

# **Estudo sobre actuadores a plasma usando a técnica Schlieren orientado para o fundo (BOS)**

**Miguel André Barbosa Moreira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electromecânica**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Frederico Miguel Freire Rodrigues  
Co-orientador: Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques

**Outubro de 2022**



## **Declaração de Integridade**

Eu, Miguel André Barbosa Moreira, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10016 de engenharia electromecânica da Faculdade de engenharias, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 06/10/2022





# **Dedicatória**

Esta dissertação é dedicada a todos aqueles que acreditaram em mim mesmo quando eu não acreditei. Vocês sabem quem são.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador Prof. Doutor Frederico Miguel Freire Rodrigues por toda a ajuda, paciência, resiliência e dedicação que teve para comigo em todo o trabalho desenvolvido e por todo o conhecimento que me transmitiu.

Agradeço ao meu co-orientador Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques pela oportunidade que me concedeu em realizar a presente dissertação assim como pela dedicação e paciência que teve para comigo ao longo desta jornada.

Agradeço à Inês por me ter acompanhado ao longo deste desafio e por nunca ter deixado de acreditar em mim, muito obrigado pelo apoio, insistência, paciência, carinho e compreensão que tiveste mesmo nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio, compreensão e paciência para comigo neste ciclo de estudos.

Por último, agradeço a todos os membros do ClusterDEM por me terem proporcionado um ambiente confortável, por me terem apoiado e por todos os bons momentos que passámos.

Obrigado a todos vocês que sempre insistiram comigo e nunca me deixaram desistir.



# Resumo

Os actuadores a plasma de barreira dieléctrica de descarga (DBD) são dispositivos bastante atractivos para as indústrias aeronáutica e eólica, principalmente para aplicações que envolvem controlo de escoamento e degelo. Tendo em conta a escassez de métodos experimentais para análise das características térmicas dos actuadores a plasma, pretendeu-se com esta dissertação construir um sistema Schlieren orientado para o fundo que permita analisar o campo de temperaturas do escoamento induzido por actuadores a plasma. Ao longo da dissertação este sistema e todo o método quantitativo por detrás dele vão ser elaborados e otimizados de forma a obter uma correcta calibração e validação deste sistema. Primeiramente, o sistema Schlieren orientado para o fundo (BOS) foi construído e calibrado através de informação presente na literatura e da realização de ensaios de optimização. Posteriormente, foram feitas análises a vários objectos de fase gerados por uma vela, uma placa de aquecimento e um maçarico de cozinha. As temperaturas do escoamento originado pela convecção do calor gerado por estes diferentes objectos foram quantificadas, recorrendo ao sistema BOS, e validadas com recurso a um termopar. Após a validação da técnica BOS, actuadores a plasma com diferentes espessuras e diferentes camadas dieléctricas foram fabricados. Primeiramente, estes actuadores foram caracterizados electricamente e foi quantificada a velocidade de escoamento induzido. Depois, foi então aplicada a técnica BOS desenvolvida para análise do campo de densidades e de temperaturas. Neste estudo, concluiu-se que a técnica BOS é um método experimental não-intrusivo que permite quantificar as temperaturas do escoamento induzido por actuadores a plasma com precisão. Para além disso, verificou-se que os actuadores a plasma permitem aumentar significativamente a temperatura do ar adjacente, o que lhes confere um elevado potencial para aplicações de degelo e prevenção de acumulação de gelo.

## Palavras-chave

Schlieren orientado para o fundo;Actuadores a plasma;DBD;Análise quantitativa;Análise de escoamentos



# **Abstract**

Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma actuators are very attractive devices for aeronautical and wind power industries, mainly when we consider applications that require flow control and deicing. Considering the lack of experimental techniques for plasma actuators thermal characteristics analysis, the aim of this dissertation consisted on building a background oriented Schlieren system to analyse the temperature field of plasma actuators' induced flow. Throughout the dissertation, this system and the analytical method behind are elaborated and optimized in order to obtain an appropriate calibration and validation. First, the background oriented Schlieren system was constructed and calibrated by using the information reported in the literature and by performing several optimization experiments. Afterwards, analyses were performed on several phase objects provided by a candle, a hotplate and a kitchen blowtorch. The temperatures of the convective flow provided by these objects were quantified by using the BOS system and validated with thermocouple measurements. After the BOS system validation, plasma actuators with different thicknesses and different dielectric materials were fabricated. Initially, these actuators were electrically characterized and the induced flow velocity was quantified. After that, the developed BOS technique was applied for density and temperature field analysis. In the current study, it was concluded that the BOS technique is a non-intrusive experimental method which accurately allows to quantify the plasma actuators induced flow temperatures. Besides that, it was verified that the plasma actuators allow to significant increase the adjacent air temperature, making them suitable for deicing and ice accumulation prevention applications.

## **Keywords**

Background oriented Schlieren; Plasma actuators; DBD; Quantitative analysis; Flow analysis



# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	O BOS como método de visualização de escoamentos .....	1
1.2	Actuadores a plasma DBD.....	2
1.3	Importância e enquadramento do tema.....	3
1.4	Objectivos da dissertação .....	4
1.5	Estrutura da dissertação.....	4
2	Revisão bibliográfica e conceitos teóricos .....	5
2.1	Teoria e origem do Schlieren .....	5
2.1.1	BOS, o Schlieren orientado para o fundo, um método quantitativo .....	6
2.1.2	Os fundos para a técnica .....	9
2.1.3	A análise quantitativa.....	10
2.2	Os efeitos ópticos e a importância do índice refractivo .....	12
2.2.1	Objecto de fase .....	14
2.2.2	O princípio de Huygens .....	14
2.2.3	A aproximação paraxial .....	15
2.2.4	A câmara .....	15
2.2.5	O teorema da intercepção .....	16
2.3	Actuadores a plasma DBD .....	17
2.4	Caracterização dos actuadores a plasma DBD.....	18
2.4.1	Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD – Corrente eléctrica .....	19
2.4.2	Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD – Carga eléctrica .....	20
2.4.3	Caracterização das velocidades dos actuadores a plasma DBD .....	21
2.5	O BOS aplicado aos actuadores a plasma DBD .....	22
3	Procedimento experimental .....	23
3.1	O Schlieren orientado para o fundo .....	23
3.1.1	O processamento das imagens.....	25
3.1.2	O fundo a utilizar.....	27
3.1.3	A reconstrução dos campos de densidade e de temperatura .....	30
3.1.4	A calibração e validação do sistema Schlieren orientado para o fundo desenvolvido .....	33
3.2	Actuadores a plasma DBD .....	35
3.2.1	A construção dos actuadores a plasma DBD.....	35
3.2.2	Métodos experimentais para a caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD .....	38
3.2.3	Método experimental para a caracterização de velocidades dos actuadores a plasma DBD .....	39
3.3	O BOS aplicado aos actuadores a plasma DBD .....	40

3.3.1 Procedimento experimental a tomar .....	40
3.3.2 Estado transiente dos actuadores a plasma DBD .....	41
4 Resultados experimentais .....	43
4.1 Calibração e validação do sistema BOS .....	43
4.1.1 Análise ao escoamento de uma vela .....	44
4.1.2 Análise ao escoamento de uma placa de aquecimento .....	48
4.1.3 Análise ao escoamento de um maçarico de cozinha .....	50
4.2 Actuadores a plasma do tipo DBD .....	52
4.2.1 Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma do tipo DBD .....	55
4.2.2 Caracterização das velocidades dos actuadores a plasma do tipo DBD ...	60
4.2.3 Análise ao escoamento proveniente dos actuadores a plasma do tipo DBD .....	62
4.2.4 Análise ao estado transiente dos actuadores a plasma do tipo DBD .....	71
5 Conclusões .....	77
5.1 Síntese global e conclusões sobre o trabalho desenvolvido .....	77
5.2 Trabalhos futuros .....	79
Bibliografia .....	81
Anexos .....	87
A.1 Script desenvolvido e otimizado em <i>Matlab</i> para a análise quantitativa e obtenção dos campos de índices refractivos, densidades e temperaturas com condições de Neumann nas margens superior e inferior .....	87
A.2 Script desenvolvido e otimizado em <i>Matlab</i> para a análise quantitativa e obtenção dos campos de índices refractivos, densidades e temperaturas com condições de Neumann nas margens esquerda e direita .....	90
A.3 Script desenvolvido em <i>Matlab</i> para a atribuição de coordenadas aos campos de densidades e de temperaturas .....	93
A.4 Script utilizado para a medição das temperaturas com o termopar de tipo K com o <i>Arduino</i> .....	94
A.5 Artigos desenvolvidos durante a dissertação .....	96

# Lista de Figuras

Figura 1.1: Esquema do fenómeno óptico de refração. ....	1
Figura 1.2: Esquema de funcionamento de um actuador a plasma DBD, adaptada de [1]. .....	2
Figura 2.1: Esquema de um sistema Schlieren orientado para o fundo. ....	7
Figura 2.2: Fundos utilizados na técnica de Schlieren orientado para o fundo a) Fundo sintético, reproduzido de [36]; b) Fundo natural, reproduzido de [48]; c) Fundo de feixe de laser disperso, reproduzido de [49]. ....	10
Figura 2.3: Esquema de funcionamento de um actuador a plasma DBD, adaptada de [53]. ....	17
Figura 2.4: Esquema do circuito eléctrico para a obtenção da potência consumida através do método da corrente eléctrica. ....	19
Figura 2.5: Esquema do circuito eléctrico para a obtenção da potência consumida através do método da carga eléctrica. ....	20
Figura 2.6: Tubo de Pitot em posição de medida para a obtenção das velocidades induzidas pelo escoamento de um actuador a plasma DBD, reproduzida de [1]. ....	21
Figura 3.1: Esquema de um sistema Schlieren orientado para o fundo, adaptada de [52]. .....	23
Figura 3.2: Sistema Schlieren orientado para o fundo utilizado na dissertação. ....	25
Figura 3.3: Interface do controlador da câmara utilizada para a captura das imagens. ....	26
Figura 3.4: <i>Software</i> de <i>crosscorrelation</i> utilizado na dissertação. ....	27
Figura 3.5: Fundos artificiais com padrão de pontos distribuídos aleatoriamente desenvolvidos no <i>software Matlab</i> , adaptada de [2]. a) 300000 partículas; b) 600000 partículas; c) 900000 partículas; d) 1000000 partículas. ....	29
Figura 3.6: Fundos utilizados no estudo a) Fundos projectado; b) Fundo activo. ....	30
Figura 3.7: Processo de reconstrução dos campos de densidade e de temperaturas apresentado através de um fluxograma. ....	32
Figura 3.8: Objectos utilizados para a calibração e validação do sistema Schlieren orientado para o fundo. Da esquerda para a direita: Placa de aquecimento, vela, maçarico de cozinha. ....	33
Figura 3.9: Sistema de validação de resultados para o campo de temperaturas a) Termopar de tipo K e <i>Arduino</i> ; b) Termopar de tipo K no suporte de medida. ....	34
Figura 3.10: Ensaio realizados com o sistema de validação para o campo de temperaturas a) Ensaio com a vela; b) Ensaio com o maçarico de culinária. ....	35
Figura 3.11: Actuadores a plasma DBD construídos com camada dieléctrica de kapton para diferentes espessuras. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: 5 camadas, 10 camadas, 14 camadas e 17 camadas. ....	36
Figura 3.12: Actuadores a plasma DBD construídos com diferentes camadas dieléctricas para mesma espessura. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Kapton, PIB, Teflon e PMMA. ....	37
Figura 3.13: Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD utilizando o método da corrente eléctrica. ....	38
Figura 3.14: Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD utilizando o método da carga eléctrica. ....	39
Figura 3.15: Caracterização de velocidade do escoamento induzido pelos actuadores a plasma DBD. ....	39
Figura 3.16: Sistema Schlieren orientado para o fundo utilizado na dissertação aplicado aos actuadores a plasma. ....	41

Figura 4.1: Sistema Schlieren orientado para o fundo utilizando um fundo projectado.	43
Figura 4.2: Campos de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pela chama de uma vela.	44
Figura 4.3: Campos de temperatura de uma chama de uma vela reconstruídos com influência das condições de fronteira.	45
Figura 4.4: Campo de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pela chama de uma vela com erro minimizado.	45
Figura 4.5: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento da chama de uma vela.	46
Figura 4.6: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento da chama de uma vela obtido na literatura, reproduzida de [36].	46
Figura 4.7: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente de uma placa de aquecimento com influência das condições de fronteira.	48
Figura 4.8: Campo de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pelo escoamento de uma placa de aquecimento chama com erro minimizado.	49
Figura 4.9: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento de uma placa de aquecimento.	49
Figura 4.10: Campo de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pelo escoamento da chama de um maçarico de cozinha com erro minimizado.	50
Figura 4.11: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento da chama de um maçarico de cozinha.	51
Figura 4.12: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão curto a) após 30 segundos de funcionamento; b) após 90 segundos de funcionamento; c) após 150 segundos de funcionamento.	53
Figura 4.13: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão longo a) após 30 segundos de funcionamento; b) após 90 segundos de funcionamento; c) após 150 segundos de funcionamento.	54
Figura 4.14: Formas de onda da tensão e da corrente para um actuador a plasma do tipo DBD com camada dieléctrica de kapton com 1,02mm de espessura para 10kVpp.	55
Figura 4.15: Consumo energético médio para actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes espessuras com camada dieléctrica de kapton.	56
Figura 4.16: Consumo energético médio para actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes materiais como camada dieléctrica.	57
Figura 4.17: Curvas de Lissajous obtidas experimentalmente para uma tensão de 7kVpp, nas quais o eixo horizontal representa a tensão em Volt (V) e o eixo vertical representa a carga em nanoCoulomb (nC) a) Kapton 5 camadas; b) Kapton 10 camadas; c) Kapton 14 camadas; d) Kapton 17 camadas; e) PIB; f) Teflon; g) PMMA.	58
Figura 4.18: Curvas de Lissajous obtidas experimentalmente para uma tensão de 8kVpp, nas quais o eixo horizontal representa a tensão em Volt (V) e o eixo vertical representa a carga em nanoCoulomb (nC) a) Kapton 10 camadas; b) Kapton 14 camadas; c) Kapton 17 camadas; d) PIB; e) Teflon; f) PMMA.	59
Figura 4.19: Perfis de velocidade para actuadores a plasma com camada dieléctrica de kapton a) 5 camadas; b) 10 camadas; c) 14 camadas; d) 17 camadas.	61
Figura 4.20: Perfis de velocidade para actuadores a plasma com camada dieléctrica com 1mm de espessura a) Kapton; b) PIB; c) Teflon; d) PMMA.	62
Figura 4.21: Campo de densidades e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD para 7kVpp a) Kapton 5 camadas; b) Kapton 10 camadas; c) Kapton 14 camadas; d) Kapton 17 camadas; e) PIB; f) Teflon; g) PMMA.	64
Figura 4.22: Campo de densidades e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD para 8kVpp a) Kapton 10 camadas; b) Kapton 14 camadas; c) Kapton 17 camadas; d) PIB; e) Teflon; f) PMMA.	66
Figura 4.23: Temperatura máxima de escoamento por parte de actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes espessuras.	67

Figura 4.24: Campo de temperaturas à superfície dos actuadores a plasma DBD para 8kVpp, reproduzida de [101] a) Kapton 5 camadas; b) Kapton 10 camadas; c) Kapton 14 camadas; d) Kapton 17 camadas.....	68
Figura 4.25: Temperatura máxima de escoamento por parte de actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes materiais como camada dielétrica. ....	69
Figura 4.26: Campo de temperaturas à superfície dos actuadores a plasma DBD com 1mm de espessura para 7kVpp, reproduzida de [93] a) Kapton; b) PIB; c) PMMA; d) Teflon. ....	70
Figura 4.27: Campo de temperaturas à superfície dos actuadores a plasma DBD com 1mm de espessura para 8kVpp, reproduzida de [93] a) Kapton; b) PIB; c) PMMA; d) Teflon. ....	70
Figura 4.28: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão a) após 0,5 segundos de funcionamento; b) após 1 segundo de funcionamento; c) após 1,5 segundos de funcionamento; d) após 2 segundos de funcionamento; e) após 2,5 segundo de funcionamento; f) após 3 segundos de funcionamento. ....	73
Figura 4.29: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão a) após 5 segundos de funcionamento; b) após 10 segundos de funcionamento; c) após 15 segundos de funcionamento; d) após 20 segundos de funcionamento; e) após 25 segundo de funcionamento; f) após 30 segundos de funcionamento. ....	75
Figura 4.30: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão após 0,1s de funcionamento. ....	75



# Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo vertical do campo de temperaturas de uma chama de uma vela.....	47
Tabela 4.2: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo horizontal do campo de temperaturas de uma chama de uma vela.	47
Tabela 4.3: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo vertical do campo de temperaturas de uma chama de um maçarico de cozinha. ....	51
Tabela 4.4: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo horizontal do campo de temperaturas de uma chama de um maçarico de cozinha.....	52



# Nomenclatura

## Acrónimos

BOS - Background Oriented Schlieren

CCD - Charge Couple Device

CCU - Camera control unit

CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor

DBD - Dielectric Barrier Discharge

DSLR - Digital Single-Lens Reflex

PIV - Particle image velocimetry

SLR - Single Lens-Reflex

FFT - Fast Fourier Transformation

## Símbolos Gregos

$\Delta x$  - Deslocamento sofrido pelo raio de luz segundo o eixo horizontal, [m]

$\Delta y$  - Deslocamento sofrido pelo raio de luz segundo o eixo vertical, [m]

$\Delta y'$  - Deslocamento virtual sofrido pelo raio de luz segundo o eixo vertical, [px]

$\Delta Z_D$  - Metade da espessura do objeto de fase

$\epsilon_0$  - Permissividade do vácuo, [ $C^2/N.m^2$ ]

$\epsilon_x$  - Deflexão angular do raio de luz, segundo o eixo horizontal

$\epsilon_y$  - Deflexão angular do raio de luz, segundo o eixo vertical

$\lambda$  - Comprimento de onda

$\lambda_D$  - Comprimento de Debye, [m]

$\phi$  - Potencial eléctrico, [V]

$\rho$  - Densidade do gás sob estudo [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_0$  - Densidade do gás do meio ambiente [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{ar}$  - Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>]

### **Símbolos Latinos**

$P_a$  - Potência do actuador a plasma, [W]

$\bar{P}_a$  - Potência média do actuador a plasma, [W]

$\vec{E}$  - Vector do campo eléctrico [N/C]

$c_0$  - Velocidade da luz no vácuo [m/s]

$c$  - Velocidade da luz no meio sob análise [m/s]

$d_A$  - Diâmetro da abertura do diafragma da máquina, [m]

$d_d$  - Desfoque geométrico proveniente da difracção da luz no fundo

$d_i$  - Desfoque geométrico

$d_{total}$  - Desfoque geométrico total

$f$  - Distância focal [m]

$F_B$  - Força mássica, [N]

$V$  - Tensão instantânea de entrada nos terminais do actuador, [V]

$I$  - Corrente instantânea de entrada nos terminais do actuador, [A]

$C_m$  - Capacidade do condensador, [F]

$Q_m$  - Carga instantânea no condensador, [nC]

$K$  - Constante de Gladstone-Dale, [ $m^3/kg$ ]

$L$  - Espessura do objeto de fase; Extensão do objeto de fase ao longo do eixo óptico [m]

$M$  - Factor de ampliação

$n_0$  - Índice refractivo

$n$  - Índice refractivo do meio envolvente

$n_p$  - Número de períodos da corrente

$P$  - Pressão do meio ambiente, [Pa]

$p_1$  - Pressão estática, [Pa]

$p_2$  - Pressão de estagnação, [Pa]

$R$  - Constante universal dos gases perfeitos, [J/kg.K]

$T$  - Temperatura, [K]

$T_0$  - Temperatura do meio envolvente, [K]

$T_c$  - Período da corrente, [s]

$Z_A$  - Distância entre o objeto de fase e a lente da câmara, [m]

$Z_B$  - Distância entre o fundo e a lente da câmara, [m]

$Z_D$  - Distância entre o fundo e o objeto de fase, [m]

$Z_i$  - Distância entre a lente da câmara e o sensor da câmara, [m]



# 1 Introdução

Neste capítulo será feita uma contextualização e breve descrição do estudo proposto na dissertação desenvolvida. Para além disso, será abordada a importância do tema em estudo e será exposta toda a estrutura da presente dissertação.

## 1.1 O BOS como método de visualização de escoamentos

Os métodos de visualização de escoamento são técnicas essenciais para o estudo no campo da mecânica dos fluidos pois permitem a análise do comportamento de um fluido num meio transparente, independentemente do estado físico do fluido em questão. É através destes que nos é possível verificar certos fenómenos, extrair dados, propriedades e características que não são perceptíveis a olho nu.

Estas técnicas não utilizam aparelhos ou dispositivos de medição localizada, daí terem ainda a particularidade de serem técnicas não intrusivas, ou seja, que não alteram ou perturbam o escoamento em análise.

Estes métodos incluem três técnicas diferentes, a primeira referida é o método de adição de material, que consiste em acrescentar partículas visíveis que tenham propriedades semelhantes às do fluido a analisar de forma a não perturbar o escoamento.

O segundo método, o qual vai ser utilizado no presente estudo, é o método óptico. Estes métodos incidem na variação do índice de refração do fluido a analisar. A zona a analisar denomina-se por objecto de fase e quando a luz o atravessa, esta é desviada ou refractada da sua trajectoria sem afectar quaisquer características do escoamento. Com a devida calibração, é então possível capturar este fenómeno através de fotografias. Depois da interacção com o escoamento, ocorrem mudanças no raio de luz, as quais possuem informações que nos permitem concluir acerca das propriedades do escoamento. As informações presentes nos raios de luz que foram refractados é então extraída através da captura destes e posterior comparação com os raios que não foram afectados pelo escoamento. Tal fenómeno pode ser ilustrado pela figura 1.1 abaixo.

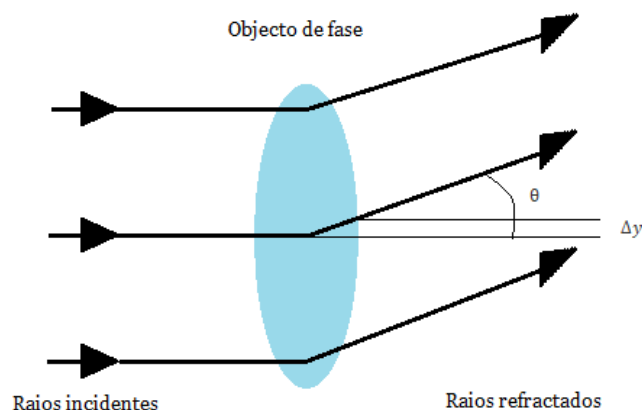


Figura 1.1: Esquema do fenómeno óptico de refração.

BOS ou “*background oriented Schlieren*” é o nome da técnica utilizada nesta dissertação que deriva da palavra alemã “*schliere*”, a qual é usada para definir as diferenças locais de um meio transparente, como por exemplo as diferenças que se podem sentir a olho nu observando ondas de calor dissipadas provenientes de um escape de um motor ou de uma estrada em dias de temperaturas mais elevadas.

O terceiro e último método acaba por misturar conceitos utilizados nos últimos dois métodos referidos, pois concentra a marcação do escoamento analisado na adição de energia e calor, ou seja, apesar de não serem introduzidas partículas para ajudar na visualização, é principalmente introduzida energia na forma de calor, o que torna possível que as partículas do escoamento que recebem esta energia possam ser analisadas através de métodos ópticos.

## 1.2 Actuadores a plasma DBD

O método de visualização abordado no estudo permitir-nos-á analisar melhor as propriedades e características do escoamento induzido por um actuador a plasma do tipo DBD, “*Dielectric Barrier Discharge*”, ou seja, descarga sobre barreira dielétrica.

Os actuadores a plasma do tipo DBD são constituídos por dois eléctrodos, um deles exposto e outro coberto, separados por uma camada de material dielétrico, o qual vai impedir a formação de um arco eléctrico entre os dois eléctrodos. Os eléctrodos são ligados a uma fonte de corrente alternada capaz de fornecer alta tensão e alta frequência, com o eléctrodo exposto ligado ao terminal positivo e o eléctrodo coberto ligado ao terminal negativo. Quando a amplitude e tensão do sinal é suficientemente elevada, o ar ioniza na zona em que o campo eléctrico é maior. Estas partículas são então aceleradas por efeito do campo eléctrico que transfere a energia para o ar adjacente criando um vento iónico como podemos ver na figura 1.2 abaixo.

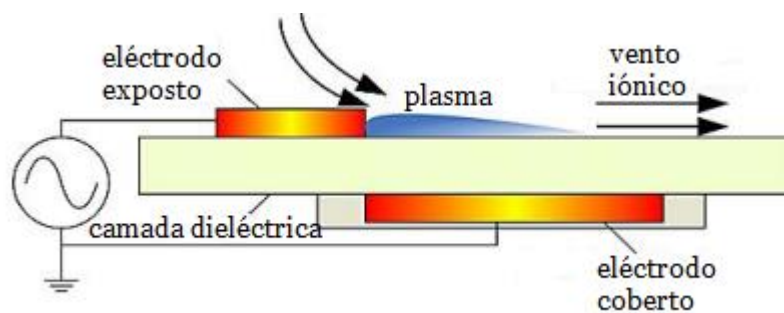


Figura 1.2: Esquema de funcionamento de um actuador a plasma DBD, adaptada de [1].

Para a construção destes actuadores são normalmente usados materiais dielétricos como kapton, teflon, vidro de quartzo ou cerâmicas, com boas propriedades isolantes, e ainda fita de cobre como material para os eléctrodos.

### **1.3 Importância e enquadramento do tema**

Ao longo dos anos, os actuadores a plasma têm sido alvo de um elevado interesse para aplicações de controlo activo de escoamentos tanto para a indústria aeronáutica como para a indústria eólica. No entanto, recentemente, diversos autores evidenciaram que, durante o funcionamento destes dispositivos, a descarga de plasma origina efeitos térmicos consideráveis que, por sua vez, levam ao aumento considerável da temperatura da superfície e do ar adjacente. Tendo em conta a magnitude destes efeitos térmicos, diversos autores começaram a estudar a aplicação de actuadores a plasma não só para controlo de escoamento, mas também para degelo ou prevenção de formação de gelo em componentes de aeronaves ou pás de turbinas eólicas. A acumulação de gelo em componentes de aeronaves, quando estas viajam em condições propícias à formação de gelo, consiste numa grande problemática para a indústria aeronáutica sendo que este fenómeno perturba localmente o escoamento de ar e desencadeia diversos eventos negativos tais como aumento do coeficiente de resistência aerodinâmica, redução do desempenho da aeronave, aumento do peso, aumento do consumo de combustível, perda de sustentação e, em casos mais severos, perda crítica do controlo da aeronave. Por outro lado, quando olhamos para a indústria eólica, os climas frios de elevada altitude são, no geral, bastante atractivos para a geração de energia eólica. Estes climas, geralmente apresentam velocidades de vento superiores e maior densidade do ar, o que aumenta em cerca de 10% a potência eólica disponível. No entanto, a acumulação de gelo nas pás de turbinas eólicas aumenta o peso destas e prejudica o seu desempenho aerodinâmico, o que por sua vez prejudica o rendimento da turbina eólica. Neste sentido os actuadores a plasma têm sido apresentados como dispositivos capazes de realizar controlo de escoamento e degelo simultaneamente, o que torna estes dispositivos altamente atractivos para as aplicações já referidas. No entanto, os estudos relativos à caracterização térmica dos actuadores a plasma são escassos, bem como as técnicas experimentais que se podem utilizar devido à elevada interferência electromagnética gerada por estes dispositivos. Considerando todo este contexto, no presente estudo pretende-se então implementar uma técnica BOS para caracterização térmica de actuadores a plasma do tipo DBD. Tal como já foi referido, este tipo de técnica baseia-se na utilização de métodos ópticos, pelo que não é afectada pela elevada interferência electromagnética gerada pelos actuadores a plasma, permitindo obter o campo de temperaturas numa zona próxima da descarga de plasma, informação esta que até à data ainda não se encontra reportada na literatura.

## **1.4 Objectivos da dissertação**

Perante a escassez de técnicas experimentais para caracterização térmica de actuadores a plasma do tipo DBD, pretende-se com esta dissertação desenvolver e implementar uma técnica Schlieren orientado para o fundo que permita quantificar o campo de temperaturas do escoamento gerado por estes dispositivos.

Os objectivos a cumprir com esta dissertação são a construção e validação do referido sistema BOS e, após esta validação, a consequente aplicação ao estudo das propriedades do escoamento dos actuadores a plasma do tipo DBD. Estes dispositivos serão fabricados e analisados para diferentes materiais dieléctricos, assim como diferentes espessuras. Com recurso à técnica BOS, serão obtidos os campos de densidade e de temperatura do seu escoamento no estado estacionário e transiente. A presente dissertação é realizada no seguimento de uma optimização de um projecto e dissertação também desenvolvida no ClusterDEM [2].

Todos os métodos e técnicas serão descritos ao pormenor assim como todo o tratamento e processamento de dados. Deste modo, a presente dissertação procura propor um novo método experimental que permite a caracterização do campo de temperaturas do escoamento induzido por actuadores a plasma, parâmetro este de elevada importância quando consideramos a utilização de actuadores a plasma para aplicações de degelo ou prevenção de formação de gelo.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada ao longo de cinco capítulos. No presente capítulo introdutório é feita uma pequena introdução e enquadramento do trabalho de forma a justificar os objectivos da dissertação e a importância do tema estudado. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre os diferentes temas da dissertação e, conjuntamente, são ainda apresentados os conceitos teóricos de forma a enquadrar o leitor. No terceiro capítulo é apresentado todo o procedimento experimental em torno do sistema Schlieren orientado para o fundo desenvolvido, assim como da sua calibração, validação e posterior aplicação à análise do campo de temperaturas do escoamento induzido pelos actuadores a plasma do tipo DBD. No quarto capítulo são apresentados os resultados experimentais assim como toda a discussão acerca dos mesmos. No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões sobre todo o trabalho desenvolvido assim como as perspectivas de trabalhos futuros.

## **2 Revisão bibliográfica e conceitos teóricos**

Neste capítulo será feita uma explicação mais detalhada e pormenorizada dos conceitos falados no capítulo introdutório, assim como uma menção a várias evoluções e estudos relacionados com as técnicas e conceitos para que seja possível perceber o desafio e objectivo por detrás da dissertação, o qual consiste na calibração e validação de um sistema BOS que permita adquirir com rigor o campo de temperaturas de escoamentos induzidos por actuadores a plasma do tipo DBD.

### **2.1 Teoria e origem do Schlieren**

Na história, temos que o primeiro registo de uma imagem deste tipo foi descoberta acidentalmente por Hooke no século XVII [3], que conseguiu observar as diferenças causadas no índice refractivo do ar pela chama de uma vela, fazendo uso da iluminação de uma segunda vela que, por sua vez, se encontrava atrás da primeira a uma determinada distância. Passados alguns anos, também com o objetivo de testar uma lente, Foucault introduziu uma lâmina no sistema Schlieren, introduzindo com esta descoberta o primeiro mecanismo para bloquear os raios de luz refratados. Este feito constituiu o primeiro grande desenvolvimento deste tipo de método óptico. Mais tarde Toepler [4] decidiu também potencializar os sistemas Schlieren através do bloqueio dos raios da luz por efeito de refração, tentando assim obter um sistema capaz de detectar as diferenças de densidade de um fluido a olho nu, ficando esta descoberta chamada de alinhamento de Toepler.

Mais recentemente Mach et al. [5] introduziram esta técnica de forma a conseguirem verificar fenómenos na diferença do índice refractivo através do efeito de ondas de choque. Apenas no século XX, Schardin [6] decidiu aprofundar a descoberta científica naquilo que é o campo dos métodos de visualização do tipo Schlieren, introduzindo no seu trabalho a visualização e o estudo das características de escoamentos causados por ondas supersónicas. Foi então que outros autores encontraram uma boa alternativa ao sistema de bloqueio dos raios de luz refratados que era a lâmina de corte, utilizando filtros de gradiente tais como os filtros de cor.

Talvez a descoberta mais inovadora e mais ousada no seu tempo, tenha sido o uso desta técnica de visualização sem impor quaisquer limites nas dimensões do objecto a ser estudado. Foi então que Weinstein [7] decidiu usar o sol como fonte de luz para o seu alinhamento. Através de um sistema Schlieren que utilizava um alinhamento de lentes e um sistema de corte que estava todo ele embutido dentro de um telescópio, o autor conseguiu analisar as ondas de choque originadas por um avião a jacto.

Agora que sabemos a origem deste tipo de sistemas de visualização podemos então aprofundar para o objeto em estudo, que são as técnicas de Schlieren quantitativas.

As técnicas de Schlieren quantitativas são as que se destinam a assegurar a distribuição de índices de refração e quantidades relacionadas em meios transparentes [8]. Uma vez que o efeito de

Schlieren se deve à refração, foi sugerido nos anos 30 por Schmidt [9] e Schardin [6] que este fosse utilizado para medir a refração, a partir da qual a densidade e a temperatura são prontamente extraídas em escoamentos de fluidos simples.

Desde essa altura, muitos métodos de Schlieren quantitativos diferentes foram publicados. O Schlieren quantitativo estava, contudo, um pouco à frente do seu tempo numa era pré-computador. Uma vez que os resultados de Schlieren exigiam densitometria e integração manual, a abordagem mais directa da interferometria foi escolhida. Os computadores podem agora, contudo, gerir convenientemente todas as tarefas de tratamento e processamento de dados para técnicas Schlieren quantitativas. Perante esta capacidade, verificou-se que as publicações em revistas científicas sobre Schlieren quantitativo aumentaram nos últimos anos, pelo que apesar de não ser uma técnica muito utilizada, não é negligenciável.

A técnica BOS foi introduzida quase simultaneamente por Meier [10] e por Dalziel et al. [11] que lhe chamaram "Schlieren" sintético. Na sua forma mais simples, consiste apenas num fundo "manchado" aleatoriamente e numa câmara. As imagens de alta resolução são capturadas pela câmara, com e sem distúrbios refractários entre os dois. O processamento de pares de imagens utilizando um *software* de *crosscorrelation* revela então pequenas distorções do fundo devido à refração, das quais podem ser derivadas imagens de tipo Schlieren. Nem a câmara nem o fundo são essencialmente novos no BOS, mas a adição de câmaras digitais e processamento de imagem faz desta uma nova e valiosa técnica de visualização e análise de escoamento.

Em 2000 Danziel et al. [12] utilizou o Schlieren orientado para o fundo para obter medições para as variações de densidade num dado fundo e Raffel et al. [13] verificou a sua aplicabilidade para tomografia em aplicações aeronáuticas de grande escala, estudando os seus princípios e aplicações [14].

Venkatakrisnan et al. [15] começou por medir campos de densidade de escoamentos, usando a técnica de Schlieren orientado para o fundo, aplicando estas medições a escoamentos de jacto assimétricos [16-18]. Goldhahn et al. explorou a aplicabilidade e incerteza para a utilização do método para escoamentos tridimensionais [19-22].

Acheson et al. verificou vários algoritmos para a visualização de escoamentos [23] e Hargather et al. verificou como o método se comparava aos restantes métodos Schlieren [24] e testou-o para análise do escoamento de explosões [25]. Para além das aplicações e dos estudos já enumerados, diversos trabalhos adicionais se podem encontrar na literatura tais como a detecção de gás [26], análise de densidades [27, 28], transferência de calor [29-31], ondas de choque [32-34], análise do escoamento derivado de chamas [35, 36], densidade [37, 38], camada limite [39], visualização de escoamentos [40, 41], bem como estudo de optimização do método [42].

### **2.1.1 BOS, o Schlieren orientado para o fundo, um método quantitativo**

Tal como indicado na secção anterior temos que o Schlieren orientado para o fundo é uma das inovações tecnológicas mais recentes neste tipo de técnicas sendo que as diferenças fulcrais deste tipo de técnica reside na sua simplicidade e facilidade no tratamento das imagens, quando

comparado com outros métodos deste género [14] que exigem fontes de luz paralelas ou material ótico como espelhos convexos, lentes ou lâminas de corte. Este facto torna esta técnica substancialmente mais fácil e simples de usar. Tem ainda como outras vantagens que o campo de visão não é limitado pelo tamanho das lentes ou dos espelhos, mas sim apenas pelo tamanho do fundo que iremos utilizar.

Como referido anteriormente, vários autores utilizaram fundos naturais [43, 44] que lhes permitiram captar efeitos ou objetos de dimensões muitas vezes superiores ao permitido pelas restantes técnicas, mas também podemos usar fundos sintéticos.

