

**Implementação de uma instalação
experimental para o estudo do cone de Taylor**
Estudos preliminares sobre a dinâmica de fluidos

Filipe Miguel Antunes Sabugueiro

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

Orientador: Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques

junho de 2021

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha família pelo apoio que me têm fornecido durante todos estes anos, sendo que sempre me deixaram perseguir as minhas maiores ambições e ao mesmo tempo me mantiveram os pés bem assentes na terra. Estou-vos eternamente grato pela confiança que sempre depositaram em mim.

De seguida gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor José Páscoa, pelas oportunidades e ajuda que me forneceu. Acompanhou-me da melhor forma possível, confiando nas minhas decisões, mas mantendo um espírito crítico que por muitas vezes foi essencial para a devida realização deste trabalho. Fico para sempre grato pela disponibilidade que mostrou e pelos conselhos que me foi fornecendo.

Um enorme obrigado ao Doutor Frederico Rodrigues pela ajuda que me forneceu na parte experimental, explicando-me o funcionamento de alguns programas e equipamentos que se tornaram essenciais para a recolha de resultados.

Em último lugar, mas certamente não menos importante, agradeço imenso aos meus amigos mais próximos não só pelo apoio que sempre me forneceram, mas também por me ajudarem a distrair e relaxar nos tempos em que me estava a focar demasiado no trabalho.

Resumo

O electrospray é um fenómeno que apresenta um enorme potencial em várias aplicações, como a propulsão aeroespacial, onde é ideal para a correção da órbita de pequenos satélites. Outras aplicações incluem a espectrometria de massa e a deposição de partículas, sendo esta a aplicação mais versátil. No entanto esta é uma tecnologia que vê muito pouco uso atualmente devido, em grande parte, ao facto de ser pouco conhecida e relativamente pouco estudada. No entanto, já se começam a observar os benefícios da implementação deste fenómeno em aplicações como a pintura e a entrega de micropartículas orgânicas em medicina. Uma das partes essenciais do electrospray, e que tem recebido menor atenção ao longo dos anos, é a parte relativa ao spray de partículas. Isto leva a que a parte que realmente se aproveita nas aplicações (a do spray de partículas) se mantenha menos conhecida e aprofundada.

Com este trabalho, pretende-se construir uma instalação no laboratório ClusterDEM da Universidade da Beira Interior, de forma a produzir e analisar electrosprays com diferentes condições eletro-hidrodinâmicas. Esta instalação foi projetada tendo em conta os valores típicos de caudal e tensão aplicada. Tentou-se utilizar um sistema PIV para a obtenção do campo de velocidades do spray. No entanto, as imagens obtidas para tal apresentaram enormes quantidades de ruído, não sendo possível realizar a devida análise. Foram ainda analisados aspetos como a tensão mínima para o estabelecimento do modo cone-jet, e foram obtidas imagens que permitiram obter uma melhor compreensão das transições entre modos.

Palavras-chave

Electrospray;cone-jet;experimental;técnica PIV;modelos analíticos;spray de partículas;

Abstract

Electrospray presents immense potential in various applications, such as aerospace propulsion, where it is ideal for the correction of small satellites' orbits. Other applications include mass spectrometry and particle deposition, being this last one the most versatile. However, this is a technology that currently sees little use, majorly due to not being widespread enough and relatively unexplored. Nonetheless, the benefits of electrospray implementation are already starting to be noticed in applications such as painting and organic microparticle delivery. One essential part of the electrospray, that has gotten less attention throughout the years, is the one relative to the particle spray. This leads to the ultimately useful part (the particle spray) not being as well studied.

This work intends to create an experimental facility for the ClusterDEM lab in University of Beira Interior, with the aim of producing and analyzing electrosprays with different electrohydrodynamic conditions. This facility was designed with the typical value of flow rate and voltage in mind. An effort was made to use a PIV system, in order to obtain the velocity field in the spray zone. However, the images show large amounts of noise, that make such analysis impossible. A few other aspects of the electrospray were analyzed such as the minimum voltage required for the cone-jet mode. Images of the transition between different modes are also presented, which allow a better comprehension of such transitions.

Keywords

Electrospray; cone-jet; experimental; PIV technique; analytical models; particle spray;

Índice

1. Introdução	1
1.1 Motivações	3
1.2 Objetivos do trabalho	4
1.3 Organização da Dissertação	4
2. Revisão da Literatura.....	5
2.1 Desenvolvimento Histórico.....	5
2.2 Trabalho Relacionado	7
2.2.1 Aumento da margem caudal-tensão	7
2.2.2 Diminuição do tempo de transição.....	8
2.2.3 Controlo da geometria do cone.....	8
2.2.4 Electrospray com água como líquido condutor.....	8
2.2.5 Líquidos de média viscosidade e baixa condutividade	9
2.2.6 Influência do número de Reynolds no caudal	9
2.2.7 Utilização de micro-PIV para o estudo do escoamento interno	9
3. Fundamentos Teórico-Analíticos	11
3.1 Funcionamento do electrospray.....	11
3.1.1 Os diferentes modos de operação	11
3.1.2 O menisco e o equilíbrio de forças	13
3.1.3 A formação do jato	14
3.1.4 As instabilidades e o modo spray	15
3.2 Análise usando modelos analíticos.....	16
3.3 Resumo	21
4. Projeto da instalação.....	23
4.1 Requisitos da instalação	23
4.2 Hipóteses subjacentes ao projeto da instalação	24
4.3 Descrição da instalação.....	29
4.3.1 Sistema de alimentação do líquido	29
4.3.2 Calibração e controlo do caudal.....	31
4.3.3 Os emissores do electrospray	34
4.3.4 Imposição e controlo da diferença de potencial entre o líquido e o coletor ..	35
4.4 Sistemas de medição incorporados na instalação	36
4.4.1 Métodos de regulação da instalação	36
4.4.2 Métodos óticos para medição da velocidade do fluido.....	37
4.5 Limitações e adaptabilidade	45
5. Obtenção de resultados experimentais.....	48

5.1 Verificação visual do modo cone-jet	48
5.2 Identificação experimental da tensão mínima para operar em modo cone-jet	52
5.3 Cálculo das velocidades através das imagens obtidas.....	55
5.4 Análise da transição entre modos e das gotas emitidas	64
6. Conclusão	72
6.1 Limitações do presente trabalho	73
6.2 Propostas de trabalho futuro	74
Bibliografia.....	75
Anexos	79
Anexo I: Desenhos técnicos das peças utilizadas.....	79
Anexo II: Código utilizado no controlo do motor (Arduino)	86
Anexo III: Código utilizado no controlo do laser	87
Anexo IV: Procedimento para obtenção do electrospray.....	88

Lista de Figuras

Figura 1.1: Exemplos de propulsores que operam através do electrospray (imagens retiradas de [9, 10, 11]).	1
Figura 1.2: Esquema das três componentes do electrospray (cone, jato e spray).	2
Figura 3.1: Exemplos de emissão no “dripping mode”	12
Figura 3.2: Exemplos de emissão no “microdripping mode”	12
Figura 3.3: Menisco líquido com o ângulo de Taylor ($49,29^\circ$)	13
Figura 3.4: Exemplos de outras geometrias em que o menisco continua estável.	14
Figura 3.5: Circulação no interior dos meniscos de líquidos com condutividades diferentes.	15
Figura 3.6: Representação da instabilidade axial (esquerda) e radial (direita).	16
Figura 3.7: Comparação entre os dois métodos para etilenoglicol com $\epsilon = 38,66$, $K = 0,017$ S/m, $\gamma = 0,048$ N/m e $f(\epsilon) = 17,3$ (valor obtido de [17]).	18
Figura 3.8: Alteração da superfície de uma gotícula dependendo do valor de Φ .	21
Figura 4.1: Representação dos três tipos principais de emissor: a) capilar interno, b) externamente humedecido e c) poroso.	28
Figura 4.2: Mecanismo utilizado para empurrar o êmbolo.	29
Figura 4.3: Suporte ajustável para a seringa.	30
Figura 4.4: Arduino Uno e módulo L298N utilizados.	31
Figura 4.5: Módulo L298N utilizado.	33
Figura 4.6: Fonte de tensão DC utilizada para o motor e microcontrolador do laser.	34
Figura 4.7: Agulhas utilizadas com diâmetros externos de 0,6mm (esquerda), 1,1mm (centro) e 2,1mm (direita).	34
Figura 4.8: Superfície coletora utilizada neste trabalho.	35
Figura 4.9: Fonte de alta tensão DC utilizada.	36
Figura 4.10: Câmera utilizada e as 3 lentes com magnificação máxima de 5x (esquerda), 100x (centro) e 300x (direita).	37
Figura 4.11: Unidade de controlo da câmara.	38
Figura 4.12: Laser utilizado, coberto de forma a reduzir o ângulo da folha de luz emitida.	38
Figura 4.13: Interface do software HCImage Live.	39
Figura 4.14: Separador “Sequence” do software HCImage Live.	40
Figura 4.15: Processamento interno das imagens capturadas pelo software.	41
Figura 4.16: Parte traseira da unidade de controlo da câmara, com o conector para o sinal de entrada e os pins utilizados na sincronização salientados.	42
Figura 4.17: Circuito e microcontrolador utilizados.	43
Figura 4.18: Circuito elétrico para a sincronização o laser, com uma resistência de 150Ω e um transístor 2N5551.	43
Figura 4.19: Esquema de todos os componentes utilizados e ligações entre eles.	44
Figura 5.1: Configuração utilizada para as imagens retiradas a 60 ms.	49
Figura 5.2: Etanol no modo “cone-jet” a $0,8308$ mL/hr, $4,75$ kV, $L=3,6$ cm, $D_e=0,6$ mm.	49

Figura 5.3: Etanol no modo “cone-jet” a 1,3139 mL/hr, 5,48 kV, L=3,0 cm, D _e =1,1 mm.	50
Figura 5.4: “Cone-jet” de etanol observado com uma ampliação de cerca de 300x.	50
Figura 5.5: “Cone-jet” de etanol observado com uma ampliação de cerca de 250x.	51
Figura 5.6: Etilenoglicol a 2,5237 mL/hr, 4,65 kV, L=0,9 cm, D _e =1,1 mm.	51
Figura 5.7: Etilenoglicol a 2,5237 mL/hr, 4,70 kV, L=1,2 cm, D _e =1,1 mm.	52
Figura 5.8: Sequência de imagens captadas durante a quebra do modo “cone-jet”	52
Figura 5.9: Introdução de imagens no PIVlab.	56
Figura 5.10: Definição da região de interesse e criação de uma máscara.	57
Figura 5.11: Opções de pré-processamento da imagem.	57
Figura 5.12: Parâmetros relativos à simulação dos algoritmos.	58
Figura 5.13: Interface para realizar a calibração da distância e tempo.....	58
Figura 5.14: Opções de pós-processamento dos resultados/vetores.	59
Figura 5.15: Visualização do campo de velocidades no exemplo escolhido.....	59
Figura 5.16: Imagem obtida inicialmente com baixas exposições.	60
Figura 5.17: Melhoria na quantidade de ruído através do ajuste de parâmetros.	60
Figura 5.18: Quantidade de ruído após o ajuste de contraste pelo PIVlab.	61
Figura 5.19: Spray e jato visíveis, com a menor quantidade de ruído possível.....	62
Figura 5.20: Imagem de um cone-jet estável com uma exposição de 200μs.	63
Figura 5.21: Sequência de imagens do modo microdripping a 1,929 mL/hr, 4,7 kV, L=4 cm e D _e =1,1 mm.....	65
Figura 5.22: Sequência de imagens de um regime de emissão alternado/bifurcado a 1,929 mL/hr, 5,5 kV, L=4 cm e D _e =1,1 mm.	66
Figura 5.23: Cone-jet no regime pulsado a 1,929 mL/hr, 6,02 kV, L=4 cm, D _e =1,1 mm.	67
Figura 5.24: Verificação do spray a ocorrer no regime pulsado do cone-jet.	68
Figura 5.25: Cone-jet estável a 0,8308 mL/hr, 6,32 kV, L=4 cm e D _e =1,1 mm.....	68
Figura 5.26: Imagens consecutivas da emissão de uma gotícula, com 202μs entre imagens.	69
Figura 5.27: Imagens consecutivas após a quebra de um cone-jet no regime pulsado, com 202μs entre imagens.	70

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Relação entre as diferentes variáveis segundo os métodos analíticos mencionados.....	22
Tabela 4.1: Valores típicos das variáveis relevantes ao cálculo do caudal mínimo e tensão mínima.....	27
Tabela 4.2: Relação entre o número inserido no código e o caudal fornecido, com o erro dos ensaios de cada.....	32
Tabela 5.1: Tensões mínimas obtidas para o estabelecimento do modo cone-jet em diferentes casos.....	53
Tabela 5.2: Comparação entre os valores de tensão mínima medidos e os valores esperados analiticamente.	53
Tabela 5.3: Propriedades relevantes para etanol e uma solução de etilenoglicol em água.	55

Capítulo 1

Introdução

A tecnologia de electrospray apresenta aplicações em imensas áreas. Uma aplicação muito estudada é a propulsão aeroespacial [1, 2, 3, 4], em que proporciona um método de propulsão de baixa força (na ordem dos mN), mas impulso específico e precisão elevados. Uma outra aplicação é a utilização do electrospray como método de produção de iões para a espectrometria de massa [5, 6]. No entanto, onde esta tecnologia realmente demonstra a sua versatilidade é nas aplicações de deposição de partículas. Estas aplicações podem ir desde a pintura de superfícies [7], à produção de nanomateriais e até mesmo à deposição de micropartículas orgânicas em medicina [8]. Expandindo nesta última aplicação, torna-se possível com esta tecnologia produzir partículas com agentes ativos no seu interior. Assim sendo facilita-se a entrega de vacinas e outros agentes, uma vez que é possível produzir partículas de tamanho tão reduzido que passam facilmente pelas barreiras biológicas das células. Novas aplicações para esta tecnologia estão constantemente a aparecer em diversas áreas. Por exemplo, a utilização do electrospray fitossanitário para a rega mais eficiente de plantas ou uma melhor entrega de pesticidas e outras substâncias. Na figura 1.1 mostram-se alguns exemplos de propulsores. As primeiras duas imagens mostram exemplos de um conjunto de emissores e a última apresenta um único emissor com características diferentes.

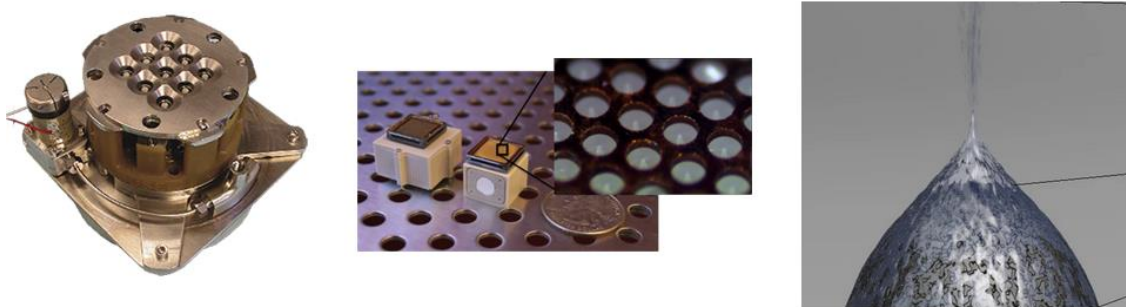


Figura 1.1: Exemplos de propulsores que operam através do electrospray (imagens retiradas de [9, 10, 11]).

