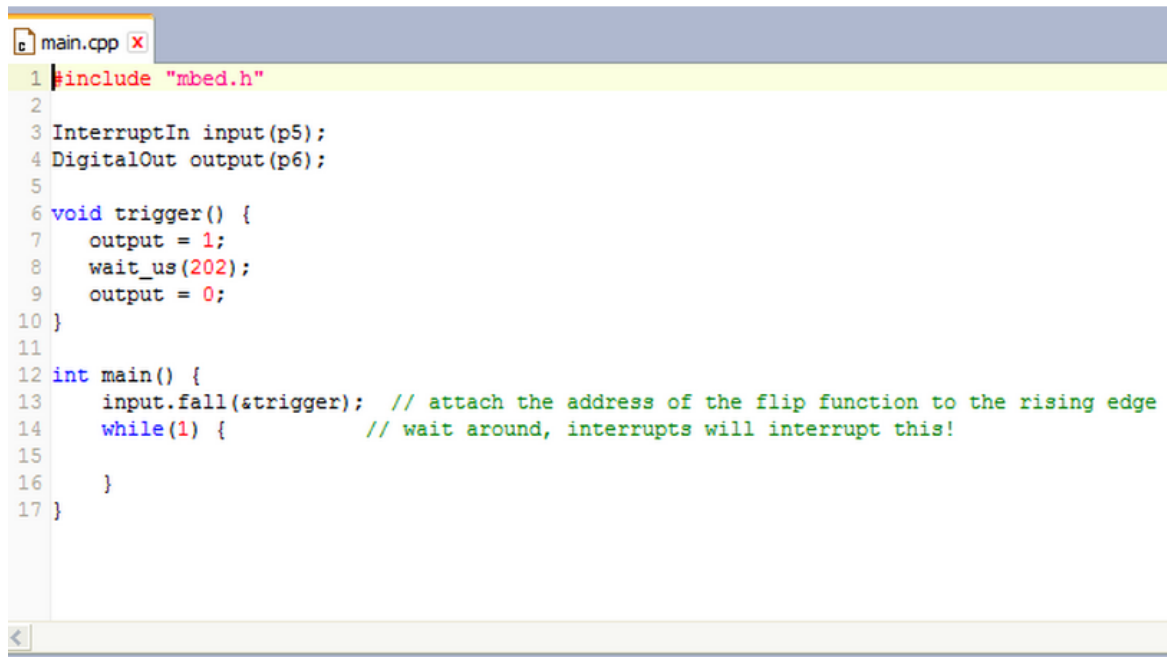


n)

Fig.II-1: Imagens das diferentes fases de construção da tubeira.

Anexo III

Código de programação do microcontrolador mbed NXP LPC 1768



```
main.cpp x
1 #include "mbed.h"
2
3 InterruptIn input(p5);
4 DigitalOut output(p6);
5
6 void trigger() {
7     output = 1;
8     wait_us(202);
9     output = 0;
10 }
11
12 int main() {
13     input.fall(&trigger); // attach the address of the flip function to the rising edge
14     while(1) {           // wait around, interrupts will interrupt this!
15     }
16 }
17 }
```

Fig.III-1: Código de programação do microcontrolador mbed NXP LPC 1768

Anexo IV

Procedimento para medições PIV com HCLImage Live e PivLab

O software *HCLImage Live* permite realizar a aquisição de imagens a partir da câmara CCD C10600-10B ORCA-R2. Este *software* possui um mostrador de imagem que permite ver em tempo real as imagens que estão a ser adquiridas e um painel lateral que permite ajustar as configurações pretendidas para a aquisição de imagens. Antes do início de cada aquisição capta-se uma imagem de calibração. A imagem de calibração corresponde a uma fita milimétrica, no plano de medições, que permitirá atribuir a relação entre pixéis e distância real. A aquisição desta imagem realiza-se a partir do painel lateral do software *HCLImage Live* na secção “Capture”. Este painel pode ser visto na figura IV-1 bem como a ordem de passos a seguir para captar uma imagem de calibração.