Assim como nas restantes técnicas Schlieren, esta variante apresenta também os seus pontos fracos como a necessidade do tratamento das imagens através de um programa de *crosscorrelation*, programa este que servirá para avaliar as diferenças entre pares de imagens. Este tipo de análise implica uma resolução inferior quando comparado a métodos mais convencionais, já que estes não fazem uso de comparação, análise e redução para a sua posterior correlação nas janelas de interrogação [45].

Desta forma, podemos então concluir que, para termos um sistema Schlieren sensível o suficiente para captar os efeitos pretendidos, necessitamos ter uma janela de interrogação grande o suficiente para que o deslocamento analisado das partículas seja o correcto [15], pois, caso contrário, poderemos obter erros significativos. Desta forma, torna-se bastante importante a utilização de janelas de interrogação suficientemente grandes para que seja obtido um deslocamento correto das partículas do fundo, assim como uma câmara que seja capaz de focar tanto no fundo como no objeto de fase [45], de forma a conseguirmos obter imagens com qualidade e resolução pretendida.

Passamos agora à explicação de como funciona este método óptico. Como já foi referido anteriormente temos que esta técnica funciona com base na análise e comparação de pares de imagens, sendo que estas imagens devem ser obtidas antes e depois da influência do objeto de fase no fundo que estaremos a analisar. É através da distorção deste fundo [10, 24], a qual é causada pela refração dos raios de luz quando se encontram em contato com o objeto de fase que conseguimos verificar certos efeitos.

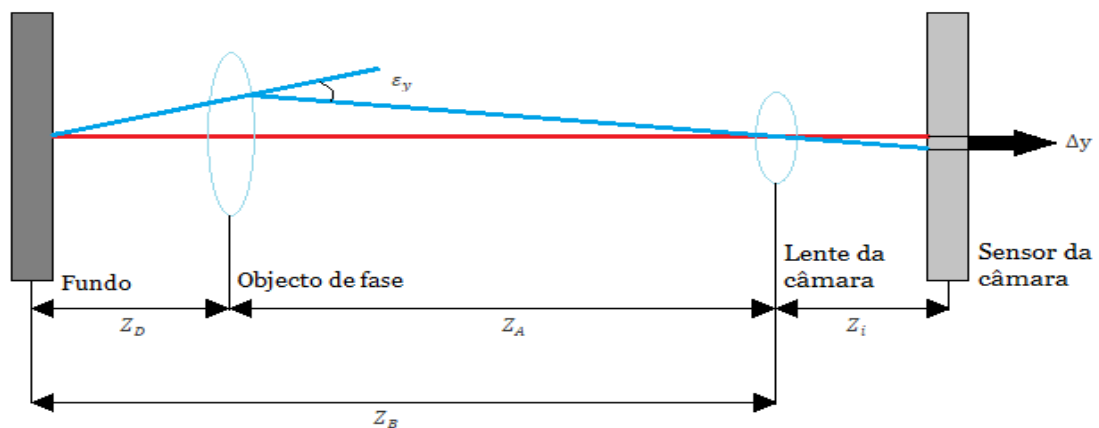


Figura 2.1: Esquema de um sistema Schlieren orientado para o fundo.

Como podemos verificar na figura 2.1 acima temos que os raios de luz se deslocam do centro do fundo que estamos a analisar até ao sensor ou obturador da máquina. Na primeira imagem captada, o objeto de fase não vai influenciar o campo que vamos analisar e na segunda imagem, o objeto de fase já estará a influenciar a refração dos raios de luz.

Podemos ainda ver acima, na figura 2.1, que a linha vermelha correspondente ao raio de luz, não tem qualquer influência pelo objeto de fase, enquanto que pelo raio azul verificamos que o raio de luz sofreu um fenómeno de refração ao passar pelo objeto fase, causando assim uma distorção no fundo.

As duas imagens obtidas podem então ser analisadas por programas de análise *crosscorrelation* desenvolvidos especificamente para a análise de deslocamentos de partículas em escoamentos como por exemplo, o *PIVlab*. Após esta análise é possível obter os campos de deslocamentos existentes entre as duas imagens e, através da aproximação paraxial referida anteriormente, podemos assumir que os ângulos de deflexão dos raios de luz são pequenos e por isso, desprezáveis. Portanto, podemos utilizar a seguinte equação 2.1 de forma a determinar qual o deslocamento que os raios de luz  $\Delta y$  apresentam:

$$\Delta y = Z_D M \varepsilon_y = Z_D \frac{Z_i}{Z_B} \varepsilon_y \quad (2.1).$$

Sendo que M corresponde ao factor de ampliação, o qual pode ser obtido através do quociente entre a distância correspondente entre a lente e o obturador da máquina, e a distância entre a lente e o fundo. Podemos então concluir que o deslocamento de cada raio pode ser obtido pela multiplicação da distância entre o objeto de fase e o fundo, e o fator de ampliação e o desvio angular sofrido por este raio. Portanto, podemos definir o campo de deslocamentos com a seguinte equação 2.2:

$$\Delta y = f \left( \frac{Z_D}{Z_D + Z_A - f} \right) \varepsilon_y \quad (2.2).$$

Podemos então verificar que na equação acima representada  $Z_A$  corresponde à distância entre o objeto de fase e a lente da câmara que iremos utilizar, e  $Z_D$  corresponderá à distância entre o fundo ao objeto de fase, assim como  $f$  corresponde à distância focal da lente que estaremos a utilizar. Desta forma, torna-se importante termos um sistema bem focado no fundo em questão e não no objeto de fase [14]. Podemos ainda concluir que o deslocamento das partículas após o processamento das imagens  $\Delta y'$  é dado em pixels por *frame* e pode ser convertido para o deslocamento real das imagens  $\Delta y$  dado em metros por *frame* [10] através da seguinte equação 2.3:

$$\frac{\Delta y'}{Z_B} = \frac{\Delta y}{Z_i} = \frac{\Delta y}{f} \quad (2.3).$$

Como referido na secção anterior, uma das grandes dificuldades deste método de visualização de escoamentos é o problema da focagem. Neste método é essencial que a câmara esteja focada no fundo, de forma a captar a distorção deste o que dificulta a focagem simultânea no objeto de fase. Este problema é designado de desfoque geométrico e o mesmo acontece na lente da câmara e pode ser expressado pela seguinte equação 2.4 [45]:

$$d_i = d_A \left[ 1 - \frac{1}{f} M' (Z_A - f) \right] \quad (2.4).$$

O desfoque geométrico pode ser dado em função do diâmetro da abertura utilizado pela câmara,  $Z_f$  que corresponde à distância entre a lente e o sensor da câmara, e  $Z_A$  como a distância entre o objeto de fase e a lente da câmara. Para além desta fonte de desfoque geométrico, existe ainda outra que pode ser causada pela difração da luz no fundo, como verificado na literatura e que pode ser dada pela equação 2.5 abaixo [45]:

$$d_d = \frac{2.44f}{d_A(M+1)\lambda} \quad (2.5).$$

Na qual  $\lambda$  representa o comprimento de onda da luz que estaremos a utilizar para iluminar o fundo. Desta forma podemos calcular o desfoque geométrico total no sistema considerando o desfoque geométrico entre a câmara e o objeto de fase, assim como o desfoque geométrico proveniente da difração da luz no fundo [45] abaixo na equação 2.6:

$$d_{total} = \sqrt{d_d^2 + d_i^2} \quad (2.6).$$

Assim, podemos verificar que a construção, calibração e validação de um sistema Schlieren orientado para o fundo necessita de um equilíbrio entre todas as distâncias escolhidas entre os vários elementos do sistema, na lente utilizada e na sua exposição. De forma a obter os melhores resultados possíveis, é importante reduzirmos a exposição ou a abertura da câmara de forma a reduzirmos o desfoque geométrico [45], já que é nele que reside a maior fonte de erro, fazendo assim uso de um fundo mais iluminado.

### 2.1.2 Os fundos para a técnica

O uso de um fundo para esta técnica implica numa das decisões mais importantes para a obtenção de bons resultados. Os fundos utilizados neste método necessitam de ter um padrão com elevado contraste [46] para que assim seja possível observarmos a distorção do mesmo. Na maior parte dos casos, são utilizados fundos artificiais ou sintéticos sendo que estes podem ser projetados ou impressos, e podem fazer uso de grelhas, redes ou de linhas perpendiculares. Os mais utilizados são os fundos sintéticos que consistem em fundos negros com diversas partículas brancas aleatórias dispersas num padrão aleatório ao longo de todo o fundo. Através da análise da literatura, podemos observar que neste tipo de fundos não é o tamanho das partículas que se torna um factor mais importante para os resultados, mas sim a quantidade de partículas. É apresentado

por vários autores [45] que devemos utilizar partículas de 2 a 5 pixels, dependendo da sensibilidade que pretendemos obter.

Podemos ainda utilizar fundos naturais, fundos estes que necessitam de ter uma densidade mais elevada e frequência espacial, como por exemplo padrões de vegetação ou superfícies rochosas. Estes fundos apresentam a vantagem de que permitem obter resultados muito bons quando o objeto de fase que estamos a analisar é muito grande, dado que são fundos capazes de produzir campos de visão muito superiores. No entanto, têm a desvantagem de devido à sua natureza, não permitirem obter resultados tão apurados, já que se encontram em mudança constante [47, 48], o que pode influenciar a qualidade dos resultados.

Existe ainda outro tipo de fundos, utilizados na técnica de visualização de escoamentos, designados de fundos de feixe de laser disperso, os quais consistem na projecção de um feixe disperso através de uma lente num plano de projecção. Quando se utiliza este tipo de fundos torna-se necessário reduzir a distância entre o objeto de fase e o fundo, de forma a obter o melhor resultado possível [49, 50]. Para além disso, torna-se importante a câmara estar focada no objeto de fase e não no fundo, mediante a lente que estaremos a utilizar, o que não corresponde à norma para estes sistemas.

Podemos ver os vários tipos de fundo na figura 2.2 abaixo.



Figura 2.2: Fundos utilizados na técnica de Schlieren orientado para o fundo a) Fundo sintético, reproduzido de [36]; b) Fundo natural, reproduzido de [48]; c) Fundo de feixe de laser disperso, reproduzido de [49].

### 2.1.3 A análise quantitativa

Como já foi referido anteriormente, o Schlieren orientado para o fundo constitui um método de visualização quantitativo. O mesmo tornou-se possível nos últimos anos através do uso de novas tecnologias e de inovações tanto nos computadores como nas máquinas fotográficas digitais [10, 24, 51]. Ao contrário de outros tipos de Schlieren todos os sistemas constituem características inerentes e únicas a cada um deles, sendo cada caso um caso. Isto porque, ao contrário dos outros métodos, não é necessário qualquer tipo de calibração no material, sendo apenas necessário conhecer e determinar as distâncias entre os vários elementos do sistema.

Desta forma, vamos então focar-nos em todo o processo de análise quantitativa das imagens capturadas através deste método depois da captura das imagens, sendo que uma delas é capturada na ausência do objeto de fase e outra sob a influência do mesmo. Ambas as imagens são sujeitas

a uma análise através de programas de análise de *crosscorrelation* e, como já foi referido anteriormente, este par de imagens é então dividido naquilo que podemos denominar como janelas de interrogação. Cada uma destas janelas vai ser alvo de análise pelo *software*, dependendo assim a resolução do tamanho e quantidade das janelas de interrogação utilizadas. É através da introdução das janelas de interrogação que conseguimos definir o número de vectores de deslocamento de partículas que irão resultar da nossa análise. Temos ainda que as janelas de interrogação podem ser definidas de forma a serem adjacentes ou parcialmente sobrepostas de forma a que a resolução dos resultados aumente.

Este método de visualização de escoamentos tem por fundamento a análise do deslocamento das partículas através da distorção do fundo. O deslocamento destas partículas no fundo deve-se ao facto de os raios de luz serem refratados quando entram em contacto com o objeto de fase. Como referido anteriormente, podemos ainda relacionar a trajetória e o deslocamento destes raios de luz com a diferença do seu índice refractivo ao longo de todo o seu percurso. Desta forma, conseguimos relacionar o campo de deslocamentos das partículas obtidos através da análise da imagem com os gradientes de mudança de índice através das seguintes equações 2.7 e 2.8 [15]:

$$\Delta x = \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \frac{1}{n_0} \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{\partial n}{\partial x} dz \quad (2.7);$$

$$\Delta y = \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \frac{1}{n_0} \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (2.8).$$

Nas quais  $\Delta x$  e  $\Delta y$  dizem respeito ao campo de deslocamentos verificados no fundo, em ambas as direções, horizontal e vertical em relação às variáveis. Em conjunto à análise da figura 2.1 anteriormente referida, podemos verificar que  $Z_D$  corresponde à distância entre o fundo e o objeto de fase,  $\Delta Z_D$  metade da espessura do objeto de fase,  $n$  ao índice refractivo no interior do objeto de fase,  $n_0$  ao índice refrativo do meio.

A partir do momento em que conseguimos obter estes campos de deslocamentos de partículas, conseguimos também correlacioná-los com o campo de gradientes do índice do refrativo em ambas as direções, horizontal e vertical.

Desta forma, podemos, através da resolução da equação de Poisson, obter assim, o campo dos índices refrativos através da análise do campo de deslocamentos [36, 52, 53]. De forma a analisar e obter os campos de índices refrativos no fundo temos ainda que introduzir condições de fronteira correspondentes ao índice refractivo no meio ambiente, para que esta equação 2.9 seja possível de resolver:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = \left( \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \frac{1}{n_0} \right) \left[ \frac{\partial \Delta x}{\partial x} \frac{\partial \Delta y}{\partial y} \right] \quad (2.9).$$

## 2.2 Os efeitos ópticos e a importância do índice refractivo

Através da literatura, podemos concluir e definir que a luz como nós a conhecemos é constituída por vários raios, ou seja, várias propagações energéticas, as quais têm uma origem e um fim [8, 19]. Estes raios de luz possuem uma fase constante ao longo de todo o seu percurso e representam-se com um comportamento periódico. Podemos definir ainda, através do ponto de vista da óptica, que a luz se propaga apenas numa única direcção ao longo do raio. Tal como dito anteriormente, estes raios possuem direcção, mas não possuem qualquer fase entre si, ou seja, cada raio é único e não tem qualquer interacção com outro qualquer. Estes raios de luz quando apresentados em diagramas podem ser simplificados e representados apenas com linhas retas e finas para indicar o seu caminho e direcção tal como foi visto no capítulo introdutório.

Temos que os métodos ópticos para visualização dos escoamentos induzidos por um fluido são dependentes da variação do valor do índice refractivo do fluido que estamos a analisar, já que esse valor está directamente relacionado com propriedades intrínsecas do fluido, como a sua densidade e por sua vez, a temperatura. Daí estes métodos de visualização serem ferramentas fulcrais para a obtenção de várias propriedades acerca do fluido em questão e do seu escoamento.

Através de tratamento computacional podemos quantificar estes valores e, conseqüentemente, analisá-los para que desta forma seja mais fácil perceber como funcionam estes métodos ópticos de visualização de escoamentos, tal como o método proposto na dissertação para análise dos escoamentos. Torna-se então importante analisarmos a definição do que é o índice refractivo que pode ser dada pela seguinte equação 2.10:

$$n = \frac{c}{c_0} \quad (2.10).$$

Como podemos verificar através da equação temos que o índice refractivo se torna uma grandeza adimensional, que tem como variáveis  $c_0$ , a velocidade da luz no vácuo e  $c$ , a velocidade da luz no meio pelo qual ela se propaga. Podemos interpretar esta equação como o quão menor é a velocidade da luz no meio quando comparada com a velocidade da luz no vácuo.

Tal como foi referido anteriormente, é importante estudarmos as diferenças no índice refractivo do fluido, pois através deste valor conseguimos concluir acerca da sua grandeza directamente proporcional, que é densidade e, através desta, conseguimos obter então também os valores da temperatura no escoamento induzido que estamos a analisar [54].

Podemos ainda descrever a proporcionalidade directa que existe entre estas duas grandezas através da equação de Clausius-Mosotti, a qual pode ser simplificada para a equação de Gladstone-Dale, que pode ser vista abaixo quando o fluido em questão se encontra no estado gasoso:

$$n - 1 = K\rho \quad (2.11).$$

Através da análise da equação 2.11 acima indicada, verificamos que temos variáveis, como o  $\rho$  que representa a densidade do fluido gasoso sujeito à análise e  $K$  como representante da constante de Gladstone-Dale. Temos ainda através da análise da literatura, que a equação para a obtenção do índice refrativo  $n$  depende ainda de outras variáveis, como por exemplo, temperatura, pressão, humidade, conteúdo de dióxido de carbono e comprimento de onda da luz [8, 55, 56]. No entanto, temos que a constante de Gladstone-Dale tem um valor para comprimentos de onda de luz visível [36].

Ciddor [56] descreve assim o comportamento dos raios de luz após estes serem refratados através de um objeto de fase. O índice refrativo tem uma grande importância na curvatura destes raios já que estes incorrem em gradientes que podem ocorrer em qualquer direção. É então possível descrever as equações 2.12 e 2.13 [57] para a curvatura destes raios para o nosso caso bidimensional, nos quais se podem propagar nos eixos horizontal segundo  $x$  e vertical segundo  $y$ , respectivamente, logo podemos concluir que os desvios dos raios segundo  $z$  é desprezável.

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.12);$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2.13).$$

Cada uma destas equações descreve o comportamento da refração da curvatura de um raio de luz quando atravessa um objeto de fase com um certo gradiente, com um índice refrativo segundo o eixo horizontal  $\frac{\partial n}{\partial x}$  ou vertical  $\frac{\partial n}{\partial y}$ .

Podemos ainda descrever estas equações de outra forma, através de uma integração ao longo de todo o eixo óptico. Desta forma, conseguimos obter as componentes horizontal e vertical correspondentes à deflexão angular que vai acontecer através do fenómeno da refração [8].

$$\varepsilon_x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} \partial z \quad (2.14);$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} \partial z \quad (2.15).$$

Através da análise das equações 2.14 e 2.15 acima representadas, podemos verificar que o desvio sofrido pelos raios de luz dirige-se principalmente a zonas que têm um maior índice refrativo. Ou seja, para um caso de estudo como o nosso, de comprimento  $L$  ao longo do eixo óptico e índice refrativo do meio  $n$ , podemos ainda definir que a deflexão angular [8] para um objeto bidimensional toma a seguinte forma pelas equações 2.16 e 2.17 abaixo:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.16);$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2.17).$$

Através da análise de todas estas equações podemos concluir que a refração dos raios de luz ocorre quando estes entram em contato com as zonas ou gradientes que possuem uma diferença no índice refractivo. Ou seja, técnicas e métodos de visualização de escoamentos, como aquele que pretendemos implementar nesta dissertação, não têm maneira nem forma de analisar meios que não apresentem diferentes índices refractivos.

### **2.2.1 Objecto de fase**

Como já foi referido no capítulo introdutório e na secção anterior, podemos verificar que a técnica utilizada nesta dissertação é um método de visualização óptico, ou seja, tem por base a análise de variações do índice refractivo do meio a estudar de forma que o nosso objeto de fase apresente uma variação do índice refractivo em várias direcções [56].

Ainda através da análise da literatura, podemos verificar que os objetos de fase podem ocorrer em vários estados da matéria e que principalmente podem conter diferenças ou gradientes de índice refractivo em várias direcções. No caso em estudo, apenas estarão em causa as componentes horizontal e vertical já que será um caso bidimensional. No entanto, em casos tridimensionais, que não serão abordados neste estudo, será necessário utilizar outras técnicas e métodos de visualização de escoamentos, como por exemplo a tomografia, estereoscopia ou a holografia [54, 58, 59].

### **2.2.2 O princípio de Huygens**

O princípio de Huygens, também chamado princípio Huygens-Fresnel, afirma que todos os pontos de uma frente de onda de som num meio de transmissão, ou de luz num meio de vácuo ou transparente, podem ser considerados como novas fontes de ondas que se expandem em todas as direcções a um ritmo dependente das suas velocidades.

Proposto pelo matemático, físico e astrónomo holandês Christiaan Huygens em 1690, é um método poderoso para o estudo de vários fenómenos ópticos.

Se um meio for homogéneo e tiver as mesmas propriedades ao longo de todo o seu comprimento, permitindo que a luz ou som viajem com a mesma velocidade, independentemente da sua direcção de propagação, o envelope tridimensional de uma fonte pontual será esférico. Caso contrário, como é o caso da luz com muitos cristais, o envelope terá a forma elipsoidal.

Através da análise deste princípio [8, 60, 61], é-nos possível verificar que este define a direcção do ângulo de refração do raio de luz quando este embate num objeto de fase e se refracta.

### 2.2.3 A aproximação paraxial

A óptica geométrica descreve a propagação da luz sob a forma de raios geométricos. Aqui, a aproximação paraxial significa que o ângulo  $\theta$  entre tais raios e algum eixo de referência do sistema óptico permanece sempre pequena, ou seja,  $\ll 1$  rad. Dentro dessa aproximação, pode assumir-se que  $\tan \theta \approx \sin \theta$ . A evolução do desvio do raio e do ângulo do raio num sistema óptico pode então ser descrita com matrizes simples, porque existem relações lineares entre o desvio e o ângulo dos raios antes e depois de algum componente do sistema óptico.

Desta forma, podemos verificar que os ângulos de refração sofridos por estes raios de luz são muito pequenos. Temos ainda que para a técnica de visualização de escoamento que iremos implementar nesta dissertação, o Schlieren orientado para o fundo, temos através da análise de literatura [8], que uma refração de aproximadamente 200 arcsegundos é considerada uma refração elevada. Temos ainda que um radiano corresponde a aproximadamente 200000 segundos, pelo que os ângulos de refração sofridos pelos raios de luz através deste método são muito pequenos e, como tal, podemos concluir que estes ângulos quando expressos em radianos são aproximadamente iguais aos valores das suas tangentes e senos, pelo que o valor do cosseno deste ângulo é de aproximadamente igual a um.

### 2.2.4 A câmara

A Câmara a utilizar no nosso método constitui um dos componentes mais importantes uma vez que está directamente conjugada com a resolução das imagens e, por consequência, com a qualidade dos resultados que poderemos obter. O processo de captação dos nossos resultados nunca esteve mais simples, graças em parte à fotografia digital, pelo que a análise quantitativa das imagens que iremos retirar se torna significativamente mais simples, rápida e fácil.

As câmaras mais utilizadas na construção de sistemas Schlieren hoje em dia são máquinas do tipo DSLR (Digital Single-Lens Reflex) cujas imagens contam com uma qualidade significativamente superior quando comparadas com as suas antecessoras, as câmaras SLR (Single Lens-Reflex). Outros processos inerentes à captação destas imagens, como o ajuste da abertura ou da exposição da fotografia, tornam-se mais simples já que conseguimos visualizar as fotografias antes e depois de cada análise. Uma vantagem, quando comparada com a fotografia analógica.

Para além destes parâmetros, temos ainda a incógnita de qual a lente a utilizar para que os nossos resultados estejam o mais próximo possíveis da realidade. A lente vai depender dos restantes elementos que constituem o sistema e das distâncias entre eles. Dos vários elementos do sistema, devemos ainda ter em atenção que, dependendo da lente a utilizar, temos de considerar também as características do sensor ou obturador da câmara, tais como o seu tempo de processamento ou o seu tempo de término da exposição [51].

Para além destes cuidados, verificamos ainda através da literatura que, no que toca a aplicações de sistemas Schlieren, devemos utilizar câmaras que possuam um sensor do tipo CCD (*Charge Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) já que máquinas

fotográficas como estas possuem uma resolução espacial muito elevada e um tempo de captura bastante reduzido, mais concretamente na ordem dos microssegundos. Este tipo de câmaras incluem assim um obturador electrónico que serve essencialmente para eliminar quaisquer vibrações ou ruído [62, 63] provenientes de quaisquer vibrações mecânicas que possam ser ocorrer e que proporcionem a deterioração da imagem.

### **2.2.5 O teorema da intercepção**

Na geometria óptica há muitos teoremas, um deles é o teorema da intercepção, também conhecido como o teorema de Thales. Este teorema foi descoberto por Thales, um matemático grego e refere-se à geometria elementar sobre as proporções de vários segmentos de recta que são criados quando duas linhas de intersecção se cruzam com um par de linhas paralelas. Este teorema afirma que se uma forma transversal for igual a intercepções em três ou mais linhas paralelas, qualquer outra linha que as corte também fará intercepções iguais. Isto significa que, dadas as três linhas paralelas, uma linha que as atravesse forma intercepções na relação correspondente das distâncias entre as linhas.

Quando este teorema é aliado à aproximação paraxial, podemos definir que o tamanho de um objeto a uma dada distância pode ser definido pela seguinte equação 2.18:

$$\frac{\text{Tamanho do objecto para a distância pretendida}}{\text{Distância pretendida}} = \frac{\text{Tamanho do objecto a uma dada distância}}{\text{Dada distância}} \quad (2.18).$$

## 2.3 Actuadores a plasma DBD

Os actuadores a plasma de descarga sob barreira dielétrica (DBD) são dispositivos electrónicos simples com várias aplicações no domínio do controlo activo de escoamentos.

Durante os últimos anos, vários estudos têm verificado a eficácia destes dispositivos para uma grande diversidade de aplicações [64-67]. Como referido no capítulo introdutório, um actuador a plasma DBD é composto por dois eléctrodos e uma camada dielétrica, como representado na figura 2.3 abaixo:

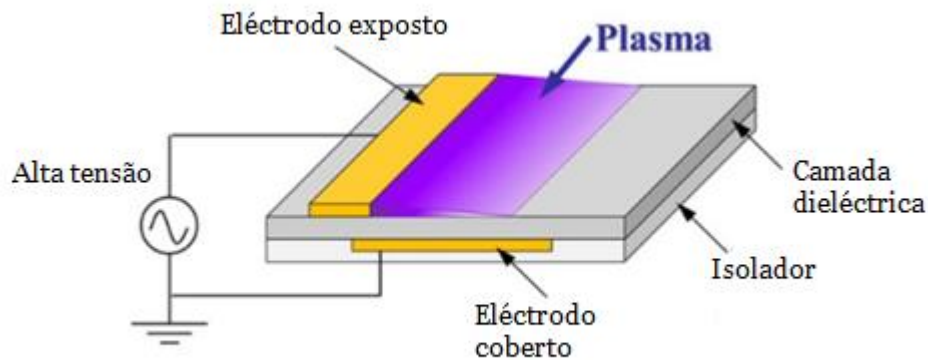


Figura 2.3: Esquema de funcionamento de um actuador a plasma DBD, adaptada de [53].

Um dos eléctrodos é exposto ao ar adjacente enquanto o outro é coberto pela camada dielétrica. O eléctrodo exposto é ligado a uma fonte de alimentação AC capaz de fornecer um sinal de alta tensão e alta frequência enquanto o eléctrodo coberto é ligado ao terra. Quando a amplitude deste sinal é suficientemente elevada, a tensão de ruptura é atingida, proporcionando a ionização do ar na área em que o campo eléctrico é maior. As partículas carregadas, geradas por esta ionização do meio, são aceleradas pelo efeito do campo eléctrico, que transfere quantidade de movimento para a região de ar adjacente criando um vento iónico.

Na literatura [68, 69], podemos então verificar que o efeito de controlo de escoamento gerador pelo plasma refere-se à formação de um vento iónico, ou seja, à aceleração do ar adjacente à superfície devido à alta transferência de energia para o ar circundante. Como consequência deste efeito, obtemos uma força mássica proporcionalmente directa à amplitude da tensão e da quantidade de plasma formada na superfície do actuador. Podemos representar esta força mássica como um vector, que vai seguir a direcção do gradiente do campo eléctrico, e que pode ser descrita pela seguinte equação 2.19:

$$F_B = \left(-\frac{\epsilon_0}{\lambda_D^2} \phi\right) \vec{E} \quad (2.19).$$

Na qual  $\epsilon_0$  representa a permissividade do vácuo, ou seja, a capacidade com que um meio se polariza mediante a presença de campos eléctricos,  $\lambda_D$  representa o comprimento de Debye, uma

medida utilizada para quantificar o efeito de plasma,  $\phi$  o potencial eléctrico que quantifica o quanto um corpo atrai ou repele cargas, e  $\vec{E}$  o vetor do campo eléctrico dado pela seguinte equação 2.20:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi \quad (2.20).$$

Estes dispositivos têm várias vantagens, tais como serem totalmente electrónicos, leves, com um consumo de energia reduzido, tempo de resposta rápido e facilidade de resposta [70-73]. As suas principais aplicações podem ser encontradas num âmbito mais industrial relacionadas com melhoramento de desempenho aerodinâmico [74-76], incluindo também controlo da camada limite [77-80] e controlo de separação de escoamentos [81-84].

Estes dispositivos, foram introduzidos como meio de controlo de escoamentos durante os anos 90 pelas obras de Roth e Reece [85, 86]. Desde então, vários estudos foram realizados a fim de compreender a física por detrás do seu funcionamento e também para avaliar a sua eficácia para aplicações de controlo activo de escoamentos. Enloe [87, 88] realizou estudos muito importantes a fim de compreender os mecanismos e as respostas de um actuador a plasma de descarga de barreira dieléctrica única. Por outro lado, os estudos realizados por Hyun et al. [89], Sung et al. [90] e Post et al. [81] são exemplos de estudos em que foram utilizados actuadores a plasma para o controlo de escoamentos. Estes estudos mostraram que os actuadores a plasma permitem modificar a camada limite e atrasar a separação do escoamento.

É ainda possível utilizar estes dispositivos para degelo ou prevenção da formação de gelo como foi verificado por diversos autores [64, 91-93] dado que uma das consequências da formação do plasma é o aquecimento da camada dieléctrica devido à dissipação de calor oriunda da descarga de plasma.

Embora a eficiência dos actuadores a plasma para as mais variadas funções referidas acima, estes dispositivos ainda apresentam alguns inconvenientes e precisam ser melhorados. A velocidade do escoamento induzido é limitada e, após um dado período de operação ou quando níveis excessivos de tensão são aplicados, estes dispositivos podem falhar. A camada dieléctrica influencia a eficiência do dispositivo e também a sua durabilidade e, por conseguinte, é importante estudar diferentes materiais dieléctricos [1, 94] de forma a encontrar materiais mais adequados para a construção de actuadores a plasma e de forma a melhorar a sua durabilidade e desempenho.

## **2.4 Caracterização dos actuadores a plasma DBD**

A caracterização dos actuadores a plasma do tipo DBD constitui ainda um desafio pelo que não se podem medir certas características devido à sua natureza, pois estes provocam uma elevada interferência electromagnética o que pode ser prejudicial ao bom funcionamento de diversos equipamentos convencionais de laboratório, o que dificulta as medições.

Desta forma, serão necessários utilizar métodos alternativos [1, 72, 95-97] para medir certas propriedades, como o consumo de energia e a velocidade de escoamento, os quais vão ser descritos nas seguintes subsecções.

### 2.4.1 Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD – Corrente eléctrica

No método da corrente eléctrica que podemos ver na figura 2.4 abaixo, uma resistência, com valor resistivo conhecido, é colocada em série entre o eléctrodo coberto e o terra. A corrente é calculada a partir da tensão medida nos terminais da resistência, usando a lei de Ohm. Deste modo, a resistência apresenta nos seus terminais uma tensão suficientemente baixa que permite a sua medição por instrumentos usuais de laboratório. Os valores típicos das resistências utilizadas estão na gama de 1 a 100 ohms para geometrias de actuadores comumente utilizadas em estudos publicados. A resistência tem uma impedância relativamente baixa em comparação com a impedância do actuador, que está na gama de megaohm durante a maior parte do ciclo AC.

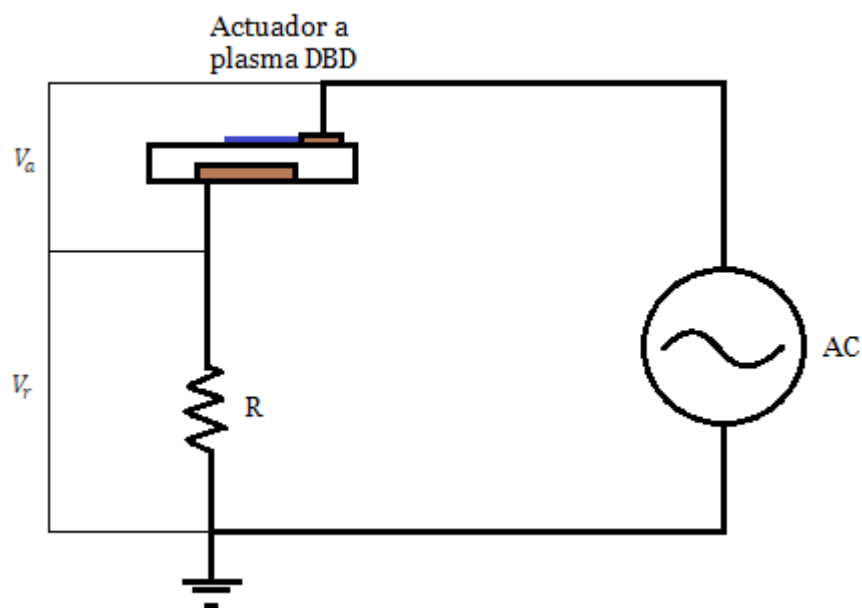


Figura 2.4: Esquema do circuito eléctrico para a obtenção da potência consumida através do método da corrente eléctrica.

No método da corrente eléctrica são registadas ondas de tensão e de corrente e a potência instantânea é calculada através da multiplicação dos dois sinais pela equação 2.21 abaixo:

$$P_a(t) = V(t) \times I(t) \quad (2.21).$$

Onde  $V(t)$  é a tensão no actuador,  $I(t)$  é a corrente do actuador, e  $P(t)$  é a potência instantânea. A potência média  $P_a$  é calculada através da média da potência instantânea ao longo de um ciclo (período)  $T$  dada pela equação 2.22 abaixo:

$$\bar{P}_a = \frac{1}{n_p T_c} \int_0^{n_p T_c} V(t) \times I(t) dt \quad (2.22).$$

### 2.4.2 Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD – Carga eléctrica

No método da carga eléctrica que podemos ver na figura 2.5 abaixo, é utilizado um condensador com uma capacidade conhecida e é colocado em série entre o eléctrodo coberto do actuador e o terra. O condensador cria um divisor de tensão AC com a impedância do actuador, que é maioritariamente capacitivo. O valor da capacidade do condensador  $C_m$  é escolhido de modo a ser grande o suficiente em comparação com a capacidade do actuador sem descarga de plasma, denominada de capacidade a frio. Dado que a capacidade dos actuadores utilizados na literatura em estudos publicados é muito baixa (5 pF a 200 pF), os condensadores são seleccionados com um valor entre 10 nF e 330 nF. A capacidade é geralmente seleccionada de modo a proporcionar uma tensão adequadamente baixa nos seus terminais que possibilite a medição desta recorrendo a instrumentos usuais de laboratório. A capacidade do condensador deve ser constante ao longo de toda a tensão de funcionamento e da gama de frequência do actuador.

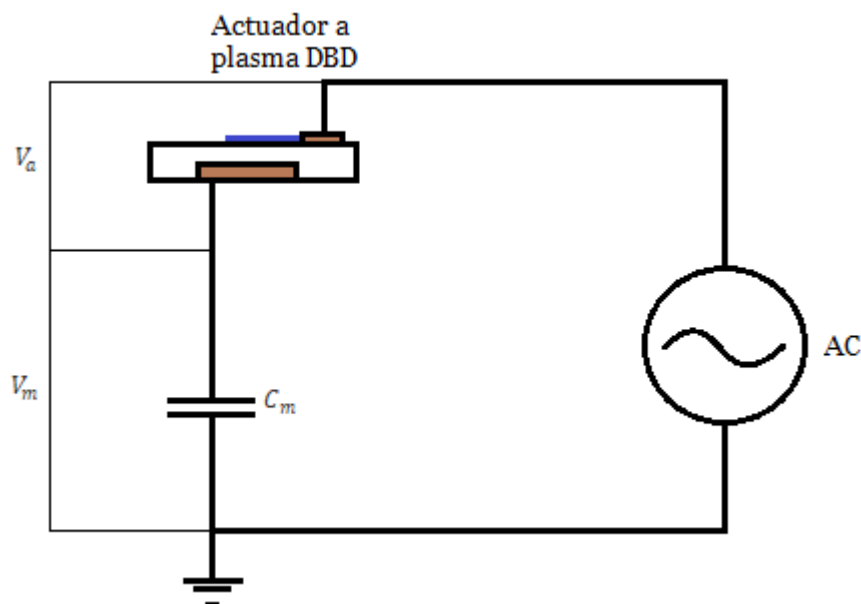


Figura 2.5: Esquema do circuito eléctrico para a obtenção da potência consumida através do método da carga eléctrica.