De forma muito breve, o electrospray ocorre quando se aplica um campo elétrico à superfície de um líquido eletricamente condutor. Este líquido pode ser alimentado de forma passiva (através de ação capilar) ou ativa (sistemas mecânicos ou pressurizados). Nas condições certas, o líquido que se encontra na extremidade de um emissor apresenta a forma de um cone. Caso se verifique o ângulo de $49,29^\circ$ entre a superfície e o eixo do cone, este é conhecido como cone de Taylor. No entanto, o electrospray também ocorre

a partir de cones com outros ângulos. Este ângulo é apenas aquele que garante um equilíbrio de forças na superfície do cone. A formação de um cone provoca a emissão de um jato fino de partículas líquidas do seu vértice. Eventualmente este jato quebra, dando origem ao spray das partículas. Mostra-se na figura 1.2 um esquema que permite visualizar melhor estas três zonas do electrospray.

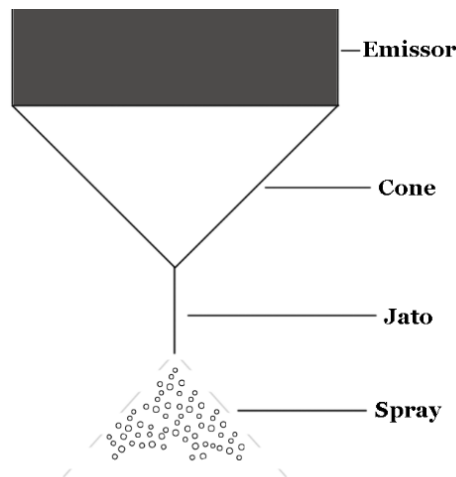


Figura 1.2: Esquema das três componentes do electrospray (cone, jato e spray).

De forma a produzir um electrospray, são tipicamente utilizados três tipos diferentes de emissor: capilar interno, externamente humedecido e poroso. O capilar interno é o tipo de emissor mais utilizado, sendo tão simples como a utilização de uma agulha fina com a extremidade plana. Com o desenvolvimento de sistemas microeletromecânicos, os emissores externamente humedecidos têm-se tornado cada vez mais populares. Estes utilizam geometrias que permitem maximizar o desempenho de um conjunto de emissores. Os porosos têm vindo a ganhar popularidade principalmente na área da propulsão aeroespacial, sendo compostos por capilares que levam o líquido até aos vários furos que existem na superfície do emissor.

A produção de um electrospray não é algo simples. É necessário aplicar uma tensão muito elevada (tipicamente na ordem dos kilovolts) e um caudal extremamente reduzido (pelos mL/hr ou menos) para que ocorra este fenómeno. Uma pequena alteração nestes dois parâmetros pode provocar grandes alterações no electrospray. Por exemplo, se a tensão aplicada for menor que um determinado valor, o cone não se conseguirá formar. Por outro lado, se for demasiado elevada, o cone mantém-se muito instável, por vezes dividindo-se em vários cones. Também é essencial ter os valores de caudal adequados. Caso o caudal fornecido seja demasiado elevado, será alimentado à zona do cone mais

líquido do que aquele que é expelido pelo jato, levando a que o cone quebre. No caso oposto, em que não é alimentado líquido suficiente, o cone não será estabelecido de todo.

Existem ainda outras variáveis muito importantes, como a distância entre o emissor e o coletor de partículas, o diâmetro externo do emissor e o líquido utilizado. Todos estes parâmetros têm impacto no valor de tensão mínima e nas propriedades do spray, como a velocidade e o diâmetro das gotículas emitidas.

Uma vez que o spray de partículas é a parte mais interessante do ponto de vista das aplicações, esta componente deve ser mais aprofundada. No entanto, a análise do spray apresenta um elevado nível de complexidade. As partículas são extremamente pequenas (na ordem dos micrómetros ou menos de diâmetro) e movem-se a velocidades muito elevadas (vários metros por segundo). Para além disso, o spray ocorre apenas dentro do espaço que é possível entre o emissor e o coletor, que possui apenas alguns centímetros de comprimento.

Um método que apresenta um grande potencial para esta análise é a utilização de um sistema PIV (Particle Image Velocimetry). Um sistema deste género realiza a comparação entre duas imagens consecutivas, captadas com tempos de exposição na ordem dos microssegundos. Através dessas duas imagens, o software fornece resultados para as velocidades nos diferentes pontos da imagem. Uma vez conhecidas as velocidades, é possível calcular as variáveis de saída mais importantes do electrospray, como a corrente emitida e a força de impulso.

1.1 Motivações

Apesar dos vários estudos ao longo dos anos, falta um modelo analítico geral (os que existem são para casos/condições específicas) que consiga prever bem as propriedades como a velocidade e geometria das gotículas emitidas ou o ângulo do spray. A formulação de um modelo simples e preciso permitiria prever as condições ideais para as diferentes aplicações. Por exemplo, calcular o valor das variáveis de entrada ideais para atingir a melhor eficiência possível num propulsor. Os modelos existentes apenas se aplicam a casos específicos como líquidos com condutividade maior que um certo valor, ou caudais perto do valor mínimo da margem do cone de Taylor, alguns deles apresentando resultados com precisão baixa.

Para além disso, existem muito poucos estudos sobre a zona do spray de partículas. A maior parte da literatura concentra-se no estudo da zona do cone. Visto que a parte mais

útil do electrospray é a emissão de partículas, torna-se necessário conhecer bem a forma como reage à alteração de parâmetros.

Com esta instalação será possível realizar estudos que permitam desvendar uma melhor compreensão deste fenómeno, possibilitando o aparecimento de novos métodos analíticos e fornecendo um meio para a otimização de parâmetros para diferentes aplicações.

1.2 Objetivos do trabalho

O primeiro objetivo é a construção de uma instalação com custo relativamente reduzido que forneça resultados adequados. Esta instalação deve ser fácil de operar e possuir uma elevada adaptabilidade a diferentes estudos.

Como segunda objetivo apresenta-se a utilização de um sistema PIV para obter as características do spray. Esta é uma parte da literatura que possui uma menor quantidade de estudos, embora seja uma das mais importantes. É esta a parte do electrospray que se apresenta como o output do sistema (sem o spray de partículas as aplicações seriam muito reduzidas ou até mesmo nenhuma).

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução ao fenómeno do electrospray, sendo também descritos os objetivos e contribuições deste trabalho. O capítulo 2 contém uma revisão da literatura, onde se apresentam o desenvolvimento histórico e os trabalhos relacionados. No capítulo 3, são fornecidos os conceitos fundamentais para a compreensão deste trabalho. São também apresentados nesse capítulo os modelos analíticos mais relevantes na literatura. No capítulo 4 é descrita a instalação que foi construída, apresentando também as decisões tomadas ao longo do projeto e as limitações que possui. O capítulo 5 contém os resultados obtidos, com a respetiva discussão e análise, fornecendo também informação sobre alguns detalhes que são essenciais à devida operação da instalação. Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as conclusões que se recolheram com este trabalho e propõem-se trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Apresenta-se neste capítulo uma revisão do conhecimento atual sobre o electrospray, de forma que se compreenda melhor o resto do trabalho, permitindo também a futura discussão dos resultados. Na secção 2.1 é apresentado brevemente o desenvolvimento histórico do conhecimento. Na secção 2.2 apresentam-se as conclusões retiradas em trabalhos relacionados com o desta dissertação.

2.1 Desenvolvimento Histórico

A primeira observação deste fenómeno foi registada por Zeleny [12] no início do século XX, que verificou um pequeno jato líquido (na ordem de $1\ \mu\text{m}$ de diâmetro) a ser expelido de uma superfície cónica de etanol, quando aplicada uma diferença de potencial (na ordem dos kV) entre o emissor e uma placa coletora. Zeleny registou que o jato se tornava cada vez mais instável ao longo do seu comprimento, eventualmente quebrando e dando origem a uma dispersão de gotículas numa geometria cónica. A causa desta geometria do spray assumiu-se inicialmente como sendo a repulsão elétrica entre as várias gotículas, algo que não voltaria a ser estudado durante décadas.

Quase 50 anos mais tarde, Taylor forneceu a primeira explicação teórica para a forma cónica da superfície líquida, descobrindo que a superfície de um líquido perfeitamente condutor (na forma cónica) apenas se encontra em equilíbrio total quando o cone possui um ângulo entre o seu eixo e a superfície de $49,29^\circ$ [13]. Este equilíbrio ocorre quando a força devida à componente normal do campo elétrico alcança o mesmo valor da força devida à tensão superficial do líquido. Graças a esta descoberta, este ângulo ficou conhecido como o ângulo de Taylor, que deu origem à designação “cone de Taylor”.

Em 1969, descobriu-se que as gotas de um líquido condutor colocadas num campo elétrico sofrem deformação não apenas devido à componente tangencial do campo elétrico, mas também devido à carga superficial que é induzida na superfície do líquido [14]. Foi então realizado um dos primeiros trabalhos com a intenção de estudar as gotículas em vez de estudar a superfície cónica (também conhecida por menisco) presente na ponta do emissor. Graças a este estudo, descobriu-se que uma gotícula no campo elétrico pode-se alongar ou contrair na direção do campo, dependendo das propriedades do líquido e do meio fluido.

Ao longo dos anos foram sendo descobertos vários modos de funcionamento do electrospray. Em 1990, Cloupeau e Prunet-Foch [15] apresentaram uma descrição de modos como o “cone-jet” e o “microdripping” que serão analisados na próxima secção. Esta compilação dos vários modos permitiu uma melhor compreensão sobre a forma como o electrospray evolui com a tensão aplicada e deu início a um estudo mais aprofundado do “cone-jet”, uma vez que foi apontado como o modo de funcionamento com maior potencial para aplicações futuras.

Começaram então a aparecer métodos analíticos para este modo, com o objetivo de prever propriedades como a corrente emitida e o diâmetro das gotículas emitidas. Um dos primeiros modelos analíticos foi desenvolvido por Fernández de la Mora e Loscertales [16, 17], tendo como objetivo principal a previsão da corrente emitida pelo jato. No entanto, não só forneceram um ótimo método de calcular esta grandeza (com base em variáveis de entrada como o caudal fornecido e as propriedades do líquido), como também descobriram que para líquidos com condutividade superior a um determinado valor, a corrente emitida se torna completamente independente dos parâmetros eletrostáticos.

Alguns outros métodos foram desenvolvidos (baseados em leis de escala), que se diferenciaram graças às hipóteses em que se baseavam ou à região do electrospray que pretendiam analisar. Um dos métodos mais usados, competindo com o método de Fernández, começou a ser desenvolvido em 1995 por Gañán-Calvo et al. [18]. Este método apresentou-se como mais abrangente no sentido em que permite a previsão da corrente, do diâmetro das gotículas, da carga presente nas gotículas e da magnitude dos valores mínimos do caudal.

Alguns trabalhos, como o de Chen e Pui [19], salientaram a importância de algumas propriedades nestes modelos analíticos. Como se apontou neste estudo, uma das poucas diferenças entre as equações fornecidas pelos métodos de Fernández e Gañán-Calvo é a importância da constante dielétrica do líquido. Conclui-se que de facto, para certos valores da constante dielétrica nenhum dos modelos apresenta resultados suficientemente bons, provocando assim o aparecimento de novos modelos e a otimização dos já existentes.

Com o passar do século, começou-se também a dar mais atenção à parte experimental, uma vez que em grande parte já se conhecia bem o mecanismo físico por trás do

electrospray. O destaque está agora no estudo de casos particulares como a utilização de diferentes tipos de líquidos [20, 21, 22], algo que permite desenvolver ainda mais o conhecimento que se possui atualmente. Alguns destes estudos permitem obter o electrospray de formas que previamente se pensaram impossíveis, como o electrospray de água em ar sem que ocorram descargas elétricas [23]. Tem-se também vindo a dar uma enorme quantidade de atenção à utilização deste fenómeno para propulsão aeroespacial (que é apenas uma de imensas aplicações) [24, 25, 26, 27]. Os estudos nesse ramo têm como objetivo melhorar a eficiência de propulsores coloides, de forma que se obtenha um maior impulso específico ou maior força com o menor consumo de líquido possível. Um terceiro ramo de estudos que se pode identificar recentemente é a otimização experimental do electrospray, seja através do uso de “arrays” de emissores [28, 29], através da análise da transição entre modos ou da resposta à alteração de variáveis [30], ou através do controlo da geometria do cone [31].

2.2 Trabalho Relacionado

Ao longo dos anos foram sendo realizados vários estudos com o foque na parte experimental, de forma a otimizar e compreender melhor os parâmetros que levam a um electrospray com as características pretendidas. Nesta secção apresentam-se alguns dos trabalhos que providenciaram os resultados mais interessantes, desde o aumento da estabilidade do cone, ao uso de diferentes líquidos e até ao estudo do movimento do fluido no interior do menisco.

2.2.1 Aumento da margem caudal-tensão

Este modo apenas é possível dentro de uma determinada margem de valores para o caudal e para a tensão (que são diferentes para cada líquido). Os valores máximos e mínimos do caudal dependem principalmente do valor da condutividade do líquido, enquanto a margem de valores para a tensão depende da geometria dos elétrodos, da tensão superficial, da condutividade e do caudal aplicado.

No entanto, é possível aumentar a margem caudal-tensão com o uso de uma semiesfera colocada ligeiramente antes da extremidade do emissor de forma que a base do cone esteja conectada a essa semiesfera [32]. Uma desvantagem que este método apresenta é que apesar de o intervalo entre o valor máximo e o valor mínimo ser aumentado, o valor mínimo para a formação do cone também aumenta. O facto de ser preciso um maior valor de tensão para que o cone-jet se forme pode não compensar a maior margem de valores que se obtém em muitas aplicações.

2.2.2 Diminuição do tempo de transição

Quando o electro spray entra no modo cone-jet, o jato pode-se separar do cone e formar de novo várias vezes até se tornar estável. Este processo pode ter uma duração de mais de 100ms, mas o ideal seria diminuir esse tempo para cerca de 1ms. Neste pequeno período de tempo, o cone-jet passa por diferentes fases, sendo que o volume do cone aumenta e diminui até finalmente estabilizar. De forma a obter o menor tempo de transição possível, deve-se diminuir o diâmetro externo do emissor (embora a partir de um certo valor o impacto seja negligível) e aumentar o caudal [30]. O aumento do valor do campo elétrico também diminui o tempo de transição embora possa ter o efeito contrário caso se aumente demasiado.

2.2.3 Controlo da geometria do cone

Em certas aplicações torna-se essencial que o cone-jet possua uma geometria estável durante longos períodos. Assim sendo, não devem ocorrer descargas elétricas que levariam a uma perturbação do volume de líquido emitido. Segundo o trabalho feito por Suhendi et al. [31], através do controlo da corrente elétrica é possível controlar a geometria do cone e mantê-lo estável durante períodos de até 4000s. Não só se torna o cone mais estável, mas as gotículas emitidas também apresentam uma menor divergência no diâmetro como consequência.