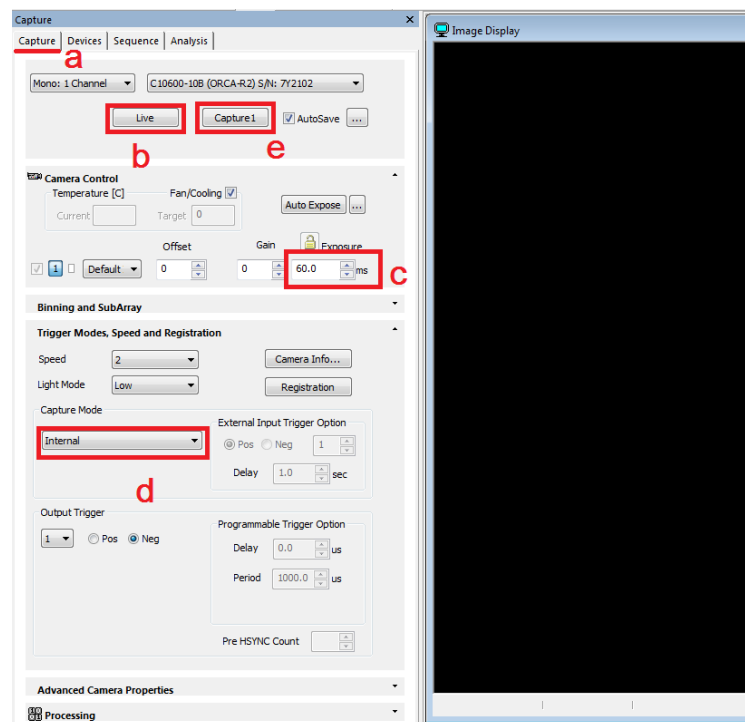


Figura IV-1: Painel lateral definido no separador de “Capture” a) permite seleccionar o separador “Capture” b) permite visualizar imagens em tempo real c) permite definir o tempo de exposição d) permite definir modo de captura e) permite captar uma imagem.

Inicialmente, no separador de captura, deve colocar-se a câmara em modo “Live” (figura IV-1-b) para a partir da visualização de imagem em tempo real no painel “Image Display”, se

focar a lente da câmara e ajustar a abertura do obturador. Para utilizar o modo “Live” deve-se definir o modo de captura interno (figura IV-1-d) e deve-se colocar um tempo de exposição adequado, por exemplo 60ms (figura IV-1-c). Quando a camera se encontra devidamente focada termina-se o modo “Live” (no mesmo botão em que se iniciou este modo, figura IV-1-b), e basta clicar no botão “Capture1” para captar a imagem de calibração. Esta imagem pode guardar-se manualmente ou pelo modo “AutoSave”. Após a aquisição de uma imagem de calibração altera-se o funcionamento do programa para o modo de aquisição de imagens que permitirão a análise PIV. A figura IV-2 mostra as configurações usadas no separador “Capture”.