A carga instantânea no condensador é dada pela seguinte equação 2.23:

$$Q_m = C_m \times V_m \quad (2.23).$$

Onde  $C_m$  diz respeito à capacidade do condensador e  $V_m$  à tensão que por ele passa. Podemos então definir a corrente através da equação 2.24 abaixo:

$$I = C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (2.24).$$

Assim que o condensador estiver ligado em série com o actuador a corrente que passa por ele é igual à corrente que passa pelo actuador pelo que a potência instantânea tem a seguinte forma dada pela equação 2.25:

$$P = V \times I = v \times C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (2.25).$$

A potência média ao longo de um dado número de períodos é então dada pela equação 2.26:

$$P_{med} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} v C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (2.26).$$

### 2.4.3 Caracterização das velocidades dos actuadores a plasma DBD

Para medir a velocidade do escoamento dos actuadores a plasma foi utilizado um tubo de Pitot [67]. Este instrumento permite obter a velocidade do escoamento e constituindo um dos métodos mais precisos para este fim. Tem uma secção circular e tem a forma de L. Para obter a velocidade do escoamento de ar, o tubo de Pitot é colocado na direcção oposta à do movimento do escoamento. Podemos ver o mesmo na figura 2.6 abaixo.



Figura 2.6: Tubo de Pitot em posição de medida para a obtenção das velocidades induzidas pelo escoamento de um actuador a plasma DBD, reproduzida de [1].

A ponta do tubo cria um ponto de estagnação no fluxo e, de acordo com a equação de Bernoulli, a diferença entre a pressão de estagnação e a pressão estática permite obter a velocidade através da seguinte equação 2.27:

$$U = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho_{ar}}} \quad (2.27).$$

Onde  $p_2$  é a pressão de estagnação,  $p_1$  é a pressão estática e  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar.

## 2.5 O BOS aplicado aos actuadores a plasma DBD

Através da literatura, vemos que não existem muitos estudos no âmbito da aplicação destas técnicas de visualização de escoamentos para a prática dos actuadores a plasma do tipo de DBD. O primeiro estudo que surgiu em relação a este tópico foi por parte de Komuro [52] em relação à visualização e reconstrução dos campos densidades e das suas variações causadas por actuadores a plasma do tipo DBD tendo analisado no seu trabalho os campos de densidade provocados tanto pelo método Schlieren tradicional como pelo Schlieren orientado para o fundo, um método quantitativo. O autor conseguiu obter bons resultados pelo que concluiu que é uma boa técnica para análise deste tipo de escoamento.

Passados dois anos do lançamento desta publicação, Kaneko [53] lançou um artigo científico no que toca à aplicação do Schlieren orientado para o fundo para a medição, caracterização e reconstrução dos campos de densidades dos actuadores a plasma DBD. Este fez um estudo de forma a otimizar a técnica.

No entanto, tal como se pode verificar pela revisão da literatura, os sistemas Schlieren orientados para o fundo ainda não foram utilizados para quantificação das temperaturas do escoamento induzido por actuadores a plasma DBD. De modo a estudar estas características dos actuadores a plasma DBD, torna-se não só necessário como interessante e inovador a implementação e otimização da técnica BOS, bem como de todo o processo de pós-processamento da informação que permita a obtenção do campo de temperaturas do escoamento induzido pelos actuadores.

### 3 Procedimento experimental

Com este capítulo iremos explicar todos os passos tomados na implementação do sistema Schlieren orientado para o fundo bem como todo o processo de calibração e validação, que nos permitiu quantificar o campo de temperaturas do escoamento induzido por um atuador a plasma DBD. Neste capítulo é ainda apresentado e discutido todo o processo de construção dos actuadores a plasma DBD assim como a sua caracterização e posterior aplicação ao método óptico.

#### 3.1 O Schlieren orientado para o fundo

O grande objetivo de toda esta dissertação é a utilização desta técnica para a análise do escoamento induzido pelos actuadores a plasma DBD, mais particularmente a obtenção do campo de temperaturas do escoamento. Este tópico de investigação é ainda desconhecido e até certo ponto problemático pois, devido à natureza dos próprios actuadores que apresentam elevada interferência eletromagnética, torna-se impossível a análise do escoamento induzido através de métodos de medição convencionais, tais como a utilização de termopares. Tal como já foi referido nas secções anteriores, o Schlieren orientado para o fundo constitui uma técnica não só qualitativa mas também quantitativa pelo que podemos derivar e obter propriedades sobre o escoamento induzido por um objeto de fase. Como já referido anteriormente, esta técnica tem por base uma análise mais simples e fácil em termos de equipamento visto que não requer muitos elementos ópticos presentes noutras técnicas Schlieren e permite também uma análise mais ampla.

No nosso caso pretendemos obter os campos de deslocamentos de partículas, os quais podem ser convertidos após uma análise para campos de índices refractivos. Após esta análise, podemos deduzir através de métodos numéricos o campo de densidades e temperaturas, os quais nos vão permitir ter um conhecimento mais vasto sobre aquilo que é o escoamento dos actuadores a plasma.

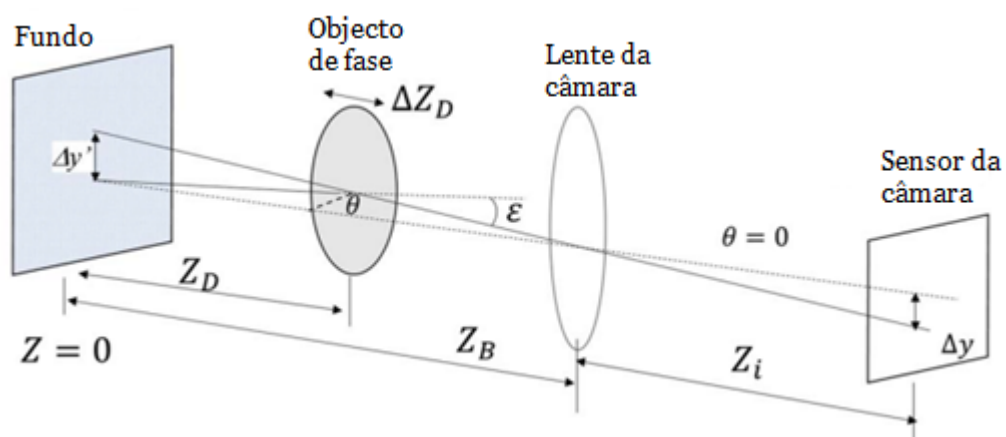


Figura 3.1: Esquema de um sistema Schlieren orientado para o fundo, adaptada de [52].

Podemos ver acima representado na figura 3.1 um esquema de um sistema Schlieren orientado para o fundo semelhante àquele que irá ser utilizado na presente dissertação. Como é possível verificar iremos fazer uso de vários componentes já mencionados no capítulo anterior como a câmara CCD, a lente, o objeto de fase e o fundo, sendo que o último não constitui um elemento ótico, porém é de extrema importância visto que é através da distorção deste fundo que iremos obter a variação de densidade do meio.

As distâncias utilizadas entre os diferentes elementos que constituem este sistema foram definidas tendo por base a informação reportada na literatura e a realização de diversos ensaios experimentais de calibração e otimização que nos permitiram aprimorar o método de modo a obtermos resultados com elevado nível de precisão. Desta forma, devemos ter uma especial atenção ao alinhamento entre todos os elementos que constituem o sistema, assim como as distâncias entre os vários elementos óticos. De forma a aumentar a sensibilidade de todo o método ótico, devemos ainda verificar que o quociente da distância do objeto de fase à lente e da lente ao fundo utilizado deve ser minimizado. Por outro lado, a distância da lente ao fundo deve ser a maior possível de forma a aumentar a sensibilidade dos resultados, tendo sempre em conta as limitações da lente utilizada, já que é essencial obtermos uma boa definição no fundo para que consigamos detetar com elevada definição a distorção causada pelo objeto de fase. Temos então que as distâncias finais utilizadas na instalação experimental foram para  $Z_D$  de 2.15m, que corresponde à distância entre o fundo e o objeto de fase, para  $Z_B$  de 3.55 m, que corresponde à distância entre o fundo e a lente utilizada, e para  $Z_l$  de 0.15m, que corresponde à distância da lente ao sensor da máquina, sendo que o sistema tem uma extensão total de 3.7m, medidas também utilizadas em [2].

Devido às limitações desta técnica é muito difícil obtermos uma boa definição tanto no fundo como no objeto de fase, no entanto, como vimos no capítulo anterior devemos ter preferencialmente uma melhor definição no fundo, ainda que com algum desfoque no objeto de fase, de forma a obtermos bons resultados e a garantir que estes não sejam comprometidos pelos erros derivados do desfoque geométrico.

Tal como foi referido no capítulo anterior, esta técnica analisa a comparação entre duas imagens sendo que uma se encontra sob influência do objeto de fase e outra na sua ausência.



Figura 3.2: Sistema Schlieren orientado para o fundo utilizado na dissertação.

Na figura 3.2 acima representada conseguimos ver a instalação experimental do sistema Schlieren orientado para o fundo utilizado no presente estudo. Neste sistema é a luz do fundo que vai ser projectada no sensor da câmara, passando pelo objeto de fase ou não dependendo da imagem que estaremos a capturar.

A comparação e consequente análise entre estas duas imagens vai ser feita, tal como indicado no último capítulo, através de um *software* de análise *crosscorrelation*, *software* este que consegue determinar através da comparação entre as duas imagens qual o deslocamento das partículas presentes no fundo originado pela sua distorção. Este deslocamento é causado pelas diferenças de densidade no ar que afectam os raios de luz, e será obtido em pixels por *frame*. Após a obtenção deste campo de deslocamentos, podemos então determinar o campo de índices refractivos, de densidades e de temperaturas através de métodos numéricos iterativos que serão descritos nas próximas secções.

### 3.1.1 O processamento das imagens

O Schlieren orientado para o fundo, método de visualização de escoamentos que iremos utilizar, necessita de um tratamento posterior das imagens capturadas de forma a revelar e obter o campo de deslocamentos, que pode ser usado para calcular outras propriedades, tais como diferenças no índice refractivo, diferenças na densidade ou na temperatura presentes no escoamento.

Desta maneira, de forma a conseguirmos obter resultados quantitativos que nos vão permitir quantificar propriedades de um dado escoamento, iremos utilizar o *software PIVlab* representado na figura 3.4 abaixo. Este *software* este é uma aplicação *open source* do *software Matlab*, mas que apresenta o seu próprio sistema e interface. Antes da utilização deste *software*, necessitamos primeiro de capturar as imagens com a câmara de alta resolução, as quais vão ser

capturadas com 100ms de exposição e podem ser processadas de diferentes formas. Podemos ver na figura 3.3 abaixo a interface do controlador da câmara.

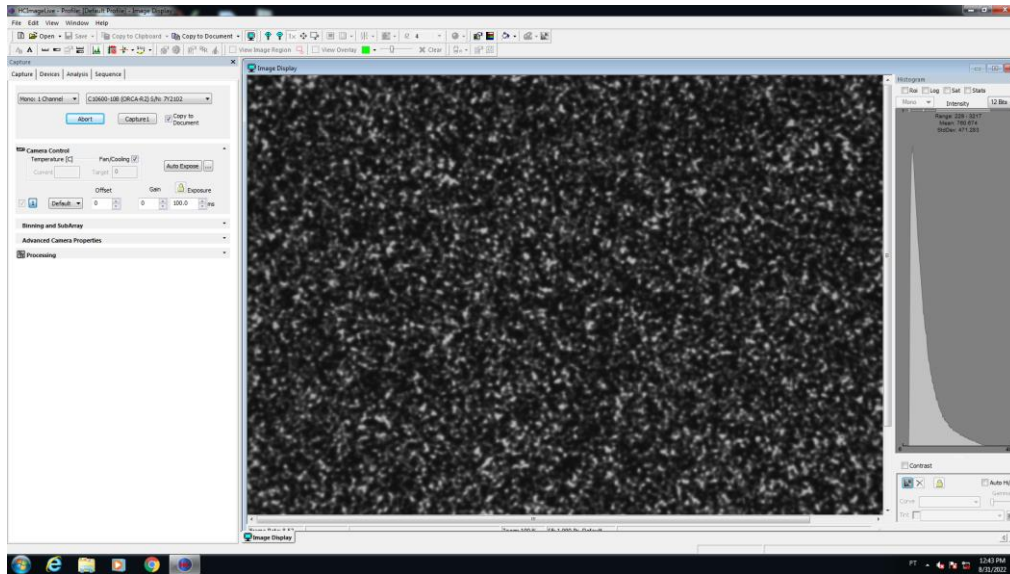


Figura 3.3: Interface do controlador da câmara utilizada para a captura das imagens.

As imagens são analisadas e o *software* determina os campos de deslocamento das partículas entre as duas imagens. De forma a obter estes valores, o *software* pode utilizar vários algoritmos, no nosso caso, iremos utilizar algoritmos FFT (*Fast Fourier Transformation*) já que são os mais utilizados na literatura [36, 52, 53]. Por outro lado, decidimos utilizar este tipo de algoritmos pois verificámos que é através destes que conseguiremos obter os melhores resultados. Para além da captura das imagens e da análise posterior, este *software* permite também aplicar outras funções tais como a calibração das imagens a partir qual podemos calcular a distância entre duas partículas do seu deslocamento, ou a função de validação de vectores que permite validar diferentes vectores de forma a eliminarmos quaisquer erros aleatórios ou residuais que possam encontrar-se nos resultados finais. Depois deste processamento das imagens conseguimos obter um campo de vectores que dizem respeito ao deslocamento das partículas entre as duas imagens. Este deslocamento deve-se à refração sofrida pelos raios de luz quando embatem no objeto de fase e é através destes valores que iremos conseguir reconstruir os campos de densidade e de temperatura.

É também importante a definição de uma janela de interrogação adequada de forma a que exista um equilíbrio nas dimensões da janela de interrogação, tal como vimos no capítulo anterior. Assim, é importante que as dimensões desta janela não sejam demasiado pequenas, devendo garantir-se que dentro de cada janela as partículas não se deslocam mais de 20% da sua largura, mas também não devem ser demasiado grandes para não prejudicar em demasia a resolução do resultado final.



Figura 3.4: Software de crosscorrelation utilizado na dissertação.

Pela análise da literatura [36] e também após a realização de diferentes testes, concluímos que a janela de interrogação que permite obter melhores resultados é de 16 por 16 pixels. No caso em questão utilizámos ainda um passo de 50%, também recomendado na literatura, de forma a aumentar a resolução dos resultados obtidos.

A câmara que iremos utilizar é uma câmara CCD C10600-10B ORCA-R2, que possui um sensor CCD com 2/3 de polegada, sendo que de forma a obtermos elevadas velocidades de transferência de imagem iremos utilizar a interface IEEE1394b e o controlador da câmara (CCU)C10600-10B [98].

Desta forma, apesar da resolução das imagens capturadas pela câmara serem de 1344 por 1024 pixels, após este processamento considerando o tamanho da janela de interrogação e o passo de 50% as imagens ficam com uma resolução de 126 por 166 pixels e será este o tamanho final que iremos analisar através do método numérico que será descrito na próxima secção.

### 3.1.2 O fundo a utilizar

Tal como foi referido no capítulo e secção anteriores, o fundo a utilizar num sistema Schlieren orientado para o fundo é de extrema importância, visto que é através da distorção deste fundo que vamos conseguir obter as variações de densidade do meio e, consequentemente, o campo de temperaturas do escoamento induzido pelo objeto de fase. Tal como referido no capítulo anterior, existem três tipos de fundos diferentes para esta técnica de visualização de escoamentos, no entanto, o fundo que irá ser utilizado neste estudo é um fundo artificial. Dentro dos fundos artificiais, existem vários tipos que podem ser utilizados para esta técnica, sendo eles o fundo artificial com padrão de pontos distribuído regularmente, o fundo artificial com padrão de pontos distribuídos aleatoriamente, e ainda o fundo artificial de ruído oscilante. Dentro destes fundos encontram-se várias vantagens e desvantagens dependendo daquilo que pretendemos analisar, já

que, por exemplo, os fundos artificiais de pontos distribuídos regularmente têm a grande desvantagem de, por consequência da sua regularidade, apresentarem um comportamento padronizado ao longo de todo o fundo. Isto, leva a erros em relação ao cálculo e à aplicação da janela de interrogação, já que esta pode ter um tamanho igual ou superior ao padrão deste fundo e, neste caso, os resultados não serão de qualquer maneira fidedignos. Já os fundos de ruído oscilante não foram sequer considerados para este estudo pois, devido à sua natureza, provocam uma grande quantidade de desfoque e, por consequência, uma baixa resolução nas imagens obtidas por eles. Por esses mesmos motivos, o fundo a utilizar neste tipo de sistema Schlieren orientado para o fundo será o fundo artificial de pontos distribuídos aleatoriamente, isto também porque este é, geralmente, o fundo artificial e sintético mais utilizado pela literatura.

O Schlieren orientado para o fundo, baseia-se essencialmente na detecção do movimento das partículas do fundo quando acontece o fenómeno de refração dos raios de luz que provoca assim uma distorção nas partículas do fundo. Como referido no capítulo anterior, pela literatura [45] as partículas devem apresentar entre 2 a 5 píxeis de diâmetro, diâmetro este que se refere ao tamanho das partículas nas imagens capturadas pela câmara.

Os vários fundos artificiais de pontos distribuídos aleatoriamente ponderados para este estudo foram criados através de um de um programa desenvolvido em *Matlab*, onde é possível especificar parâmetros em relação ao número de píxeis no fundo e ao número de partículas presentes nele. Neste caso, foi utilizado um diâmetro de 2 píxeis com um desvio de 0.5 píxeis para o diâmetro das partículas.

De forma a verificar qual o fundo que melhor se iria adequar aos nossos casos de estudo, foram feitos vários ensaios de maneira a concluir qual o número de partículas mais adequado. Os fundos utilizados e testados têm entre 300000 e 1000000 de partículas e estão representados na figura 3.5 abaixo. Concluimos assim, à semelhança com o estudo [2], que um fundo para esta técnica necessita de ter uma boa quantidade de partículas mas não demasiadas pois este pode provocar saturação nas partículas e uma consequente distorção dos resultados. Por estes motivos, o fundo a utilizar será um fundo de 900000 partículas, já que é o fundo que apresenta o melhor equilíbrio entre a saturação e a definição das imagens, tal como também foi verificado em [2], um estudo previamente realizado no nosso laboratório com recurso a um sistema BOS semelhante. No entanto, não pudemos assumir de antemão o mesmo numero de particulas para o fundo uma vez que diferentemente do estudo [2], no presente estudo utilizamos um fundo activo exposto por um monitor ao invés de um fundo projeto.

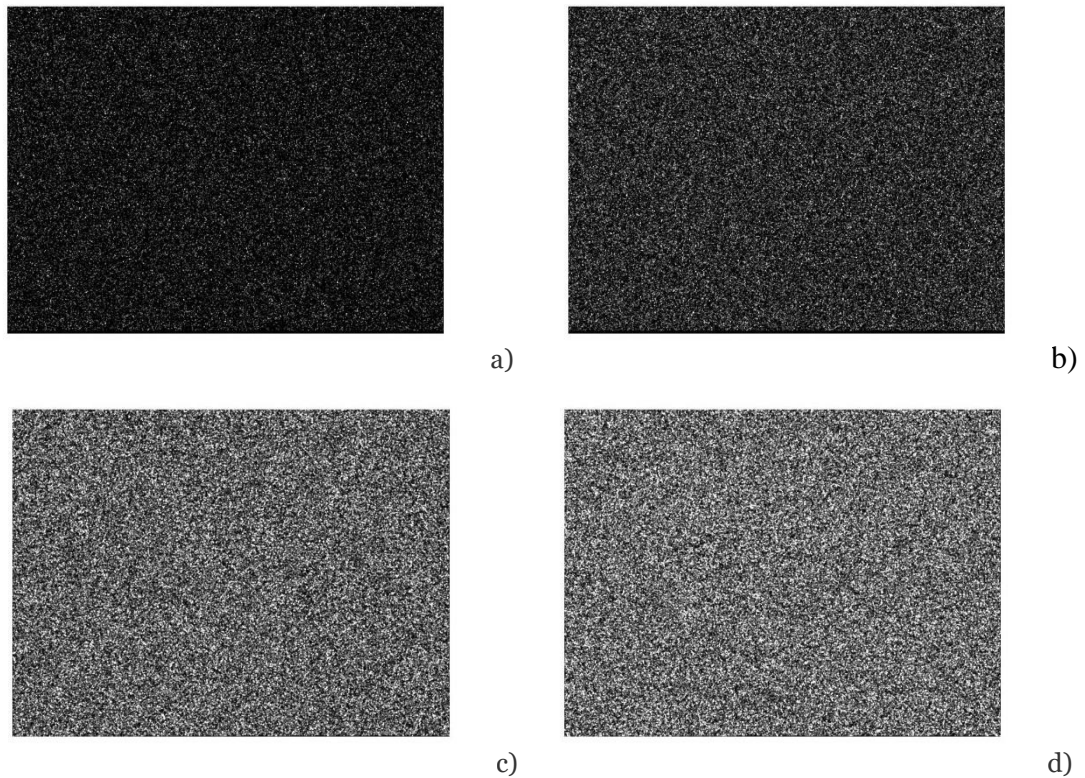


Figura 3.5: Fundos artificiais com padrão de pontos distribuídos aleatoriamente desenvolvidos no *software Matlab*, adaptada de [2]. a) 300000 partículas; b) 600000 partículas; c) 900000 partículas; d) 1000000 partículas.

Uma das grandes melhorias que foi feita e que permitiu uma otimização significativa deste sistema Schlieren orientado para o fundo, quando comparado com aquele utilizado no estudo [2], foi efetivamente o uso de um fundo activo, através do uso de um monitor, substituindo assim o uso de um fundo projectado. Concluimos que o fundo projectado, para além de provocar muitos mais erros na aquisição das imagens também torna o processo de pós-processamento mais difícil. Isto acontece porque, devido à natureza dos fundos projectados, estes originam erros provocados pela difracção da luz através da superfície em que o fundo é projectado. Por outro lado, apresenta ainda erros em relação à questão da luminosidade, já que para este tipo de fundo estar bem definido e sem ruído luminoso, todos os ensaios devem ser feitos sem qualquer luz ambiente. O mesmo não se verifica quando estamos a utilizar o monitor como fundo activo que nos permite obter resultados menos ruído luminoso e com muito mais definição do que com fundo projectado. Estes fundos podem ser vistos na figura 3.6 abaixo.



Figura 3.6: Fundos utilizados no estudo a) Fundos projectado; b) Fundo activo.

### 3.1.3 A reconstrução dos campos de densidade e de temperatura

Como já foi referido anteriormente é através da distorção do fundo que conseguimos, por intermédio do *software* de *crosscorrelation*, obter um campo de deslocamento das partículas diretamente relacionado com a refração dos raios de luz ao atravessar o objecto de fase. Através da equação para o deslocamento das partículas, a qual foi referida no capítulo anterior, temos que o nosso campo de deslocamentos de partículas irá corresponder às variáveis  $\Delta_x$  e  $\Delta_y$  para o deslocamento horizontal e vertical, respectivamente. Desta forma todos os valores presentes nesta equação fora do integral são constantes, já que se tratam de dados definidos durante a montagem do sistema Schlieren orientado para o fundo, ou parâmetros do meio envolvente ao escoamento fluido que estaremos a analisar. Desta forma, facilmente conseguimos obter valores para as variações no índice refractivo no escoamento. Torna-se então possível encontrar uma relação entre os deslocamentos das partículas causadas pela distorção do fundo e o campo de índices refractivos da luz causadas pelo objeto de fase, sendo que esta distribuição do campo de índices refractivos vai ser descrita pela equação de Poisson, já referida no capítulo anterior. Para a resolução da equação de Poisson e da consequente distribuição dos índices refractivos necessitamos ainda de inserir condições de fronteira.

De uma forma geral, para os sistemas Schlieren orientados para o fundo, as fronteiras da imagem que estaremos a analisar encontram-se bastante distantes do objeto de fase, pelo que não interferem de qualquer maneira com o escoamento induzido por ele. No entanto, o mesmo não foi verificado neste estudo já que através da calibração do sistema Schlieren orientado para o fundo verificámos que a imagem analisada irá ter dimensões na ordem dos 15.5 cm de altura e largura no fundo. No entanto, esta dimensão corresponde a um plano de 6.5 cm de altura e largura na zona do objeto de fase, valor este obtido através do teorema da intercepção e da aproximação paraxial, definições que foram também referidas no último capítulo. Desta forma foi verificado que as condições de fronteira impostas acabam por ter alguma influência sobre os nossos resultados, pelo que foi feita uma optimização face ao método anterior [2] no que toca ao código

de resolução do método numérico. Com esta modificação, ao invés de serem forçadas condições de fronteira através da imposição de valores para o índice refractivo, dependendo das condições ambientes, foram utilizadas condições de fronteira de Neumann que tendem para zero, nas margens inferior e superior das janelas de interrogação, ou nas margens da esquerda e da direita, dependendo do objeto de fase que estaremos a analisar.

Quando as condições de fronteira foram forçadas através da imposição de valores para o índice refractivo, antes de cada ensaio foi medida a temperatura ambiente e calculada a densidade e a pressão ambiente. Assim, através da resolução da equação de Poisson conseguimos então obter um campo de índices refractivos para o eixo horizontal e vertical, na forma de uma matriz, que pode ser convertido para um campo de densidades utilizando a relação de Gladstone-Dale também referida no capítulo anterior e que se apresenta na equação 3.1 abaixo:

$$\rho = \frac{n-1}{K} \quad (3.1).$$

A resolução da equação de Poisson é feita usando o script em *Matlab* optimizado neste estudo, o qual se baseia em métodos iterativos utilizando o método das diferenças finitas com um esquema de quarta ordem.

Dado que  $\rho$  representa a densidade que pretendemos calcular,  $n$  representa o índice refractivo e  $K$  representa a constante de Gladstone-Dale que apresenta um valor de aproximadamente  $2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$  dentro do espectro da luz visível, tal como referido na literatura [15, 36]. Desta forma, conseguimos então obter o campo de temperaturas através do campo de densidades utilizando a equação do estado dos gases 3.2 descrita abaixo:

$$P = \rho \times R \times T \quad (3.2).$$

Na qual  $P$  diz respeito à pressão e toma um valor de 101325 Pa para a localização do nosso laboratório,  $R$  é a constante dos gases perfeitos, que é de aproximadamente 287 J/kg.K e  $T$  a temperatura que pretendemos obter. Podemos ainda assumir que, para o nosso caso em que tanto o fluido como o movimento do seu escoamento é completamente livre, este estará sujeito a uma pressão constante, sendo assim possível determinarmos o campo de temperaturas através da equação 3.3 abaixo:

$$T = \frac{\rho_0 T_0}{\rho} \quad (3.3).$$

Nesta equação  $\rho$  representa a densidade do ar ambiente assim como  $T_0$  representa a temperatura do ar no meio ambiente.

Tal como foi referido anteriormente, todos estes parâmetros são medidos antes de cada ensaio laboratorial de forma a garantir resultados fidedignos. Temos então, que o processo na íntegra funciona através da forma descrita abaixo pelo fluxograma da figura 3.7, para que seja mais fácil

perceber todo o processo por detrás da reconstrução dos campos de densidade e de temperaturas utilizando dados previamente adquiridos.

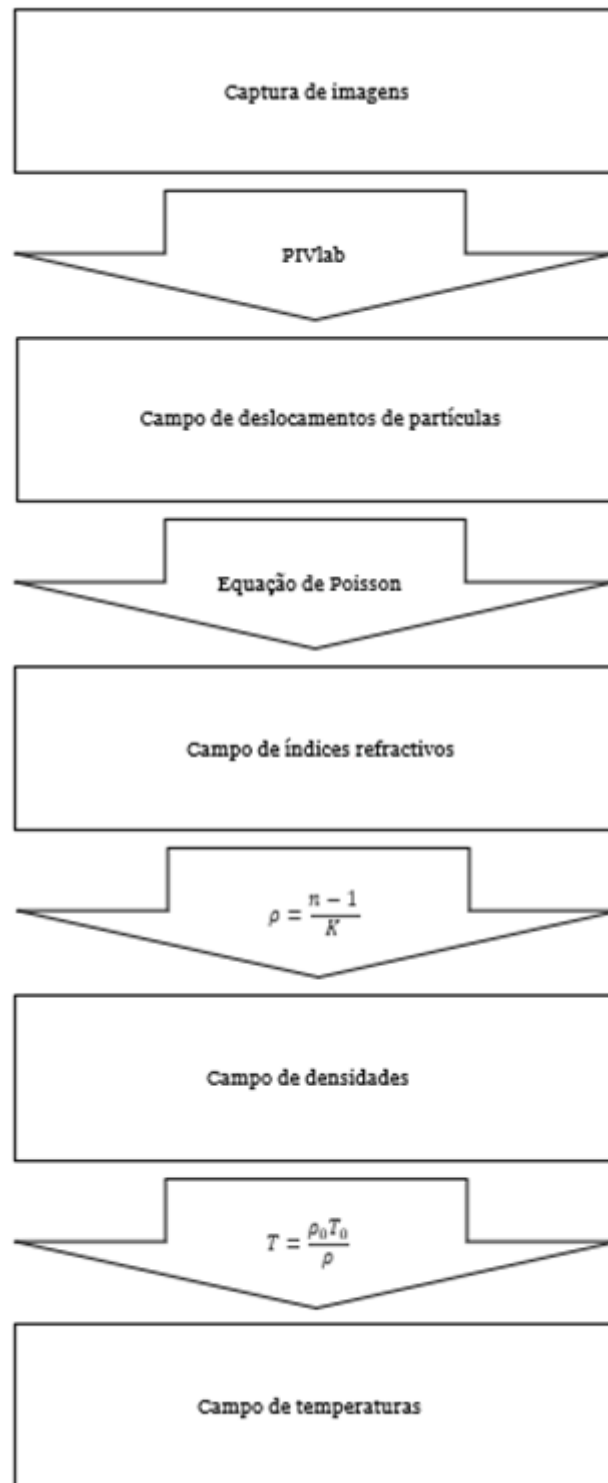


Figura 3.7: Processo de reconstrução dos campos de densidade e de temperaturas apresentado através de um fluxograma.

### 3.1.4 A calibração e validação do sistema Schlieren orientado para o fundo desenvolvido

De forma a calibrar e validar o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo, é importante analisarmos objetos de fase que consigamos comparar através de outras formas ou métodos instrumentais ou convencionais. Inicialmente foram feitos ensaios com o sistema Schlieren orientado para o fundo para vários objetos que permitem gerar diferentes variações de densidades no meio, os quais podem ser vistos na figura 3.8 abaixo.



Figura 3.8: Objectos utilizados para a calibração e validação do sistema Schlieren orientado para o fundo. Da esquerda para a direita: Placa de aquecimento, vela, maçarico de cozinha.

Como podemos ver na imagem acima, os objetos de fase que iremos analisar serão provenientes do escoamento produzido pelos objetos representados. Inicialmente iremos utilizar uma vela, uma placa de aquecimento e um maçarico de culinária, e é com estes objetos que iremos produzir diferentes escoamento que nos permitam calibrar e validar o nosso sistema.

A vela constitui um bom objeto de fase, já que o escoamento induzido pela sua chama causa grandes variações na densidade do ar envolvente tal como concluído em [36].

Por outro lado, iremos utilizar a placa de aquecimento já que constitui um sistema mais estável quando comparado com a vela pois não está tão sujeita a oscilações no meio assim como a variações na intensidade da sua chama, tornando-se uma fonte de calor mais uniforme. No entanto, também foi utilizada para verificarmos a capacidade do sistema em detetar e estimar sistemas ou objetos de fase com um escoamento tridimensional, já que a nossa análise é puramente bidimensional.

De forma a confirmarmos e obtermos uma calibração e validação do sistema por intermédio de outro meio, iremos também utilizar um maçarico de culinária já que, assim como a vela, causa

ainda mais diferenças na densidade do ar pois permite obter temperaturas mais altas, e também constitui uma fonte de calor mais uniforme, pelo que não está tão sujeita a oscilações do ar envolvente.

De forma a minimizarmos os erros nos diferentes objetos de fase, antes de cada ensaio, iremos utilizar sempre velas novas para termos sempre a mesma intensidade de chama e minimizarmos qualquer erro que possa resultar do consumo do pavio ou da cera. Também de forma a termos resultados mais uniformes com o maçarico, iremos utilizá-lo sempre com o mesmo nível de gás, sendo este repostado após cada ensaio, o que nos permite produzir uma chama mais uniforme em cada ensaio.

Como a nossa finalidade é analisar o escoamento induzido por estes objetos de fase, iremos ter foco no fundo e na distorção deste e não nas chamas ou nas oscilações de calor, visto que estas causam uma grande distorção no fundo, provocando uma grande margem de erro. Desta forma, o escoamento dos diferentes objetos foi medido a determinadas alturas, sendo que a chama da vela se encontra a 8.5cm da margem inferior da nossa janela de interrogação, a placa se encontra a 7,6 cm da margem inferior da janela de interrogação e o bocal do maçarico de culinária se encontra a 7 cm da margem inferior da janela de interrogação.



Figura 3.9: Sistema de validação de resultados para o campo de temperaturas a) Termopar de tipo K e *Arduino*; b) Termopar de tipo K no suporte de medida.

Como referido na secção anterior, temos ainda que a nossa janela de interrogação, depois do tratamento da resolução e tendo em conta a distância a que o objeto de fase se encontra do fundo, apresenta um tamanho real de 6.5 cm. Assim, de forma a validarmos este sistema Schlieren orientado para o fundo também iremos medir, através do uso de um termopar do tipo K cuja incerteza é de  $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ , que por sua vez está ligado a um *Arduino* com um *software* de aquisição de temperaturas, vários pontos ao longo da nossa janela de interrogação, tanto no sentido horizontal como no sentido vertical, de forma a validarmos a técnica em ambas as dimensões. Este sistema encontra-se representado na figura 3.9 acima.

De relembrar que para os casos referidos anteriormente, iremos impor condições de fronteira com índice refractivo fixo nas margens esquerda e direita da nossa janela interrogação. Este valor de índice refractivo fixo é calculado tendo em conta a temperatura ambiente e outros factores tais como a pressão e a densidade. Por outro lado, nas margens inferior e superior iremos utilizar

condições de Neumann, ou seja, que tendem para zero, já que vai ser nestas margens que vamos obter maior influência sobre o nosso escoamento. Uma grande melhoria que foi feita em relação ao método implementado no estudo [2].

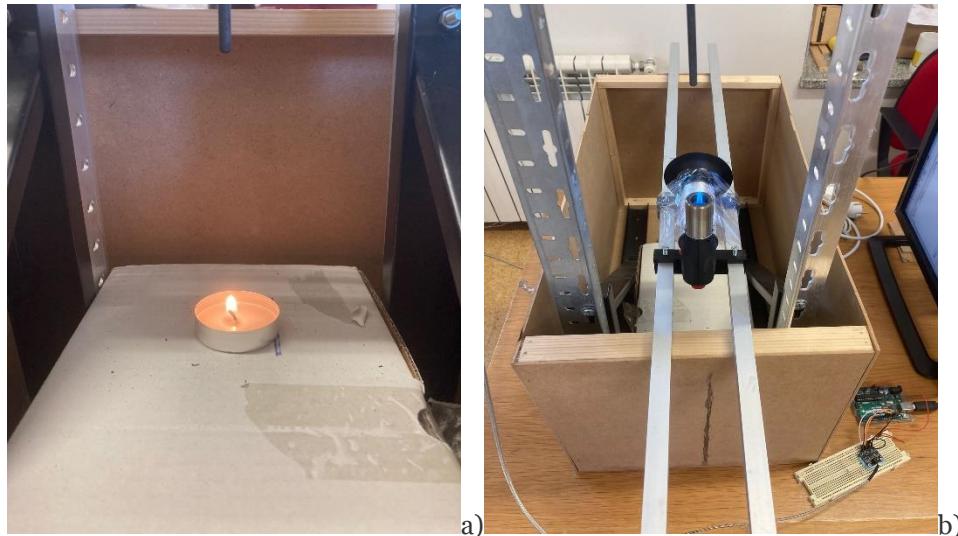


Figura 3.10: Ensaio realizado com o sistema de validação para o campo de temperaturas a) Ensaio com a vela; b) Ensaio com o maçarico de culinária.

Na figura 3.10 acima podemos ver a implementação de diferentes objetos, que funcionam como fontes de calor, usados para fazer a validação do sistema Schlieren orientado para o fundo através do uso de um termopar do tipo K e de um *Arduino*.