2.2.4 Electro spray com água como líquido condutor

O uso de água como líquido para electro spray implica normalmente a introdução de dióxido de carbono na experiência. Isto deve-se ao facto de o cone-jet se tornar muito instável (quando realizado em ar) devido ao elevado valor da tensão superficial que leva a que o campo elétrico necessário para o cone-jet seja maior que aquele necessário para a ionização do ar. Nesse caso, as descargas elétricas tornam-se muito comuns, levando a que o cone-jet se quebre frequentemente. A utilização de um gás com um limite de campo elétrico mais elevado, como o CO₂, permite que se forme um cone-jet estável.

No entanto, López-Herrera et al. [22] verificaram que é possível obter um cone-jet estável (em ar) dentro de certos limites de caudal e condutibilidade da água. O electro spray passa por quatro modos diferentes com o aumento da tensão aplicada: “dripping mode”, “cone-jet mode”, “electrical dripping mode” e “cone-jet glow discharge mode”. O modo cone-jet estável é apenas observado numa margem muito pequena de valores de tensão, mas demonstrou-se com este estudo que se consegue alcançar a estabilidade sem a utilização de outro gás.

2.2.5 Líquidos de média viscosidade e baixa condutividade

O trabalho realizado por Wang et al. [33] declara que utilizando líquidos de baixa condutividade e de média viscosidade, o cone-jet torna-se instável quando se aproxima dos limites inferiores da margem caudal-tensão. De forma a obter um cone-jet estável, verifica-se ser ideal utilizar os valores de caudal e tensão mais elevados. Como já se sabia previamente, a forma do menisco depende do equilíbrio entre a força devida à tensão superficial e a componente normal da força devida ao campo elétrico. O que se observa no estudo em questão é que para este tipo de líquidos a componente tangencial desta força também tem impacto significativo na forma do menisco. Para além disso, o aumento da tensão aplicada leva ao aumento do ângulo do cone e à diminuição da sua altura. A diminuição da altura ocorre devido ao aumento da componente normal do campo elétrico que faz com que a tensão superficial tente compensar essa variação do valor. Esta diminuição da distância entre a base do cone e o seu vértice acompanha o aumento da componente tangencial do campo elétrico, sendo esta a componente responsável pelo transporte do líquido para a formação do jato.

2.2.6 Influência do número de Reynolds no caudal

Um destes estudos, realizado por Barrero et al. [34], afirma que a componente tangencial do campo elétrico na superfície do cone causa uma recirculação do fluido que o transporta em direção ao vértice perto da superfície e em direção ao emissor perto do eixo do cone. Para além disso, observou-se neste estudo que a velocidade do líquido aparenta ser principalmente dependente da condutibilidade e viscosidade. Utilizando partículas de poliestireno para visualizar o caudal, verificou-se que em líquidos com condutibilidade e viscosidade maiores (menor número de Reynolds), o líquido é transportado na direção do eixo do cone e que existe uma zona de estagnação que separa a zona de recirculação e a zona em que o fluido é transportado para o jato. Em condutibilidades e viscosidades mais baixas (número de Reynolds maior), existe também um movimento do líquido de forma circular em torno do eixo do cone. Afirma-se neste estudo que a componente tangencial das tensões devidas ao campo elétrico (e consequentemente a velocidade do fluido) aumenta com a diminuição do valor da condutibilidade. Caso esta componente tenha maior influência na velocidade do fluido que o caudal, a recirculação do fluido começa a aparecer no interior do cone.

2.2.7 Utilização de micro-PIV para o estudo do escoamento interno

Um estudo mais recente [35] utilizou a tecnologia PIV (Particle Image Velocimetry) de forma a estudar a estabilidade do escoamento no interior de um cone de Taylor. Devido

à curvatura do cone e aos índices refrativos dos líquidos, as imagens obtidas sofrem uma distorção que pode fornecer resultados incorretos no cálculo das velocidades. De forma a corrigir estas distorções, foi utilizado no estudo em questão um método de mapeamento de velocidades que permite obter dados corretos a partir das imagens incorretas.

A mesma zona de estagnação mencionada anteriormente foi aqui também observada, sendo que delimitava também uma zona de recirculação. Como seria de esperar, a velocidade do fluido é maior perto do vértice onde o jato é formado e o líquido é expelido. O que se torna interessante é que o aumento da corrente (que acompanha um aumento do volume de líquido a ser emitido e uma maior velocidade) faz com que a zona de estagnação retraia em direção à base do cone. Isto deve-se ao facto de existir uma menor quantidade de fluido a sofrer a recirculação. Em termos de estabilidade, pode-se retirar do estudo em questão que líquidos com tensões superficiais mais baixas levam a zonas de recirculação maiores, o que significa que a velocidade no interior do cone é menor e o cone torna-se mais estável. No entanto, em algumas aplicações, pode ser vantajoso ter um valor de corrente emitida (e velocidade) maior em troca da estabilidade do cone e estabilidade do valor da corrente.

Capítulo 3

Fundamentos Teórico-Analíticos

Neste capítulo são apresentados os conceitos essenciais para o estudo e compreensão do electrospray. A secção 3.1 começa por apresentar os modos de funcionamento e as diferentes partes do electrospray. A secção 3.2 contém um resumo dos modelos analíticos atualmente conhecidos. Por fim, a secção 3.3 apresenta um resumo de todo o conteúdo teórico coberto até ao início dessa secção.

3.1 Funcionamento do electrospray

Quando um líquido é transportado até à ponta de um emissor (considere-se daqui em diante uma agulha com a ponta lisa) com caudais baixos, este é emitido na forma de gotas tipicamente um pouco maiores que o diâmetro do emissor. Caso o caudal seja suficientemente baixo, o líquido começa a formar uma gota que se prende ao emissor por forças capilares até eventualmente se tornar demasiado grande. Quando as forças capilares deixam de aguentar o peso do volume líquido, este cai e dá lugar à próxima gota se o líquido continuar a ser alimentado até ao emissor. No caso de o líquido ser eletricamente condutor e se for aplicada uma tensão suficientemente elevada entre o emissor e uma placa condutora colocada a uma determinada distância, o volume de líquido na ponta do emissor toma a forma de um cone com um jato extremamente fino a ser emitido do seu vértice. Este jato eventualmente quebra e são então emitidas gotículas (com diâmetros na ordem dos μm) num spray com uma geometria cónica.

3.1.1 Os diferentes modos de operação

Dependendo dos valores do caudal e da tensão aplicada, a emissão de líquido com a assistência de um campo elétrico pode ocorrer em vários modos de funcionamento [15, 36]. Os modos principais serão aqui brevemente apresentados segundo uma ordem que corresponde ao aumento do valor da tensão. O primeiro modo que aparece, apresentado na figura 3.1, é o chamado “dripping mode” e é caracterizado pelo aumento da frequência de emissão e pela diminuição do diâmetro das gotas (comparando com o caso em que não é aplicada nenhuma tensão). Este aumento da frequência de emissão deve-se à ação do campo elétrico nas cargas presentes na superfície líquida, que possui um sentido oposto à ação capilar. O diâmetro das gotas continua, no entanto, a ser ligeiramente maior que o diâmetro do emissor.

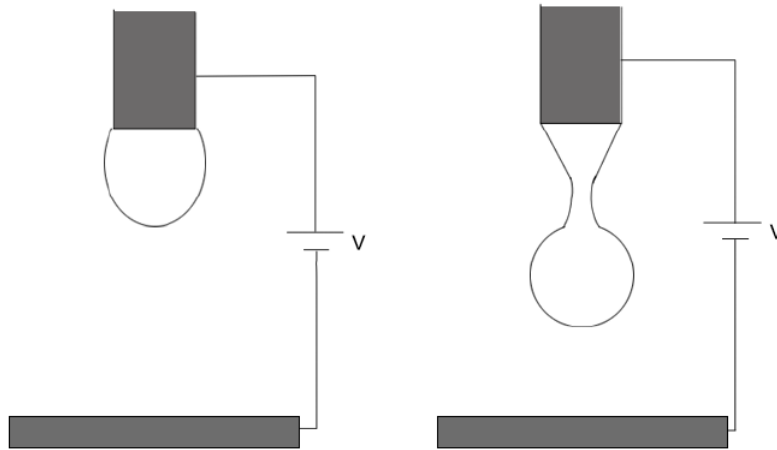


Figura 3.1: Exemplos de emissão no “dripping mode”.

Continuando a aumentar a tensão, entra-se no próximo modo de funcionamento chamado “microdripping mode”. Este modo, apresentado na figura 3.2, possui frequências de emissão muito maiores e o diâmetro das gotas emitidas passa a ser menor que o diâmetro do emissor (na ordem das dezenas de μm). Para além disso, as gotas emitidas possuem uma grande uniformidade no seu tamanho, mesmo sendo emitidas a frequências de centenas (ou até milhares) por segundo. Neste modo, a superfície líquida alonga-se, tomando a forma de um filamento líquido com uma pequena gota no fim que eventualmente se separa, repetindo o ciclo de emissão. Devido ao aspeto e à elevada frequência de emissão, torna-se fácil confundir este modo com o próximo quando visto a olho nu.

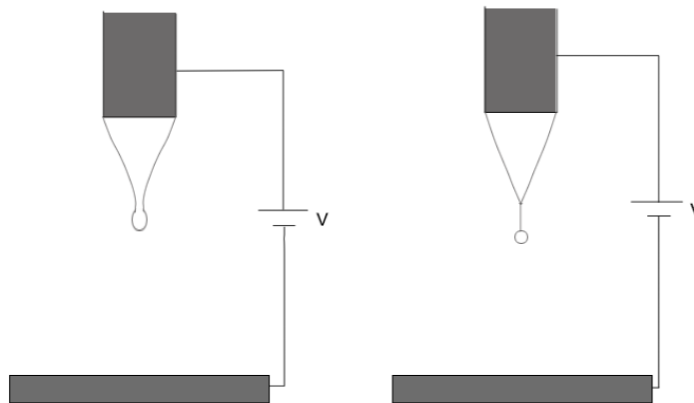


Figura 3.2: Exemplos de emissão no “microdripping mode”.

Se o valor do caudal e da tensão estiverem dentro de uma determinada margem, dá-se início ao “cone-jet mode”. Este é modo que tem sido mais estudado, devido à grande quantidade de aplicações que pode ter. É também o modo que requer mais cuidado para atingir e manter. É neste modo que ocorre o cone de Taylor, sendo que a superfície líquida toma uma forma cónica como foi descrito nos trabalhos de Zeleny. No entanto, a superfície pode ter ângulos distintos do ângulo de Taylor e continuar a operar neste

modo. É possível através deste modo obter gotículas no spray com uma enorme gama de diâmetros, podendo estes descer até à ordem dos nanómetros. Os pormenores deste modo serão discutidos em maior detalhe no subcapítulo seguinte.

Aumentando ainda mais o valor da tensão, torna-se visível a emissão de vários jatos no que é chamado “multi-jet mode”. Este é um modo de funcionamento pouco estudado, mas caracteriza-se pela separação da superfície líquida em dois ou mais meniscos, cada um com o seu jato. Em alguns casos, estes jatos aparentam sair diretamente da periferia do emissor, sem que seja visível uma superfície líquida. Apesar de ser um modo altamente instável e irregular, a divisão do caudal por vários jatos provoca a emissão de gotículas ainda mais pequenas e com frequências de emissão ainda maiores.

Uma vez apresentados os principais modos de funcionamento, será agora analisado de uma forma mais detalhada o “cone-jet mode” uma vez que é neste modo que todo este trabalho será desenvolvido.

3.1.2 O menisco e o equilíbrio de forças

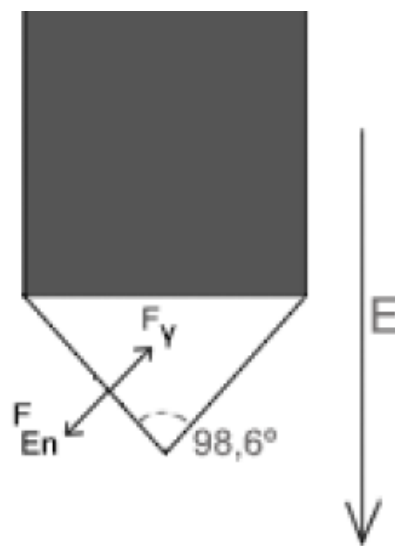


Figura 3.3: Menisco líquido com o ângulo de Taylor (49,29°).

Considere-se mais uma vez um volume líquido na ponta de uma agulha (emissor). No caso em que o líquido é condutor, este volume começa-se a deformar quando aplicado um campo elétrico. A superfície vai-se deformando cada vez mais com o aumento da tensão a ser aplicada, deixando de assumir a forma causada unicamente pela tensão superficial. Quando a força devida à componente normal do campo elétrico (F_{En}) se aproxima da força devida à tensão superficial (F_Y), o volume líquido começa a apresentar

uma forma cônica, como se mostra na figura 3.3. Para qualquer líquido, quando a superfície apresenta o ângulo de Taylor de $49,29^\circ$ (entre o eixo do cone e a superfície), torna-se garantido que nesse momento as forças referidas acima possuem o mesmo valor, independentemente das propriedades do líquido como a constante dielétrica, a densidade e a viscosidade.



Figura 3.4: Exemplos de outras geometrias em que o menisco continua estável.

No entanto, não é necessário o cone possuir o ângulo de Taylor para que seja estável, sendo possível obter cones com ângulos maiores ou menores e até mesmo com superfícies mais côncavas ou mais convexas, como na figura 3.4. Para entender melhor a possibilidade de a superfície apresentar uma curvatura, é necessário conhecer o mecanismo de formação do jato.

3.1.3 A formação do jato

Tendo em conta que o líquido está a ser alimentado até à ponta do emissor de uma forma constante (e a caudais extremamente baixos, na ordem dos mL/hr ou menos), para que o menisco se mantenha com a sua forma cônica estável, é necessário que o líquido que está a ser injetado seja igualmente expelido. Neste modo, o líquido é ejetado na forma de um jato que é emitido a partir do vértice do menisco. O líquido na superfície do menisco acelera em direção ao jato de forma a dar continuidade à sua emissão. Esta aceleração deve-se à ação da componente tangencial do campo elétrico nas cargas superficiais presentes no menisco (e também no jato).

A zona de formação do jato depende principalmente da condutividade do líquido. Para líquidos com condutividades relativamente elevadas ($K \geq 10^{-4} \text{ S.m}^{-1}$) a formação do jato está contida à parte do menisco mais próxima do jato. Em líquidos com condutividades menores, a zona de formação começa a retrair em direção à base do cone, formando um menisco com uma forma mais côncava [36]. De forma a tornar mais fácil a compreensão das zonas de formação do jato, apresentam-se na figura 3.5 exemplos do que seria de esperar em diferentes líquidos. Pode-se também observar as linhas de circulação do

líquido no interior do menisco, que mostram claramente a separação entre a zona de emissão e a zona de recirculação [35].