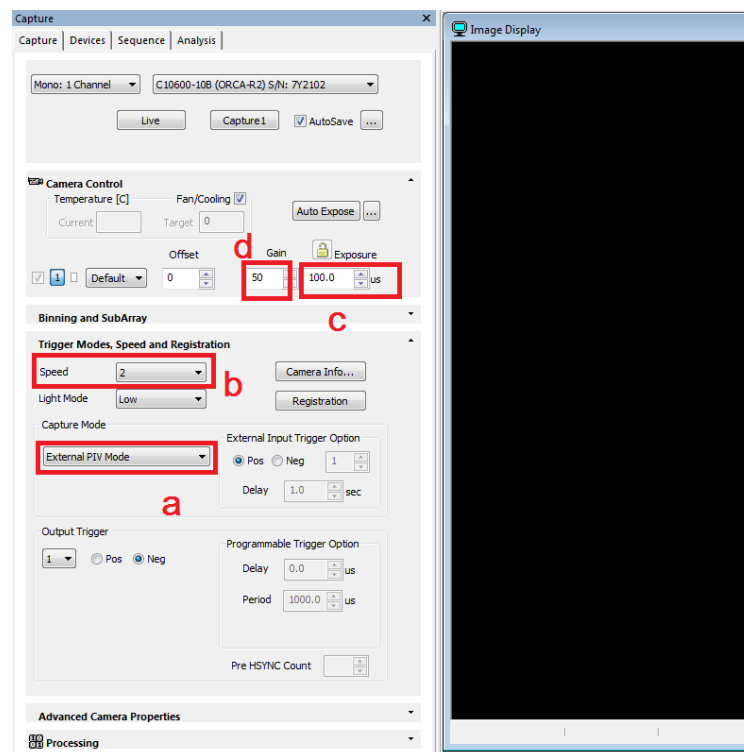


Figura IV-2: Configurações do separador “Capture” para aquisição de imagens PIV a) em “External PIV Mode” b) velocidade da camera c) tempo de exposição d) ganho

O modo que permite adquirir imagens para análise PIV é o modo “External PIV Mode” (figura IV-2-a). No entanto, e antes de se definir este modo, deve-se introduzir um sinal externo na unidade de controlo da camera. Por cada pulso deste sinal externo a camera inicia uma captura de um par de imagens. Assim, colocando um sinal com uma frequência elevada (por exemplo 1 kHz) faz com que a unidade de controlo esteja sempre a receber pulsos, e deste modo assim que é possível esta inicia a aquisição de um par de imagens. Para que a camera adquira pares de imagens com curtos tempos entre os pares, define-se a velocidade 2 (figura IV-2-b). No tempo de exposição deve definir-se um período de tempo de acordo com as velocidades que se pretendem medir. As partículas, de uma imagem para a outra, não devem avançar mais de 25% das dimensões da imagem, como tal deve definir-se um tempo que satisfaça esta condição. Neste caso definiu-se 100 μ s (figura IV-2-c) e a sincronização dos

pulsos de laser foi feita de acordo com este tempo de exposição. Para que as partículas fiquem mais nítidas nas imagens adquiridas pode-se adicionar ainda um ganho, por exemplo na figura IV-2-d verifica-se que se estabeleceu um ganho igual a 50.

Estabelecida a configuração do separador “Capture” seleciona-se o separador “Sequence”. Este separador pode ver-se na figura IV-3.

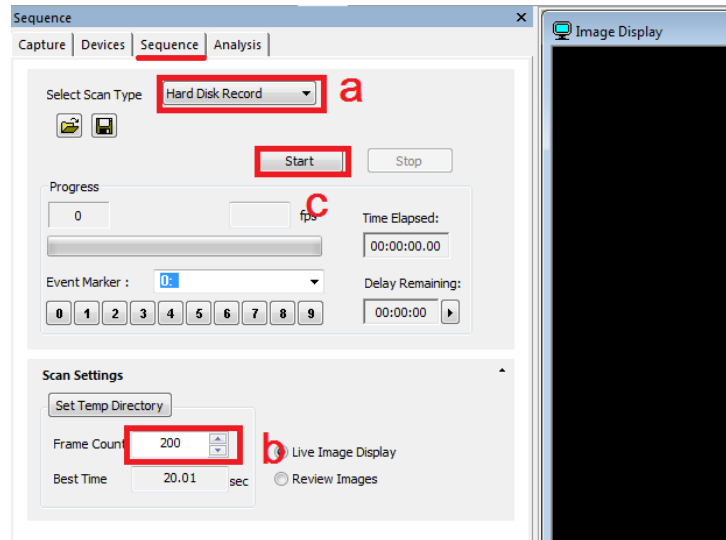


Figura IV-3: Configurações do separador “Sequence” a) Tipo de captura b) Número de imagens pretendido c) Botão para iniciar a captura.