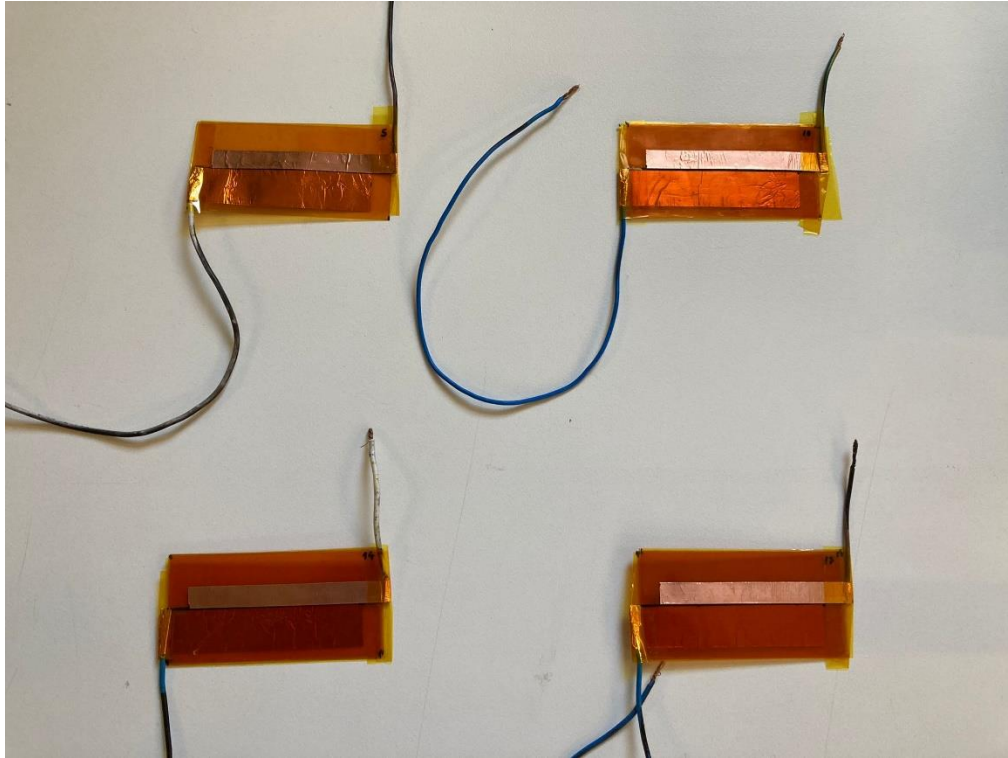
## 3.2 Actuadores a plasma DBD

### 3.2.1 A construção dos actuadores a plasma DBD

Com esta dissertação, pretendemos dar uma grande ênfase à análise do escoamento induzido pelos actuadores a plasma DBD através do método Schlieren orientado para o fundo.

Vão ser construídos vários actuadores a plasma DBD constituídos por vários materiais dielétricos com várias espessuras, sendo que os materiais dielétricos que iremos utilizar serão a fita de kapton, a borracha PIB (Polisobutileno), teflon e PMMA (Polimetilmetacrilato).

Inicialmente iremos verificar de que maneira a espessura da camada dielétrica afecta o comportamento destes actuadores a plasma DBD, pelo que inicialmente vão ser analisados quatro actuadores a plasma diferentes, todos com camada dielétrica de fita de kapton, mas apresentando diferentes espessuras.



**Figura 3.11:** Actuadores a plasma DBD construídos com camada dielétrica de kapton para diferentes espessuras. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: 5 camadas, 10 camadas, 14 camadas e 17 camadas.

Como podemos ver na figura 3.11, as espessuras que iremos analisar são de 0,3, 0,6, 0,84 e 1,02mm, correspondentes a 5, 10, 14 e 17 camadas, respectivamente, já que cada camada tem 0,06mm de espessura. De maneira a obtermos as diferentes espessuras, a construção da camada dielétrica baseia-se na sobreposição de várias camadas de fita de kapton, as quais devem ser colocadas de uma maneira uniforme. Para evitar a inclusão pequenas bolhas de ar entre as camadas, utilizamos uma solução líquida que permite um ligeiro deslizamento das camadas entre elas e nos garante uma total adesão das camadas sem quaisquer bolhas de ar. Na fabricação das camadas dielétricas é extremamente importante garantir que não existem qualquer tipo de bolhas de ar ou de solução líquida entre as várias camadas, pois a existência destas promove a degradação do actuador, podendo causar o seu deterioramento antecipado.

Para além dos actuadores anteriormente referidos, irão ser também construídos três diferentes actuadores com 1 mm de espessura feitos com diferentes materiais, também estes já referidos anteriormente como o PIB, teflon e o PMMA.

A construção do actuador de borracha PIB também é feita a partir da sobreposição de duas camadas de fita, já que estas apresentam uma espessura de 0,5mm. Em relação ao actuador de teflon, este material já vem em forma de placa com 1 mm de espessura, pelo que apenas o devemos cortar com as dimensões desejadas e não necessitamos de fazer sobreposição de fita. Em relação ao actuador de PMMA, este material vem também em placas que, da mesma maneira, devemos cortar com as dimensões pretendidas.

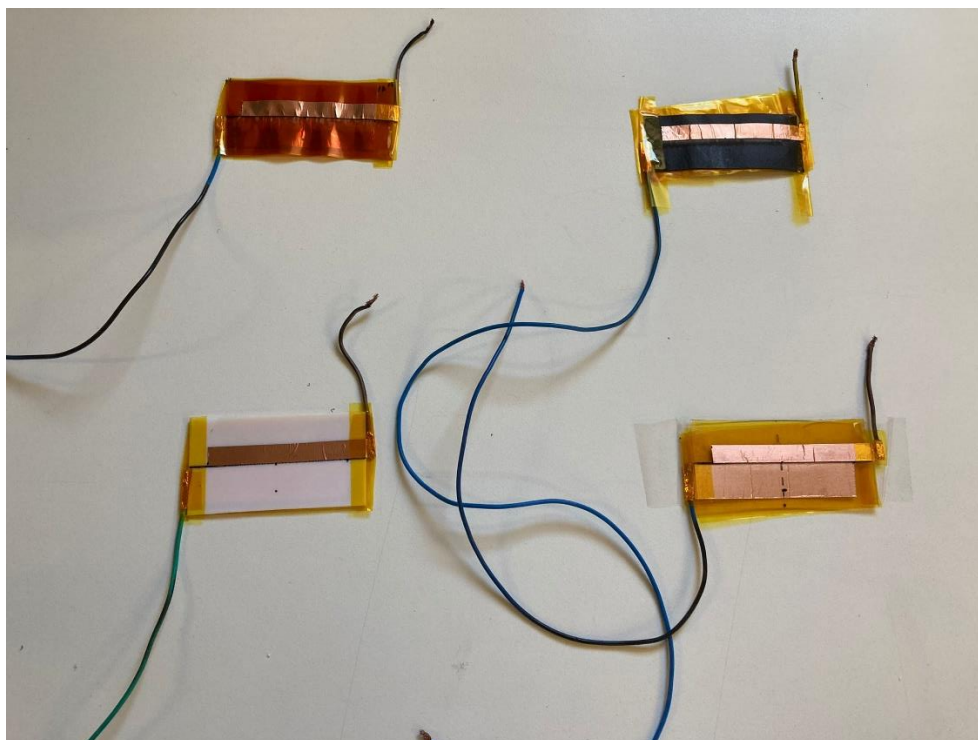


Figura 3.12: Actuadores a plasma DBD construídos com diferentes camadas dieléctricas para mesma espessura. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Kapton, PIB, Teflon e PMMA.

Estes actuadores podem ser vistos na figura 3.12 acima e serão também comparados com o actuador de kapton com 1,02 mm de espessura.

Já em relação aos eléctrodos que constituem os actuadores a plasma, tanto o eléctrodo exposto como o eléctrodo coberto devem encontrar-se assimétricos para facilitar a formação de plasma. Assim, tal como com a ligação do actuador à fonte de alimentação, devemos ter uma especial atenção à assimetria destes eléctrodos já que a posição dos mesmos também pode provocar um rompimento precoce da camada dieléctrica e conseqüente degradação do actuador.

Todos estes actuadores têm 10 cm de comprimento e 5 cm de altura sendo que os eléctrodos têm 11 cm cada um dando espaço para que estes possam estar ligados de uma melhor maneira aos cabos que por sua vez estão ligados à fonte de alimentação, sendo que a zona de formação do plasma terá apenas 8 cm de comprimento. Iremos utilizar estas medidas para a camada dieléctrica já que são as mais utilizadas na literatura.

Como verificámos no capítulo anterior para que o fenómeno da geração de plasma aconteça os actuadores a plasma do tipo DBD devem ser alimentados com uma fonte de corrente alternada capaz de debitar alta tensão e alta frequência. Para esse efeito iremos utilizar a fonte PVM500 que satisfaz estes requisitos. Esta fonte é capaz de debitar uma tensão máxima de 20kV e uma frequência entre os 20 e os 50 kHz. No entanto, a corrente debitada por esta possui valores bastante reduzidos, tão baixos como 10mA, dado que a potência desta fonte está na ordem dos 200W.

### 3.2.2 Métodos experimentais para a caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD

A caracterização eléctrica é necessária para medir os sinais de entrada aplicados ao actuador a plasma e estimar parâmetros eléctricos tais como consumo de energia, carga, tensão de ruptura, capacidade a frio e capacidade efectiva.

O sinal de entrada do actuador de plasma é produzido por uma fonte de alimentação PVM 500 e medido por um PicoScope modelo 5443A, um dispositivo normalmente utilizado para o diagnóstico na indústria automóvel que pode transformar um computador normal num osciloscópio. A tensão e a frequência do sinal foram medidos por uma sonda especial chamada Secondary Ignition Pickup que pode medir sinais de alta tensão que passam através de um fio sem desligar ou retirar o fio. A taxa de amostragem utilizada foi de 50 microsegundos, a resolução vertical da medição foi de 14bits e a incerteza da potência medida é de cerca de 1%.

Uma vez que o sinal apresenta níveis de alta tensão, a forma de onda de corrente não pode ser medida por equipamento convencional. Para ultrapassar esta questão, foram utilizados dois métodos diferentes para obter os parâmetros: O método da corrente eléctrica e o método da carga eléctrica que se podem ver na instalação experimental apresentada nas figuras 3.13 e 3.14 abaixo.

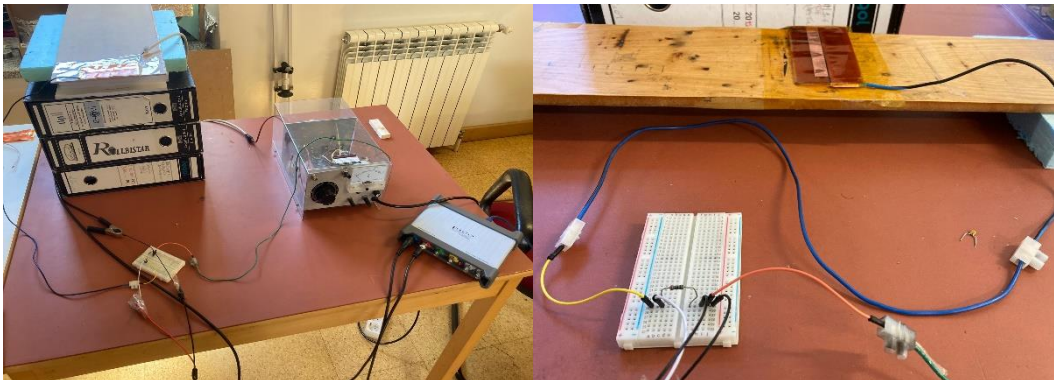


Figura 3.13: Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD utilizando o método da corrente eléctrica.

O método da corrente eléctrica foi utilizado para estimar a forma de onda da corrente, e juntamente com a forma de onda da tensão foi calculado o consumo de energia. Tal como referido no capítulo anterior neste método, uma resistência com valor conhecido é colocada entre o eléctrodo coberto e o terra, e depois a corrente é calculada a partir da tensão usando a lei de Ohm. Foi utilizada uma resistência com  $100 \Omega$  de impedância com 1% de tolerância, a impedância da resistência é relativamente baixa em comparação com a impedância do actuador para não afectar o funcionamento do actuador.

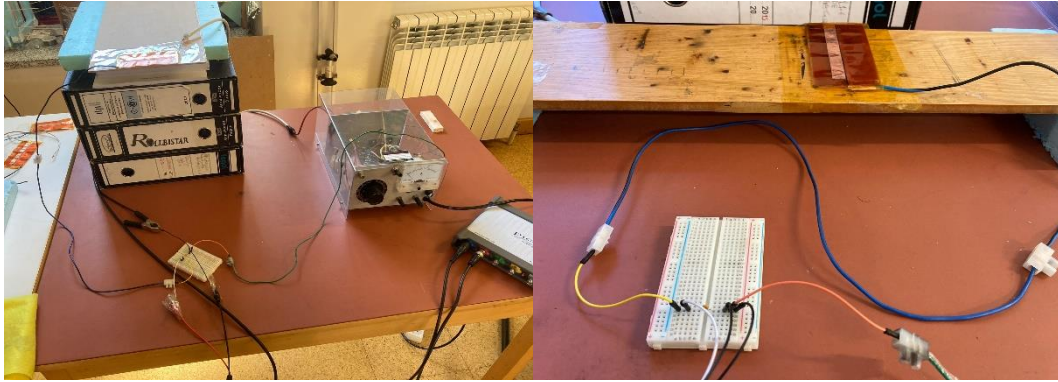


Figura 3.14: Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma DBD utilizando o método da carga eléctrica.

Para obter a carga, a tensão de ruptura e as capacidades do actuador foi utilizado o método de carga eléctrica. Tal como referido no capítulo anterior neste método, um condensador é colocado em série com o actuador entre o eléctrodo coberto e o terra. O condensador deve ter um grande valor de capacidade comparativamente à capacidade do actuador sem descarga de plasma. A carga instantânea e a tensão instantânea do actuador traçada uma em função da outra geram uma curva de Lissajous. Foi utilizado um condensador com 10 nF de capacitância e 10% de tolerância.

### 3.2.3 Método experimental para a caracterização de velocidades dos actuadores a plasma DBD

Tal como referido no capítulo anterior, para medir a velocidade do escoamento induzido pelos actuadores a plasma foi utilizado um tubo Pitot, um dos instrumentos mais utilizados para este fim. Tem secção circular e tem a forma de L. Para obter a velocidade de escoamento, o tubo de Pitot é colocado na direcção oposta do movimento do escoamento.

A ponta do tubo vai criar um ponto de estagnação no escoamento e, de acordo com a equação de Bernoulli referida anteriormente, a diferença entre a pressão de estagnação e a pressão estática permite obter a velocidade.

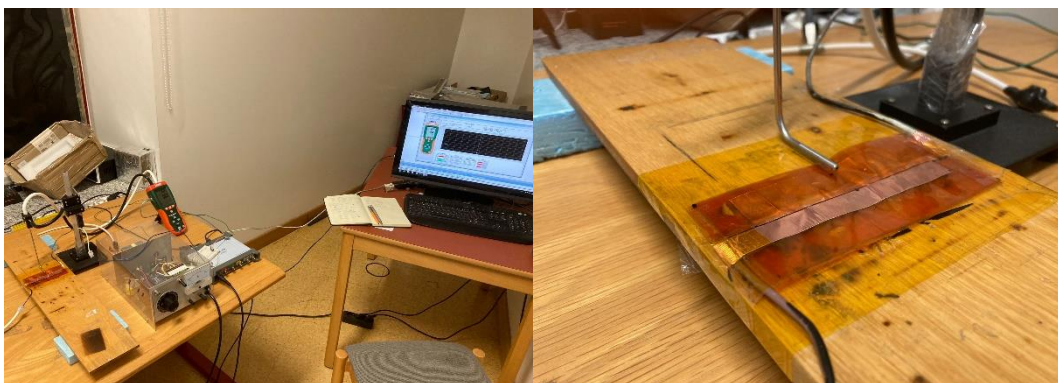


Figura 3.15: Caracterização de velocidade do escoamento induzido pelos actuadores a plasma DBD.

Como podemos verificar na figura 3.15 acima para além da fonte de alimentação PVM500, do PicoScope 5443A e da sonda, o tubo de Pitot foi ligado a um micromanómetro HD350 que pode fazer um determinado número de leituras, dependendo do tempo. Os resultados finais consistem, na média de 10 amostras de velocidade sendo que os resultados da velocidade apresentam um erro padrão inferior a  $\pm 0,1\text{m/s}$ .

O tubo Pitot deve estar centrado no plano longitudinal do actuador, a 1,5 cm da borda do electródo exposto e a altura variável. O próprio tubo Pitot tem uma espessura de 3mm e devido à sua forma circular, todas as leituras começam com 1,5mm de altura em vez de 0mm. Por causa desta limitação, as velocidades entre 0 e 1,5mm não podem ser medidas.

### **3.3 O BOS aplicado aos actuadores a plasma DBD**

#### **3.3.1 Procedimento experimental a tomar**

Após a análise e subsequente calibração e validação do nosso sistema Schlieren orientado para o fundo, podemos então aplicá-lo à análise do escoamento induzido pelos actuadores a plasma do tipo DBD. Através desta análise, podemos ver de que maneira a espessura da camada dielétrica, assim como o material utilizado, influencia o comportamento do escoamento dos actuadores a plasma.

Por forma a realizarmos estas análises, inicialmente vamos analisar dois actuadores padrão, sendo que o actuador padrão será um actuador feito com camada dielétrica de kapton com espessura de 1,02 mm. Um deles com as dimensões anteriormente referidas de 10 cm de comprimento, e 5 cm de largura, sendo que os eléctrodos coberto e exposto apresentam um comprimento de 11 cm para que a formação de plasma ocorra ao longo de um comprimento de 8 cm. Para além deste actuador, foi também feito um actuador com a mesma espessura e com a mesma camada dielétrica, no entanto, com dimensões reduzidas, com 5 cm de comprimento e 4 cm de largura, sendo que o plasma se forma numa região de 3 cm de comprimento, por forma a verificarmos se existe alguma influência negativa do escoamento em termos tridimensionais, já que a nossa análise é apenas bidimensional. As dimensões utilizadas para o segundo actuador servem exatamente para verificar se existe alguma diferença na análise de escoamento entre o actuador mais comprido e o actuador mais curto, pois através da literatura [15] pretendemos que o objeto de fase seja o menos espesso possível já que a nossa análise é puramente bidimensional. Assim, à partida, quanto menor for a espessura do escoamento a ser analisado, mais baixo será o erro que estaremos a induzir nos nossos resultados. Antes de iniciarmos as capturas de imagens para os actuadores a plasma, devemos certificar-nos de que já ocorreu alguma degradação na camada de elétrica para que não existam picos de tensão que possam induzir-nos em erro. Após esta degradação inicial iremos tirar resultados ao fim de 30 segundos, um minuto e meio e 2 minutos e meio para estes actuadores, de forma a verificarmos a evolução das características do seu escoamento. Podemos observar na figura 3.16 abaixo a nossa instalação experimental quando aplicada aos actuadores a plasma.



Figura 3.16: Sistema Schlieren orientado para o fundo utilizado na dissertação aplicado aos actuadores a plasma.

Este procedimento também será aplicado para análise do escoamento dos vários actuadores para diferentes espessuras e com diferentes materiais, no entanto, apenas para 30 segundos, já que, como será demonstrado no capítulo seguinte, este é o tempo necessário até que a temperatura do escoamento induzido pelos actuadores a plasma estabilize.

Relembremos ainda que, para esta análise, as condições de fronteira vão ser impostas através de índices refractivos previamente calculados para valores de temperatura ambiente, pressão atmosférica ambiente e densidade. Estas condições de fronteira vão ser colocadas nas margens superior e inferior da nossa janela de interrogação, enquanto que as condições de Neumann referidas anteriormente, que tendem para zero, serão colocadas na margem esquerda e na margem direita, de forma a não induzirem os nossos resultados em erro.

### **3.3.2 Estado transiente dos actuadores a plasma DBD**

Esta é outra análise inovadora que servirá para averiguar quanto tempo demora o escoamento induzido pelo actuador a plasma demora até atingir temperaturas constantes. As condições utilizadas para esta análise vão ser idênticas às da análise anterior, mas apenas aplicadas ao actuador padrão.

De forma a analisarmos este estado transiente dos actuadores a plasma DBD devemos utilizar o modo sequencial ou rápido da nossa câmara fotográfica que nos vai permitir tirar imagens a cada 100ms. Pelo que iremos observar uma evolução do escoamento por parte dos actuadores a plasma desde 100ms até 3 segundos com um intervalo de meio segundo entre cada medição. Para além disso, iremos ainda realizar uma análise entre 100ms e 30 segundos, com intervalo de 5 segundos em cada medição.

## 4 Resultados experimentais

Com este capítulo pretende-se apresentar e discutir os resultados obtidos através do Schlieren orientado para o fundo, da sua calibração e validação, e posterior aplicação à análise do escoamento proveniente de actuadores a plasma, assim como a caracterização destes tendo em conta a influência do material da camada dieléctrica e a sua espessura.

### 4.1 Calibração e validação do sistema BOS

Tal como foi referido nos capítulos anteriores, numa fase inicial procurou-se obter uma otimização do sistema BOS, relativamente ao estudo anterior [2]. Esta melhoria e otimização do sistema foi obtida através da mudança de um fundo projectado para um fundo activo com recurso a um monitor. Tal como se verifica na figura 4.1 abaixo representada, podemos ver que o fundo projectado para além de necessitar de ausência de luz ambiente, provoca muitos erros na aquisição das imagens devido à disparidade e às imperfeições causadas pela difracção da luz através do fundo, no qual este está a ser projectado. Nas seguintes secções, iremos analisar os vários casos de estudo ou objetos de fase já com o uso de um fundo activo, tal como mencionado anteriormente.

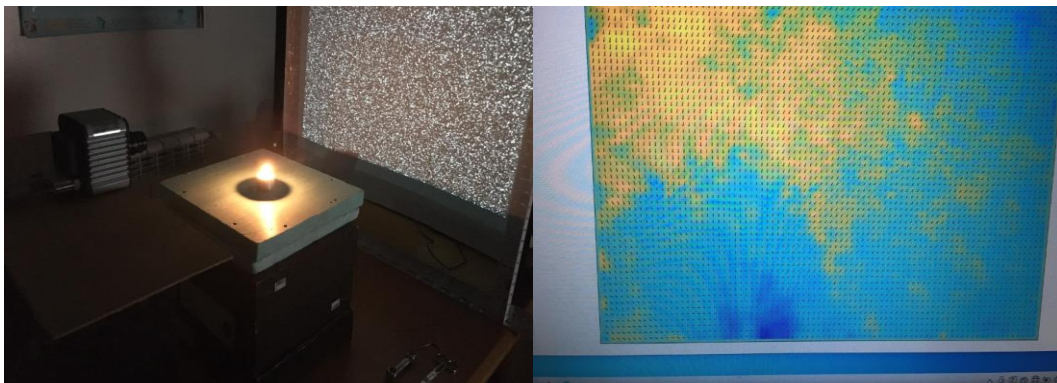


Figura 4.1: Sistema Schlieren orientado para o fundo utilizando um fundo projectado.

Na Figura 4.1 podemos ver um resultado obtido para a chama de uma vela com o sistema BOS fazendo uso de um fundo projetado. Tal como se verifica pela imagem ao lado, apesar do sistema permitir detetar uma zona de variação de densidades relativa ao escoamento de ar quente produzido pela vela, este resultado não apresenta o padrão correto nem o formato esperado do escoamento. Tal como veremos nas secções seguintes, a utilização de um fundo activo com recurso a um monitor, permitiu-nos ultrapassar esta dificuldade.

### 4.1.1 Análise ao escoamento de uma vela

Como referido no último capítulo, para obtermos uma validação do nosso sistema Schlieren orientado para o fundo, iremos analisar os escoamentos induzidos por vários objetos de fase, também eles mencionados no último capítulo. O primeiro objeto de fase que iremos analisar será o escoamento induzido através da chama de uma vela. O escoamento de ar quente produzido por uma vela constitui um bom objeto de fase pois causa grandes variações na densidade do ar envolvente, tal como demonstrado em outros estudos [36].

Como podemos ver na figura 4.2 abaixo, que diz respeito aos campos de deslocamentos de partículas por parte da chama desta vela, verificamos que estes campos de deslocamentos possuem muito ruído, já que a vela está colocada no centro do plano, e vemos também muitos vectores ao redor desta. De notar que nestes resultados não tivemos em conta a influência das condições de fronteira sobre os nossos resultados, pelo que nestes testes iniciais, as condições de fronteira são impostas através da imposição de valores forçados do índice refractivo para as condições ambiente em qualquer uma das margens da janela de interrogação.

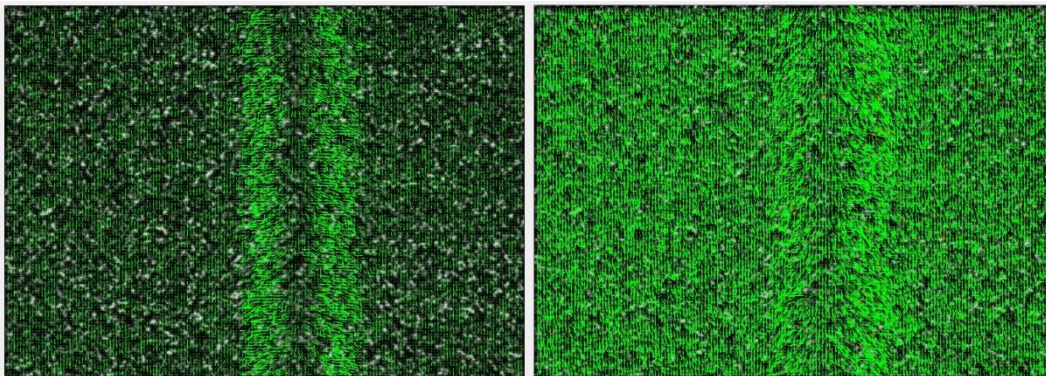


Figura 4.2: Campos de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pela chama de uma vela.

Podemos então observar na figura 4.3 abaixo os resultados já após a reconstrução destes para um campo de temperaturas. Tal como podemos observar, para uma temperatura ambiente em torno dos 25°C, temos que a temperatura ambiente se torna bastante vaga, incluindo zonas com temperaturas na ordem dos 10°C. Podemos ainda observar que o que seria expectável de se obter seria a zona mais quente localizada na margem de baixo da imagem, o que não acontece. Desta forma podemos então concluir que as condições de fronteira estavam a ter impacto e a adulterar os resultados finais.

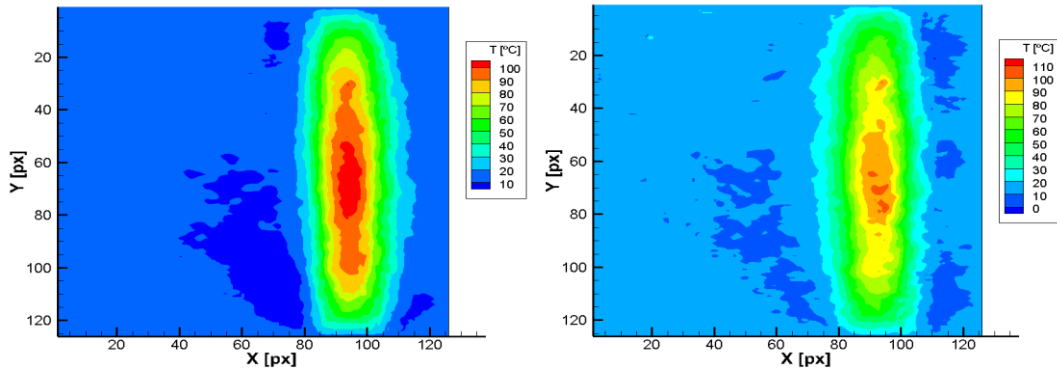


Figura 4.3: Campos de temperatura de uma chama de uma vela reconstruídos com influência das condições de fronteira.

De modo a melhorarmos os resultados finais, testou-se também a realização da medição a diferentes distâncias da vela. Como podemos verificar na figura 4.4 abaixo representada, temos que o campo de deslocamentos de partículas quando comparado com os anteriores não possui ruído algum fora da zona de variação de densidades do ar por parte da chama da vela, o que nos leva a crer que os resultados terão muito mais brio e qualidade.

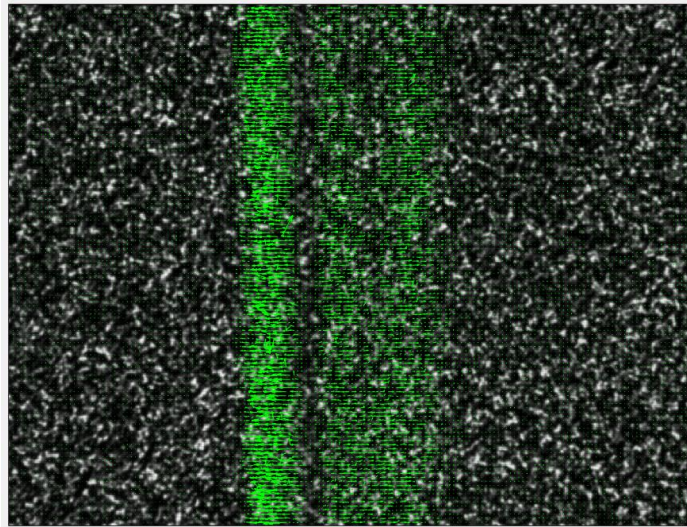


Figura 4.4: Campo de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pela chama de uma vela com erro minimizado.

Na figura 4.5 abaixo, conseguimos ver o campo de densidades e de temperaturas por parte do escoamento induzido pela chama da vela já reconstruídos com sucesso. Nestes resultados, tal como referido no capítulo anterior, foram impostas condições de Neumann, ou seja, que tendem para zero nas margens inferior e superior da nossa janela de interrogação. Tal como podemos verificar, com a implementação destas novas condições de fronteira conseguimos reduzir a influência destas sobre os nossos resultados. Desta maneira, conseguimos verificar que na margem inferior do nosso plano de medição, conseguimos encontrar a temperatura mais alta ou a densidade mais baixa para a chama da nossa vela, tal como seria de esperar.

De relembrar que o nosso plano de medição após o tratamento de imagem e correspondente à realidade no plano do objecto de fase tem apenas 6,5 cm de largura e 6,5 cm de altura. Pelo que conseguimos ver uma extensão destas propriedades ao longo dos 6,5 cm. Relembramos ainda que o escoamento analisado é realizado a uma altura inicial de 10,5 cm da base da vela.

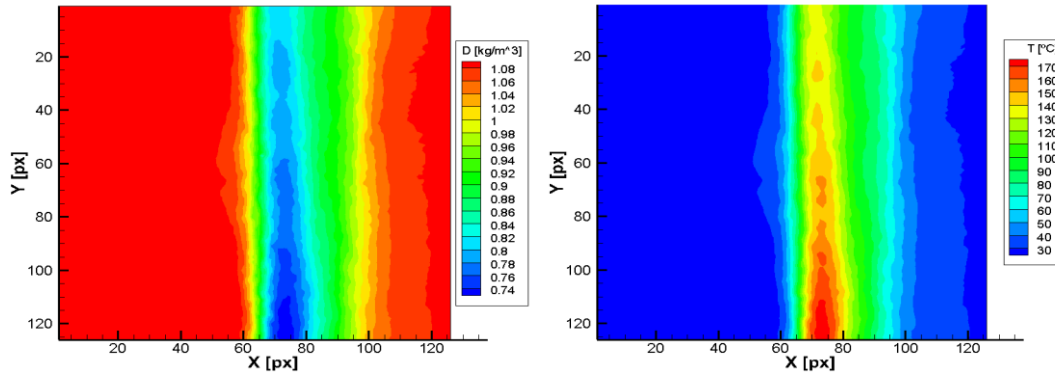


Figura 4.5: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento da chama de uma vela.

Como podemos reparar na figura 4.6 abaixo, provenientes de um estudo semelhante ao nosso [36], no que toca à análise do escoamento induzido pela chama de uma vela, temos que os nossos resultados da reconstrução do campo de densidades e de temperaturas são bastante próximos em todos os aspectos daqueles obtidos no estudo. Pelo que podemos concluir que o nosso sistema se encontra calibrado e validado com sucesso em termos qualitativos.

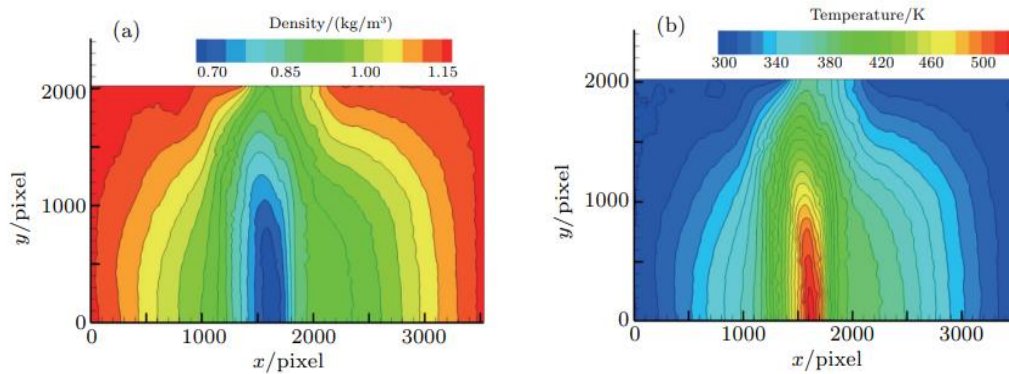


Figura 4.6: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento da chama de uma vela obtido na literatura, reproduzida de [36].

Ainda de forma a validarmos estes resultados e todo o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo, assim como todo o método quantitativo por detrás da análise, foi feito um varrimento de temperaturas usando um termopar de tipo K, sendo que os resultados foram então digitalizados através do *Arduino*. De relembrar que todas as medições são fruto de médias de 10 amostras consecutivas e foram medidas nos mesmos pontos em ambos os métodos, quer para o Schlieren orientado para o fundo, quer para o método convencional baseado no uso do termopar. O

varrimento de temperaturas foi feito nos eixos centrais do campo de temperaturas através da análise da figura 4.5 anteriormente representada. Foram retirados vários pontos para  $X = 63$  pixels e para  $Y = 63$  pixels, sendo que cada um dista 1,3 cm do próximo desde uma altura inicial de 10,5 cm, tal como foi mencionado anteriormente, ao longo dos 6,5 cm da janela de interrogação. Todos os resultados estão em graus Celsius e desta maneira representamos então os resultados na tabela 4.1 seguinte, assim como o erro relativo entre os dois métodos.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo vertical do campo de temperaturas de uma chama de uma vela.

Ponto de medição	1	2	3	4	5
BOS (°C)	173.810	161.018	148.975	138.431	132.209
Termopar (°C)	172.990	160.860	149.080	138.040	132.020
Erro (%)	0.477	0.096	0.070	0.285	0.147

Como podemos ver na figura acima os erros entre os diferentes métodos, ao longo do eixo vertical, são bastante baixos, pelo que temos uma boa precisão para este eixo. O mesmo não se pode verificar para o eixo horizontal representado na tabela 4.2 seguinte.

Tabela 4.2: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo horizontal do campo de temperaturas de uma chama de uma vela.

Ponto de medição	1	2	3	4	5
BOS (°C)	77.817	107.389	148.842	60.676	30.204
Termopar (°C)	76.711	107.710	146.600	107.660	76.704
Erro (%)	1.442	0.296	1.529	43.643	60.623

Os resultados para ambos os eixos apresentam uma percentagem de erro bastante reduzida, no entanto nos resultados para os pontos 4 e 5 conseguimos ver um erro bastante superior. Este erro deve-se à oscilação da chama da vela, uma característica intrínseca deste tipo de escoamento que não nos é possível controlar. Através da observação dos resultados para o eixo horizontal, vemos que existe alguma disparidade entre os pontos 1 e 2, os quais se encontram à esquerda do centro da chama da vela, e os pontos 4 e 5 que se encontram à direita do centro da chama da vela. Tal como referido anteriormente esta disparidade deve-se à oscilação por parte da chama da vela que não pode ser controlada quando estamos a fazer a análise através do Schlieren orientado para o fundo. No entanto, nas secções seguintes vão ser analisados outros objectos de fase para que consigamos ter uma validação mais credível.

### 4.1.2 Análise ao escoamento de uma placa de aquecimento

O segundo objeto de fase que iremos analisar trata-se do escoamento induzido por parte de uma placa de aquecimento. Iremos utilizar esta placa, já que é uma fonte mais estável que a vela anteriormente referida e que não está tão sujeita a oscilações do meio envolvente. Também vamos utilizar a placa de forma a verificar o quão adequado é o nosso sistema para análise de objetos de fase tridimensionais, já que o nosso método é apenas bidimensional.