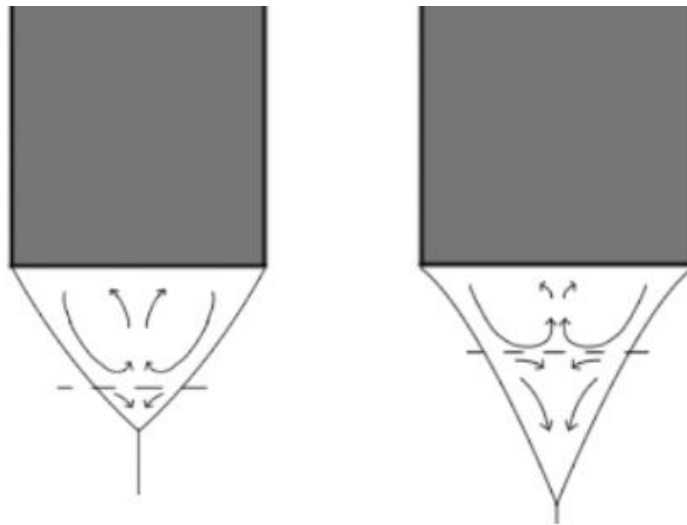


Figura 3.5: Circulação no interior dos meniscos de líquidos com condutividades diferentes.

Sabe-se ainda que o comprimento deste jato depende principalmente do caudal fornecido e da viscosidade do líquido, podendo atingir comprimentos de alguns centímetros ou sendo extremamente curto, na ordem das dezenas de micrómetros. Aliás, a produção de jatos relativamente longos é utilizada em “electrospinning”, que aproveita estes jatos para criar fibras extremamente finas através da solidificação do líquido.

3.1.4 As instabilidades e o modo spray

No entanto, na maior parte dos casos em que se utiliza o modo cone-jet, o jato acaba por quebrar após percorrer uma determinada distância. A quebra do jato provoca a emissão de gotículas extremamente pequenas (na ordem dos μm ou até nm de diâmetro). Estas gotículas possuem ainda uma determinada carga que pode ou não ser neutralizada, dependendo da aplicação pretendida. Visto que a quebra do jato é essencial para que ocorra o electrospray, torna-se adequado conhecer os mecanismos que provocam este fenómeno.

O jato quebra devido a dois tipos de instabilidade, apresentados na figura 3.6, que podem ocorrer simultaneamente. O primeiro tipo de instabilidade será aqui chamado de instabilidade axial, devido a ocorrer no sentido do eixo do jato. Desde que o jato se mantenha estável, as gotículas produzidas possuem todas o mesmo tamanho, sendo emitidas em intervalos de tempo bem definidos. Devido à emissão das gotículas na

mesma direção do jato, pode-se tornar difícil observar a sua separação, podendo-se até considerar que de facto não existe o spray pretendido.

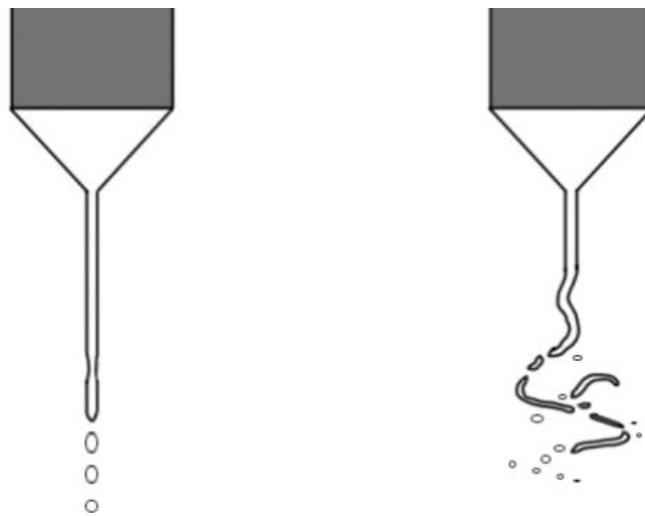


Figura 3.6: Representação da instabilidade axial (esquerda) e radial (direita).

Caso este seja o único tipo de instabilidade que se observa num determinado caso, o aumento do caudal é um método utilizado para provocar o segundo tipo de instabilidade, que será apresentado como instabilidade radial, devido a provocar a emissão de gotículas de forma que se separem do eixo do jato. Neste tipo de instabilidade, as perturbações laterais por parte do campo elétrico tornam-se dominantes, fazendo com que o jato apresente um movimento lateral de forma quase caótica. Uma vez instável, esta zona do jato quebra-se continuamente, dando origem à dispersão numa geometria cónica de gotículas de tamanho extremamente reduzido. Estas gotículas apresentam tamanhos menos uniformes, sendo que as maiores se encontram mais próximas do centro do cone.

3.2 Análise usando modelos analíticos

Através da observação das equações que fazem parte dos métodos analíticos mais utilizados e aceites, torna-se possível obter uma melhor compreensão da importância de certas variáveis no electrospray. Sem estes métodos seria um pouco mais difícil compreender se, por exemplo, a alteração do caudal tem mais impacto no valor da corrente emitida do que a alteração da condutibilidade do líquido.

Assim sendo, serão apresentadas nesta secção as equações presentes na literatura que fornecem os resultados mais acertados, sendo também apresentado na próxima secção um resumo de forma a discriminar o impacto que a alteração de cada variável tem no electrospray.

Os métodos baseados em leis de escala pretendem, como o nome sugere, avaliar como uma grandeza escala com a alteração de determinadas variáveis. Os métodos deste tipo que serão aqui apresentados são mais adequados para obter a ordem de grandeza que se pode esperar, do que para obter resultados precisos sobre as grandezas que são calculadas. No entanto, fornecem uma ótima compreensão da importância das variáveis.

O primeiro método a ser apresentado foi desenvolvido por Fernández de la Mora e Loscertales [17] e baseia-se na hipótese de que para líquidos com uma condutibilidade relativamente elevada ($K \geq 10^{-4} \text{ S.m}^{-1}$), onde o diâmetro do jato é suficientemente pequeno ($< 10 \text{ } \mu\text{m}$), a corrente emitida torna-se independente dos parâmetros eletrostáticos (tornando-se independente da tensão aplicada) e da configuração dos eletrodos (podendo a distância entre o emissor e a placa coletora variar). Assume-se também neste método que uma circulação do fluido no interior do menisco de forma que este esteja a circular em direção ao vértice em todo o seu volume, é uma aproximação suficientemente boa para este tipo de líquidos.

Assim sendo, são propostas as seguintes equações para a corrente emitida (I), o diâmetro das gotículas (D_d) e o caudal mínimo necessário para o modo “cone-jet” (Q_{min}):

$$I = f(\varepsilon)(\gamma K Q \varepsilon^{-1})^{1/2} \quad (3.1)$$

$$D_d = G(\varepsilon)(Q \tau)^{1/3} \quad (3.2)$$

$$Q_{min} = \varepsilon \varepsilon_0 \gamma \rho^{-1} K^{-1} \quad (3.3)$$

Nestas equações, $f(\varepsilon)$ e $G(\varepsilon)$ são funções da constante dielétrica determinadas experimentalmente, γ é a tensão superficial, K é a condutibilidade elétrica, Q é o caudal a ser aplicado, ε é a constante dielétrica do líquido em questão, ε_0 é a constante de permissividade do vácuo, ρ é a massa volúmica do líquido e τ representa o tempo de relaxação elétrica, que se calcula pela seguinte expressão:

$$\tau = \varepsilon \varepsilon_0 K^{-1} \quad (3.4)$$

São ainda propostas duas variáveis adimensionais, sendo a primeira um parâmetro adimensional para o caudal (η) e a segunda uma variável de escala para o comprimento do jato (r^*):

$$\eta = (\rho K Q \gamma^{-1} \varepsilon^{-1} \varepsilon_0^{-1})^{1/2} \quad (3.5)$$

$$r^* = (Q \varepsilon \varepsilon_0 K^{-1})^{1/3} \quad (3.6)$$

Um outro método analítico, também com o objetivo de encontrar leis de escala foi desenvolvido por Gañán-Calvo et al. [18, 37], fornecendo equações para as mesmas grandezas. No entanto, os resultados obtidos foram diferentes principalmente na importância da constante dielétrica. Para além disso, este método não utiliza as mesmas funções da constante dielétrica que o método anterior requer, como se pode ver nas equações seguintes:

$$I = 6,46\varepsilon^{1/4}(\gamma K Q \varepsilon^{-1})^{1/2} \quad (3.7)$$

$$D_d = 1,66\varepsilon^{-1/6}(Q\tau)^{1/3} \quad (3.8)$$

$$Q_{min} = \varepsilon^{1/2}\varepsilon_0\gamma\rho^{-1}K^{-1} \quad (3.9)$$

Mostra-se na figura 3.7 uma comparação entre os dois métodos para o cálculo da corrente dependente da variação do caudal. Como se vê, existe uma pequena diferença, que se deve ao valor determinado experimentalmente para $f(\varepsilon)$ não ser igual ao valor calculado pela expressão $6,46\varepsilon^{1/4}$.

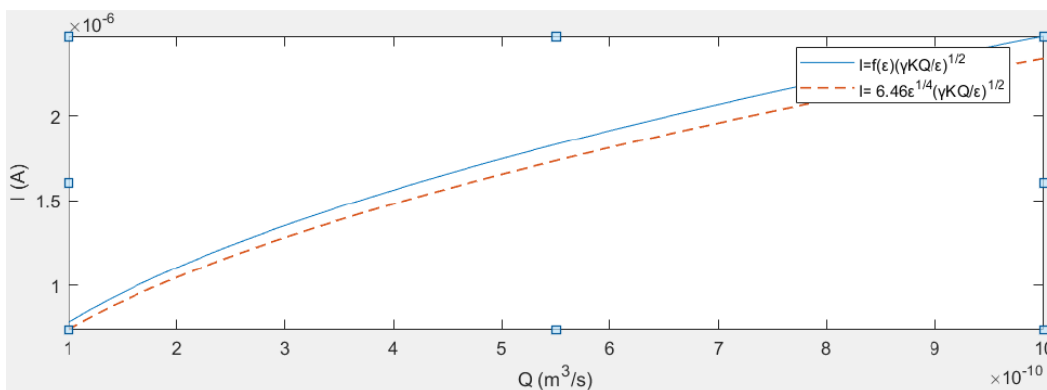


Figura 3.7: Comparação entre os dois métodos para etilenoglicol com $\varepsilon = 38,66$, $K = 0,017$ S/m, $\gamma = 0,048$ N/m e $f(\varepsilon) = 17,3$ (valor obtido de [17]).

Devido ao facto de a diferença entre estas equações ser a importância da constante dielétrica, Chen e Pui realizaram um estudo com o objetivo de descobrir qual dos dois métodos fornece os resultados mais corretos para diferentes valores desta propriedade [19]. No entanto, concluiu-se que nenhum dos métodos fornece resultados suficientemente bons. O modelo proposto por Gañán-Calvo et al. não é capaz de prever corretamente o diâmetro das gotículas em líquidos com uma constante dielétrica inferior a 80. Para além disso, uma das hipóteses considerada neste modelo (sendo que se assumiu que as condições do meio ambiente podiam ser desconsideradas) é inadequada ao caso real.

Também para a corrente emitida, nenhum dos modelos deu resultados suficientemente bons quando comparados com os dados experimentais obtidos, embora o modelo de Fernández de la Mora tenha chegado perto (mas apenas em valores baixos da constante dielétrica). Apesar das falhas que estes modelos apresentam, estes podem ser úteis para obter aproximações e as ordens de grandeza que seria de esperar, apresentando também a importância das diferentes propriedades que será evidenciada no próximo subcapítulo.

Para além das leis que têm sido descritas, ao longo dos anos foram sendo estabelecidas algumas equações para os diferentes parâmetros como a tensão necessária para estabelecer um “cone-jet”. As equações que se demonstrem interessantes para este trabalho de forma a melhorarem a compreensão de como o electrospray reage à alteração das variáveis serão agora apresentadas de forma direta e sucinta.

Segundo Morris et al. [38], é possível obter uma ótima aproximação da tensão mínima (V_{min}) necessária para estabelecer um “cone-jet” através da seguinte equação:

$$V_{min} = \sqrt{\frac{\gamma D_e}{2\epsilon_0} \ln\left(\frac{4L}{D_e}\right)} \quad (3.10)$$

Verifica-se que esta tensão mínima depende não só do líquido, mas também do diâmetro externo do emissor (D_e) e da distância entre o emissor e o coletor (L). Ainda do mesmo estudo podem-se retirar as seguintes equações:

$$\frac{I}{\dot{m}} = \left(\frac{q}{m}\right) \quad (3.11)$$

$$v_e = \sqrt{\left(2V \frac{q}{m}\right)} \quad (3.12)$$

Nestas equações I representa a corrente emitida, \dot{m} é o caudal mássico, (q/m) é a razão carga-massa das gotículas, v_e representa a velocidade das gotículas no momento de emissão e V é a tensão aplicada.

Várias outras relações estão atualmente bem estabelecidas, como por exemplo a relação entre a geometria do cone e a razão iões-gotículas na emissão de um electrospray com determinados líquidos [39]. No entanto, este trabalho concentra-se menos nas especificidades das aplicações e mais no fenómeno em si, portanto esse tipo de equações ficará por apresentar devido a ser irrelevante para o resto do trabalho.

Para além de métodos para prever os valores das variáveis, foram também desenvolvidas algumas expressões analíticas com o objetivo de prever aspetos menos quantitativos. Um exemplo interessante é a expressão desenvolvida por Melcher e Taylor [40], que considera as interações superficiais entre a gotícula líquida e o campo elétrico presente no meio exterior. Sabe-se através deste estudo que existe uma convecção do fluido no interior da gotícula, não apenas devido à componente tangencial do campo elétrico, mas também devido à carga superficial induzida na superfície.

Considerem-se os seguintes parâmetros, sendo que a letra “a” corresponde ao fluido externo (tipicamente ar) e a letra “b” corresponde ao fluido no interior da gotícula:

$$R = \frac{K_b}{K_a} \quad (3.13)$$

$$S = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} \quad (3.14)$$

$$M = \frac{\mu_a}{\mu_b} \quad (3.15)$$

Assim sendo, R representa a relação entre as condutividades dos fluidos, S a relação entre as constantes dielétricas dos fluidos e M a relação entre as viscosidades dos fluidos. Através destes parâmetros e da equação apresentada abaixo, é possível prever a forma que a superfície da gotícula irá tomar (este método também se pode aplicar a gotículas de maior tamanho como aquelas presentes no modo “dripping”).

$$\Phi = S(R^2 + 1) - 2 + \frac{3}{5}(RS - 1)\frac{2M + 3}{M + 1} \quad (3.16)$$

Caso o valor de Φ seja nulo, a gotícula encontra-se perfeitamente em equilíbrio e apresenta uma superfície esférica. No entanto, se Φ apresentar um valor negativo, a gotícula começa a reduzir de tamanho na direção do campo elétrico, como se mostra na figura 3.8. O oposto ocorre no caso de Φ apresentar um valor positivo. No caso em que o líquido no interior de uma gotícula possui uma condutibilidade muito maior que o fluido exterior (como uma gotícula de água em ar), o valor de Φ é sempre positivo e a gotícula alonga-se na direção do campo elétrico.