Neste separador seleciona-se o modo “Hard Disk Record”, visto que este é o modo de captura de seqüências mais rápido (figura IV-3-a). Em “Frame Count” (figura IV-3-b) define-se o número de imagens que se pretendem adquirir e, clicando em “Start” (figura IV-3-c) inicia-se a aquisição de uma seqüência de imagens.

Após adquirir um par de imagens pode realizar-se a análise PIV recorrendo ao *software* PIVlab. Este *software* permite carregar imagens em formatos como .jpg .tif e .bmp e permite carrega-las em dois tipos de sequencias diferentes, tal como mostra a figura IV-4.

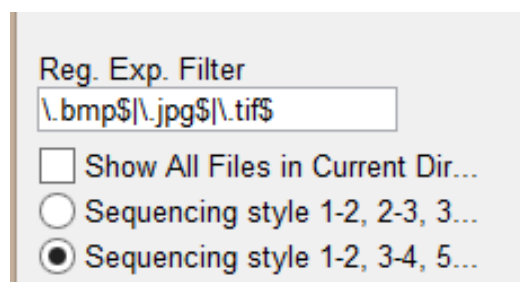


Figura IV-4: Formatos e tipos de seqüência em que podem ser carregadas as imagens no PIVlab.

Carregadas as imagens para análise definem-se os parâmetros de Pré-processamento. Na figura IV-4 podem ver-se estes parâmetros e os respectivos valores definidos aquando da realização deste trabalho.

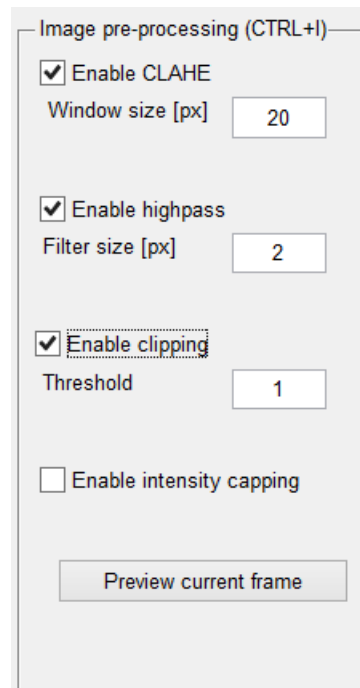


Figura IV-5: Painel de pré-processamento das imagens com os parâmetros utilizados neste trabalho.

A função “CLAHE” serve para otimizar o contraste de imagem, a função “highpass” acentua a imagem e remove o sinal de fundo, a função “clipping” remove regiões com baixo sinal e aumenta a velocidade dos cálculos e, por fim, a função “intensity capping” reduz a influência de partículas muito brilhantes. Após a configuração do pré-processamento passa-se à configuração dos aspetos de análise PIV. O PIVLab permite a realização das medições por um algoritmo DCC ou FFT. Enquanto que o algoritmo FFT realiza a análise por 3 passos diferentes, diminuindo o tamanho das janelas inicialmente configuradas, já no algoritmo DCC realiza-se a análise para um só tamanho de janelas de interrogação, mas com uma sobreposição de janelas. A figura IV-6 mostra o painel de configuração do algoritmo PIV, neste caso escolhendo o algoritmo DCC.

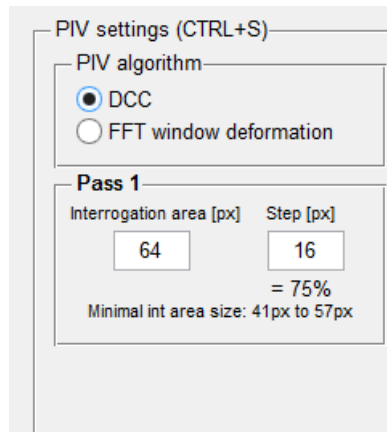


Figura IV-6: Painel de configuração do algoritmo de análise PIV

Na figura IV-6 mostra-se a configuração de uma análise PIV com um algoritmo DCC, este realiza a análise em janelas de interrogação de 64 pixels e com uma sobreposição entre janelas de 75%. O programa permite também definir regiões de interesse ou excluir zonas que não se pretendem analisar. Depois da definição destes parâmetros realiza-se a análise PIV das imagens.