Na figura 4.7 abaixo, conseguimos ver o campo de deslocamentos de partículas por parte do escoamento da placa de aquecimento. Como podemos ver a variação de densidade não toma a forma esperada ao longo de toda a margem inferior da janela de interrogação. Podemos ver também um resultado já posteriormente analisado com o campo de temperaturas reconstruído em que também estariam a ser impostas condições de fronteira através da imposição de valores fixos para o índice refrativo. Neste resultado verificamos mais uma vez a influência negativa destas condições de fronteira para a obtenção de resultados finais.

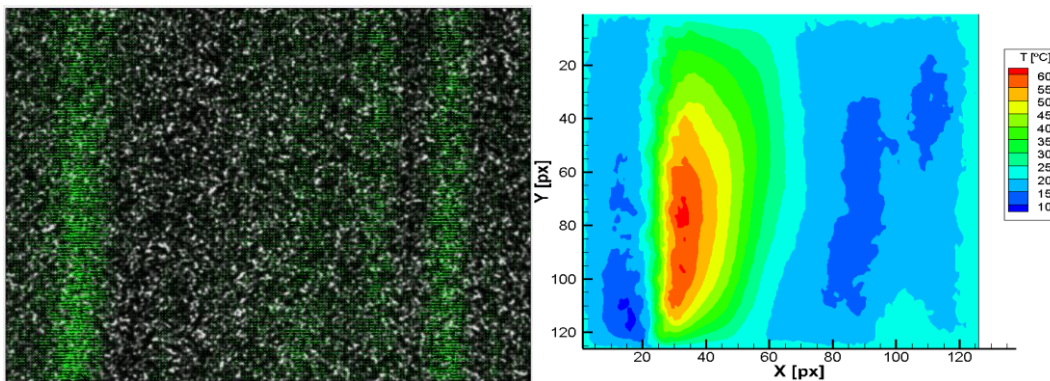


Figura 4.7: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente de uma placa de aquecimento com influência das condições de fronteira.

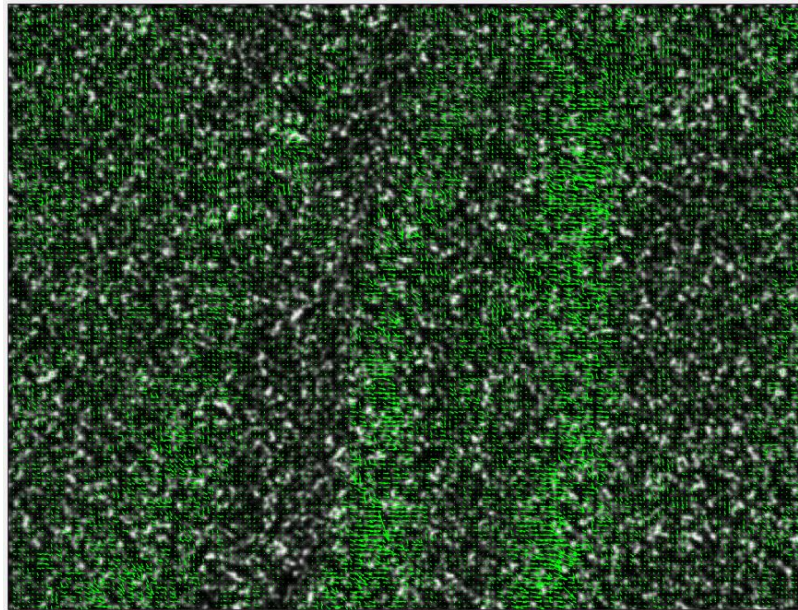


Figura 4.8: Campo de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pelo escoamento de uma placa de aquecimento chama com erro minimizado.

Como podemos verificar na figura 4.8 acima reparámos que o campo de deslocamentos de partículas para a placa de aquecimento continua a apresentar um comportamento um tanto aleatório tendo em conta a uniformidade desta fonte de calor e objeto de fase. Após a imposição das condições de Neumann referidas no capítulo anterior, as quais tendem para zero nas margens inferior e superior do nosso plano de medição, conseguimos então reconstruir com eficácia os campos de densidades e de temperaturas para a placa de aquecimento.

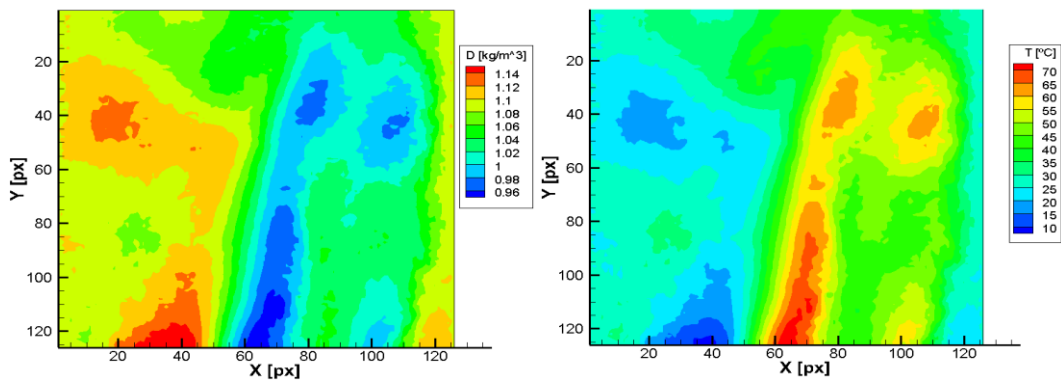


Figura 4.9: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento de uma placa de aquecimento.

Após a análise da figura 4.9 acima, podemos confirmar as nossas suspeitas, assim como para o campo de deslocamentos de que o escoamento por parte deste objeto constitui um fenómeno tridimensional que não consegue ser totalmente capturado através do nosso sistema Schlieren orientado para o fundo. Por este mesmo motivo, não foi feita uma validação através de outros

métodos. Relembramos que o plano de medição mantém as dimensões anteriormente referidas. No entanto, o escoamento está a ser analisado a uma altura inicial de 7,6 cm da base da placa.

### 4.1.3 Análise ao escoamento de um maçarico de cozinha

O último objeto de fase que iremos analisar será o escoamento induzido pela chama de um maçarico de cozinha. Iremos utilizar este objeto de forma a confirmar e reforçar a validação do nosso sistema Schlieren orientado para o fundo, já que este é um objeto que consegue causar maiores variações de densidade do ar, uma vez que este origina temperaturas bastante mais altas do que as originadas pela vela. Por outro lado, permite também gerar uma chama mais uniforme, ou seja, não está tão sujeita a oscilações do meio.

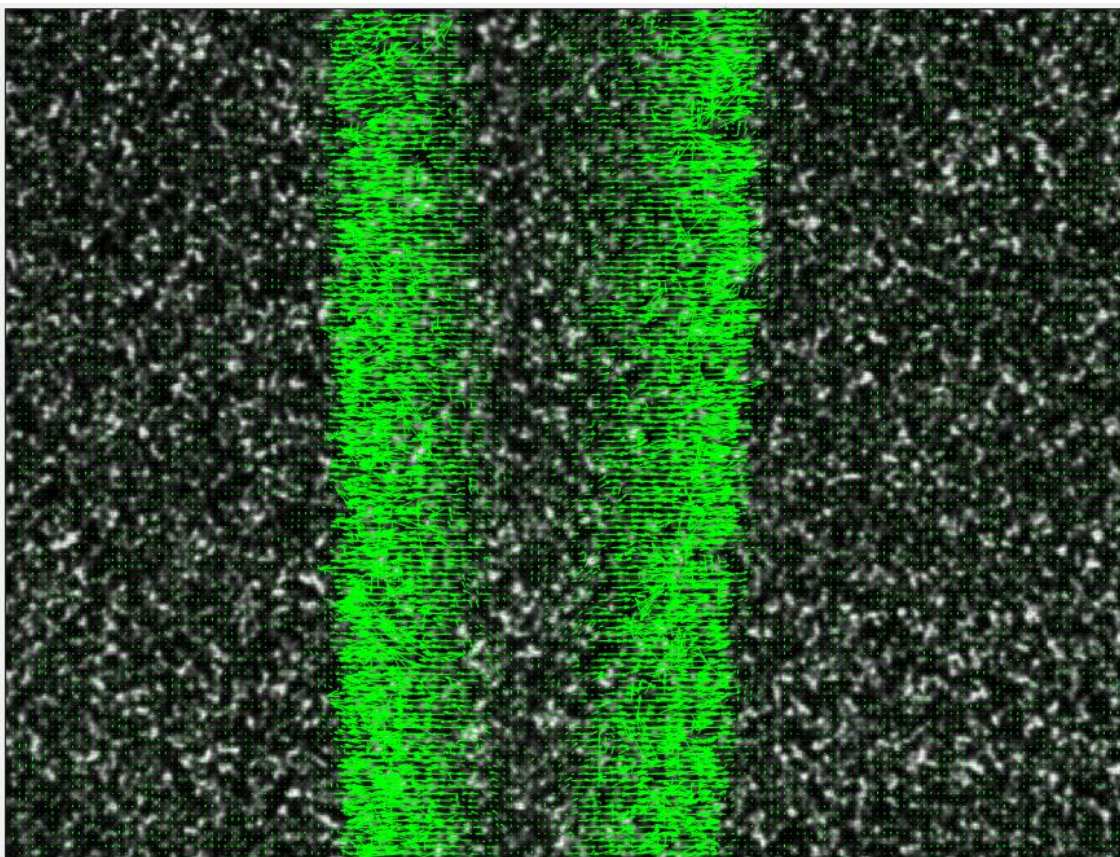


Figura 4.10: Campo de deslocamentos de partículas devido à diferença de densidade no ar causada pelo escoamento da chama de um maçarico de cozinha com erro minimizado.

Como podemos reparar na figura 4.10 acima representada temos o campo de deslocamentos de partículas para um maçarico de cozinha, vemos então que os vectores são bastante uniformes e o campo de deslocamentos tem pouco ou nenhum ruído fora das zonas de variação de densidades no ar causadas pela chama do maçarico de cozinha.

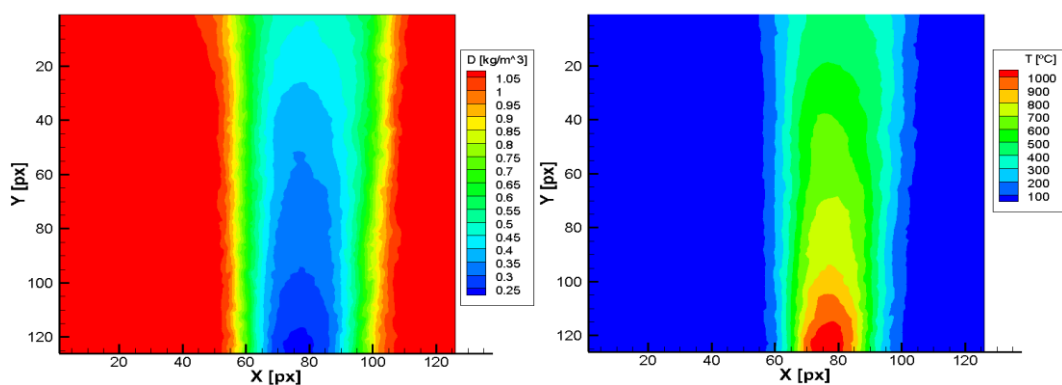


Figura 4.11: Campo de densidades e de temperaturas devido ao escoamento da chama de um maçarico de cozinha.

Na figura 4.11 acima, podemos verificar os campos reconstruídos de densidades e de temperaturas para o escoamento induzido pelo maçarico de cozinha, respectivamente. Através da análise desta figura observamos que estes campos reconstruídos constituem uma boa reconstrução e análise do escoamento induzido por este. Ao contrário dos resultados anteriores para os restantes objetos de fase, nesta análise foram logo impostas as condições de Neumann referidas anteriormente, que tendem para zero nas margens inferior e superior da nossa janela de interrogação. Desta maneira, conseguimos verificar que, tal como expectável, as temperaturas mais altas se encontram na margem inferior do nosso plano de medição.

Relembramos ainda que para esta análise as dimensões do nosso plano de medição, mantêm-se idênticas, mas a distância do escoamento analisado dista 7 cm desde a margem inferior até ao bocal do maçarico de cozinha.

Tal como foi feito para a vela, e de forma a termos uma segunda validação para o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo, foi também feito um varrimento de temperaturas utilizando um termopar tipo K em que os resultados foram então digitalizados através do *Arduino*. Os varrimentos foram feitos nos eixos centrais do campo de temperaturas tal como descrito anteriormente. As temperaturas analisadas são fruto de médias de 10 amostras consecutivas e foram medidas nos mesmos pontos para ambos os métodos. Temos então que os varrimentos foram feitos para  $X = 63$  pixels e para  $Y = 63$  pixels. Foram retirados vários pontos, sendo que cada um dista 1,3 cm do próximo a uma altura inicial de 7 cm, como referido anteriormente ao longo destes 6,5 cm, altura da janela de interrogação.

Apresentamos então os resultados para as temperaturas obtidas em graus Celsius e para o erro relativo entre os dois métodos.

Tabela 4.3: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo vertical do campo de temperaturas de uma chama de um maçarico de cozinha.

Ponto de medição	1	2	3	4	5
BOS (°C)	1050.300	804.880	680.500	567.200	440.870
Termopar (°C)	961.160	801.700	684.720	591.120	449.310
Erro (%)	9.273	0.397	0.617	4.047	1.879

Como podemos ver na tabela 4.3 acima representada, ao longo do eixo vertical, os erros entre os dois métodos são bastante baixos, no entanto não são tão baixos quando comparados aos da vela, o que nos leva a concluir que este método não é tão eficaz para temperaturas muito elevadas, como é o caso do maçarico. No entanto, podemos considerar com estes valores de erro que mais uma vez o sistema BOS implementado nos permite quantificar as temperaturas do escoamento com precisão.

Tabela 4.4: Resultados obtidos para ambos os métodos assim como o erro relativo entre ambos para o eixo horizontal do campo de temperaturas de uma chama de um maçarico de cozinha.

Ponto de medição	1	2	3	4	5
BOS (°C)	136.280	486.350	681.120	598.000	291.190
Termopar (°C)	289.050	590.690	691.180	585.520	288.940
Erro (%)	52.853	17.664	1.456	2.133	0.776

Tal como se verificou para a vela, os resultados não são tão precisos para o varrimento ao longo do eixo horizontal representado na tabela 4.4 acima. Temos que os resultados para ambos os eixos apresentam uma percentagem de erro reduzida na zona central, mas nos resultados para os pontos 4 e 5 conseguimos ver um erro bastante superior quando comparado com os pontos 1 e 2. Temos novamente que este erro se deve à oscilação da chama do maçarico de cozinha que também constitui uma característica intrínseca deste tipo de escoamento que não nos é possível controlar durante a captura de imagens para o método Schlieren orientado para o fundo. No entanto, podemos concluir que mesmo com esta disparidade entre os vários pontos temos uma validação sólida do nosso sistema Schlieren orientado para o fundo para medições na zona central do plano de medição. As zonas nas laterais apresentam um erro superior que também se pode justificar com a proximidade das condições de fronteira impostas, que acabam por influenciar as medições. Pela validação aqui apresentada, concluímos que o sistema implementado nos permite adquirir resultados e com uma margem de erro bastante reduzida e que, como tal, pode ser aplicado para a análise consequente do escoamento induzido por parte dos actuadores a plasma do tipo DBD.

## 4.2 Actuadores a plasma do tipo DBD

Antes de realizarmos as análises ao escoamento por parte dos actuadores a plasma do tipo DBD iremos primeiramente verificar se existe algum impacto devido ao comprimento do nosso objeto de fase, ou seja, inicialmente vão ser analisados dois actuadores padrão referidos no capítulo anterior. Nesta dissertação, o actuador padrão será um actuador feito com camada dielétrica de kapton com uma espessura de 1,02 mm, uma vez que este será o actuador comum aos diferentes testes realizados. Vamos então considerar o actuador curto como sendo um actuador com 5 cm de comprimento e 4 cm de largura, sendo que com as dimensões dos eléctrodos exposto e coberto a região de formação do plasma terá cerca de 3 cm. Para além deste actuador, iremos também fazer um com as dimensões referidas no capítulo anterior que são mais comuns na literatura, ou

seja, com 10 cm de comprimento e 5 cm de largura. Com as dimensões dos eléctrodos coberto e exposto já mencionadas, obtemos então uma região de formação de plasma com 8 cm. Como o sistema BOS implementado nos permite principalmente analisar um escoamento num plano bidimensional, este ensaio experimental tornou-se necessário para verificarmos se um comprimento maior de atuador pode ou não afetar negativamente a medição.

Os resultados para as análises destes actuadores encontram-se nas figuras 4.12 e 4.13 abaixo representadas. Relembramos que para estas análises, foram impostas condições de Neumann nas margens esquerda e direita da nossa janela de interrogação e que todos estes ensaios foram feitos para uma tensão de 9 kVpp. O primeiro ensaio foi feito após 30 segundos de funcionamento, o segundo após um minuto e meio e o terceiro após 2 minutos e meio.

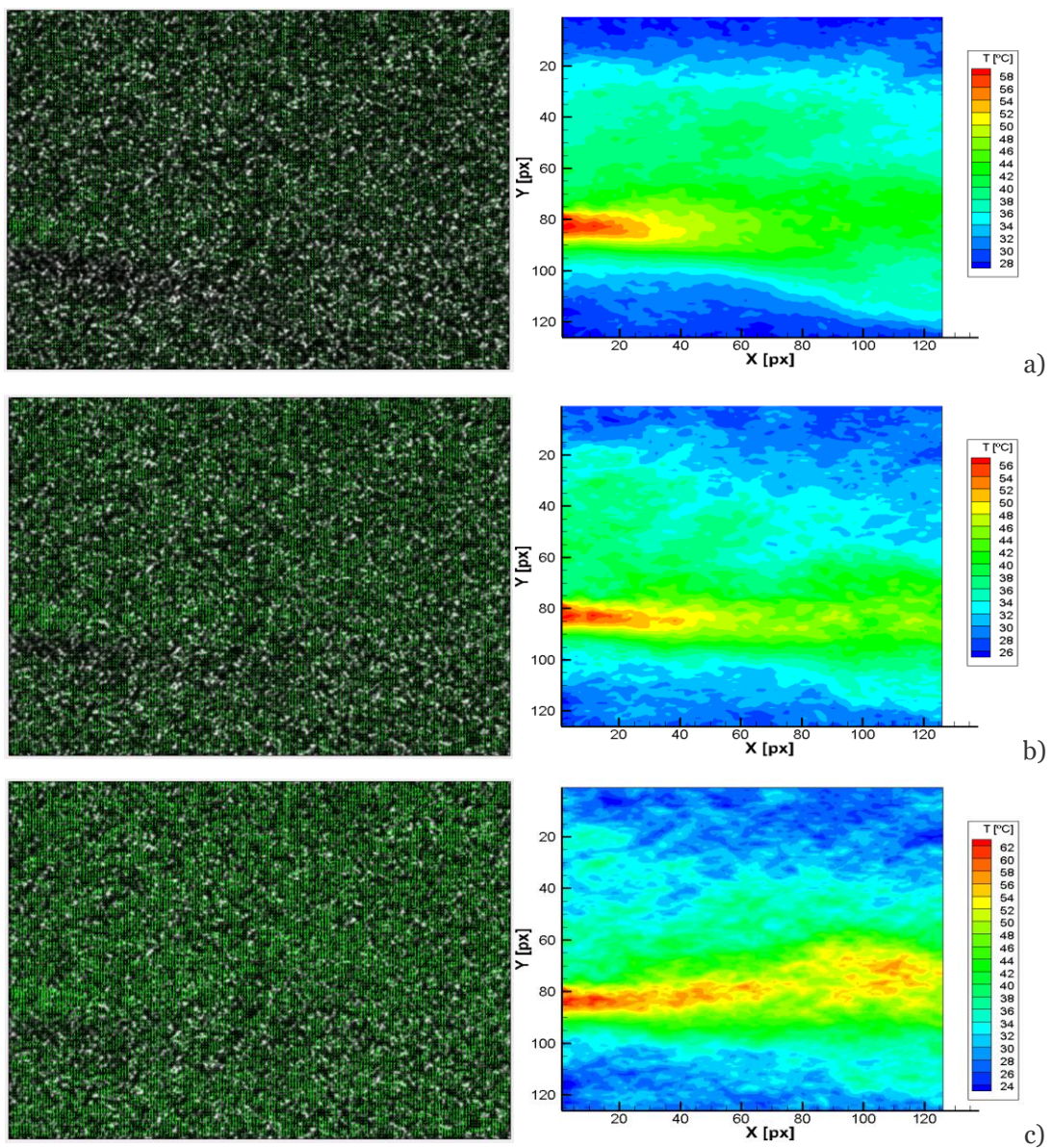


Figura 4.12: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão curto a) após 30 segundos de funcionamento; b) após 90 segundos de funcionamento; c) após 150 segundos de funcionamento.

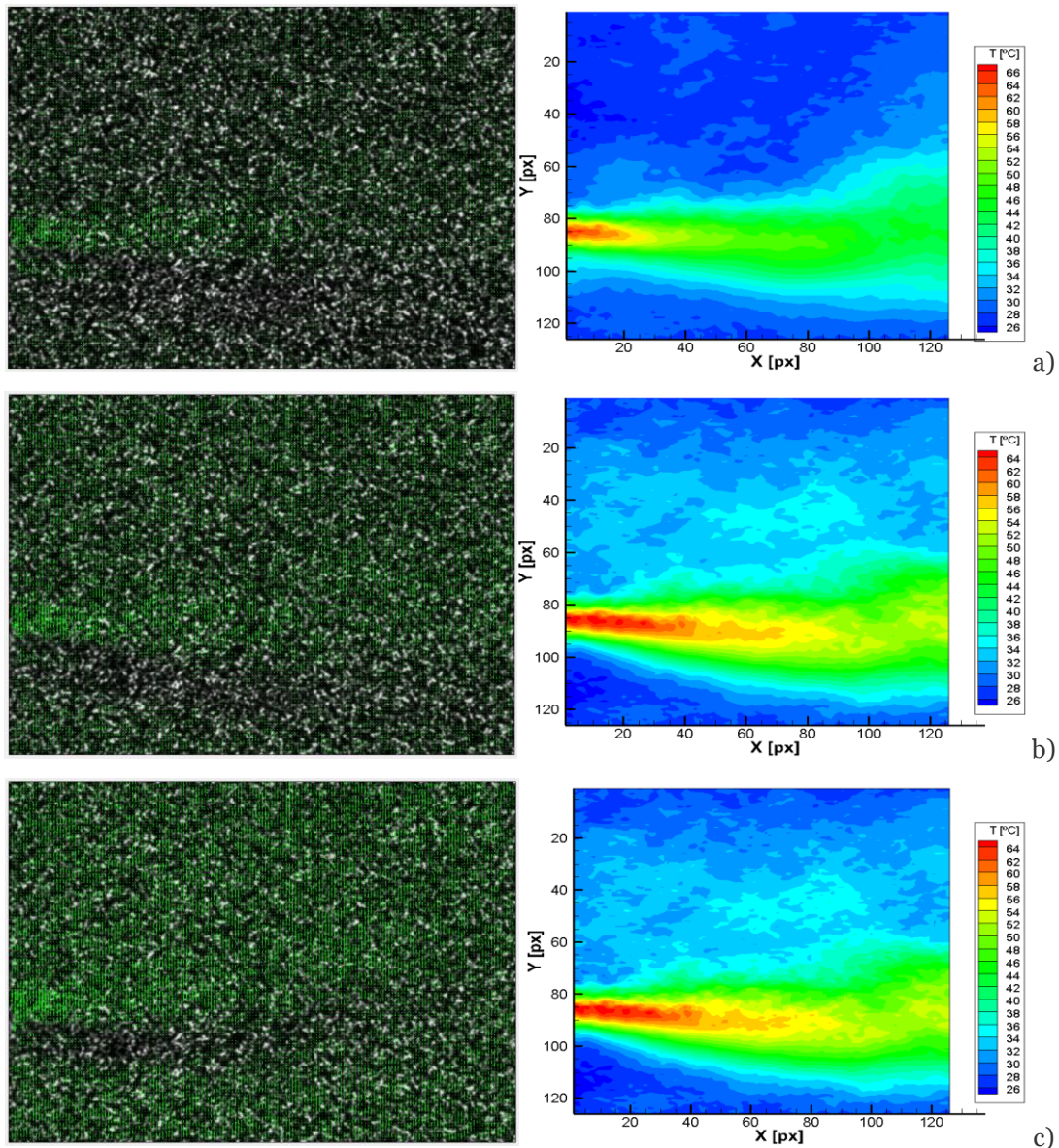


Figura 4.13: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão longo a) após 30 segundos de funcionamento; b) após 90 segundos de funcionamento; c) após 150 segundos de funcionamento.

Através da análise dos resultados acima representados concluímos que não se verifica uma influência significativa do escoamento devido a efeitos tridimensionais tal como se verificou anteriormente para o escoamento induzido pela placa de aquecimento. O actuador mais curto serviu exactamente para verificar se existe alguma diferença na análise do escoamento entre este e o actuador longo.

Como visto anteriormente [15] o objeto de fase deve ser o menos espesso possível já que o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo é apenas bidimensional. Verificou-se ainda que para o actuador mais curto tivemos oscilações maiores na temperatura do seu escoamento. O que seria esperado, já que a camada dielétrica aquece muito mais facilmente devido ao seu tamanho reduzido. Desta maneira decidimos então utilizar as dimensões do actuador mais longo para as restantes análises. Podemos ainda concluir que 30 segundos é o tempo necessário para

estabilização das temperaturas de escoamento por parte dos actuadores a plasma com as dimensões do actuador longo referidas anteriormente.

#### 4.2.1 Caracterização eléctrica dos actuadores a plasma do tipo DBD

Na figura 4.14 abaixo representada temos a representação das formas de onda correspondentes à tensão e à corrente do actuador a plasma, neste caso para um actuador a plasma de 1,02 mm de espessura com camada dieléctrica de kapton quando lhe são aplicados 10kVpp.

Como é possível verificar, enquanto que a forma de onda para a tensão apresenta um comportamento sinusoidal, a forma de onda da corrente, apesar de seguir também um comportamento sinusoidal apresenta, vários picos ao longo desta onda. Tal como referido nos capítulos anteriores, estes picos correspondem a momentos de descarga por parte do actuador a plasma quando o plasma se forma. Estas descargas causam alterações na impedância da camada dieléctrica e ocorrem duas vezes por cada ciclo de corrente.

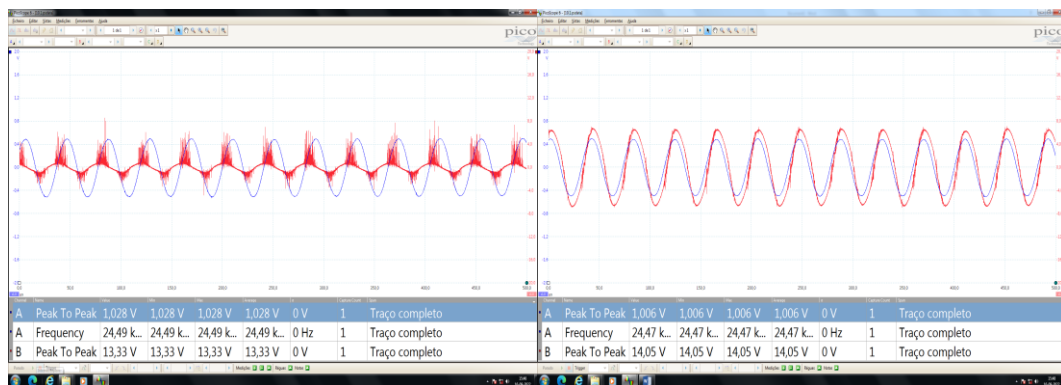


Figura 4.14: Formas de onda da tensão e da corrente para um actuador a plasma do tipo DBD com camada dieléctrica de kapton com 1,02mm de espessura para 10kVpp.

Iremos agora analisar o consumo energético dos actuadores a plasma do tipo DBD através do método da corrente eléctrica descrito nos capítulos anteriores. Tal como foi referido, este consumo energético foi estimado para os actuadores com 5, 10, 14 e 17 camadas que correspondem a 0,3, 0,6, 0,84 e 1,02 mm de espessura, respectivamente. Todos eles com camada dieléctrica de kapton. Na figura 4.15, apresentada abaixo, podemos observar o gráfico representativo dos resultados obtidos para os consumos energéticos para tensões entre os 4 e os 11 kVpp.

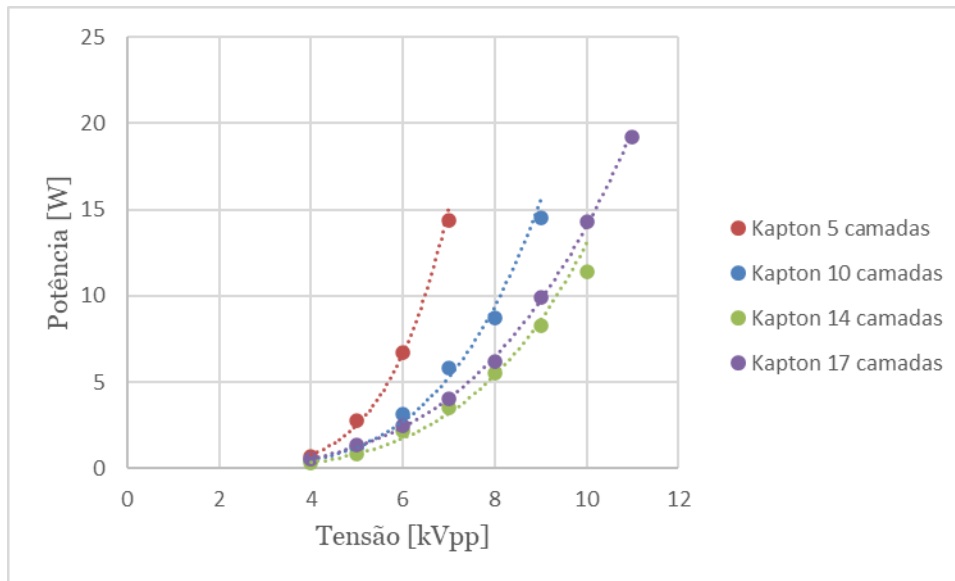


Figura 4.15: Consumo energético médio para actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes espessuras com camada dielétrica de kapton.

Como podemos reparar o actuador de 5 camadas é o que apresenta um maior consumo energético para o mesmo nível de tensão, sendo também o actuador que apresenta uma tensão máxima de funcionamento mais baixa. Podemos ainda reparar que com um aumento da espessura da camada dielétrica, temos uma diminuição da potência consumida para os mesmos níveis de tensão, o que é expectável já que também foi verificado que para um aumento da espessura na camada dielétrica, a formação do plasma apenas se dá para tensões mais elevadas. No entanto, nos resultados presentes nesta figura, verificamos que a relação que deveria existir entre espessura e o aumento de potência não ocorre para o actuador de 17 camadas quando comparado com o de 14. Foram levados a cabo vários ensaios para corrigir esta situação e verificar que o mesmo não acontece na realidade, no entanto, temos que esta pequena variação se deve à variação muito pequena entre as espessuras dos actuadores de 14 e 17 camadas e também devido a degradação da sua camada dielétrica. O que fez com que os resultados não apresentassem o comportamento esperado, no entanto, estes estão de acordo com as restantes especificações que serão descritas nas secções seguintes.

Podemos ainda ver na figura 4.16 representada abaixo, o consumo energético para actuadores com diferentes camadas dielétricas. Nesta figura, analisamos actuadores com 1 mm de espessura constituídos por diferentes materiais dielétricos, sendo estes kapton, PIB, teflon e PMMA, tal como foi referido anteriormente. Estes consumos energéticos podem ser visualizados abaixo para tensões entre os 4 e os 11 kVpp.

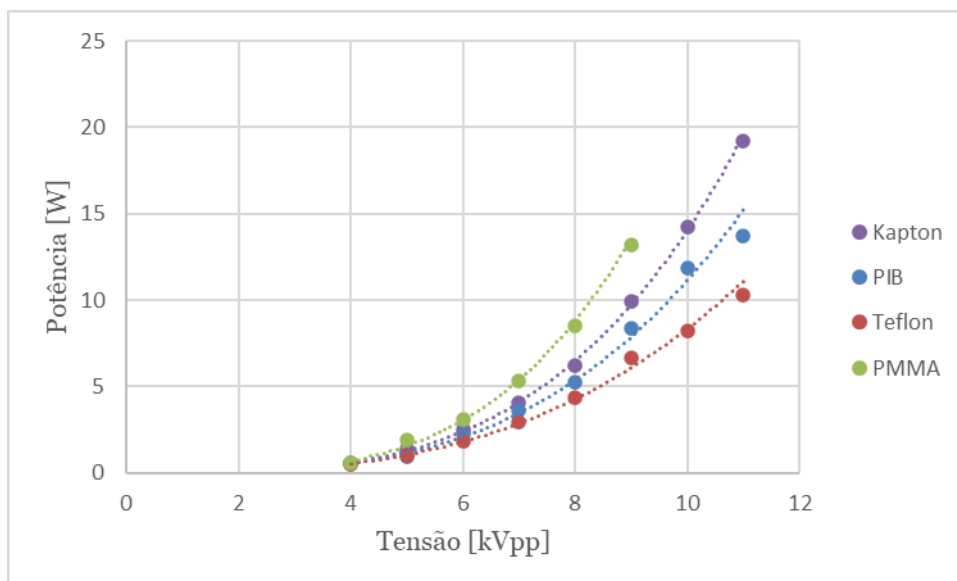


Figura 4.16: Consumo energético médio para actuares de plasma do tipo DBD com diferentes materiais como camada dielétrica.

Como podemos verificar através da análise da figura acima representada, temos que para a mesma espessura de 1 mm para os vários actuares de plasma, o actuator de PMMA é o actuator que consome mais potência para os mesmos níveis de tensão. Reparámos ainda nos testes que o actuator feito com camada dielétrica de PMMA é bastante frágil, visto que é um material que se deforma muito facilmente devido à sua deformação plástica com o aumento de temperatura. Pelo que não foi possível realizar testes com este actuator para tensões superiores a 9kVpp. O kapton quando comparado com os restantes materiais, excluindo o PMMA, é um material para a camada dielétrica que faz com que o actuator consuma mais potência, aumentando também a temperatura da camada dielétrica com a sua potência. Temos que os actuares de PIB e de teflon são actuares onde foi verificado ao longo de todos os testes e ensaios que apresentam um comportamento muito mais robusto no que toca à sua deformação e deterioração do dielétrico. De forma a obtermos a evolução da carga dos actuares durante o seu ciclo de tensão foi utilizado o método da carga elétrica descrito nos capítulos anteriores e foram então estimadas as curvas de Lissajous para cada actuator de plasma. Estas curvas encontram-se representadas na figura 4.17 e 4.18 abaixo para 7 e 8 kVpp, respectivamente.