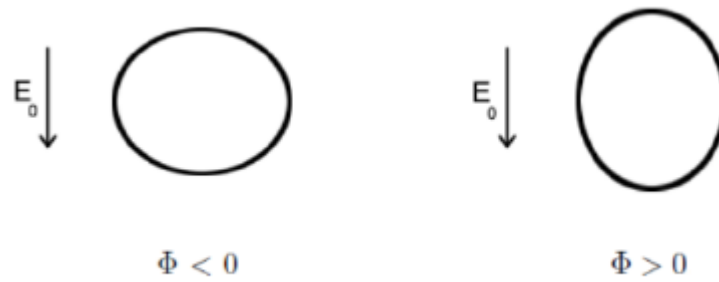


Figura 3.8: Alteração da superfície de uma gotícula dependendo do valor de Φ .

3.3 Resumo

Apresentaram-se ao longo deste capítulo as bases do conhecimento necessário para realizar o trabalho aqui em questão. Foi primeiramente mencionado o desenvolvimento histórico desde a descoberta do fenómeno de electrospray até ao conhecimento atual, que tende a aprofundar mais nas aplicações que esta tecnologia apresenta. No entanto, como se mostrou nos trabalhos relacionados, ainda são feitos estudos com o objetivo de otimizar o funcionamento do electrospray, de forma que se torne mais eficiente através da diminuição dos requisitos (e.g. menores tensões mínimas), do aumento do “output” (e.g. maior propulsão) ou até mesmo através do aumento da estabilidade do “cone-jet”.

Mostraram-se também alguns modos de funcionamento, sendo que se aprofundou mais no modo que aqui será estudado, o modo “cone-jet”. Foi então fornecida uma explicação do funcionamento deste modo, desde a formação do cone até à formação do spray de gotículas, sendo também apresentados vários modelos analíticos que permitem prever a forma como determinadas variáveis reagem à alteração do valor de outras.

É então necessário ter em mente alguns aspetos essenciais do eletrospray, de forma a compreender melhor o resto do trabalho. Em primeiro lugar, deve-se entender que o modo “cone-jet” apenas ocorre num determinado intervalo de valores para o caudal e para a tensão. No caso do caudal, valores demasiado baixos levam a que não seja alimentado líquido suficiente para que ocorra emissão contínua e valores demasiado elevados fazem com que o menisco cresça demasiado depressa, eventualmente quebrando. Já no caso da tensão, valores demasiado baixos não são capazes de equilibrar as forças na superfície de forma que se forme um cone, enquanto valores demasiado elevados tornam o cone demasiado instável (formando vários que agem de forma caótica). É aqui também necessário reconhecer que a forma típica do cone se deve ao equilíbrio entre a força devida à tensão superficial e a força devida à componente normal do campo elétrico.

Em segundo lugar, deve-se compreender que o spray das gotículas apenas ocorre no caso em que o jato quebra (a distância ao coletor pode não ser suficiente). Esta quebra do jato deve-se a dois tipos de instabilidades, sendo que um dos tipos (axial) produz gotículas segundo o eixo do jato e o outro tipo (radial) provoca a emissão de gotículas de forma cônica, também na direção geral do jato.

Através dos métodos analíticos, torna-se possível decifrar as variáveis mais importantes de um electrospray. Apresenta-se então na tabela 3.1 o impacto que a alteração de determinadas variáveis tem em certas grandezas.

Tabela 3.1: Relação entre as diferentes variáveis segundo os métodos analíticos mencionados.

Grandeza	Aumenta com o aumento de	Diminui com o aumento de
Q_{\min}	ϵ, γ	ρ, K
V_{\min}	γ, D_e, L	
I	γ, K, Q	ϵ
D_d	ϵ, Q	K
v_e	$V, (q/m)$	

Capítulo 4

Projeto da instalação

Neste capítulo é apresentada a instalação desenvolvida para este trabalho desde os requisitos na secção 4.1, às decisões tomadas na secção 4.2. Na secção 4.3 inicia-se a descrição dos vários componentes da instalação, levando à secção 4.4 onde se descrevem os métodos de aquisição de dados utilizados. Por fim, este capítulo termina com a secção 4.5, onde se descrevem as limitações e a adaptabilidade da instalação.

4.1 Requisitos da instalação

Ao longo dos anos foram sendo realizados variados estudos numéricos e analíticos. No entanto, de forma a verificar a veracidade e/ou precisão dos seus resultados, é necessário recorrer a estudos experimentais para que os dados possam ser comparados com a realidade. As instalações experimentais tipicamente utilizadas requerem investimentos monetários relativamente grandes e podem apresentar uma montagem ou operação mais complexa. Isto faz com que muitos laboratórios optem por não investir no equipamento necessário, uma vez que se trata de uma tecnologia que apenas recentemente começou a ganhar popularidade (embora o seu potencial seja enorme em diversas aplicações). Em muitos estudos, uma verificação experimental rápida e básica (mas ainda com boa precisão) é preferível em vez de recorrer a laboratórios de alta precisão com o equipamento necessário.

Os requisitos para que o electrospray ocorra são relativamente simples. A possível complexidade vem com o tipo de estudo que se pretende realizar e com as restrições que se impõem (e.g. estudo de um electrospray em vácuo). Alguns estudos têm também vindo a estudar a utilização de vários emissores colocados num array, em vez de apenas um emissor isolado [28, 41]. No entanto, para obter um electrospray na forma mais básica os requisitos são:

- Um reservatório para o líquido
- Um emissor (tipicamente uma agulha eletricamente condutora)
- Uma placa coletora ou extratora
- Uma forma de levar o líquido até à ponta do emissor (através de um reservatório pressurizado ou de uma bomba mecânica)
- Uma fonte de alta tensão

No trabalho em questão, pretende-se que a instalação possibilite o uso de vários líquidos a diferentes valores de caudais e tensões. Assim sendo, deve ser possível regular o valor do caudal e da tensão aplicada num largo intervalo de valores, uma vez que uns líquidos podem necessitar de valores muito diferentes de outros devido às suas propriedades. No entanto, também é essencial que a alteração destes valores seja feita de forma precisa, uma vez que são estas as variáveis que definem os modos de funcionamento e os regimes do electrospray, sendo que a passagem entre modos e regimes é por vezes realizada de forma abrupta ao ultrapassar um determinado valor.

Deve-se ainda possibilitar a alteração de variáveis como a distância entre o emissor e a placa coletora e a utilização de diferentes diâmetros do emissor, de forma que possa ser estudada a influência destes valores nas outras variáveis como a tensão necessária para o modo “cone-jet”.

É também conveniente que a instalação seja suficientemente adaptável a diferentes estudos. Por exemplo, deve-se ter em conta a possibilidade de trocar a placa coletora por um anel extrator que simula mais corretamente o funcionamento de um propulsor. De forma a conseguir obter os resultados pretendidos, é necessário que a instalação possibilite a incorporação de uma câmara sem que ocorra a obstrução da linha de visão deste equipamento. Ainda em relação à recolha de resultados, devido à utilização da tecnologia PIV (que será devidamente explicada no seguinte capítulo), torna-se necessário operar a instalação num ambiente completamente escuro. Assim sendo, torna-se necessário que a instalação opere de forma contínua e estável, sem que sejam necessários ajustes constantes, algo que também é fundamental para a obtenção de resultados com valores adequados.

4.2 Hipóteses subjacentes ao projeto da instalação

A primeira decisão que se tomou foi em relação ao sistema de alimentação do líquido. Existem dois tipos de alimentação: passiva e ativa. Em sistemas de alimentação passiva, o líquido movimenta-se até ao local de emissão através de forças capilares, da ação da tensão superficial e/ou da ação gravítica. Como se pode imaginar, sistemas deste género não fornecem qualquer controlo sobre o valor do caudal, o que vai contra os objetivos deste trabalho. Assim sendo, optou-se pela incorporação de um sistema de alimentação ativo, em que o líquido é movimentado de forma controlada.

Existem dois métodos principais de alimentar o líquido até ao emissor: através da diferença de pressão entre o reservatório e a saída do emissor ou através da incorporação

de uma bomba de infusão (que tipicamente empurra o êmbolo de uma seringa). Cada um destes métodos possui as suas vantagens e desvantagens.

Com a pressurização do reservatório torna-se possível obter caudais com valores extremamente baixos se que ocorra a perda de estabilidade. Devido à enorme importância que esta variável tem no funcionamento do electrospray, este método apresenta então uma vantagem bastante forte sendo utilizado em muitos dos estudos que são realizados perto do valor mínimo do caudal (para que o modo “cone-jet” se estabeleça). Um sistema deste género utiliza um reservatório de gás a alta pressão e uma bomba de vácuo de forma a regular a pressão no interior do reservatório de líquido. Assim sendo, o valor da pressão no reservatório e conseqüentemente o valor do caudal, estão essencialmente dependentes das capacidades da bomba de vácuo e da quantidade de gás que ainda está presente no reservatório de gás. É então que se tornam claras as desvantagens deste método.

Durante a utilização prolongada da instalação, pode ser necessário interromper o electrospray para trocar o reservatório de gás e para além disso, a pressão que é fornecida vai diminuindo ao longo do tempo o que pode levar a que o caudal não seja constante. A segunda desvantagem está relacionada com a complexidade que aparece quando se pretende obter um determinado valor predefinido para o caudal, sendo necessário realizar os cálculos com as diferentes pressões, viscosidade e comprimentos e diâmetros dos tubos. Um terceiro problema relacionado com este segundo é a calibração ou verificação do caudal, tornando-se por vezes necessário medir o caudal enquanto o sistema opera, o que apresenta bastantes obstáculos (e.g. a inserção de uma bolha de gás nos tubos e medição do seu deslocamento é pouco aconselhável uma vez que pode introduzir instabilidades na quantidade de líquido que é fornecida ao electrospray).

Graças a todas estas desvantagens, muitos estudos têm sido realizados com a utilização de uma bomba de seringa. Este tipo de bomba possibilita a entrega de líquido a caudais também extremamente baixos através do deslocamento do êmbolo da seringa a velocidades muito baixas. Este método apresenta a resposta às desvantagens do anterior, sendo que o caudal é excecionalmente constante (desde que o movimento do êmbolo seja constante) e é possível em muitas destas bombas introduzir o valor de caudal pretendido, removendo assim o processo de calibração e verificação do caudal.

No trabalho aqui apresentado optou-se pelo segundo método (bomba de seringa), devido principalmente à facilidade de uso. No entanto, bombas que são capazes de entregar o

líquido com caudais inferiores a 1 mL/hr de forma bastante estável, são também excessivamente caras. Tornou-se então necessário realizar a substituição deste equipamento por uma versão mais barata, mas com capacidades suficientes para a obtenção de um bom electrospray.

Sabe-se que o modo “cone-jet” é apenas possível dentro de um certo intervalo de valores para o caudal e tensão aplicada (que depende das propriedades do líquido). De forma a criar um sistema de alimentação do líquido de forma adequada, foi imprescindível obter uma melhor compreensão dos valores típicos para o caudal. Visto que a outra componente que define o estabelecimento do modo “cone-jet” é a tensão aplicada, é também fundamental ter uma noção dos valores que possibilitam este modo de forma a escolher uma fonte de alta tensão que seja capaz de atingir esses valores. De certa forma, enquanto é necessário ter um sistema de alimentação do líquido que atinja valores suficientemente baixos do caudal (mL/hr ou menos), também é necessário ter uma fonte de tensão que atinja valores suficientemente altos de tensão (vários kV). No entanto não se deve ficar com a ideia de que o caudal deve ser o mais baixo possível, uma vez que também existe um valor mínimo para o caudal. O mesmo acontece para a tensão, sendo que existe um valor máximo para a tensão aplicada.

Alguns estudos foram realizados ao longo dos anos com o objetivo de prever os valores mínimos para estas duas variáveis. Foram então encontradas aproximações consideradas suficientemente boas para o caudal mínimo (Q_{min}) [42] e para a tensão mínima (V_{min}) [38], que se apresentam nas seguintes equações:

$$Q_{min} = \frac{\gamma \epsilon_0}{\rho K} \quad (4.1)$$

$$V_{min} = \sqrt{\frac{\gamma D_e}{2 \epsilon_0}} \ln\left(\frac{4L}{D_e}\right) \quad (4.2)$$

De forma a obter os valores típicos para o caudal e para a tensão, tomam-se como exemplo os valores típicos para as variáveis relevantes. Considere-se que o líquido a ser usado é etanol que possui as propriedades apresentadas na tabela 4.1, onde também se mostram valores típicos para o diâmetro do emissor e distância à placa coletora.

Tabela 4.1: Valores típicos das variáveis relevantes ao cálculo do caudal mínimo e tensão mínima.

Propriedade / Variável	Valor
Tensão superficial (γ)	0,0224 N/m
Massa volúmica (ρ)	789 kg/m ³
Condutibilidade (K)	1,30 x 10 ⁻⁵ S/m
Diâmetro externo do emissor (D_e)	0,001 m
Distância à placa coletora (L)	0,05 m

Assim sendo, pode-se proceder ao cálculo das equações (4.1) e (4.2) da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 Q_{min} &= \frac{0,0224 \times 8,854 \times 10^{-12}}{789 \times 1,30 \times 10^{-5}} & (4.3) \\
 &= 1,933 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 0,06959 \text{ mL/hr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{min} &= \sqrt{\frac{0,0224 \times 0,001}{2 \times 8,854 \times 10^{-12}}} \ln\left(\frac{4 \times 0,05}{0,001}\right) & (4.4) \\
 &= 5,959 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Deve-se também ter em conta que embora o valor mínimo do caudal seja extremamente baixo, o valor máximo tende a ser entre 50 e 80 vezes superior (embora o número de estudos sobre o valor máximo seja muito reduzido), portanto o intervalo de valores para o caudal em que o modo “cone-jet” é possível continua a ser relativamente largo. É importante salientar que a alteração das variáveis aqui assumidas podem provocar grandes alterações nos valores mínimos do caudal e tensão, sendo isto algo que se deve ter em conta durante a operação da instalação.

Outro aspeto da instalação que teve que se considerar foi o tipo de emissor que seria utilizado. Existem três tipos principais de emissor: os de capilar interno, os externamente humedecidos e por fim os porosos. Os primeiros, que se observam na figura 4.1-a), são os mais simples e os mais utilizados na literatura em estudos do electrospray independentemente das aplicações que lhe possam ser dadas. Emissores deste tipo consistem quase sempre na utilização de uma agulha com a ponta plana, apresentando-se então como o tipo de emissor com menos custo. No entanto, tem também sido estudada a incorporação de vários capilares internos em conjunto de forma a fornecer um maior impulso (maiores quantidades de líquido a ser expelido) em propulsores aeroespaciais [43].