Uma vez realizada a análise dos respetivos *frames* é necessário calibrar a medição. Para este efeito utiliza-se a imagem de calibração que foi captada antes da aquisição de imagens do ensaio, e definem-se nesta imagem dois pontos e a respetiva distância real entre esses dois pontos. É também necessário introduzir no programa o tempo entre o par de imagens. A figura IV-7 ilustra este processo.

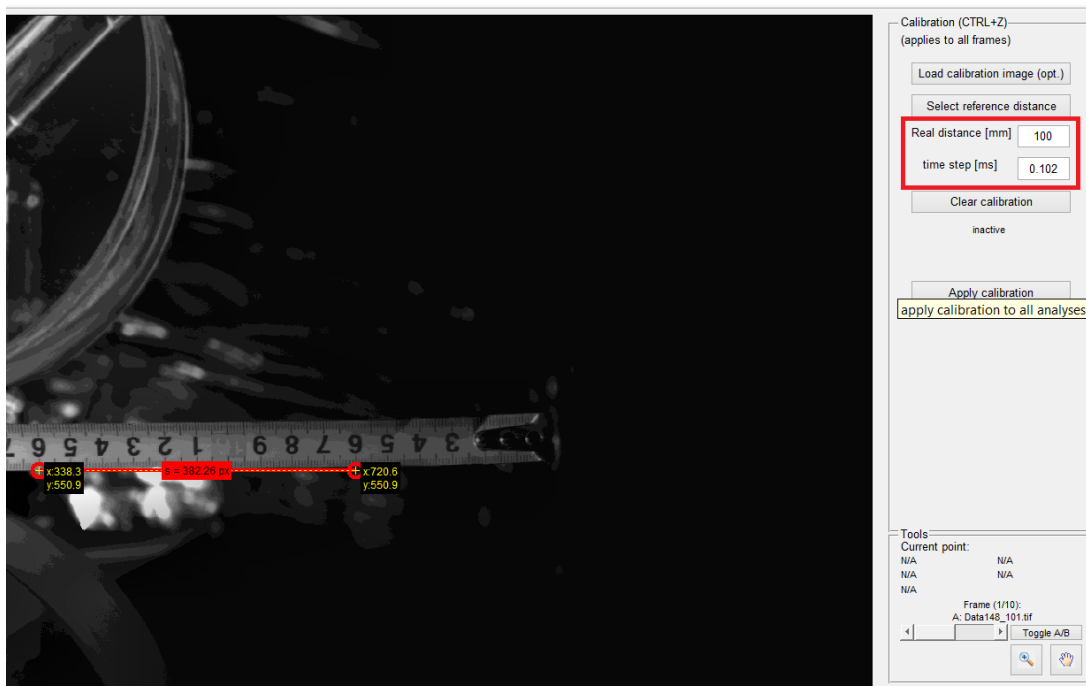


Figura IV-7: Painel de calibração do PIVLab

Após esta calibração efetuada o *software* converte todos os valores obtidos para m/s. O programa tem um erro associado ao cálculo dos vetores e é normal que na análise das imagens apareçam vetores com gamas de velocidade muito superiores às previstas, e que não têm sentido real. Perante isto, deve-se usar a ferramenta de pós-processamento que permite validar os vetores calculados. Recorrendo a esta ferramenta definem-se os limites de velocidades a eliminar de entre os vetores que se encontrem fora destes limites. O processo de pós-processamento encontra-se exemplificado na figura IV-8.