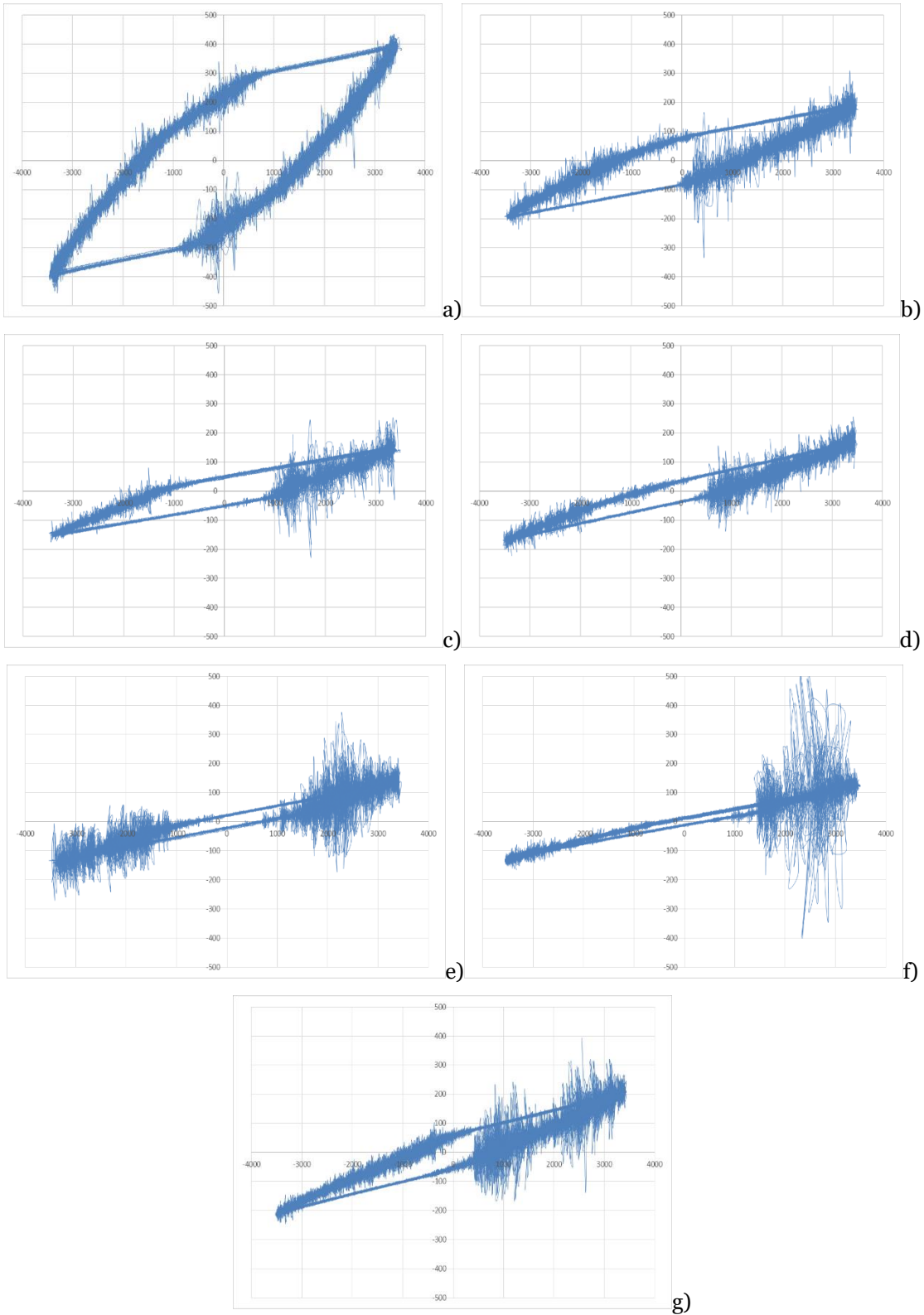


Figura 4.17: Curvas de Lissajous obtidas experimentalmente para uma tensão de 7kVpp, nas quais o eixo horizontal representa a tensão em Volt (V) e o eixo vertical representa a carga em nanoCoulomb (nC) a) Kapton 5 camadas; b) Kapton 10 camadas; c) Kapton 14 camadas; d) Kapton 17 camadas; e) PIB; f) Teflon; g) PMMA.

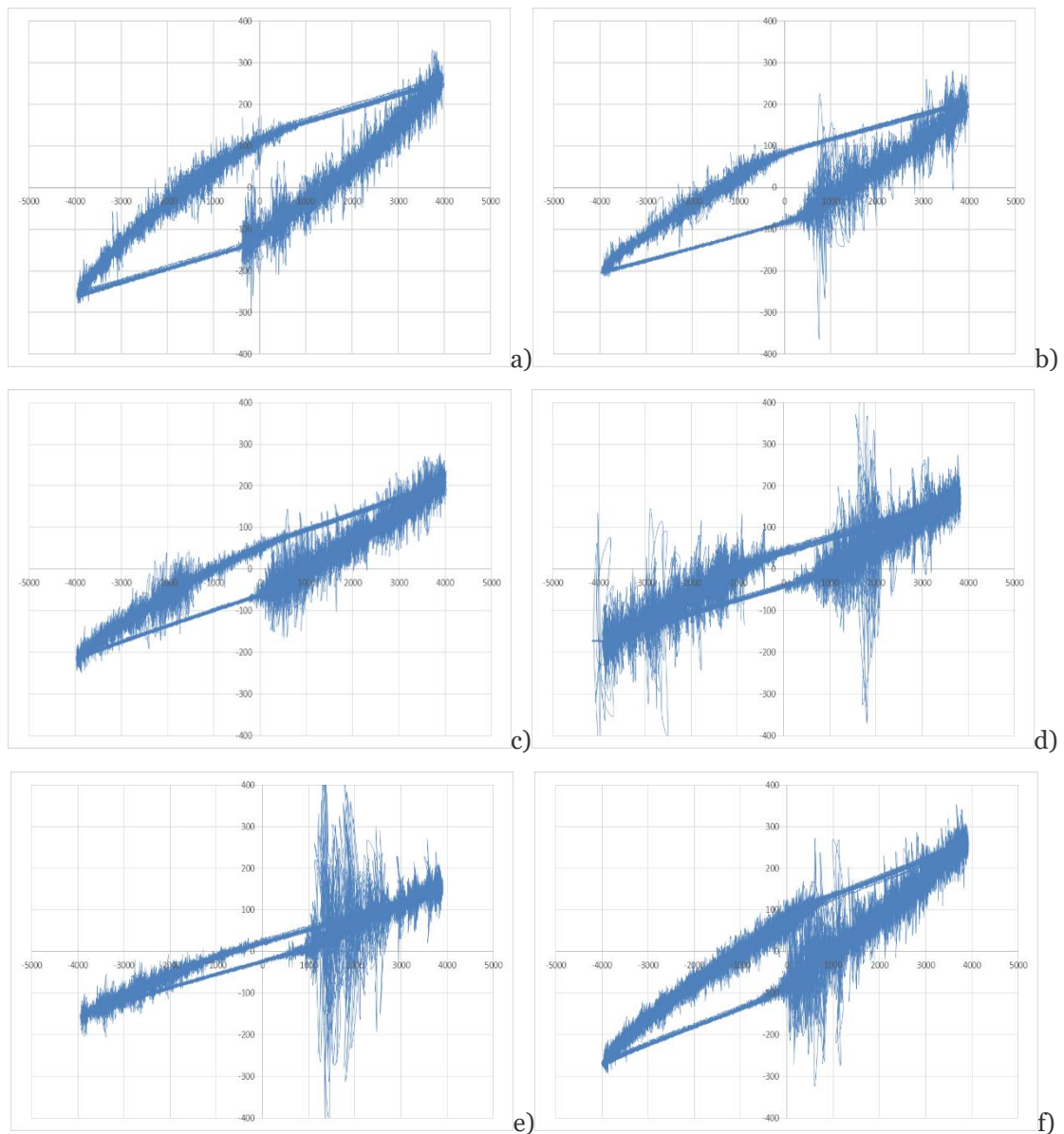


Figura 4.18: Curvas de Lissajous obtidas experimentalmente para uma tensão de 8kVpp, nas quais o eixo horizontal representa a tensão em Volt (V) e o eixo vertical representa a carga em nanoCoulomb (nC) a) Kapton 10 camadas; b) Kapton 14 camadas; c) Kapton 17 camadas; d) PIB; e) Teflon; f) PMMA.

Pela literatura [97, 99] temos que a área interior da curva de Lissajous corresponde à potência ou consumo energético por parte dos actuadores a plasma. Desta maneira, como podemos ver da análise das figuras acima representadas para as tensões de 7 e 8kVpp, verificamos que os resultados para o consumo de potência são congruentes com os resultados obtidos anteriormente para o consumo energético estimados pelo método da resistência eléctrica.

Como podemos observar existe uma diminuição da área das curvas de Lissajous com o aumento da espessura da camada dieléctrica para os actuadores de kapton o que seria de esperar e contraria os resultados obtidos pelo método da corrente eléctrica para os actuadores de 14 e de 17 camadas para ambos os níveis de tensão apresentados. No entanto, estes resultados encontram-se de

acordo com o expectável, sendo que se previa que o actuador de 14 camadas apresentasse um consumo de energia superior ao actuador de 17 camadas.

Podemos ainda verificar que de entre os actuadores apresentados com a mesma espessura é o actuador com camada dielétrica de PMMA que apresenta curvas com maior área seguido do actuador de kapton com 17 camadas. Por outro lado, o actuador de teflon mantém-se como o actuador mais eficiente em termos energéticos, resultados que se encontram de acordo com os obtidos pelo método da corrente eléctrica representados anteriormente.

#### **4.2.2 Caracterização das velocidades dos actuadores a plasma do tipo DBD**

De maneira a termos uma caracterização das velocidades induzidas pelo escoamento por parte de um actuador a plasma foi utilizado um tubo de pitot, tal como referido nos capítulos anteriores. A velocidade do escoamento induzida foi então obtida para diferentes alturas medidas a partir do actuador a plasma, as quais podem ser observadas nos perfis representados na figura 4.19 abaixo, para os diferentes actuadores construídos e analisados neste estudo.

Relembramos ainda que devido ao diâmetro do tubo de pitot, este instrumento é considerado como um elemento intrusivo, sendo que as velocidades não podem ser medidas directamente na zona de descarga de plasma. Por outro lado, estudos demonstraram que as velocidades induzidas pelo actuador apresentam maiores magnitudes numa zona ligeiramente à frente da zona de descarga de plasma, pelo que as medições dos perfis de velocidade foram realizadas a 1,5 cm de distância da lateral do eléctrodo exposto [100].

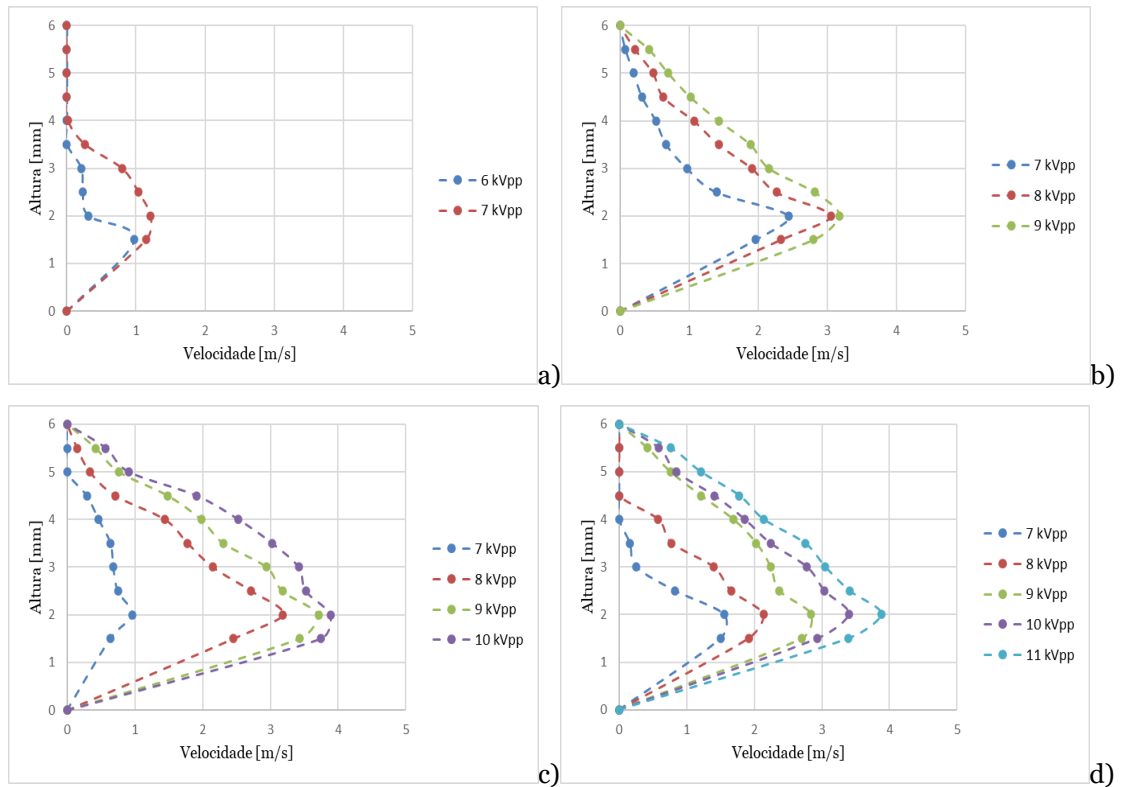


Figura 4.19: Perfis de velocidade para actuadores a plasma com camada dielétrica de kapton a) 5 camadas; b) 10 camadas; c) 14 camadas; d) 17 camadas.

Como podemos verificar na figura acima representada, temos uma comparação entre as velocidades obtidas para os escoamentos dos vários actuadores a plasma com camada dielétrica de kapton para 5, 10, 14 e 17 camadas, que correspondem a 0,3, 0,6, 0,84 e 1,02 mm, respectivamente. Como podemos observar, tal como para o consumo energético, verificamos que o actuador de 5 camadas apresenta uma tensão máxima de funcionamento mais baixa quando comparado com os restantes. Podemos ainda observar que quão mais espesso é um actuador a plasma maior será a tensão máxima que será capaz de suportar. Este comportamento deve-se ao facto da formação de plasma se realizar apenas para tensões mais elevadas, no caso dos actuadores mais espessos. Podemos então concluir que para níveis de tensão mais altos, as velocidades máximas por parte dos escoamentos destes actuadores vão também aumentando, sendo que temos uma velocidade máxima na ordem de 1,2 m/s para o actuador de 5 camadas, 3,1 m/s para o actuador de 10 camadas, 3,8 m/s para o actuador de 14 camadas e 3,9 m/s para o actuador de 17 camadas. Estes resultados demonstram que, para o mesmo nível de tensão aplicada, actuadores com camadas dielétricas de menor espessura permitem induzir velocidades de escoamento superiores. No entanto, como estes actuadores não conseguem suportar níveis de tensão aplicada tão elevados como actuadores com maior espessura de camada dielétrica, quando comparamos para o valor máximo de tensão suportada por cada um dos actuadores, verificamos que os actuadores com maior espessura permitem atingir magnitudes de velocidade de escoamento superiores.

Na figura 4.20 abaixo representada temos uma comparação entre as várias velocidades obtidas para os escoamentos dos vários actuadores a plasma, desta vez com a mesma espessura, mas com

camadas dielétricas diferentes. As camadas dielétricas são constituídas por kapton, PIB, teflon e PMMA como referido anteriormente.

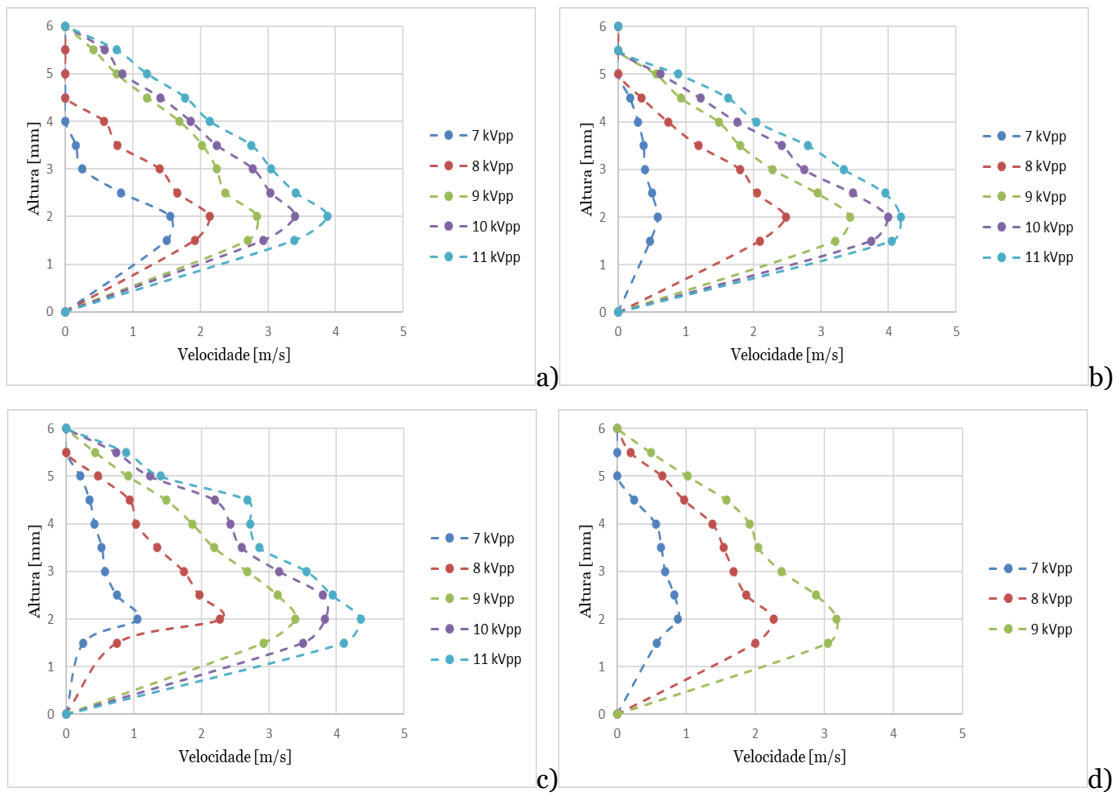


Figura 4.20: Perfis de velocidade para actuadores a plasma com camada dielétrica com 1mm de espessura a) Kapton; b) PIB; c) Teflon; d) PMMA.

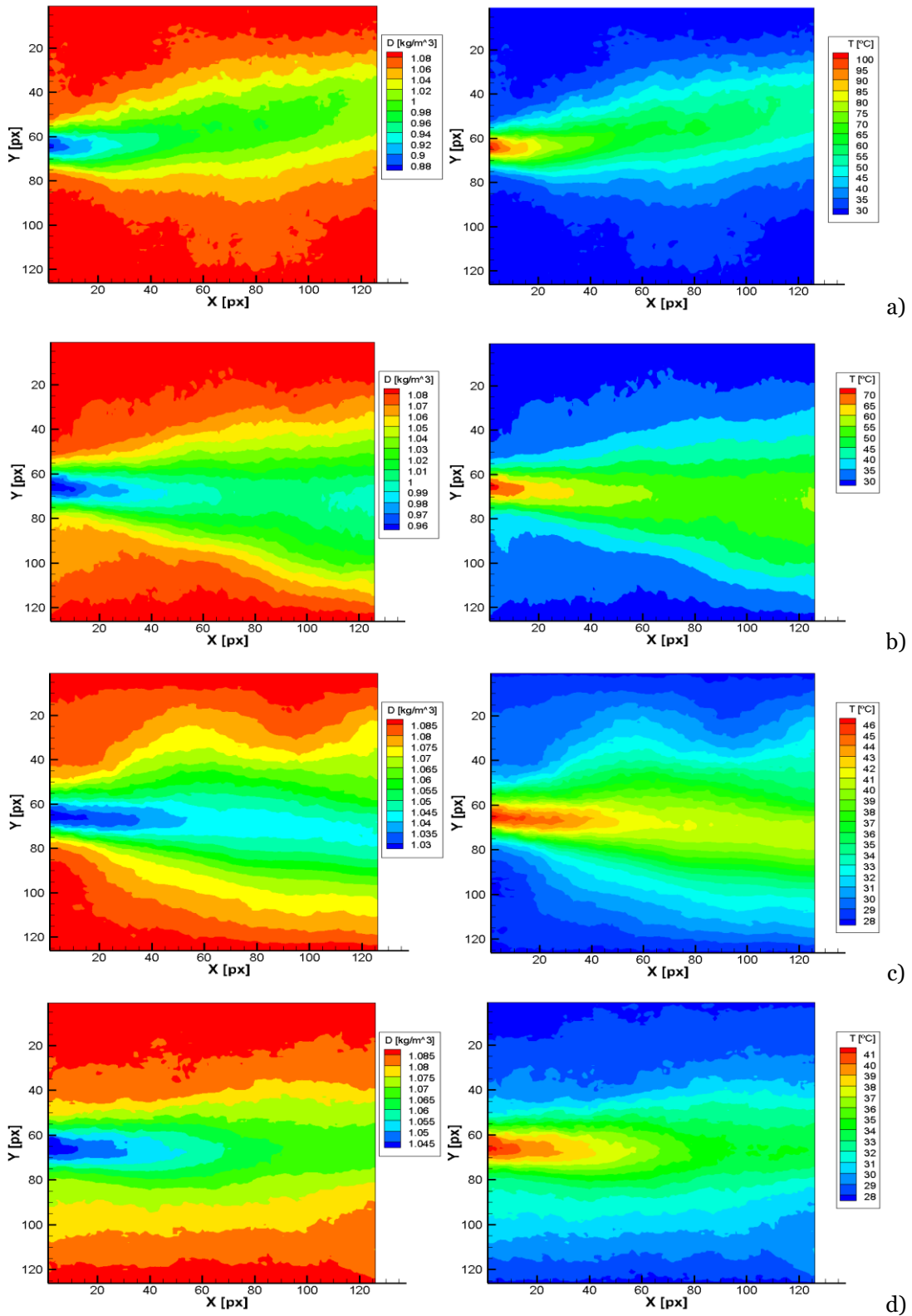
Como podemos observar através da análise dos vários gráficos para cada um dos actuadores, temos que a borracha PIB e o teflon são os materiais que tiveram um melhor rendimento no que toca à parte do consumo energético apresentados na secção anterior. São também materiais que como camada dielétrica, permitem ao actuador a plasma obter velocidades de escoamento superiores para os mesmos níveis de tensão comparativamente ao actuador de kapton. Temos ainda que o actuador de PMMA apresenta velocidades de escoamento mais reduzidas e não suporta níveis de tensão mais altos devido ao sobreaquecimento da camada dielétrica e a sua consequente deterioração e deformação plástica.

### 4.2.3 Análise ao escoamento proveniente dos actuadores a plasma do tipo DBD

Agora que o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo se encontra calibrado e validado, e a caracterização para os diferentes actuadores a plasma com diferentes espessuras e diferentes materiais dielétricos se encontram concluídas, podemos então aplicar o sistema Schlieren orientado para o fundo desenvolvido na presente dissertação. Assim com a utilização deste

sistema, poderemos proceder ao estudo e análise do campo de densidades e do campo de temperaturas do escoamento proveniente dos actuadores a plasma do tipo DBD.

Tal como se pode verificar na figura 4.21 abaixo representada, podemos ver vários campos de densidades e de temperaturas relativos ao escoamento induzido pelos vários actuadores a plasma estudados para 7kVpp.



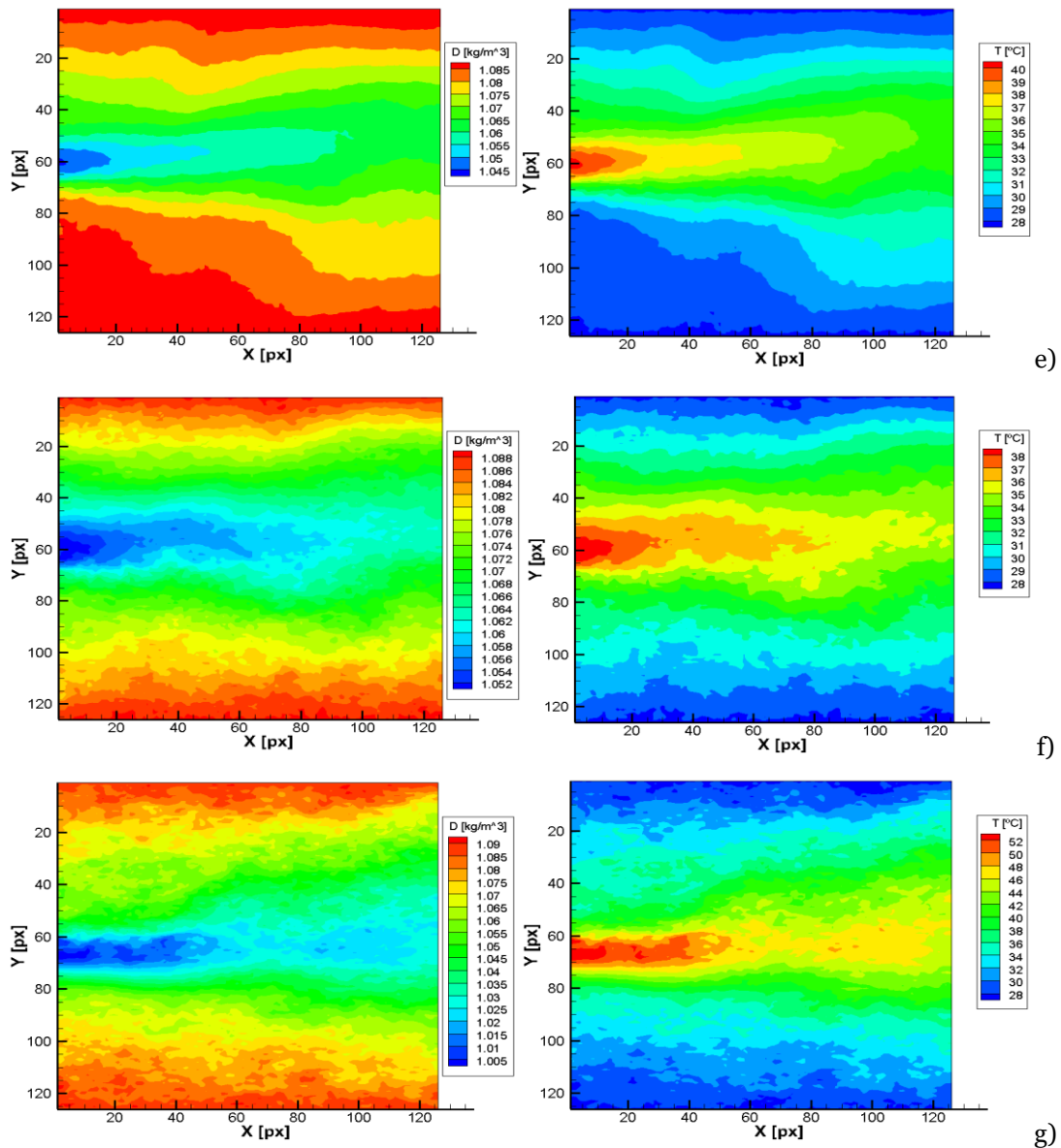


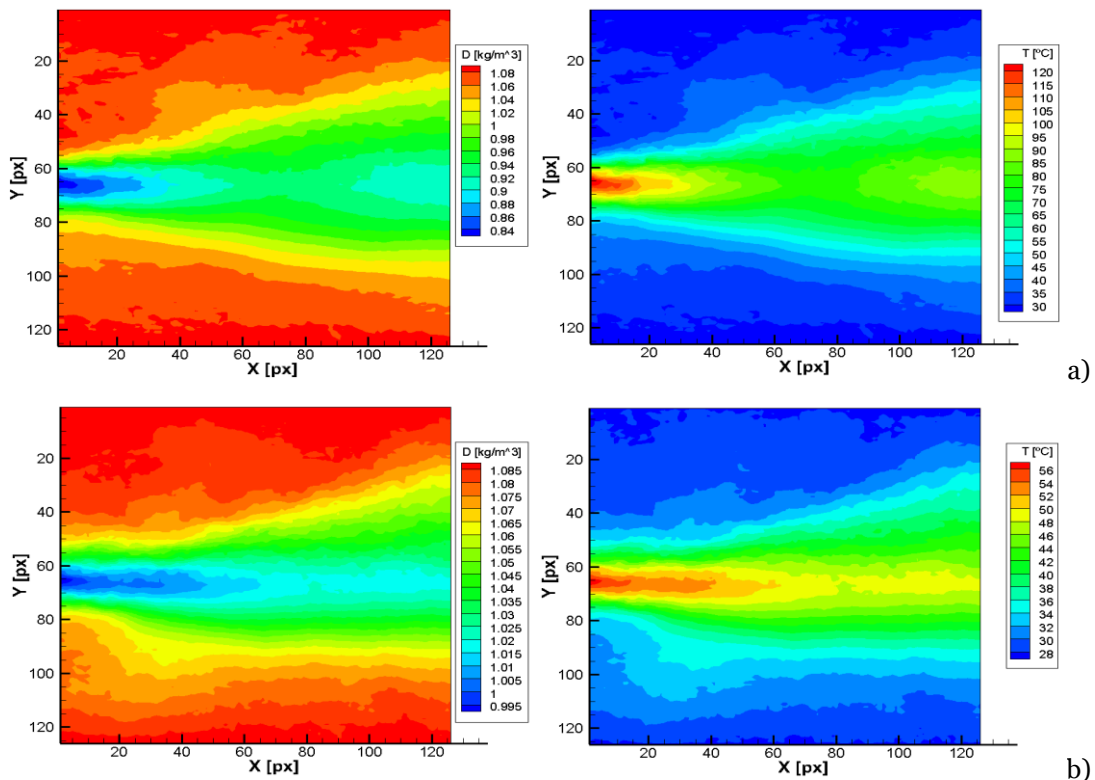
Figura 4.21: Campo de densidades e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD para 7kVpp a) Kapton 5 camadas; b) Kapton 10 camadas; c) Kapton 14 camadas; d) Kapton 17 camadas; e) PIB; f) Teflon; g) PMMA.

Como podemos ver pela análise da figura anterior, para os actuadores com a mesma camada dielétrica de fita de kapton e com diferentes espessuras temos que, para o mesmo nível de tensão representado, o actuador com 5 camadas tem uma temperatura máxima de escoamento de 100°C, para 10 camadas de 70°C, para 14 camadas de 46°C e para 17 camadas de 41°C. O que nos leva a concluir que as temperaturas do escoamento induzido serão inferiores para actuadores com espessuras de camada dielétrica maiores. Estes resultados fazem todo o sentido, já que, tal como foi referido anteriormente, para actuadores com uma espessura mais pequena, a formação de plasma ocorre mais cedo, ou seja, para níveis de tensão mais baixos. Por este mesmo motivo, o actuador de 5 camadas obteve um nível de tensão máximo de funcionamento mais baixo e daí uma formação de plasma mais precoce comparado aos restantes. Por outro lado, este actuador apresentou um consumo de energia superior aos restantes actuadores para o mesmo nível de

tensão aplicada. Uma vez que parte da energia consumida é transferida para o escoamento adjacente e a restante parte é dissipada sob a forma de calor, é expectável que este actuador também apresente uma dissipação de energia calorífica para o meio adjacente superior.

Quando comparados com o actuador de kapton de 17 camadas que corresponde a 1,02 mm de espessura temos que o PMMA possui uma temperatura de escoamento superior à dos restantes. Uma vez mais, este resultado encontra-se alinhado com os resultados obtidos para o consumo de energia eléctrica com os quais tínhamos verificado que o actuador de PMMA apresentava maior potência consumida. O teflon e a borracha PIB apresentam temperaturas de escoamento mais baixas pelo que podemos então concluir que existe também uma relação entre as propriedades dieléctricas das camadas e as suas temperaturas máximas de escoamento, visto que tanto o teflon como o PIB são materiais mais isolantes com uma maior rigidez dieléctrica quando comparados com o kapton ou PMMA.

Podemos verificar então na figura 4.22 abaixo, os campos de densidades e de temperaturas dos escoamentos induzidos por parte dos actuadores a plasma analisados na presente dissertação, desta vez para um nível de tensão de 8kVpp, sendo que desta vez vai ser excluído o actuador de 5 camadas com camada dieléctrica de kapton, pois devido à sua fina espessura, este actuador apresentou dificuldades para suportar este nível de tensão durante um período de tempo maior.



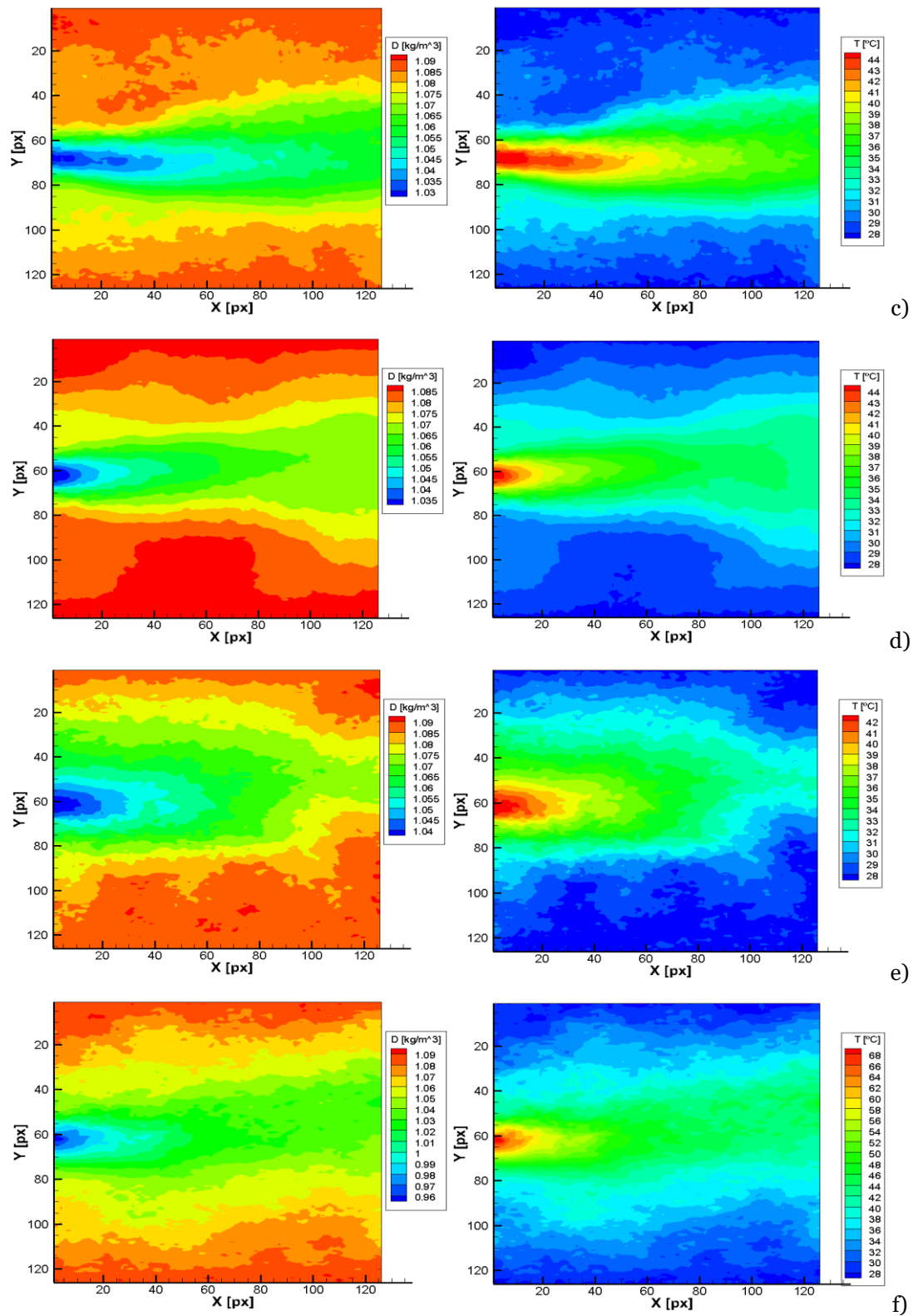


Figura 4.22: Campo de densidades e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD para 8kVpp a) Kapton 10 camadas; b) Kapton 14 camadas; c) Kapton 17 camadas; d) PIB; e) Teflon; f) PMMA.

Como podemos ver através da análise desta figura verificamos que o actuador de kapton de 10 camadas apresenta a temperatura do escoamento mais elevada. Temos ainda que a mesma relação apresentada anteriormente entre o aumento da espessura e a diminuição da temperatura dos seus escoamentos se mantém. Por outro lado, verificamos que existe uma similaridade entre as temperaturas máximas de escoamento por parte dos actuadores de kapton com 14 e 17 camadas. Este efeito deve-se à proximidade entre as suas espessuras e o mesmo não se verifica para outros níveis de tensão que serão discutidos posteriormente.

Já em relação aos restantes materiais dieléctricos temos que o PMMA desta vez apresenta um aumento de temperatura do seu escoamento bastante superior quando comparado à figura anterior. E que o PIB e o teflon apresentam um comportamento similar e temperaturas de escoamento similares às do actuador de kapton com 17 camadas. Para que a apresentação destas figuras não se torne repetitiva, a temperatura máxima obtida para todos os níveis de tensão foram compilados e são apresentados nas figuras 4.23 e 4.25.

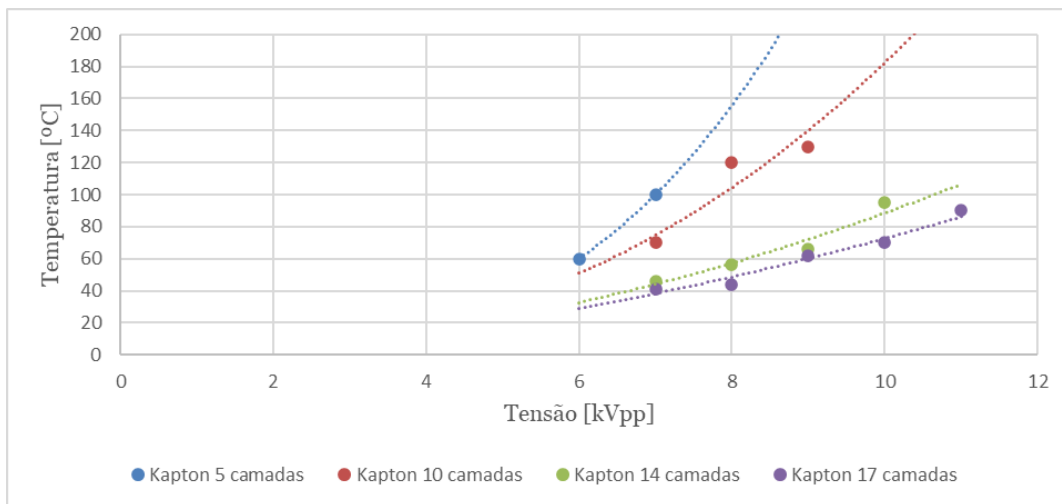


Figura 4.23: Temperatura máxima de escoamento por parte de actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes espessuras.