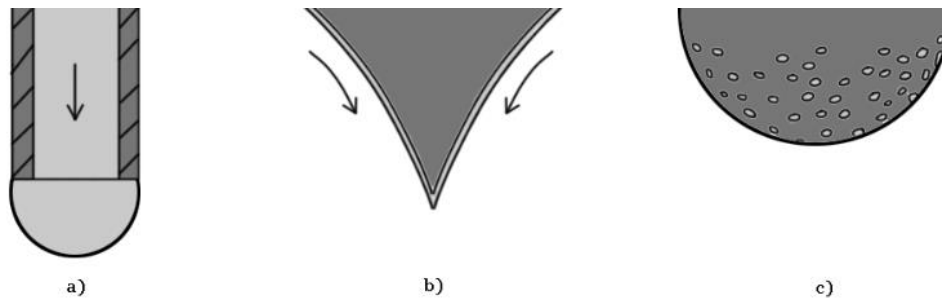


Figura 4.1: Representação dos três tipos principais de emissor: a) capilar interno, b) externamente humedecido e c) poroso.

Com o maior desenvolvimento de sistemas microeletromecânicos, os emissores externamente humedecidos (figura 4.1-b)) têm aumentado em popularidade [44, 45], uma vez que se torna possível criar diferentes geometrias de emissor de forma a maximizar o desempenho do conjunto [46, 47] (este tipo de emissor é frequentemente utilizado em conjuntos de vários emissores numa pequena área). O líquido é levado até ao local de emissão devido à ação capilar e tensão superficial do líquido. Assim sendo, este tipo de emissor é mais adequado para sistemas de alimentação (de líquido) passiva.

Por fim, os emissores do tipo poroso (figura 4.1-c)), são construídos com materiais que possuem pequenos capilares internos que permitem que o líquido seja entregue até aos locais de emissão. Quando o líquido chega à superfície destes emissores, este pode ser emitido diretamente das saídas dos capilares ou pode agir de forma idêntica aos externamente humedecidos. Desta forma, este tipo de emissor pode-se considerar um meio termo entre os outros dois. Os emissores porosos têm ganho popularidade em aplicações de propulsão aeroespacial, devido ao facto de conseguirem fornecer caudais de emissão mais elevados, utilizando o espaço disponível de forma mais eficiente.

Neste trabalho, optou-se pela utilização do tipo de emissor mais simples, o de capilar interno. Esta decisão justifica-se pela necessidade de estudar o electrospray como um fenómeno, sem que se foque demasiado nas aplicações (como as de propulsão). Para além disso, estes emissores apresentam-se como sendo a opção mais barata e mais rapidamente acessível.

4.3 Descrição da instalação

4.3.1 Sistema de alimentação do líquido

Considerou-se no projeto da instalação que um caudal de 1 mL/hr seria bastante aceitável. Deve-se ter em conta que o valor deste caudal deve-se poder alterar de forma a estudar o seu impacto no electrospray. Este valor de 1 mL/hr é apenas o valor base escolhido para a escolha de equipamentos como o motor.

Decidiu-se também incorporar uma seringa na instalação, servindo como reservatório, e sendo o caudal fornecido através do movimento do seu êmbolo. Seria possível utilizar um reservatório à parte e alimentar o líquido através de um tubo até ao emissor, mas foi escolhida esta solução devido a ser mais prática e menos espaçosa.

Assim sendo, tendo as seringas utilizadas 201 mm² de área circular, com um caudal de 1 mL/hr ($\approx 0,278$ mm³/s), calculou-se que o êmbolo deve-se mover a uma velocidade de:

$$v_{embolo} = \frac{Q}{A} = \frac{0,278}{201} \approx 0,00138 \frac{mm}{s} \quad (4.5)$$

Foi então construído um mecanismo capaz de empurrar o êmbolo de uma forma constante. De forma a mover o êmbolo, são utilizadas placas acrílicas, um acoplador mecânico de veios, um varão roscado e obviamente o motor. Esta parte da instalação pode-se verificar na figura 4.2.



Figura 4.2: Mecanismo utilizado para empurrar o êmbolo.

O funcionamento destes componentes é relativamente simples. Quando o motor entra em funcionamento, provoca a rotação do acoplador, que por sua vez irá provocar a rotação do varão roscado. O êmbolo está então bem seguro entre duas placas de acrílico, e é movimentado através da interação entre o varão roscado e uma porca sextavada que se encontra inserida em uma das placas de acrílico. No entanto, é necessário que esta placa não rode com o varão, mas sim que se desloque ao longo dele. Para tal, introduz-se uma haste e um rolamento lineares de forma a combater a rotação.

Para que o líquido seja expelido da seringa, o resto da seringa não se deve mover. Assim sendo, fixou-se a flange da seringa a uma outra placa de acrílico, que é colocada a uma determinada distância da placa coletora. Esta distância (e consequentemente a distância do emissor ao coletor) é regulável através de quatro parafusos sextavados e as suas porcas, que estão ligadas a placas laterais de forma a manter a seringa estável, como se mostra na figura 4.3. Nesta mesma figura, é também possível verificar a utilização da haste linear mencionada anteriormente.

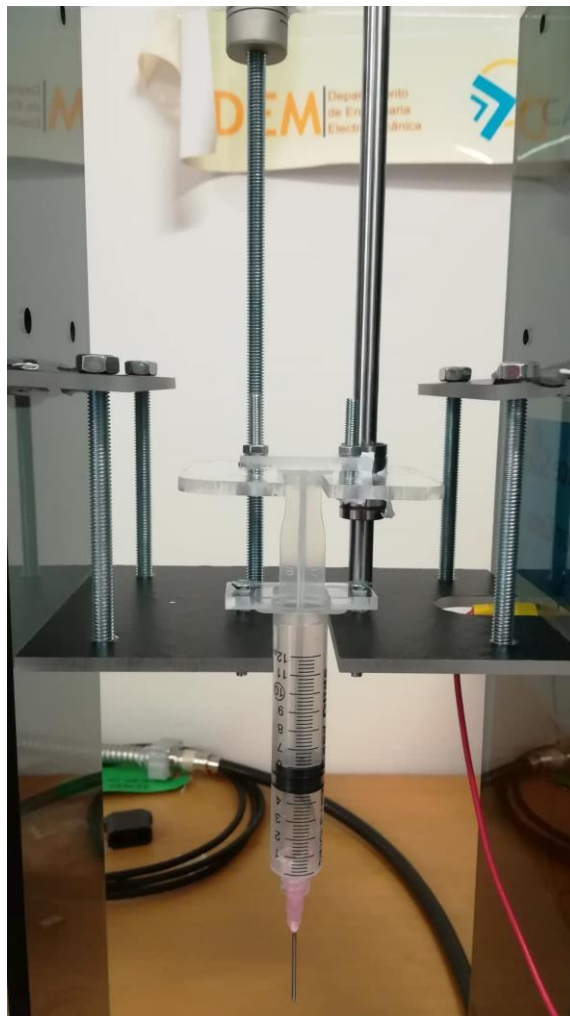


Figura 4.3: Suporte ajustável para a seringa.

Devido à necessidade de mover o êmbolo a velocidades extremamente baixas (para que o caudal também possua valores baixos), deve ser fornecida ao acoplador uma rotação de velocidade igualmente baixa. Tendo em conta o passo de 1 mm do varão roscado utilizado, pode-se calcular a velocidade de rotação do motor que se pretende (para o caudal de 1 mL/hr definido anteriormente):

$$n = \frac{v_{embolo}}{\text{passo do varão}} = \frac{0,00138 \frac{mm}{s}}{1 \text{ mm}} = 0,00138 \text{ rps} \approx 0,083 \text{ rpm} \quad (4.6)$$

Tendo em conta que também se devem obter valores de caudal maiores que 1 mL/hr e não só menores, foi escolhido para esta instalação um motor DC de 12 V, com uma velocidade de rotação máxima de 0,6 rpm. Este valor é muito superior ao calculado, mas foi dos motores mais lentos que se conseguiu encontrar, e como se irá ver a seguir, foi capaz de atingir os caudais de 1 mL/hr e menos. Caso fosse necessária uma rotação ainda mais lenta, seria possível implementar um sistema de engrenagens nesta parte da instalação.

4.3.2 Calibração e controlo do caudal

Um problema que ficaria por resolver seria que desta forma apenas se obteria um valor para o caudal. Introduziu-se então um sistema composto por um Arduino Uno e um L298N motor drive, de forma a enviar um sinal PWM para controlar a velocidade do motor. Ambos os componentes estão visíveis na figura 4.4.

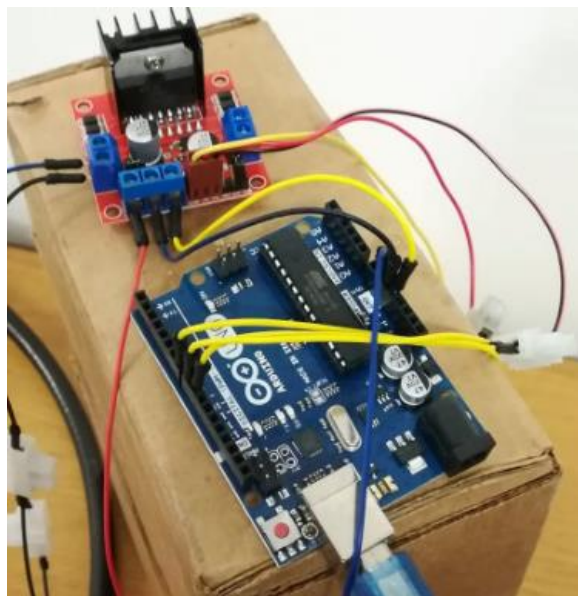


Figura 4.4: Arduino Uno e módulo L298N utilizados.

Esta solução vem também com a vantagem de retirar o erro humano que existiria no acerto manual de um potenciômetro, fornecendo um controlo mais preciso da velocidade (e do caudal). O caudal é então controlado através da alteração de um número no código Arduino, tornando-se também possível inverter o sentido de rotação de uma forma bastante simples. Apesar deste novo sistema, a calibração continua a ser de elevada importância, sendo que foram realizados vários testes de forma a saber a relação entre os números introduzidos no código e o valor do caudal que seria fornecido. A relação entre estes dois valores depende obviamente do motor utilizado e da sua velocidade de rotação máxima. Para o motor desta instalação, apresentam-se na tabela 4.2 alguns valores para o caudal.

Tabela 4.2: Relação entre o número inserido no código e o caudal fornecido, com o erro dos ensaios de cada.

Número no Arduino	Q (mL/hr)
255	5,80 ± 0,1068
230	5,64 ± 0,0720
205	5,32 ± 0,1182
180	5,06 ± 0,0267
155	4,83 ± 0,0894
130	4,42 ± 0,0469
105	3,72 ± 0,0919
90	3,04 ± 0,0398
80	2,52 ± 0,0494
70	1,92 ± 0,0775
60	1,313 ± 0,0079
50	0,830 ± 0,0063

O módulo L298N consiste numa ponte H, fabricada com o intuito de operar dois motores DC, controlando não só a velocidade de rotação dos motores (através de um sinal PWM) mas também o sentido de rotação. De seguida, explica-se brevemente o funcionamento deste componente com a ajuda da figura 4.5, onde são salientadas as partes relevantes.

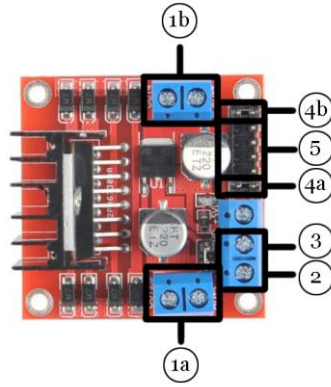


Figura 4.5: Módulo L298N utilizado.

Em primeiro lugar, (1a) e (1b) referem-se aos terminais para os conectores que irão ligar aos motores A e B. Neste trabalho apenas será utilizado um motor. De seguida, em (2) é ligada a alimentação através da fonte de tensão, podendo aceitar tensões com valores entre 6V e 35V. O pino (3) corresponde ao GND, devendo ser ligado ao sistema como tal. Os pinos (4a) e (4b) são os responsáveis pelo controlo dos motores, sendo conectados aos pinos de saída PWM do Arduino. Por fim, em (5) estão os pinos de entrada que possibilitam a alteração do sentido de rotação de ambos os motores, estando também estes ligados ao Arduino. Deve-se ter em conta que este componente apresenta uma queda de tensão de cerca de 2V.

O Arduino Uno utilizado é um microcontrolador com 14 pinos de input/output digitais e 6 inputs analógicos. Seis dos pinos digitais podem ser usados como outputs PWM. Este microcontrolador foi projetado para funcionar simplesmente com a conexão a um computador via USB, fornecendo uma plataforma bastante acessível para a realização de circuitos eletrónicos que operam segundo um código computacional. O código criado especificamente para este trabalho será apresentado nos Anexos. Como já foi referido, este componente será utilizado para fornecer um sinal PWM ao L298N, que é controlado diretamente através da alteração do código no computador. Foram também utilizados alguns dos outputs digitais de forma a inverter o sentido de rotação do motor quando for necessário.

De forma a alimentar o motor (através do L298N) e também o microcontrolador que irá regular o laser, foi utilizada a fonte de tensão DC que se apresenta na figura 4.6. Como se pode ver, é uma fonte que possibilita a alimentação de dois circuitos distintos, tornando-se assim muito útil para este trabalho.



Figura 4.6: Fonte de tensão DC utilizada para o motor e microcontrolador do laser.

4.3.3 Os emissores do electropray

Como já foi definido, serão utilizados nesta instalação emissores do tipo capilar interno. Uma maneira muito comum de incorporar este tipo de emissores é através da utilização de uma agulha de seringa (fundamentando ainda mais a utilização de uma seringa como reservatório). Estas agulhas devem, no entanto, possuir a extremidade plana de forma a não perturbar a base do cone de Taylor. Para além disso, devem ser feitas de um material capaz de transmitir o potencial elétrico ao líquido na sua ponta.

Neste trabalho optou-se por utilizar três agulhas diferentes, variando nos seus diâmetros externos e internos (embora o importante para o electropray seja apenas o externo). Estas agulhas, que se observam na figura 4.7, possuem diâmetros externos de 0,6 mm, 1,1 mm e 2,1 mm. Devido aos valores de caudal extremamente baixos, as perdas em linha consideraram-se desprezáveis neste trabalho (com um caudal de 1 mL/hr, o líquido passa pela agulha mais pequena a cerca de apenas 0,246 mm/s).



Figura 4.7: Agulhas utilizadas com diâmetros externos de 0,6mm (esquerda), 1,1mm (centro) e 2,1mm (direita).

4.3.4 Imposição e controlo da diferença de potencial entre o líquido e o coletor

Pode-se então passar a uma outra variável de projeto, tão importante quanto o caudal. Como já foi esclarecido anteriormente, o electropray necessita de uma diferença de potencial, tipicamente na ordem dos kV, que depende em grande parte da distância ao coletor e do diâmetro do emissor. Assim sendo, o valor da tensão necessária pode variar bastante.

Para além do emissor, também o coletor deve ser eletricamente condutor. Este último componente pode também apresentar várias formas, que dependem em grande parte do objetivo do estudo e da aplicação que se tem em mente. Por exemplo, para aplicações de propulsão é bastante útil utilizar um anel extrator no lugar do coletor. Nesse caso, este componente encontra-se colocado a apenas alguns milímetros do emissor, possuindo uma abertura no centro de forma a deixar passar as partículas do spray. Deve-se ter em atenção que as partículas estão eletricamente carregadas, sendo comum utilizar um componente adicional para as neutralizar.