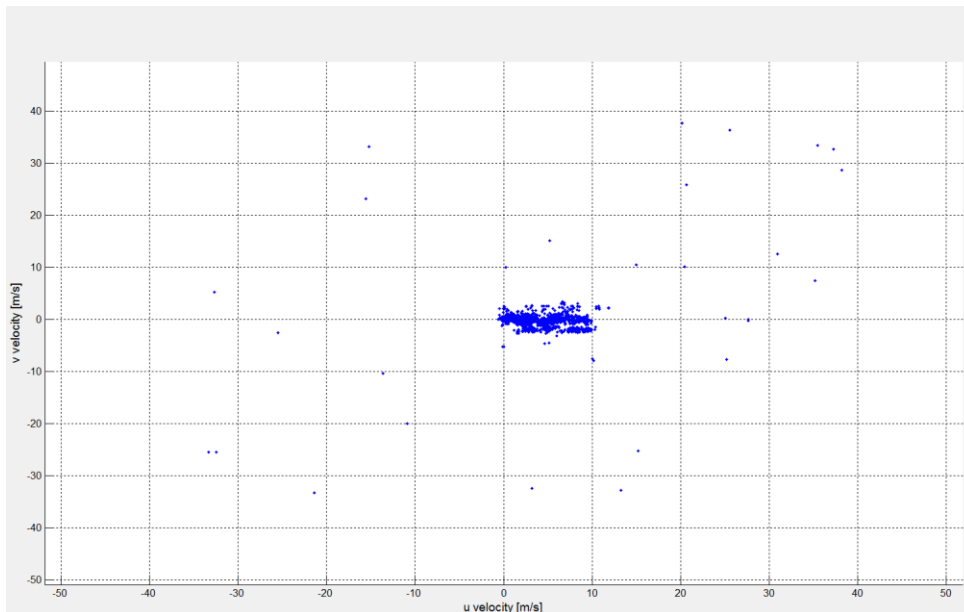


Figura IV-8: Painel de Pós-processamento. É possível selecionar com o rato uma zona de pontos que corresponde às velocidades a esperar no resultado.

Tal como se verifica na figura, existe uma zona com a maioria dos vetores calculados e outros vetores com valores dispersos. Os limites devem ser definidos tendo em conta que a zona de maior concentração de vetores deve estar dentro dos limites e os restantes vetores que se encontram dispersos podem ser desprezados. Assim, obtêm-se o campo de vetores finais tal como exemplifica a figura IV-9.

Este *software* conta ainda com ferramentas de análise que permitem criar gráficos com o módulo da velocidade, calcular linhas de corrente do escoamento, medir a velocidade média numa área, a vorticidade, entre outros parâmetros.