Desta maneira, conseguimos verificar forma mais clara o comportamento das temperaturas dos escoamentos induzidos pelos actuadores a plasma para diferentes espessuras de camada dieléctrica de kapton. Através da observação deste gráfico, podemos observar que o actuador de 10 camadas foi aquele que conseguiu obter uma temperatura superior no seu escoamento para outros níveis de tensão, respectivamente, a 8 e 9kVpp. O actuador de kapton de 5 camadas, em teoria, deveria conseguir obter temperaturas de escoamento superiores, mas visto que este não consegue suportar tensões de funcionamento mais elevadas, concluímos que para aplicações onde o escoamento deverá apresentar temperaturas mais elevadas, o actuador de kapton com 10 camadas será o mais adequado.

Já em relação aos actuadores de 14 e 17 camadas, podemos observar que estes têm uma relação muito próxima em certos aspectos. No entanto, podemos concluir que as temperaturas de escoamento serão sempre superiores para o actuador de 14 camadas. Desta maneira, podemos

concluir que existe uma relação entre a temperatura do escoamento dos actuadores com a sua espessura de camada dielétrica, ou seja, de uma maneira geral, quanto menos espesso é o actuador a plasma, para o mesmo nível de tensão, maior será a temperatura do seu escoamento induzido.

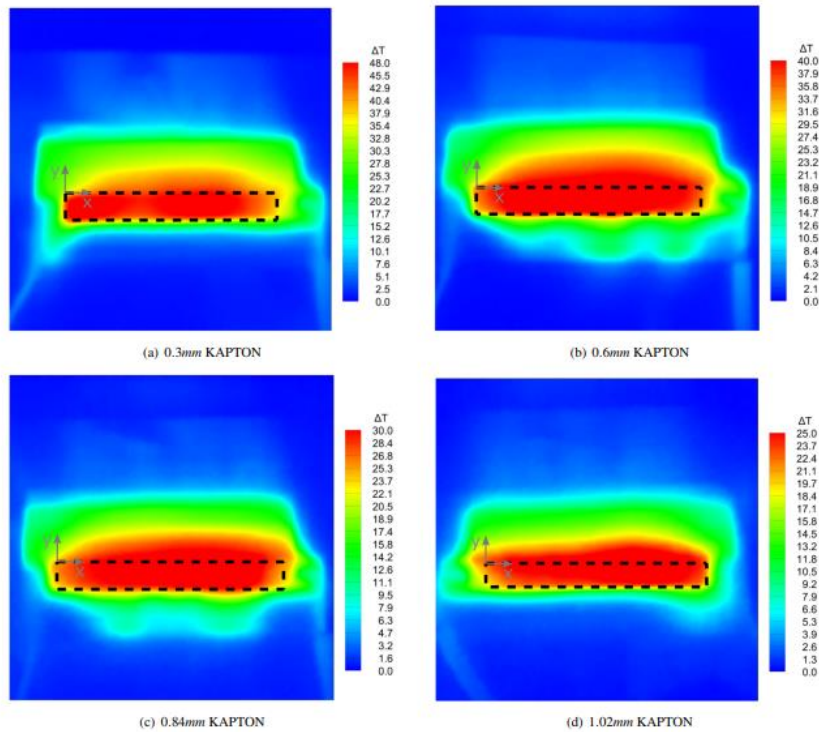


Figura 4.24: Campo de temperaturas à superfície dos actuadores a plasma DBD para 8kVpp, reproduzida de [101] a) Kapton 5 camadas; b) Kapton 10 camadas; c) Kapton 14 camadas; d) Kapton 17 camadas.

De forma a termos uma melhor ideia quanto à validade e veracidade dos resultados obtidos anteriormente podemos comparar os nossos resultados com aqueles obtidos por um estudo semelhante. Rodrigues et al. [101] realizou um estudo acerca das propriedades térmicas dos actuadores a plasma do tipo DBD utilizando uma técnica de termografia por infravermelhos para medir as temperaturas na superfície da camada dielétrica para actuadores a plasma com camadas dielétricas de kapton compostas por 5, 10, 14 e 17 camadas. Na figura 4.24 acima representada, podemos ver os resultados obtidos neste estudo para 8kVpp. Relembramos que enquanto neste estudo a temperatura medida corresponde à da superfície da camada dielétrica, na presente dissertação apenas são medidas as temperaturas do escoamento por parte dos actuadores.

Como podemos reparar na figura acima representada, e através da correlação com as figuras apresentadas anteriormente, temos que os nossos resultados apresentam semelhanças e concordância com os resultados reportados na literatura, se bem que com algumas diferenças devido aos meios medidos serem diferentes. Conseguimos também observar uma diminuição da temperatura na superfície do actuador com o aumento da espessura o que corrobora os nossos resultados.

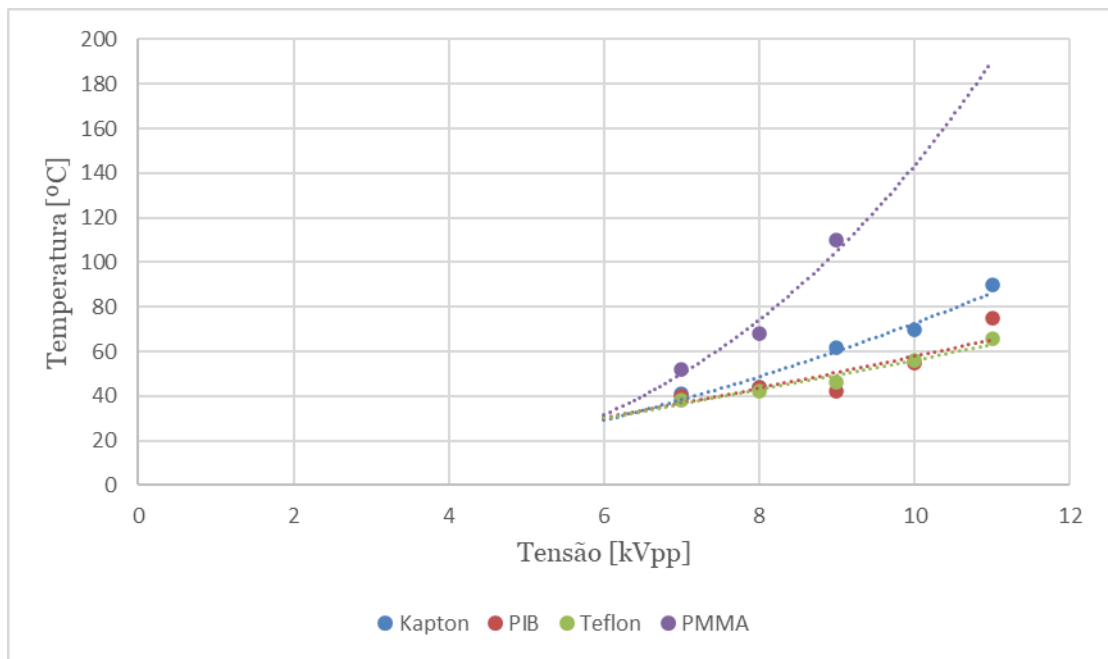


Figura 4.25: Temperatura máxima de escoamento por parte de actuadores a plasma do tipo DBD com diferentes materiais como camada dielétrica.

Já em relação à análise entre actuadores para a mesma espessura representadas na figura 4.25 acima, para materiais dielétricos diferentes, temos que é o actuator de PMMA que consegue obter temperaturas de escoamento mais elevadas para os mesmos níveis de tensão. No entanto, este, devido às suas propriedades, possui tensões de funcionamento mais baixas e uma deformação plástica muito elevada.

Já em relação aos restantes actuadores, verificamos que o actuator que apresenta um comportamento mais regular é o actuator de kapton com 17 camadas, que inicialmente apresenta temperaturas de escoamento bastante similares aos actuadores de PIB e de teflon.

Os actuadores de PIB e de teflon são aqueles que apresentam temperaturas de escoamento mais baixas, sendo que na sua maioria é o teflon que apresenta temperaturas de escoamento menores quando comparado com o PIB.

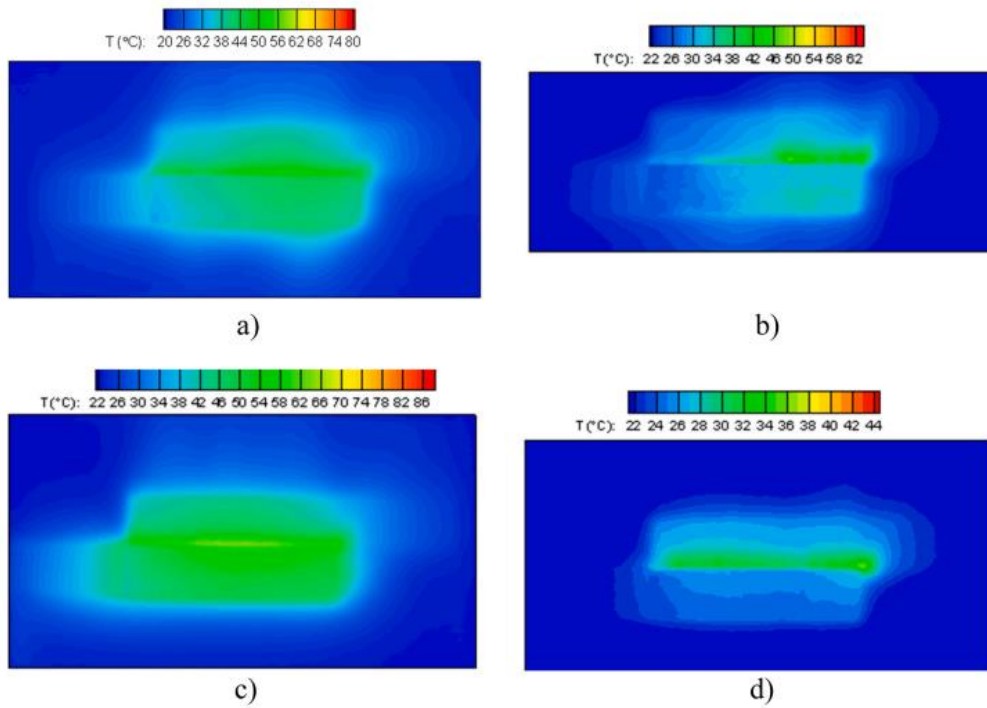


Figura 4.26: Campo de temperaturas à superfície dos actuadores a plasma DBD com 1mm de espessura para 7kVpp, reproduzida de [93] a) Kapton; b) PIB; c) PMMA; d) Teflon.

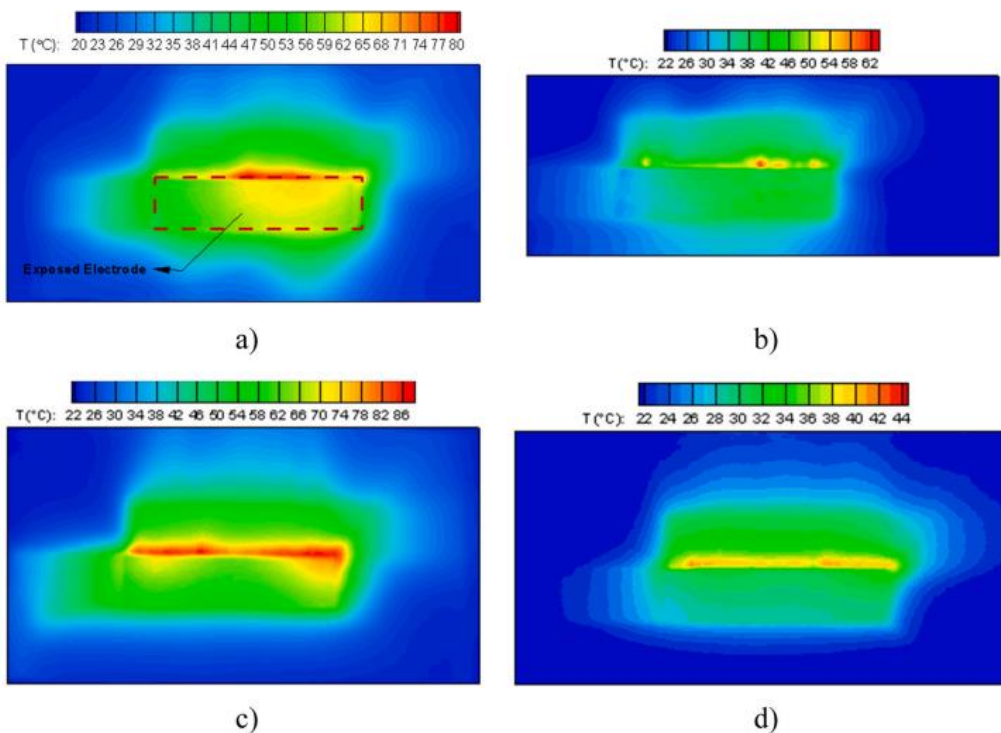


Figura 4.27: Campo de temperaturas à superfície dos actuadores a plasma DBD com 1mm de espessura para 8kVpp, reproduzida de [93] a) Kapton; b) PIB; c) PMMA; d) Teflon.

Para confirmarmos de certa forma os restantes resultados, vamos também compará-los com os resultados de outro estudo realizado dentro do tema da caracterização térmica dos actuadores a plasma DBD. Abdollahzadeh et al. [93] realizou um estudo sobre a optimização paramétrica em relação a vários actuadores a plasma do tipo DBD com a finalidade de detectar gelo ou de realizar degelo. Foram também usadas técnicas de termografia por infravermelhos para medir as temperaturas à superfície da camada dieléctrica para actuadores com camada dieléctrica de kapton, PIB, teflon e PMMA com 1mm de espessura para 7kVpp e para 8kVpp representados acima nas figuras 4.26 e 4.27 respectivamente.

Relembramos novamente que enquanto neste estudo a temperatura medida corresponde à da superfície da camada dieléctrica, na presente dissertação são medidas as temperaturas do escoamento por parte dos actuadores, resultados estes que não existem na literatura.

Tal como podemos observar nas figuras acima representadas, e através da correlação com as figuras apresentadas anteriormente, verificamos mais uma vez que os nossos resultados apresentam concordância entre os resultados do estudo, apenas com ligeiras diferenças devido às diferenças das medições nos meios.

Podemos assim concluir que, os valores de temperaturas de superfície dos actuadores reportados na literatura são bastante próximos dos obtidos pelo nosso método BOS, sendo que o actuador de PMMA possui maiores temperaturas na sua superfície seguido pelo actuador de kapton. No entanto podemos reparar que a diferença entre as temperaturas da superfície do actuador de borracha PIB e do actuador de teflon são mais elevadas e o mesmo não se verifica nas temperaturas dos seus escoamentos. No entanto, isto indica que o PIB e o Teflon são materiais que têm maior dificuldade em dissipar calor para o escoamento de ar adjacente. Por outro lado, confirmou-se também que o actuador de borracha PIB consegue obter temperaturas mais altas à sua superfície para vários níveis de tensão, tal como se verificou no nosso estudo para as temperaturas dos seus escoamentos.

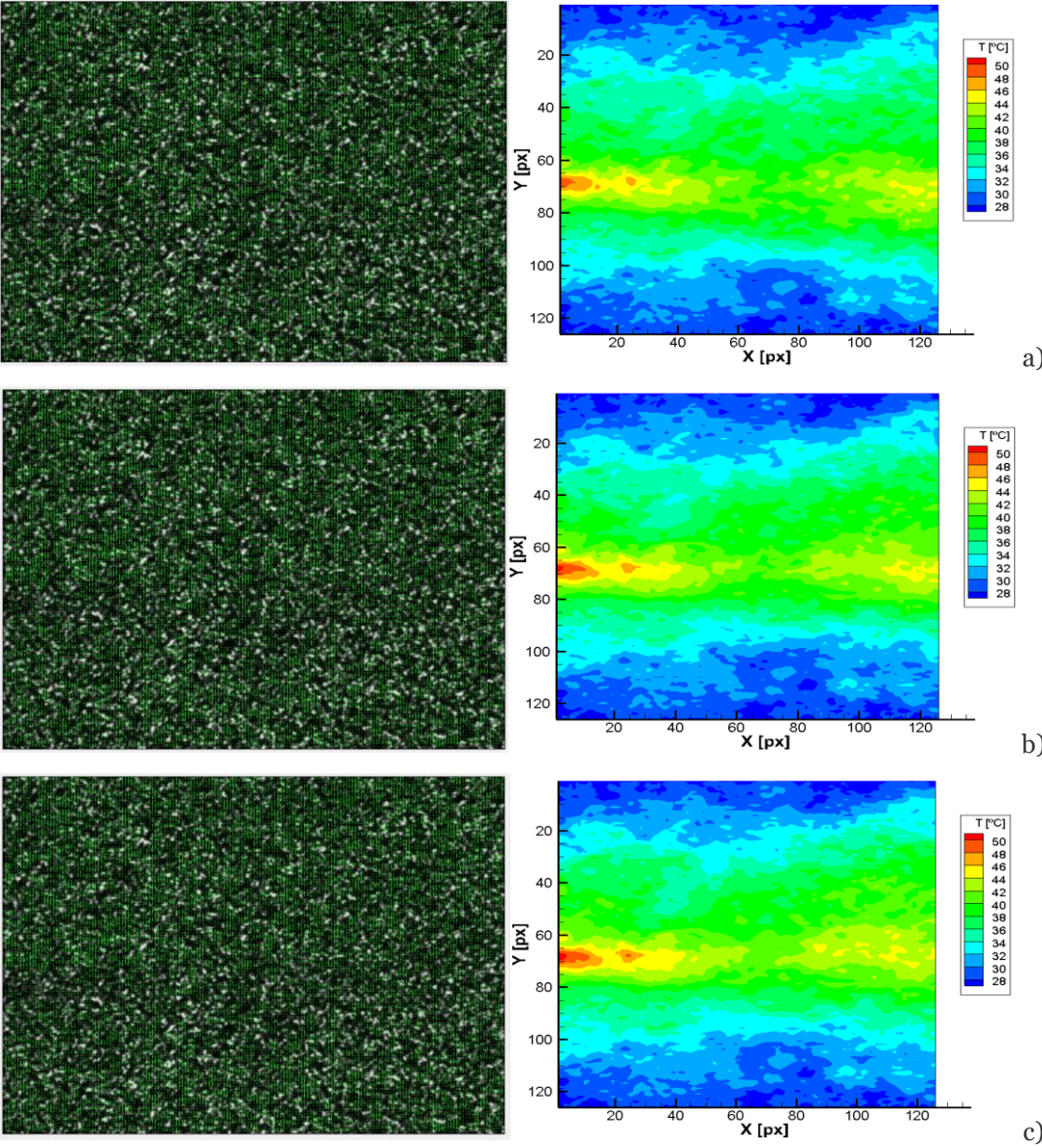
#### **4.2.4 Análise ao estado transiente dos actuadores a plasma do tipo DBD**

Tal como referido no capítulo anterior, esta será também uma análise inovadora que irá servir para avaliarmos o tempo que um actuador a plasma demora para aumentar a temperatura do escoamento de ar adjacente. A compreensão deste fenómeno é de particular importância para a utilização de actuadores a plasma em aplicações de degelo ou prevenção de acumulação de gelo. Por outro lado, temos ainda interesse em saber o intervalo de tempo necessário para que a temperatura do escoamento induzido estabilize e se mantenha mais ou menos constante. As condições utilizadas para esta análise serão exactamente iguais às análises anteriores, apenas aplicadas ao actuador padrão, sendo que o actuador padrão é um actuador de kapton com 1,02 mm de espessura tal como referido nos capítulos anteriores.

De forma a analisar este estado transiente iremos utilizar o modo sequencial da câmara fotográfica que nos vai permitir tirar imagens a cada 100ms, sendo que a primeira análise será

feita nos primeiros 3 segundos de funcionamento do actuador e a segunda análise irá ser feita nos primeiros 30 segundos de funcionamento do actuador, com um intervalo de meio segundo entre cada medição e de 5 segundos entre cada medição, respectivamente.

Na figura 4.28 abaixo representada, podemos observar o campo de deslocamentos e a consequente reconstrução do seu campo de temperaturas correspondente a cada ensaio para uma tensão de 9kVpp.



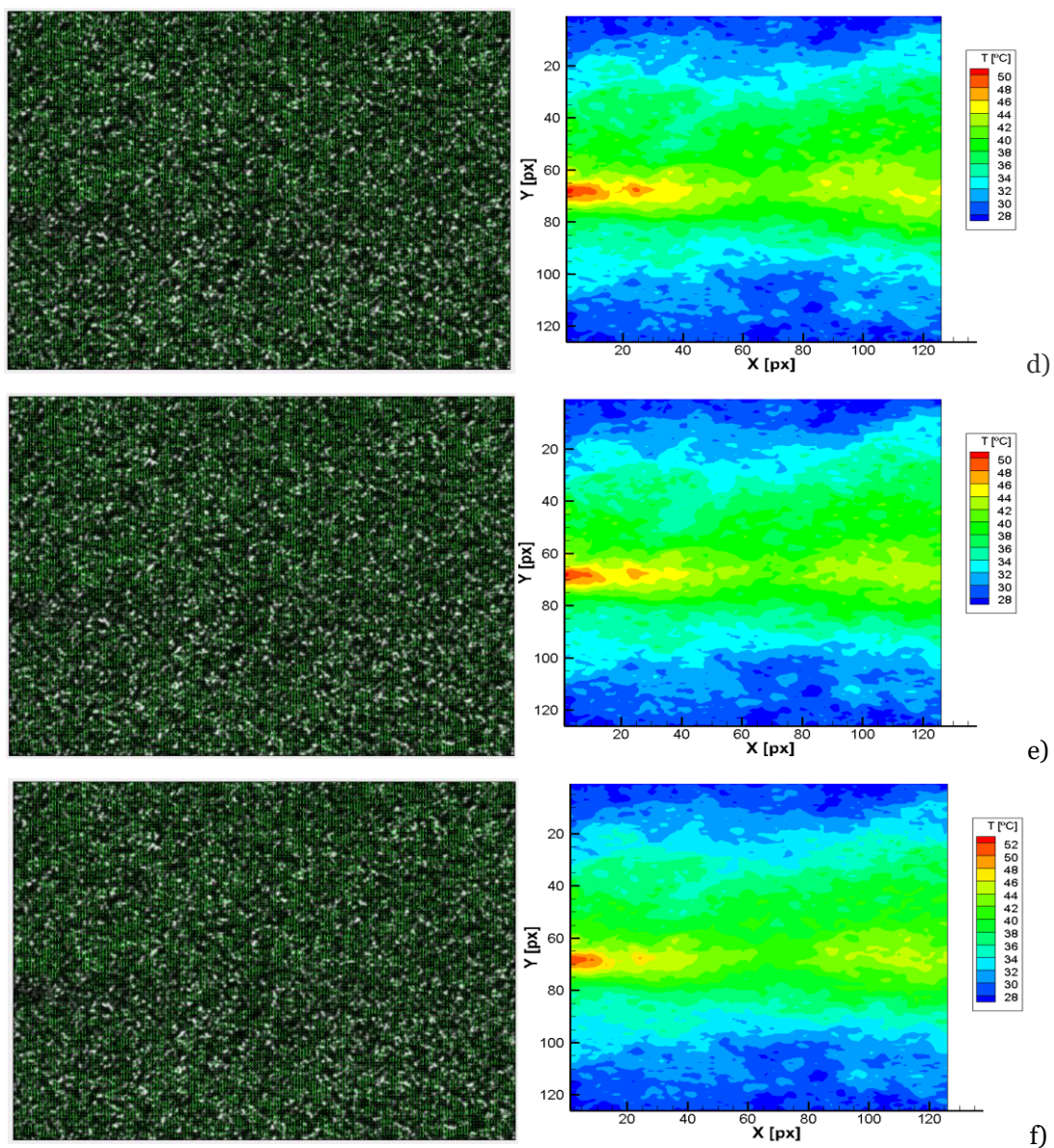
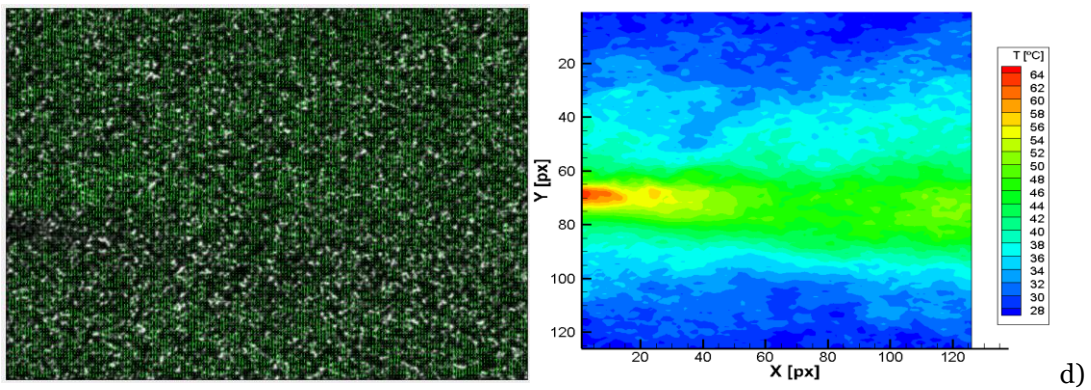
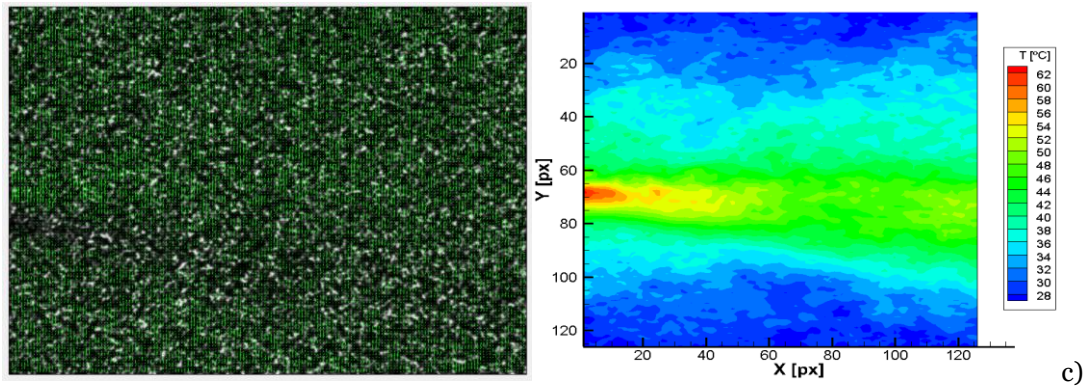
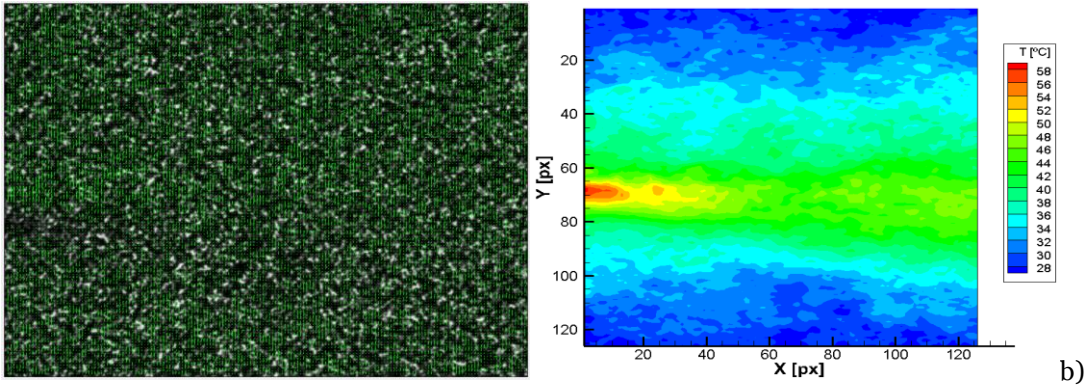
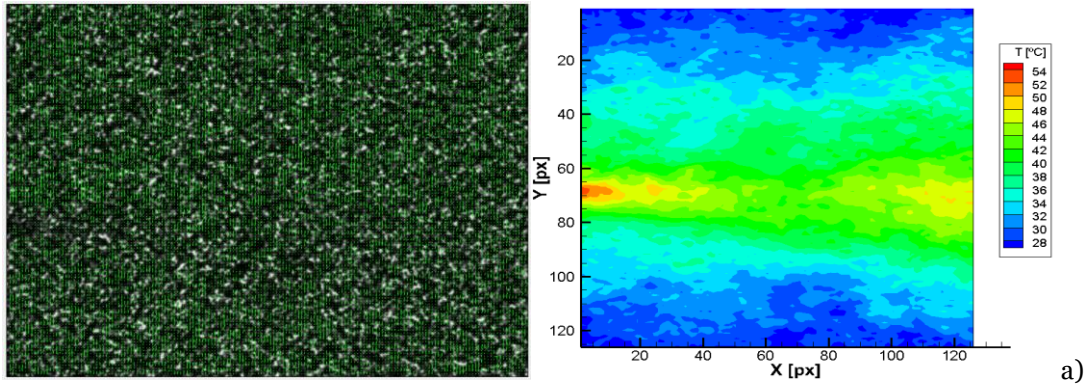


Figura 4.28: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuador a plasma DBD padrão a) após 0,5 segundos de funcionamento; b) após 1 segundo de funcionamento; c) após 1,5 segundos de funcionamento; d) após 2 segundos de funcionamento; e) após 2,5 segundo de funcionamento; f) após 3 segundos de funcionamento.

Verificamos que, para a análise transiente dos primeiros 3 segundos de funcionamento de um actuador a plasma não temos grande evolução entre as várias medições. Sendo que este apresenta uma temperatura máxima de escoamento de 50°C ao fim de 0,5s, 1s, 1,5s, 2s e 2,5s, e só aumenta cerca de 2°C ao fim de 3 segundos de funcionamento. Podemos então concluir que assim que o actuador é ligado, a temperatura do escoamento aumenta rapidamente numa fase inicial correspondente a um intervalo de tempo inferior a 0,5s, continuando depois a aumentar mas de uma forma mais gradual.



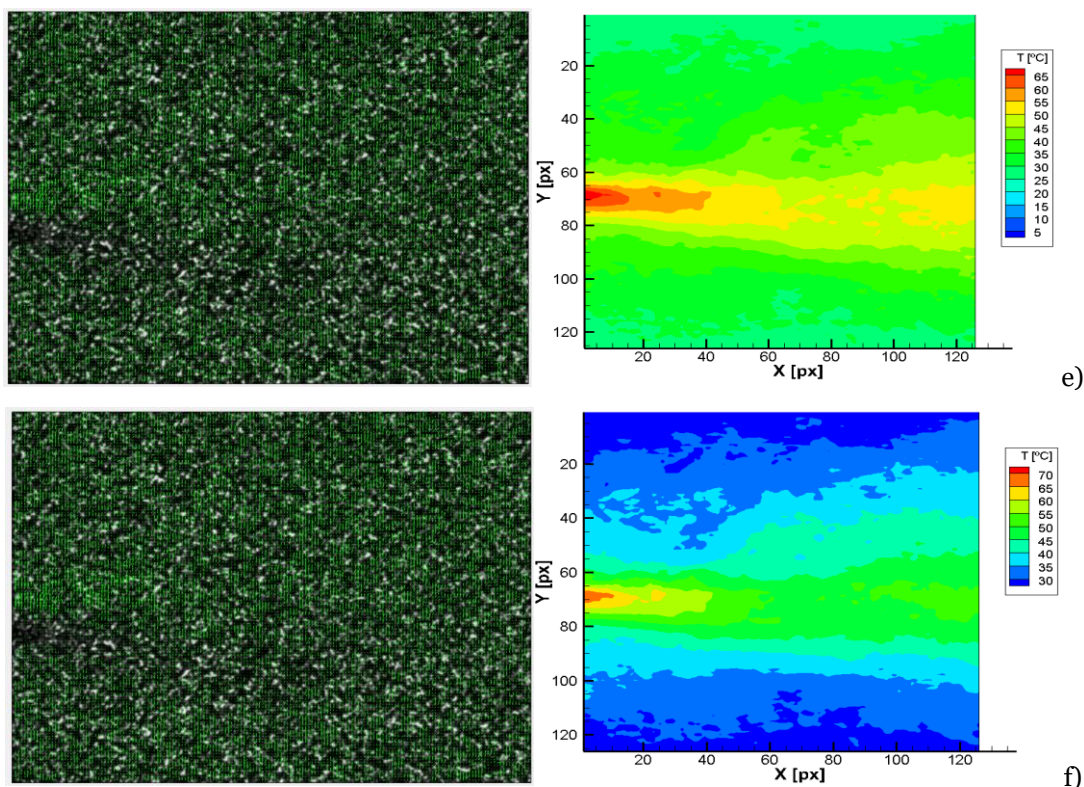


Figura 4.29: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuator a plasma DBD padrão a) após 5 segundos de funcionamento; b) após 10 segundos de funcionamento; c) após 15 segundos de funcionamento; d) após 20 segundos de funcionamento; e) após 25 segundo de funcionamento; f) após 30 segundos de funcionamento.

Já em relação à análise transiente nos primeiros 30 segundos de funcionamento do actuator a plasma, representada na figura 4.29 acima, temos que as diferenças de temperaturas são mais notáveis uma vez que o intervalo de tempo também é maior, sendo que estas aumentam cerca de 4°C a cada 5 segundos de funcionamento para os primeiros 15 segundos de funcionamento. Entre os 15 e os 20 segundos, existe um aumento de apenas 2°C, entre os 20 e os 25 segundos apenas 1°C e de 5° para os 30 segundos. Tempo este que corresponde ao tempo de estabilização da temperatura do escoamento por parte do actuator a plasma, tal como foi visto anteriormente.

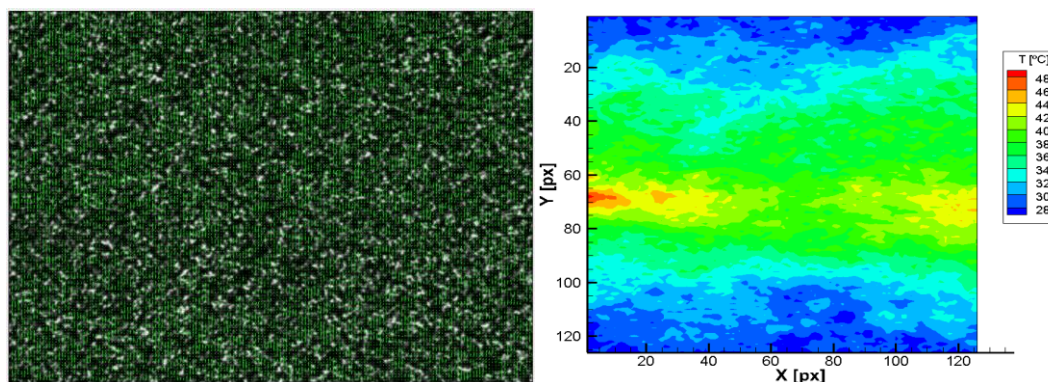


Figura 4.30: Campo de deslocamentos e de temperaturas do escoamento proveniente do actuator a plasma DBD padrão após 0,1s de funcionamento.

Na figura 4.30 acima representada, conseguimos verificar o efeito de formação do plasma e a temperatura do escoamento por parte do actuador a plasma ao fim de 100ms que nos leva a concluir que a formação do plasma e respectiva transferência de calor para o ar adjacente é um processo praticamente imediato. Assim que a tensão é aplicada ao actuador, a temperatura do seu escoamento tende logo para valores consideravelmente mais elevados que a temperatura ambiente, tal como pode ser visto na figura acima, o que leva a concluir que este tipo de dispositivos apresenta uma rápida resposta quando solicitado em aplicações de degelo ou prevenção de acumulação de gelo.

## 5 Conclusões

Neste capítulo irão ser apresentadas as conclusões sobre o estudo e dissertação desenvolvida assim como eventuais ideias de trabalhos futuros e optimizações ou aplicações a realizar no sistema Schlieren orientado para o fundo.