No entanto, para este trabalho será suficiente utilizar uma versão mais básica que passa pela introdução de uma placa metálica (figura 4.8), que serve como coletor das partículas emitidas. Deve-se ter cuidado para que este componente e o emissor não estejam em contacto com outras superfícies metálicas, uma vez que as tensões elevadas que serão aplicadas entre eles são altamente perigosas.



Figura 4.8: Superfície coletora utilizada neste trabalho.

Considere-se então um valor de tensão típico de 6 kV, calculado anteriormente na equação (4.4). De forma a aplicar a tensão necessária, e tendo em conta a possibilidade de serem precisos valores superiores a 10 kV, foi utilizada a fonte de alta tensão Lab Mate

high voltage DC power supply da Spruce Science. Este equipamento é capaz de fornecer tensões até 30kV, com corrente máxima de 1mA, de forma extremamente estável e precisa. É possível operar esta fonte de tensão remotamente através da ligação a um computador, no entanto, neste trabalho foi operada manualmente através do seu painel frontal que se pode observar na figura 4.9.



Figura 4.9: Fonte de alta tensão DC utilizada.

Esta fonte é incorporada na instalação ligando o seu terminal positivo à agulha (emissor) e o terminal negativo à placa coletora. Deve-se ter cuidado redobrado com estes componentes, principalmente após a sua utilização, e esperar alguns minutos antes de tocar na placa e/ou no emissor.

4.4 Sistemas de medição incorporados na instalação

4.4.1 Métodos de regulação da instalação

Nesta instalação, são reguláveis os seguintes parâmetros: o caudal, a tensão aplicada, a distância do emissor ao coletor e o diâmetro do emissor. Em primeiro lugar, o caudal foi medido em comparação com o número inserido no código Arduino. Facilmente podia ser relacionado com o valor de tensão aos terminais do motor, mas considerou-se mais prático ter uma relação direta com a parte do sistema que se controla manualmente. Os vários valores que foram obtidos para esta relação foram já apresentados na tabela 4.2. Esta medição do caudal foi feita de modo visual, através da utilização da câmara digital e da lente com ampliação de 100x. Foi observado o deslocamento entre dois traços de medição na seringa (correspondente a 0,2 mL) para cada valor no código, sendo registado o tempo entre dois traços consecutivos. Calculou-se então o caudal correspondente, através da divisão deste volume pelo intervalo de tempo, sendo realizados cinco ensaios para cada valor no código.

Relativamente à tensão aplicada, não foi feita nenhuma calibração ou medição da tensão, uma vez que a fonte apresenta o valor exato que está a ser aplicado. Assim sendo, durante a operação desta instalação, pode-se regular a tensão aplicada através do painel frontal, observando ao mesmo tempo o valor aplicado.

A distância do emissor ao coletor é ajustada como já foi descrito na secção do sistema de alimentação do caudal. No entanto, a verificação desta distância deve ser realizada manualmente. Neste trabalho foi utilizada uma régua milimétrica para registar a distância utilizada em cada ensaio.

Por fim, o diâmetro do emissor pode variar entre os três valores correspondentes às agulhas mostradas anteriormente. A alteração deste parâmetro é tão simples como a troca da agulha numa seringa.

4.4.2 Métodos óticos para medição da velocidade do fluido

Como é óbvio, de forma a obter imagens será necessário utilizar uma câmara. Neste trabalho, foi utilizada uma câmara digital CCD C10600-10B ORCA-R2, com um acoplamento para lentes do tipo C-mount. Na figura 4.10, observa-se esta mesma câmara e o conjunto de três lentes que foi utilizada ao longo deste trabalho.



Figura 4.10: Câmera utilizada e as 3 lentes com magnificação máxima de 5x (esquerda), 100x (centro) e 300x (direita).

De forma a comunicar as imagens ao computador, a informação captada pela câmara passa antes pela unidade de controlo C10600-10B, que se apresenta na figura 4.11. Será também através desta unidade de controlo que será regulado o funcionamento do laser.



Figura 4.11: Unidade de controlo da câmara.



Figura 4.12: Laser utilizado, coberto de forma a reduzir o ângulo da folha de luz emitida.

O laser utilizado, que se observa na figura 4.12, tem como objetivo iluminar suficientemente as gotículas emitidas pelo electrospray, de forma que sejam captadas corretamente pela câmara. Idealmente, esta deve ser a única fonte de luz presente durante a aquisição dos resultados, devendo estar o local completamente escuro. Este laser permite criar um plano de luz com um ângulo de 60° a um comprimento de onda de 660 nm, sendo alimentado por 5 V e uma corrente de 250 mA. Através do cabo de modulação do laser, é possível regular o seu funcionamento com um sinal TTL, sendo que quando são fornecidos 5 V neste cabo o laser não emite luz e quando são fornecidos 0 V emite luz à potência máxima.

O controlo do laser é então realizado através do microcontrolador mbed NXP LPC 1768, que possui um código (apresentado nos Anexos), que determina o tempo durante o qual o laser deve permanecer ligado. Ao receber o devido sinal da unidade de controlo da

câmera, o laser irá ligar-se durante esta duração com a intensidade máxima, desligando-se ao fim do tempo definido e esperando pelo próximo impulso do sinal que é recebido.

O software da câmera apresenta uma interface tal como se mostra na figura 4.13. No lado esquerdo está presente o painel de controlo, onde se podem definir vários parâmetros. Os mais relevantes (salientados na imagem) são a exposição, o ganho, a velocidade, o modo de luz e o modo de captura. No centro da imagem pode-se verificar o mostrador que tanto pode apresentar a imagem em direto como pode ser usado para verificar as imagens capturadas. No lado direito verifica-se um histograma que permite verificar a diferença entre os valores mais claros e os valores mais escuros da imagem, servindo também para simular o ajuste de contraste que pode ser necessário.

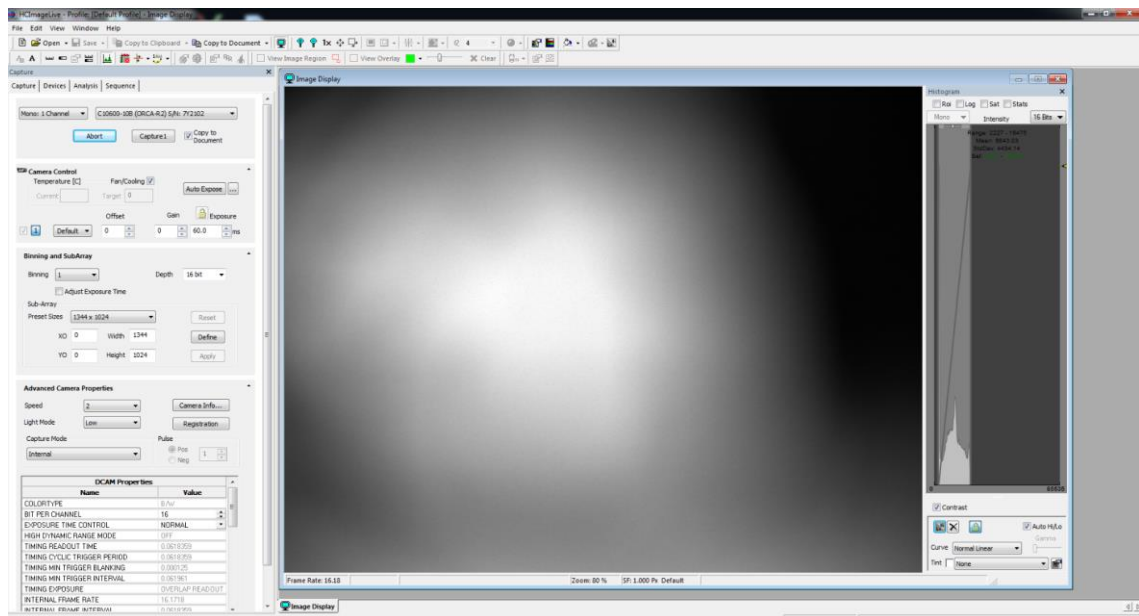


Figura 4.13: Interface do software HCIImage Live.

No painel de controlo pode-se observar ainda um outro separador que será utilizado neste trabalho, que se apresenta na figura 4.14. É neste separador que se definem os parâmetros relativos à captura de uma sequência de imagens, como por exemplo o número de imagens que deve ser capturado.

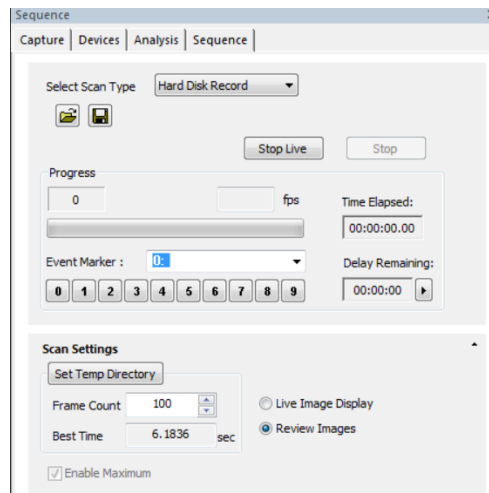


Figura 4.14: Separador “Sequence” do software HCLive Live.

Neste trabalho serão utilizados dois modos de captura, o modo “Internal” e o modo “External PIV Mode”. O primeiro modo captura a imagem imediatamente quando se carrega no botão “Capture”, com o tempo de exposição definido. O segundo modo está dependente de um impulso externo que deve ser inserido na unidade controlo da câmara, sendo que apenas irá dar início à aquisição de imagens quando este impulso for recebido. Torna-se assim possível realizar a sincronização entre a captura da imagem e o acionamento do laser.

Como já foi referido, para uma boa análise PIV, o local deve estar completamente escuro sendo que a única fonte de luz é o laser a funcionar em modo pulsado. Para além disso, é necessário que duas imagens consecutivas possuam exatamente o mesmo tempo de exposição. É aqui que surge um problema com o software HCLive Live.

Este software é capaz de capturar uma imagem com um tempo de exposição de 50 μ s no mínimo (que é suficiente), no entanto a segunda imagem terá sempre um tempo de exposição maior. Isto ocorre devido ao processamento da primeira imagem, que leva em média 60 ms [48]. Visto que o software apenas consegue processar uma imagem de cada vez, o processamento da segunda imagem irá ocorrer no mínimo 60 ms depois do final da exposição da primeira imagem. Assim sendo, a segunda imagem possuirá um tempo de exposição mínimo de 60 ms, uma vez que tem que esperar que haja “espaço” para o seu processamento. A figura 4.15 permite uma melhor compreensão deste processo.

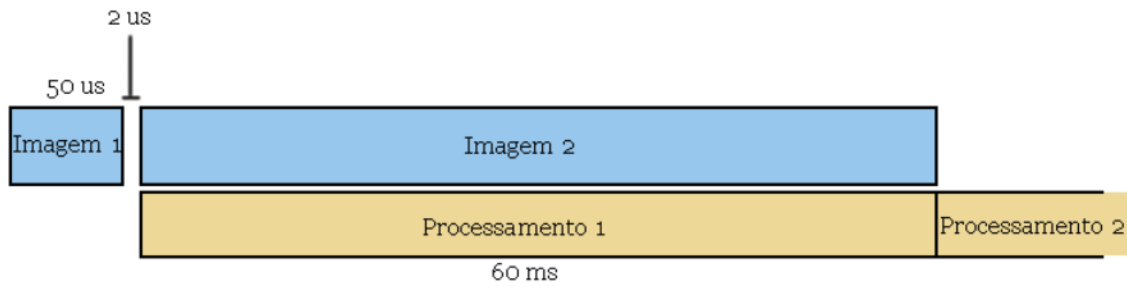


Figura 4.15: Processamento interno das imagens capturadas pelo software.

Pode-se verificar nesta figura que também existe um tempo mínimo entre a captura de duas imagens consecutivas de 2 µs. O tempo de 60 ms é demasiado longo para as velocidades que se esperam das gotículas, portanto foi necessário encontrar uma solução que permitisse uma segunda imagem com o mesmo tempo curto da primeira, mesmo que o software não seja capaz de diminuir este tempo.

A solução consiste no uso do laser de forma pulsada e sincronizada com a captura da primeira imagem. O laser será ligado em simultâneo com o início da primeira captura de imagem, mantendo-se ligado durante um determinado tempo de forma que na segunda imagem apenas chegue informação (na forma de luz) à câmara durante o tempo da primeira exposição. Assim, mesmo que a câmara esteja a recolher informação durante 60 ms, apenas irá receber luz durante o mesmo tempo da primeira exposição. Por exemplo, se a primeira exposição for de 100 µs, deve-se programar o microcontrolador do laser de forma que este esteja ligado durante 202 µs, tendo em conta os 2 µs que existem de intervalo entre duas capturas consecutivas. O laser apenas se voltará a ligar quando a unidade de controlo enviar o sinal de que foi dado início à captura de um novo par de imagens.

Na figura 4.16 apresenta-se a parte de trás da unidade de controlo da câmara, onde estão salientados os pinos que serão utilizados para a sincronização.

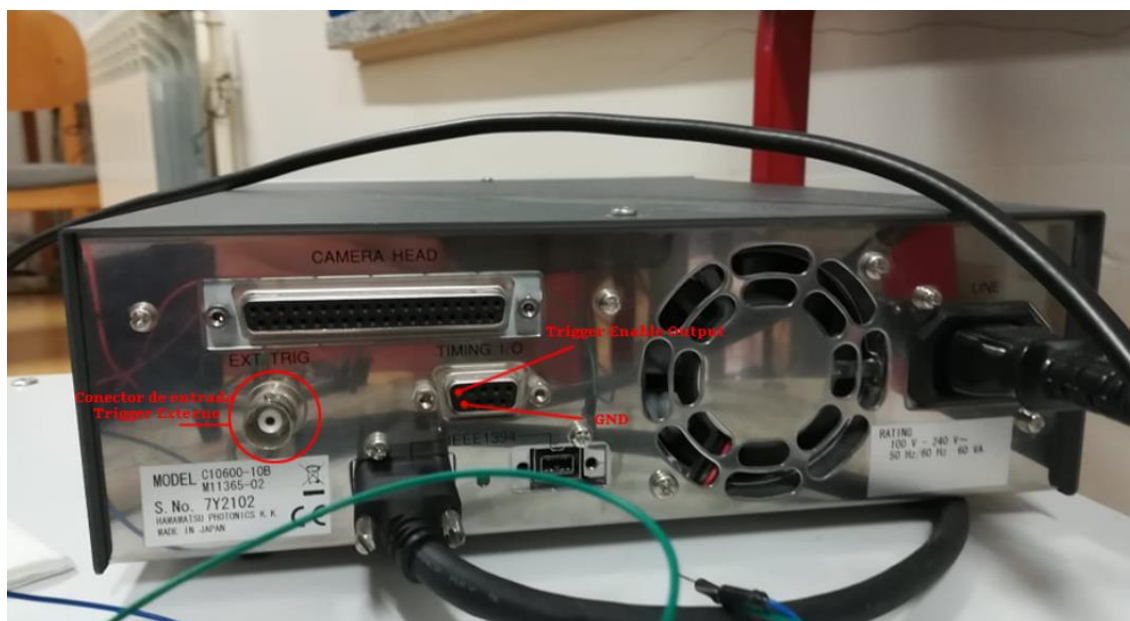


Figura 4.16: Parte traseira da unidade de controlo da câmara, com o conector para o sinal de entrada e os pins utilizados na sincronização salientados.