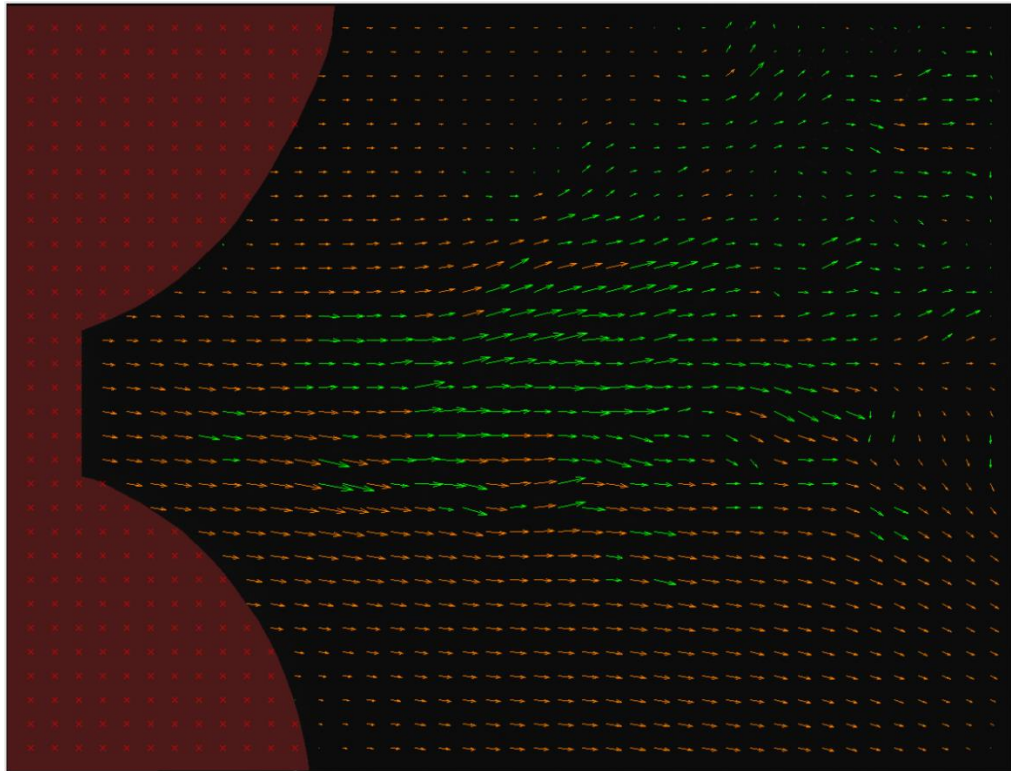


Figura IV-9: Campo de vetores de velocidade após o pós-processamento e a eliminação de vetores espúreos.