### 5.1 Síntese global e conclusões sobre o trabalho desenvolvido

Tal como referido ao longo da dissertação o grande objectivo em torno deste estudo era o desenvolvimento de um sistema Schlieren orientado para o fundo e a sua consequente calibração e validação para posterior aplicação ao estudo dos escoamentos induzidos por diferentes actuadores a plasma. Este estudo apresenta elevada importância uma vez que os trabalhos presentes na literatura apenas reportam as temperaturas da superfície do actuador, mas até à data, devido à elevada interferência electromagnética gerada pelo actuador, nenhum estudo conseguiu caracterizar as temperaturas do escoamento de ar induzido pelo actuador.

Inicialmente e após várias tentativas foi desenvolvido um sistema Schlieren orientado para o fundo que não conseguia obter resultados com pouca margem de erro pois as imagens capturadas tinham um grande ruído. Verificou-se que grande parte do ruído resultava do fundo utilizado pelo que se decidiu passar a utilizar um fundo activo produzido por um monitor. Por outro lado, o método quantitativo, que se pretendia implementar, possuía várias falhas que foram optimizadas ao longo da dissertação, não só com a implementação de um fundo activo, mas também com a correcta definição de janelas de interrogação e, principalmente, a optimização das condições de fronteira adequadas à nossa instalação experimental. Desta forma foi-nos possível calibrar o sistema e validá-lo com auxílio de vários objectos de fase provenientes de escoamentos de várias fontes de calor como a vela, a placa de aquecimento e o maçarico de cozinha.

Após análise destes objectos de fase, os resultados foram então comparados com um método convencional através do uso de um termopar de tipo K conectado a um *Arduino* que nos permitiu medir e digitalizar os dados. Foi então verificado para a vela e para o maçarico de cozinha, que em ambos os eixos horizontal e vertical os resultados têm uma margem de erro muito pequena, que por vezes é aumentada devido à oscilação das chamas destes objectos de fase. Pudemos ainda observar, através da análise e posterior comparação dos resultados para o maçarico de cozinha, que o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo acaba por perder alguma qualidade para medições de temperaturas de escoamento mais elevadas. No entanto, estas gamas de temperaturas são bastante superiores às produzidas por actuadores a plasma. Verificámos ainda, a partir da análise da placa de aquecimento, que o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo não é capaz de analisar com rigor e qualidade escoamentos com efeitos tridimensionais significativos, já que se trata apenas de um sistema bidimensional.

Já em relação à caracterização dos actuadores a plasma desenvolvidos, pudemos concluir que a camada dieléctrica tem uma grande influência no comportamento dos diferentes actuadores a plasma, sendo a componente mais importante na sua construção. Verificámos que existe uma maior degradação e uma tensão máxima inferior para actuadores com camadas menos espessas e que existe uma relação entre a espessura da camada dieléctrica e o seu consumo energético, já que para actuadores menos espessos a formação de plasma ocorre para níveis de tensão mais baixos. Temos ainda que em relação ao seu consumo energético, de uma maneira generalizada, quanto mais espesso é o actuador menor será o seu consumo energético, considerando o mesmo nível de tensão. Em relação às velocidades de escoamento induzido, estas são mais elevadas para níveis de tensão mais altos. Os actuadores a plasma de PIB e de teflon apresentam consumos energéticos mais baixos e velocidades de escoamento mais elevadas para os mesmos níveis de tensão.

Em relação à análise das temperaturas de escoamento por parte dos actuadores a plasma do tipo DBD, através do Schlieren orientado para o fundo conseguimos verificar que existe uma diminuição da temperatura dos escoamentos com o aumento da espessura da camada dieléctrica. Verificámos ainda que existe uma relação entre as propriedades dieléctricas da camada e a temperatura dos seus escoamentos, já que actuadores feitos com PIB e teflon apresentam temperaturas de escoamento mais baixas devido às suas elevadas propriedades isolantes.

Já na análise transiente do funcionamento de actuadores a plasma, conseguimos concluir que o ao seu tempo de estabilização da temperatura do escoamento acontece ao fim de cerca de 30 segundos de funcionamento. Por outro lado, verificamos que a formação de plasma ocorre de forma imediata e que da mesma forma a temperatura do escoamento atinge muito rapidamente valores mais elevados que a temperatura ambiente, o que vai permitir tirar partido deste efeito para a aplicabilidade destes actuadores em aplicações de degelo ou prevenção de acumulação de gelo.

Podemos então concluir que o nosso sistema Schlieren orientado para o fundo consegue produzir e obter resultados com uma percentagem de erro bastante reduzida e, como tal, torna-se uma ferramenta ideal para a determinação das propriedades do escoamento dos actuadores a plasma DBD, tal como também pudemos concluir através da comparação com outros trabalhos da literatura. Podemos ainda concluir, em relação aos diferentes materiais para camada dieléctrica, que os que apresentaram um comportamento mais robusto são a borracha PIB e o teflon, no entanto dependendo da aplicação do actuador será interessante utilizar outros materiais como é o caso do kapton e do PMMA, pois estes permitem atingir temperaturas de escoamento mais elevadas para níveis de tensão mais baixos, o que os torna ideais para a detecção de gelo e degelo. Nestes casos não estes actuadores não necessitam de funcionar a tensões tão elevadas que não irão promover assim a sua deformação plástica e eventual deterioração.

## **5.2 Trabalhos futuros**

De forma a melhorar ainda mais o método e aprofundar mais o conhecimento sobre os actuadores a plasma DBD proponho o desenvolvimento de uma instalação Schlieren orientado para o fundo capaz de medir as temperaturas à superfície do actuador e do escoamento por ele induzido simultaneamente. Proponho ainda eventuais melhorias e optimizações que possam ser feitas ao método de análise quantitativo de forma a reduzirmos ainda mais o erro por parte desta técnica de visualização de escoamentos.

Proponho também ainda dentro do campo do Schlieren orientado para o fundo um sistema capaz de visualizar e analisar escoamentos tridimensionais de forma a alagamos o leque de objectos de fase possíveis de analisar.

Já em relação aos actuadores a plasma proponho mais trabalhos desenvolvidos em torno da investigação de mais materiais para camadas dieléctricas de forma a conseguirmos aproveitar todo o potencial que esta tecnologia tem para nos oferecer e superarmos assim o grande obstáculo que é a durabilidade dos mesmos.



# Bibliografia

1. Moreira, M., F. Rodrigues, and J. Páscoa, *Experimental Study of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Flow Control*, in *International Congress on Engineering 2019*. 2019: Covilhã, Portugal.
2. Santos, G.F.T.P., *Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma*  
*Desenvolvimento de uma instalação schlieren qualitativa e quantitativa*. 2018, Universidade da Beira Interior: Covilhã.
3. Rienitz, J., *Schlieren experiment 300 years ago*. *Nature*, 1975. **254**: p. 293-295.
4. Töpler, A., *Optische Studien nach der Methode der Schlierenbeobachtung*. *Annalen der Physik*, 1868. **210**(6): p. 194-217.
5. Mach, E. and P. Salcher, *Optische Untersuchung der Luftstrahlen*. *Annalen der Physik*. **277**: p. 144-150.
6. Schardin, H., *Das Toeplersche Schlierenverfahren Grundlagen für seine Anwendung und quantitative Auswertung*. 1934, VDI-Verl. Berlin: VDI-Verl.
7. Weinstein, L.M., *Large-field high-brightness focusing schlieren system*. *AIAA Journal*, 1993. **31**(7): p. 1250-1255.
8. Hirschberg, A., *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media: G.S. Settles (Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2001)*. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2002. **21**: p. 493.
9. Schmidt, E.A., *Schlierenaufnahmen des Temperaturfeldes in der Nähe wärmeabgebender Körper*. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 1932. **3**: p. 181-189.
10. Meier, G., *Computerized background-oriented schlieren*. *Experiments in Fluids*, 2002. **33**(1): p. 181-187.
11. Dalziel, S.B., G.O. Hughes, and B.R. Sutherland. *SYNTHETIC SCHLIEREN*. 1998.
12. Dalziel, S.B., G.O. Hughes, and B.R. Sutherland, *Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren'*. *Experiments in Fluids*, 2000. **28**(4): p. 322-335.
13. Raffel, M., H. Richard, and G.E.A. Meier, *On the applicability of background oriented optical tomography for large scale aerodynamic investigations*. *Experiments in Fluids*, 2000. **28**(5): p. 477-481.
14. Richard, H. and M. Raffel, *Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method*. *Measurement Science and Technology*, 2001. **12**(9): p. 1576-1585.
15. Venkatakrisnan, L. and G.E.A. Meier, *Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique*. *Experiments in Fluids*, 2004. **37**(2): p. 237-247.
16. Venkatakrisnan, L., *Density Measurements in an Axisymmetric Underexpanded Jet by Background-Oriented Schlieren Technique*. *AIAA Journal*, 2005. **43**(7): p. 1574-1579.
17. Hendiger, J., M. Chludzińska, and P. Ziętek, *Assessment of the background oriented schlieren application in testing the temperature limit of an axisymmetric ventilation jet*. *Journal of Building Engineering*, 2021. **35**: p. 101964.
18. Zhang, P., et al., *A method to measure vapor concentration of droplet evaporation based on background oriented Schlieren*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021. **168**: p. 120880.

19. Goldhahn, E. and J. Seume, *The background oriented schlieren technique: sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field*. Experiments in Fluids, 2007. **43**(2): p. 241-249.
20. Nicolas, F., et al., *3D reconstruction of a compressible flow by synchronized multi-camera BOS*. Experiments in Fluids, 2017. **58**(5): p. 46.
21. Grauer, S.J., et al., *Instantaneous 3D flame imaging by background-oriented schlieren tomography*. Combustion and Flame, 2018. **196**: p. 284-299.
22. Liu, H., C. Shui, and W. Cai, *Time-resolved three-dimensional imaging of flame refractive index via endoscopic background-oriented Schlieren tomography using one single camera*. Aerospace Science and Technology, 2020. **97**: p. 105621.
23. Atcheson, B., W. Heidrich, and I. Ihrke, *An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging*. Experiments in Fluids, 2009. **46**(3): p. 467-476.
24. Hargather, M.J. and G.S. Settles, *A comparison of three quantitative schlieren techniques*. Optics and Lasers in Engineering, 2012. **50**(1): p. 8-17.
25. Hargather, M.J., *Background-oriented schlieren diagnostics for large-scale explosive testing*. Shock Waves, 2013. **23**(5): p. 529-536.
26. Ting, C.-C. and C.-C. Chen, *Detection of gas leakage using microcolor schlieren technique*. Measurement, 2013. **46**(8): p. 2467-2472.
27. van Hinsberg, N.P. and T. Rösgen, *Density measurements using near-field background-oriented Schlieren*. Experiments in Fluids, 2014. **55**(4): p. 1720.
28. Shimazaki, T., S. Ichihara, and Y. Tagawa, *Background oriented schlieren technique with fast Fourier demodulation for measuring large density-gradient fields of fluids*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022. **134**: p. 110598.
29. Vinnichenko, N.A., A.V. Uvarov, and Y.Y. Plaksina, *Combined study of heat exchange near the liquid–gas interface by means of Background Oriented Schlieren and Infrared Thermal Imaging*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014. **59**: p. 238-245.
30. Michalski, Q., et al., *An application of speckle-based background oriented schlieren for optical calorimetry*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018. **91**: p. 470-478.
31. Rajshekhar, G. and D. Ambrosini, *Multi-scale approach for analyzing convective heat transfer flow in background-oriented Schlieren technique*. Optics and Lasers in Engineering, 2018. **110**: p. 415-419.
32. Yamamoto, S., Y. Tagawa, and M. Kameda, *Application of background-oriented schlieren (BOS) technique to a laser-induced underwater shock wave*. Experiments in Fluids, 2015. **56**(5): p. 93.
33. Hayasaka, K., et al., *Optical-flow-based background-oriented schlieren technique for measuring a laser-induced underwater shock wave*. Experiments in Fluids, 2016. **57**(12): p. 179.
34. Porta, D., et al., *Visualization of a shock wave travelling inside a rectangular duct using the background-oriented schlieren method*. Wave Motion, 2022. **114**: p. 102999.
35. Su, C. and J. Bai, *Measurement of the neutral plane of an internal fire whirl using the background-oriented Schlieren technique for a vertical shaft model of a high-rise building*. Measurement, 2016. **78**: p. 151-167.
36. Guo, G.-M. and H. Liu, *Density and temperature reconstruction of a flame-induced distorted flow field based on background-oriented schlieren (BOS) technique*. Chinese Physics B, 2017. **26**(6): p. 064701.
37. Hayasaka, K. and Y. Tagawa, *Mobile visualization of density fields using smartphone background-oriented schlieren*. Experiments in Fluids, 2019. **60**(11): p. 171.
38. Vinnichenko, N.A., et al., *Natural convection flows due to evaporation of heavier-than-air fluids: Flow direction and validity of using similarity of*

- temperature and vapor density fields*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019. **106**: p. 1-10.
39. Wang, C., et al., *Three-dimensional reconstruction of incident shock/boundary layer interaction using background-oriented schlieren*. Acta Astronautica, 2019. **157**: p. 341-349.
  40. Becher, L., et al., *Background-oriented schlieren technique for two-dimensional visualization of convective indoor air flows*. Optics and Lasers in Engineering, 2020. **134**: p. 106282.
  41. Vinnichenko, N.A., et al., *Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented Schlieren technique*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020. **114**: p. 110051.
  42. Ding, H., S. Yi, and X. Zhao, *Research on correction of imaging deviation based on background-oriented schlieren technique*. Optik, 2020. **224**: p. 165692.
  43. Heineck, J.T., et al., *Background Oriented Schlieren (BOS) of a Supersonic Aircraft in Flight*, in *AIAA Flight Testing Conference*. 2016, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
  44. Hill, M.A. and E.A. Haering, *Ground-to-air flow visualization using Solar Calcium-K line Background-Oriented Schlieren*. Experiments in Fluids, 2016. **58**(1): p. 4.
  45. Raffel, M., *Background-oriented schlieren (BOS) techniques*. Experiments in Fluids, 2015. **56**(3): p. 60.
  46. Vinnichenko, N.A., A.V. Uvarov, and Y.Y. Plaksina. *ACCURACY OF BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN FOR DIFFERENT BACKGROUND PATTERNS AND MEANS OF REFRACTION INDEX RECONSTRUCTION*. 2012.
  47. Rinkevichyus, B., et al., *Investigation of Background Pattern for the Outdoor Application of the BOS Method*. 2013. p. 305-320.
  48. Hargather, M.J. and G.S. Settles, *Natural-background-oriented schlieren imaging*. Experiments in Fluids, 2010. **48**(1): p. 59-68.
  49. Meier, A.H. and T. Roesgen, *Improved background oriented schlieren imaging using laser speckle illumination*. Experiments in Fluids, 2013. **54**(6): p. 1549.
  50. Bühlmann, P. and M. Ehrensperger. *Laser speckle based background oriented schlieren measurements in a fire backlayering front*. 2014.
  51. Hargather, M.J. and G.S. Settles. *Recent Developments in Schlieren and Shadowgraphy*. 2010.
  52. Komuro, A., et al., *Visualization of density variations produced by alternating-current dielectric-barrier-discharge plasma actuators using the background-oriented schlieren method*. Plasma Sources Science and Technology, 2019. **28**(5): p. 055002.
  53. Kaneko, Y., H. Nishida, and Y. Tagawa, *Background-oriented schlieren measurement of near-surface density field in surface dielectric-barrier-discharge*. Measurement Science and Technology, 2021. **32**(12): p. 125402.
  54. Panigrahi, P.K. and m. krishnamurthy, *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*. 2012: Springer New York.
  55. Birch, K.P. and M.J. Downs, *An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air*. Metrologia, 1993. **30**(3): p. 155-162.
  56. Ciddor, P.E., *Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared*. Applied Optics, 1996. **35**: p. 1566.
  57. Dereniak, E.L. and T.D. Dereniak, *Geometrical and Trigonometric Optics*. 2008, Cambridge: Cambridge University Press.
  58. Agrawal, A.K., et al., *Three-dimensional rainbow schlieren tomography of a temperature field in gas flows*. Applied Optics, 1998. **37**(3): p. 479-485.
  59. Brequigny, P., et al., *An experimental study on turbulent premixed expanding flames using simultaneously Schlieren and Tomography techniques*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017. **95**.
  60. Miller, D.A.B., *Huygens's wave propagation principle corrected*. Optics Letters, 1991. **16**(18): p. 1370-1372.

61. Anderson, F.L., *Huygens' Principle geometric derivation and elimination of the wake and backward wave*. Scientific Reports, 2021. **11**(1): p. 20257.
62. Dabiri, D., *Digital particle image thermometry/velocimetry: a review*. Experiments in Fluids, 2009. **46**(2): p. 191-241.
63. Raffel, M., et al., *Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S., & Kompenhans, J. (2013). Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer. 2013.
64. Rodrigues, F., J. Pascoa, and M. Trancossi, *Heat generation mechanisms of DBD plasma actuators*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018. **90**: p. 55-65.
65. Abdollahzadeh, M., et al., *Numerical design and analysis of a multi-DBD actuator configuration for the experimental testing of ACHEON nozzle model*. Aerospace Science and Technology, 2015. **41**: p. 259-273.
66. Rodrigues, F.F., et al., *A new plasma actuator configuration for improved efficiency: the stair-shaped dielectric barrier discharge actuator*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019. **52**.
67. Rodrigues, F., M. Moreira, and J. Páscoa, *Analysis and Implementation of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Ground Vehicles Wake Reduction*, in *Fluids Engineering Division Summer Meeting 2021*. 2021.
68. Ferry, J. and J. Rovey, *Thrust Measurement of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators and Power Requirements for Aerodynamic Control*. 2010.
69. Corke, T. and M. Post, *Overview of Plasma Flow Control: Concepts, Optimization, and Applications*. 2005.
70. Rodrigues, F.F., J.C. Pascoa, and M. Trancossi. *Analysis of Innovative Plasma Actuator Geometries for Boundary Layer Control*. in *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2016.
71. Kotsonis, M. and L.L.M. Veldhuis, *Experimental study on dielectric barrier discharge actuators operating in pulse mode*. Journal of Applied Physics, 2010. **108**: p. 113304.
72. Enloe, C.L., et al. *Parameterization of Temporal Structure in the Single Dielectric Barrier Aerodynamic Plasma Actuator (Invited)*. 2005.
73. Rodrigues, F.F., J.C. Pascoa, and M. Trancossi, *Experimental Analysis of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators Thermal Characteristics Under External Flow Influence*. Journal of Heat Transfer, 2018. **140**(10).
74. Corke, T.C., C.L. Enloe, and S.P. Wilkinson, *Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control*. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010. **42**(1): p. 505-529.
75. Tirumala, R., et al., *Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014. **47**(25): p. 255203.
76. Thomas, F.O., et al., *Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control*. AIAA Journal, 2009. **47**: p. 2169-2178.
77. Schatzman, D.M. and F.O. Thomas, *Turbulent Boundary-Layer Separation Control with Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators*. AIAA Journal, 2010. **48**: p. 1620-1634.
78. Font, G.I., *Boundary Layer Control with Atmospheric Plasma Discharges*. AIAA Journal, 2006. **44**: p. 1572-1578.
79. Porter, C., et al., *Boundary Layer Control Using a DBD Plasma Actuator*, in *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*.
80. Opaits, D., et al., *Plasma Control of Boundary Layer Using Low-Temperature Non-equilibrium Plasma of Gas Discharge*, in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*.
81. Post, M.L. and T.C. Corke, *Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators*. AIAA Journal, 2004. **42**(11): p. 2177-2184.
82. Poon, D. *Separation Control using Plasma Actuators: Experimental Studies of Plasma Actuator Performance*. 2011.

83. Huang, J., T.C. Corke, and F.O. Thomas, *Plasma Actuators for Separation Control of Low-Pressure Turbine Blades*. AIAA Journal, 2006. **44**(1): p. 51-57.
84. Kelley, C.L., et al., *High Mach Number Leading-edge Flow Separation Control using AC DBD Plasma Actuators*. Bulletin of the American Physical Society, 2011. **64**.
85. Roth, J., D. Sherman, and S. Wilkinson, *Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma*, in *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*.
86. Reece, R., M. Daniel, and P.W. Stephen. *Boundary Layer Flow Control With a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma*. 1998.
87. Enloe, C.L., et al., *Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology*. AIAA Journal, 2004. **42**(3): p. 589-594.
88. Enloe, C.L., et al., *Mechanisms and Responses of a Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects*. AIAA Journal, 2004. **42**(3): p. 595-604.
89. Hyun, K.T. and C.H. Chun, *The wake flow control behind a circular cylinder using ion wind*. Experiments in Fluids, 2003. **35**(6): p. 541-552.
90. Sung, Y., et al., *Aerodynamic modification of flow over bluff objects by plasma actuation*. Experiments in Fluids, 2006. **41**(3): p. 479-486.
91. Rodrigues, F., et al., *An Experimental Study On Segmented Encapsulated Electrode Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Mapping the Ice Formation On the Surface: A Conceptual Analysis*. Journal of Heat Transfer, 2021. **143**: p. 14.
92. Rodrigues, F., M. Abdollahzadeh, and J. Páscoa, *Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Flow Control, Ice Formation Detection and Ice Accumulation Prevention*. 2020.
93. Abdollahzadeh, M., et al., *Parametric optimization of surface dielectric barrier discharge actuators for ice sensing application*. Sensors and Actuators A Physical, 2022. **335**: p. 113391.
94. Rodrigues, F., et al., *Comparative Evaluation of Dielectric Materials for Plasma Actuators Active Flow Control and Heat Transfer Applications*. 2021.
95. Dong, B., et al., *Experimental study of a DBD surface discharge for the active control of subsonic airflow*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008. **41**(15): p. 155201.
96. Rodrigues, F., J. Páscoa, and F. Dias, *Power Consumption Characterization of DBD Plasma Actuators for boundary layer control*. 2015.
97. Ashpis, D., M. Laun, and E. Griebeler, *Progress toward Accurate Measurements of Power Consumption of DBD Plasma Actuators*. 2012.
98. Hamamatsu, *Digital CCD Camera C106000-10B Instruction Manual*. 2009.
99. Kriegseis, J., et al., *Capacitance and power consumption quantification of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators*. Journal of Electrostatics, 2011. **69**(4): p. 302-312.
100. Pons, J., E. Moreau, and G. Touchard, *Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005. **38**(19): p. 3635-3642.
101. Rodrigues, F.F., J.C. Pascoa, and M. Trancossi. *Experimental Thermal Characterization of DBD Plasma Actuators*. in *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2017.



# Anexos

## A.1 Script desenvolvido e otimizado em *Matlab* para a análise quantitativa e obtenção dos campos de índices refractivos, densidades e temperaturas com condições de Neumann nas margens superior e inferior

```
clc

u= (u_filtered);
v= (v_filtered);
%%%ddx/dx%%%
h = 0.001;          % step size
X = -1:h:1;        % domain
r = (u)*0.0015;    % range
%po= diff(r)/h
%ddx_dx = po.'
ddx_dx = diff(r,1,2)/h; % first derivative

rowToDelete = 63; % or whatever....
ddx_dx(rowToDelete,:) = [];

%Z = diff(Y)/h; % second derivative
%plot(X(:,1:length(Y)),Y,'r',X,f,'b', X(:,1:length(Z)),Z,'k')
disp('matriz deslocamento segundo o eixo do xx')
v(1:16,8:18)
disp('DERIVADA segundo xx, da matriz deslocamento segundo o eixo do
xx')
ddx_dx(1:16,8:18)

%%%ddy/dy%%%
hh = 0.0013;       % step size
XX = -1:hh:1;      % domain
rr = v *0.0015;    % range
YY = diff(rr,1,1)/h; % first derivative
%ddy_dy = transpose(YY) ;
ddy_dy = YY ;

rowToDelete = 63; % or whatever....
ddy_dy(:,rowToDelete) = [];

disp('matriz deslocamento segundo o eixo do yy')
u(1:16,8:18);
disp('DERIVADA segundo yy, da matriz deslocamento segundo o eixo do
yy')
ddy_dy(1:16,1:18);

% Solving the 2-D Poisson equation by the Finite Difference
...Method
% Numerical scheme used is a second order central difference in space
```

```

...(5-point difference)

%%
%Specifying parameters
nx=126; %Number of steps in space(x)
ny=126; %Number of steps in space(y)
niter=30000; %Number of iterations
dx=2/(nx-1); %Width of space step(x)
dy=2/(ny-1); %Width of space step(y)
x=-1:dx:1; %Range of x(0,2) and specifying the
grid points
y=-1:dy:1; %Range of y(0,2) and specifying the
grid points
%b=zeros(nx,ny); %Preallocating b
c=0.0438
r=c*((ddx_dx*0.0015)+(ddy_dy*0.0015)) %lado direito da eq
de poisson
b=r;
pn=ones(nx,ny); %Preallocating pn

%%
% Initial Conditions
p=ones(nx,ny); %Preallocating p

%%
%Boundary conditions
%p(:,1)=1.00027717;
%p(:,ny)=1.00027717;
%p(1,:)=1.00027717;
%p(nx,:)=1.00027717;

%%
%Source term
%b(round(ny/4),round(nx/4))=3000;
%b(round(ny*3/4),round(nx*3/4))=-3000;

%%
i=2:nx-1;
j=2:ny-1;
%i=nx-1:-1:2;
%j=ny-1:-1:2;
%Explicit iterative scheme with C.D in space (5-point difference)
for it=1:niter
    pn=p;
    for j = 2:ny-1
        for i = 2:nx-1
            p(i,j)=((dy^2*(pn(i+1,j)+pn(i-
1,j)))+(dx^2*(pn(i,j+1)+pn(i,j-1)))-
(b(i,j)*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));
        end

            i = nx;
            p(i,j)=((dy^2*(pn(i-1,j)+pn(i-1,j)))+(dx^2*(pn(i,j+1)+pn(i,j-
1)))-
(b(i,j)*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));

            i = 1;
            p(i,j)=((dy^2*(pn(i+1,j)+pn(i+1,j)))+(dx^2*(pn(i,j+1)+pn(i,j-
1)))-
(b(i,j)*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));
        %Boundary conditions
    end
end

```

```

p(:,1)=1.000247;
p(:,ny)=1.000247;
%p(1,:)=1.000249;
%p(nx,:)=1.000249;

end

%p(nx,1:80)=1.0002479072637216;
    %p(nx,81:88)=1.0002398434050093;
    %p(nx,89:95)=1.000218527618766;
    %p(nx,96:98)=1.000183271600871;
    %p(nx,99:105)=1.000218527618766;
    %p(nx,106:113)=1.0002398434050093;
    %p(nx,114:126)=1.0002479072637216;
end

dlmwrite('Refractive index distribution.txt',p);
density=(p-1)/0.000227;
dlmwrite('D.txt',density);
Ktemperature=(1.087585*301.15)*1./density;
Ctemperature=Ktemperature-273.15;
dlmwrite('T.txt', Ctemperature);
%%
%%Plotting the solution (refractive index fields)
%h=surf(x,y,p,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'2-D Poisson equation';['{\itNumber of iterations} =
',num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Density distribution)
%h=surf(x,y,density,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'2-D Poisson equation (Density Field)';['{\itNumber of
iterations} = ',num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Temperature in Kelvin)
%h=surf(x,y,Ktemperature,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'Temperature in Kelvin';['{\itNumber of iterations} =
',num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Temperature in Celsius)
h=surf(x,y,Ctemperature,'EdgeColor','none');
shading interp
axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 0 200])

```

```

title({'Temperature in Celsius';['\itNumber of iterations} =
',num2str(it)]})
xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
ylabel('\leftarrow Spatial co-ordinate (y)')
zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')

```

## A.2 Script desenvolvido e otimizado em *Matlab* para a análise quantitativa e obtenção dos campos de índices refractivos, densidades e temperaturas com condições de Neumann nas margens esquerda e direita

```

clc

u= (u_original);
v= (v_original);

%%dx/dx%%
h = 0.001;      % step size
X = -1:h:1;    % domain
r = (u)*0.0015; % range
%po= diff(r)/h
%ddx_dx = po.'
ddx_dx = diff(r,1,2)/h; % first derivative

rowToDelete = 63; % or whatever....
ddx_dx(rowToDelete,:) = [];

%Z = diff(Y)/h; % second derivative
%plot(X(:,1:length(Y)),Y,'r',X,f,'b', X(:,1:length(Z)),Z,'k')
disp('matriz deslocamento segundo o eixo do xx')
v(1:16,8:18)
disp('DERIVADA segundo xx, da matriz deslocamento segundo o eixo do
xx')
ddx_dx(1:16,8:18)

%%ddy/dy%%
hh = 0.0013;    % step size
XX = -1:hh:1;  % domain
rr = v *0.0015; % range
YY = diff(rr,1,1)/h; % first derivative
%ddy_dy = transpose(YY) ;
ddy_dy = YY ;

rowToDelete = 63; % or whatever....
ddy_dy(:,rowToDelete) = [];

disp('matriz deslocamento segundo o eixo do yy')
u(1:16,8:18);
disp('DERIVADA segundo yy, da matriz deslocamento segundo o eixo do
yy')
ddy_dy(1:16,1:18);

```

```

% Solving the 2-D Poisson equation by the Finite Difference
...Method
% Numerical scheme used is a second order central difference in space
...(5-point difference)

%%
%Specifying parameters
nx=126; %Number of steps in space(x)
ny=126; %Number of steps in space(y)
niter=30000; %Number of iterations
dx=2/(nx-1); %Width of space step(x)
dy=2/(ny-1); %Width of space step(y)
x=-1:dx:1; %Range of x(0,2) and specifying the
grid points
y=-1:dy:1; %Range of y(0,2) and specifying the
grid points
%b=zeros(nx,ny); %Preallocating b
c=0.0438
r=c*((ddx_dx*0.0015)+(ddy_dy*0.0015)) %lado direito da eq
de poisson
b=r;
pn=ones(nx,ny); %Preallocating pn

%%
% Initial Conditions
p=ones(nx,ny); %Preallocating p

%%
%Boundary conditions
%p(:,1)=1.00027717;
%p(:,ny)=1.00027717;
%p(1,:)=1.00027717;
%p(nx,:)=1.00027717;

%%
%Source term
%b(round(ny/4),round(nx/4))=3000;
%b(round(ny*3/4),round(nx*3/4))=-3000;

%%
i=2:nx-1;
j=2:ny-1;
%i=nx-1:-1:2;
%j=ny-1:-1:2;
%Explicit iterative scheme with C.D in space (5-point difference)

for it=1:niter
    pn=p;
    for i = 2:ny-1
        for j = 2:nx-1
            p(i,j)=((dy^2*(pn(i+1,j)+pn(i-
1,j)))+(dx^2*(pn(i,j+1)+pn(i,j-1)))-
(b(i,j)*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));
            end
        end
    end
    j = 1;
end

```

```

        p(i,j)=(dy^2*(pn(i+1,j)+pn(i-1,j)))+(dx^2*(pn(i,j+1)+pn(i,j-1)))-
        (b(i,j)*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));

        j = ny;
        p(i,j)=(dy^2*(pn(i+1,j)+pn(i-1,j)))+(dx^2*(pn(i,j-1)+pn(i,j+1)))-
        (b(i,j)*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));

        %Boundary conditions
        %p(:,1)=1.000247;
        %p(:,ny)=1.000247;
        p(1,:)=1.000247;
        p(nx,:)=1.000247;

        end

%p(nx,1:80)=1.0002479072637216;
    %p(nx,81:88)=1.0002398434050093;
    %p(nx,89:95)=1.000218527618766;
    %p(nx,96:98)=1.000183271600871;
    %p(nx,99:105)=1.000218527618766;
    %p(nx,106:113)=1.0002398434050093;
    %p(nx,114:126)=1.0002479072637216;
end

dlmwrite('Refractive index distribution.txt',p);
density=(p-1)/0.000227;
dlmwrite('D.txt',density);
Ktemperature=(1.087585*301.15)*1./density;
Ctemperature=Ktemperature-273.15;
dlmwrite('T.txt', Ctemperature);
%%
%%Plotting the solution (refractive index fields)
%h=surf(x,y,p,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'2-D Poisson equation';['{\itNumber of iterations} = ',num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Density distribution)
h=surf(x,y,density,'EdgeColor','none');
shading interp
axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
title({'2-D Poisson equation (Density Field)';['{\itNumber of iterations} = ',num2str(it)]})
xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Temperature in Kelvin)
%h=surf(x,y,Ktemperature,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'Temperature in Kelvin';['{\itNumber of iterations} = ',num2str(it)]})

```

```

xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
xlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Temperature in Celsius)
h=surf(x,y,Ctemperature,'EdgeColor','none');
shading interp
axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 0 200])
title({'Temperature in Celsius';[{'\itNumber of iterations} =
',num2str(it)]})
xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
xlabel('Solution profile (P) \rightarrow')

```

### A.3 Script desenvolvido em *Matlab* para a atribuição de coordenadas aos campos de densidades e de temperaturas

```

%arquivo=fopen('tp.txt');
%A=fscanf(arquivo,'%g',[180,180]);
clc;
clear all;
A=readmatrix('T.txt');
[numrow,numcol]=size(A);
B=zeros(numrow*numcol,3);
j0=0;
cont0=0;
for j=1:numcol
    for i=1:numrow
        cont=(j-j0)*i+cont0;
        B(cont,1)=j;
        B(cont,2)=i;
        B(cont,3)=A(i,j);
    end
    j0=j;
    cont0=cont;
end

writematrix(B,'T2.txt','Delimiter','tab');
% arquivo=fopen('results.txt','w');
% formatSpec1 = 'TITLE="TECPLOT PLOTS"\n';
% formatSpec2 = 'VARIABLES="X" "Y" "T"\n';
% formatSpec3 = 'ZONE F=POINT, I=%d, J=%d\n';
% fprintf(arquivo,formatSpec1);
% fprintf(arquivo,formatSpec2);
% fprintf(arquivo,formatSpec3,numrow,numcol);
% fclose(arquivo);

```

## A.4 Script utilizado para a medição das temperaturas com o termopar de tipo K com o *Arduino*

```
// Basic example using one-shot measurement.
// The call to readThermocoupleTemperature() is blocking for 0(100ms)

#include <Adafruit_MAX31856.h>

// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31856 maxthermo = Adafruit_MAX31856(10, 11, 12, 13);
// use hardware SPI, just pass in the CS pin
//Adafruit_MAX31856 maxthermo = Adafruit_MAX31856(10);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) delay(10);
  Serial.println("MAX31856 thermocouple test");

  maxthermo.begin();

  maxthermo.setThermocoupleType(MAX31856_TCTYPE_K);

  Serial.print("Thermocouple type: ");
  switch (maxthermo.getThermocoupleType() ) {
    case MAX31856_TCTYPE_B: Serial.println("B Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_E: Serial.println("E Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_J: Serial.println("J Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_K: Serial.println("K Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_N: Serial.println("N Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_R: Serial.println("R Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_S: Serial.println("S Type"); break;
    case MAX31856_TCTYPE_T: Serial.println("T Type"); break;
    case MAX31856_VMODE_G8: Serial.println("Voltage x8 Gain mode");
break;
    case MAX31856_VMODE_G32: Serial.println("Voltage x8 Gain mode");
break;
    default: Serial.println("Unknown"); break;
  }
}

void loop() {
  Serial.print("Cold Junction Temp: ");
```

```

Serial.println(maxthermo.readCJTemperature());

Serial.print("Thermocouple Temp: ");
Serial.println(maxthermo.readThermocoupleTemperature());
// Check and print any faults
uint8_t fault = maxthermo.readFault();
if (fault) {
    if (fault & MAX31856_FAULT_CJRANGE) Serial.println("Cold Junction
Range Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_TCRANGE) Serial.println("Thermocouple
Range Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_CJHIGH) Serial.println("Cold Junction
High Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_CJLOW) Serial.println("Cold Junction
Low Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_TCHIGH) Serial.println("Thermocouple
High Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_TCLOW) Serial.println("Thermocouple
Low Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_OVUV) Serial.println("Over/Under
Voltage Fault");
    if (fault & MAX31856_FAULT_OPEN) Serial.println("Thermocouple
Open Fault");
}
delay(2000);
}

```

## **A.5 Artigos desenvolvidos durante a dissertação**

**M. Moreira**, F. Rodrigues, and J. Páscoa, Experimental Study of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Flow Control, in International Congress on Engineering 2019. 2019: Covilhã, Portugal.

Rodrigues, F., **M. Moreira**, and J. Páscoa, Analysis and Implementation of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Ground Vehicles Wake Reduction, in Fluids Engineering Division Summer Meeting 2021. 2021.

**M. Moreira**, J. Páscoa, F. Rodrigues and S. Cândido, Development and validation of a background oriented Schlieren (BOS) system for air density and temperature quantification, in International Congress on Engineering 2022. 2022: Covilhã, Portugal.

Manuscrito em preparação: **M. Moreira**, F. Rodrigues, S. Cândido, G. Santos and J. Páscoa, Development of a background-oriented schlieren (BOS) system for plasma actuators induced flow thermal characterization, Energies.