Anexo V

Esquema de ligações do PVM500

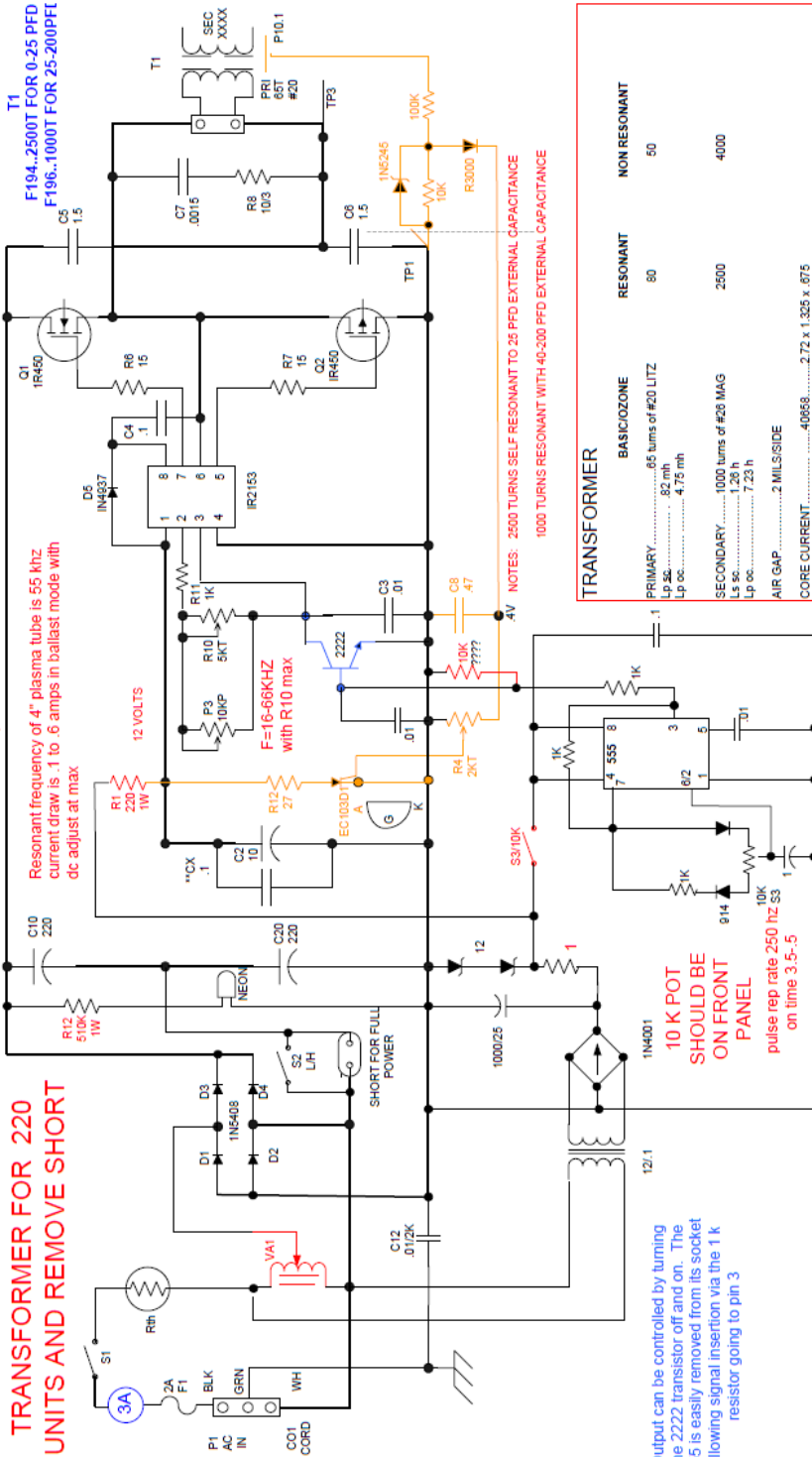
PVM4000C00DRV10

DIDRIV10/PVM500DC SCHEMATIC for PULSED HALF POWER RESONANT OPERATION REV2110-11

Intended for dielectric barrier discharge systems/plasma displays/hydrogen production

USE 220 VOLT 12 VOLT TRANSFORMER FOR 220 UNITS AND REMOVE SHORT

150 volts S2 down
300 volts S2 up



Resonant frequency of 4" plasma tube is 55 khz
current draw is .1 to .6 amps in ballast mode with
dc adjust at max

F=16-66KHZ
with R10 max

NOTES: 2500 TURNS SELF RESONANT TO 25 PFD EXTERNAL CAPACITANCE
1000 TURNS RESONANT WITH 40-300 PFD EXTERNAL CAPACITANCE

TRANSFORMER		RESONANT	NON RESONANT
BASICOIZONE		80	50
PRIMARY.....	.65 turns of #20 LITZ		
Lp ac.....	.82 mh		
Lp oc.....	4.75 mh		
SECONDARY.....	1000 turns of #26 MAG	2500	4000
Ls ac.....	7.23 h		
Ls oc.....	7.23 h		
AIR GAP.....	.2 MILS/SIDE		
CORE CURRENT.....	40868.....	2.72 x 1.325 x .875	
CORE ream.....	40787.....	2.72 x 1.53 x .875	
CORE int ferrite.....		3.2 x 1.756 x .825	
CORE int ferrite.....		3.2 x 1.265 x .825	
SET.....		35 us on 48 x 4 column boe .8 amps cold	

Output can be controlled by turning the 2222 transistor off and on. The 555 is easily removed from its socket allowing signal insertion via the 1 k resistor going to pin 3

Proprietary and intellectual property of INFORMATION UNLIMITED PO Box 716 Amherst N.H. 03057 Tel# 1 603 673 6493/4730 Fax# 1 603 672 5406 EMAIL to <BOB@AMAZING1.COM> Web site at <http://www.amazing1.com>

Figura V-1: Esquema de ligações da fonte de alimentação PVM 500

Anexo VI

Artigos desenvolvidos durante a dissertação

Rodrigues, F.; Páscoa, J.C.; Dumas, A.; Trancossi, M.; “Preliminary design, set-up and testing of a plasma DBD actuator for boundary layer control”, *International conference on Engineering*, 27-29 Novembro, Covilhã, Universidade da Beira Interior, pp. 7, 2013

Páscoa, J.C.; Rodrigues, F.; Das, S.; Abdollahzadeh, M.; Dumas, A.; Trancossi, M.: “Exit flow vector control on a Coanda nozzle using Dielectric Barrier Discharge actuator”, *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Paper n.º IMECE2014-38915, pp.10, 2014,