Na parte esquerda da imagem, verifica-se salientado o conector de entrada “Trigger Externo”. Esta entrada deverá ser ligada a um gerador de sinais, de modo que o software dê início a uma captura de imagens neste modo. O gerador de sinais fornece um sinal TTL e sempre que a unidade de controlo da câmara recebe um pulso, dá início a uma captura (a não ser que esta já esteja a decorrer). Neste trabalho, foi entregue a este conector de entrada um sinal com uma frequência de cerca de 1kHz, de forma a que a câmara iniciasse uma nova captura de imagens o mais rápido possível.

A saída “Trigger Enable Output” é ligada ao microcontrolador, sendo que é enviado um sinal a nível baixo quando se inicia a captura de um par de imagens. Quando o microcontrolador verifica a passagem deste sinal para nível baixo, envia o V pelo cabo de modulação ao laser durante o tempo definido no código, ligando-o assim durante o tempo pretendido. Apresentam-se o circuito e o microcontrolador utilizados para esta sincronização nas figuras 4.17 e 4.18.

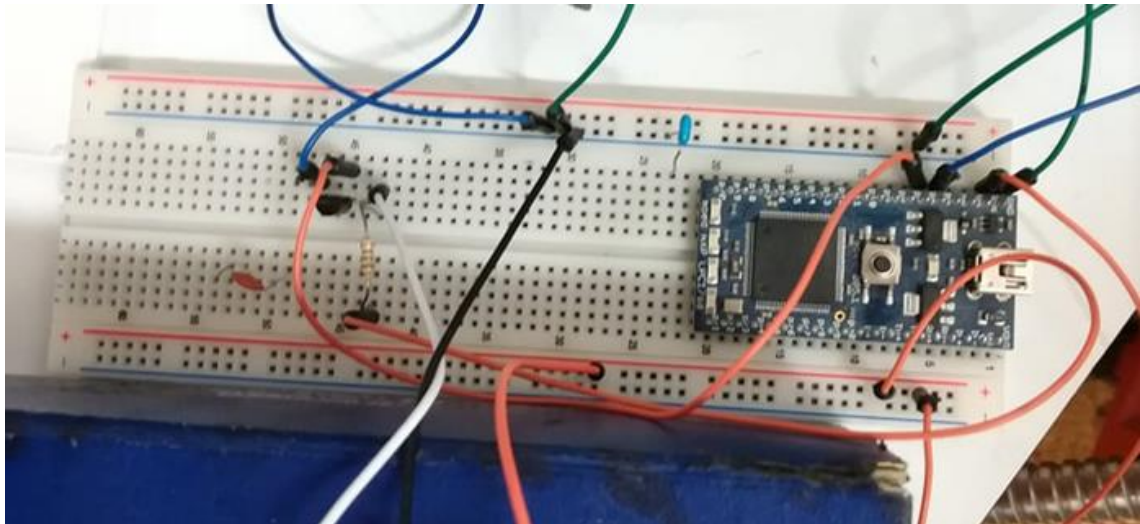


Figura 4.17: Circuito e microcontrolador utilizados.

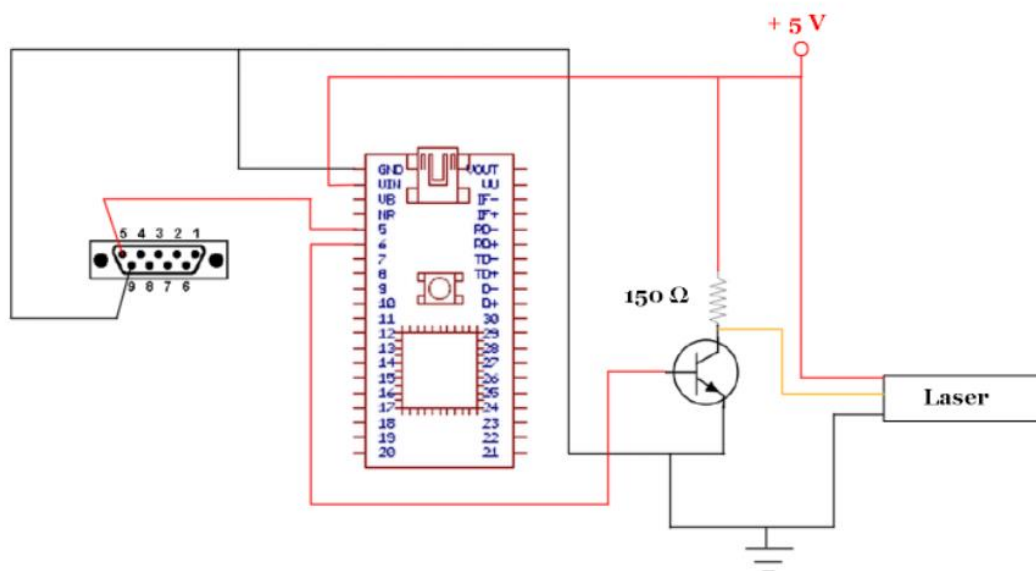


Figura 4.18: Circuito elétrico para a sincronização o laser, com uma resistência de 150Ω e um transistor 2N5551.

Uma vez descritos todos os componentes da instalação, apresenta-se na figura 4.19 o esquema geral com todos estes equipamentos e as suas ligações assinalados.

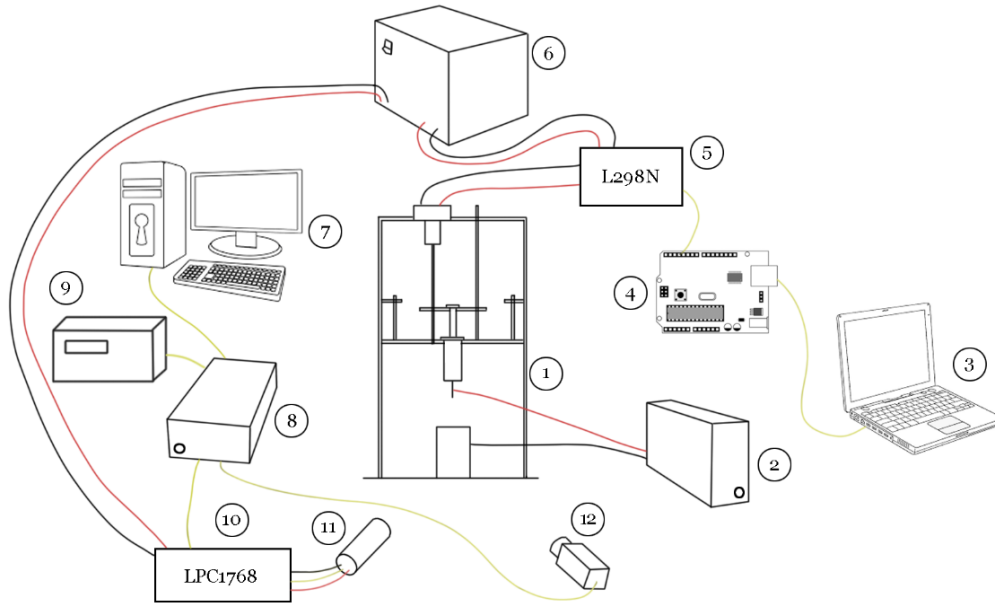


Figura 4.19: Esquema de todos os componentes utilizados e ligações entre eles.

Nesta figura, representa-se em (1) a parte da instalação onde ocorre o electrospray, sendo também nesta parte que o reservatório líquido está presente (na forma de uma seringa), bem como o mecanismo de alimentação do líquido até ao emissor e a placa coletora. O emissor e a placa coletora deverão estar ligados à fonte de alta tensão DC, que está representada em (2).

De seguida, representa-se em (3) o computador portátil que será utilizado para regular a velocidade do motor. Isto é realizado através da comunicação com um Arduino Uno (4), que envia um sinal PWM até à ponte H L298N. Por sua vez, este controla a tensão que é entregue aos terminais do motor. Para o devido funcionamento deste sistema, o módulo L298N deve ser alimentado com uma tensão DC, que lhe é fornecida pela fonte de tensão representada em (6).

De forma a controlar a câmara e obter as imagens pretendidas, é utilizado um outro computador (7) que está ligado à unidade de controlo da câmara (8). Esta unidade está obviamente ligada à câmara (12), mas para que se obtenham imagens adequadas a este trabalho está também conectada a um gerador de sinais (9) e um microcontrolador LPC1768 (10), que controla o funcionamento de um laser (11). Como se observa na figura, este microcontrolador será também alimentado pela fonte de tensão em (6), uma vez que esta fonte possibilita a alimentação de dois circuitos distintos simultaneamente.

4.5 Limitações e adaptabilidade

A primeira limitação que esta instalação apresenta é o intervalo de valores que possibilita para o caudal. Devido ao controlo do sinal PWM através do Arduino, sendo possível inserir 255 valores no código, poder-se-ia esperar que fosse possível obter 255 valores distintos para o caudal. No entanto, abaixo de um determinado valor no código, o motor deixa de receber potência suficiente para conseguir superar a inércia do sistema. Assim sendo, o motor deixa de empurrar o êmbolo, estabelecendo o valor mínimo possível. Obviamente, este valor mínimo do caudal está dependente do motor utilizado e do sistema de engrenagens (caso fosse utilizado).

Para o motor aqui utilizado, o valor mínimo que foi possível obter foi de 50 no código, correspondente a um caudal de aproximadamente 0,8308 mL/hr. Existe também um valor máximo para o caudal, que é atingido quando se insere o valor de 255 no código, correspondente a um caudal de 5,8084 segundo a tabela 4.2.

Nesta mesma tabela apresentada anteriormente, é possível observar o desvio padrão para cada valor. No entanto, o funcionamento do sistema possui muito provavelmente valores mais baixos do que os apresentados, graças ao método que foi utilizado para obter a relação com o caudal. Foram realizados cinco ensaios para cada valor no código que é apresentado na tabela. A medição do caudal foi realizada através da utilização de uma câmara USB, de forma a cronometrar o tempo que o êmbolo demorou a deslocar-se entre vários traços da escala graduada da seringa. Foi considerada a distância equivalente a um volume de 0,2 mL em todos os ensaios.

Nos valores mais baixos do caudal, cada um destes ensaios podia demorar até cerca de 15 minutos devido à velocidade extremamente baixa do êmbolo. No entanto, nos ensaios dos caudais mais elevados, por vezes tornou-se difícil anotar o segundo exato em que o êmbolo atingiu o ponto pretendido. Esta dificuldade pode ter levado à diferença de 2 ou 3 segundos em cada ensaio, sendo que esta quantidade tem muito mais impacto nestes caudais (em que o tempo medido foi por exemplo cerca de 130 segundos) do que nos caudais mais reduzidos (em que o tempo de medido se aproxima mais dos 500 ou mais segundos).

Isto em conjunto com a utilização de uma lente com maior ampliação nos últimos dois valores do código, justificam os valores de desvio padrão muito mais reduzidos que estes apresentam. A lente torna-se importante devido a ser mais fácil de verificar quando o

êmbolo atinge o ponto exato que é pretendido se a imagem estiver mais próxima desse ponto.

Um detalhe que se deve ter em atenção durante a operação desta instalação é a colocação de um pequeno peso em cima do motor, ou alternativamente, em cima da placa superior (de forma que o acoplador esteja encostado a essa placa). Este peso é essencial para obter um caudal constante uma vez que desta forma previne-se que a rotação do varão roscado empurre o motor para cima. Isto seria algo que aconteceria sem este peso, devido à inércia do êmbolo que o motor tinha que superar. Por outras palavras, quando o motor está em funcionamento, ou se move a placa do êmbolo ou se move o motor e sem este peso no motor, seria mais fácil para o sistema que o motor se movimentasse. Obviamente, se fosse utilizado um motor um pouco mais pesado, seria desnecessário adicionar este peso.

Uma outra limitação que se descobriu durante o projeto do sistema de alimentação, foi que devido às velocidades excecionalmente baixas do motor, quando fosse preciso recuar/subir a placa do êmbolo, este iria demorar vários minutos para uma pequena distância. O ajuste da distância entre o emissor e o coletor, ou até a inserção de uma nova seringa no sistema exigem o ajuste da posição da placa do êmbolo. Assim sendo, tornou-se necessário arranjar um método para movimentar esta placa de forma mais rápida.

A solução utilizada foi incorporada no projeto do conjunto de placas acrílicas. Quando for necessário movimentar a placa do êmbolo, é possível retirar os parafusos que seguram a placa inferior aos suportes laterais, removendo então essa mesma placa. Deve ainda ser removida a haste linear que atravessa a placa superior e a placa do êmbolo. Desta forma, é possível facilmente rodar a placa do êmbolo manualmente em torno do varão roscado, aumentando bastante a velocidade a que esta se desloca.

Após ser colocada na posição pretendida, pode-se voltar a montar a placa inferior. Caso ainda sejam necessárias pequenas correções na posição da placa (na ordem de milímetros), estas correções podem agora ser feitas com o motor que é capaz de operar em ambos os sentidos.

Uma última limitação está mais relacionada com o método de aquisição do que com a instalação em si. Devido à utilização de um sistema PIV, o local de ensaio deve estar o mais escuro possível. Caso exista alguma quantidade de luz para além do laser, a imagem da segunda exposição irá receber um pouco mais de luz do que a da primeira e deixará

de ter o mesmo tempo de exposição efetivo. Existe ainda o limite que o software apresenta para o valor da exposição, sendo que nenhuma imagem é capaz de possuir um tempo de exposição inferior a 50 μ s.

Apesar das limitações referidas, a instalação apresenta uma ótima adaptabilidade a diferentes estudos. Esta é capaz de operar um electrospray nos diferentes modos que se conhecem, sendo capaz de regular o valor do caudal num largo intervalo de valores. É também possível o uso de vários líquidos diferentes, uma vez que estes líquidos são simplesmente inseridos na seringa que é montada posteriormente na instalação. Com o ajuste da distância das placas, é possível realizar estudos sobre a influência da geometria e configuração dos emissores e placas coletoras/extratoras. Por exemplo, caso se pretendesse realizar um estudo mais focado na aplicação de propulsão, facilmente se inseria um anel de extração à volta do emissor em vez de ter apenas a placa coletora. A instalação pode fornecer resultados obtidos através da análise de imagens (como neste trabalho) mas apresenta também a possibilidade de serem obtidos através de outros métodos como a medição direta da corrente.

Capítulo 5

Obtenção de resultados experimentais

Este capítulo inicia-se com a secção 5.1 onde são apresentadas as imagens usadas inicialmente para a confirmação visual do bom funcionamento da instalação. De seguida, na secção 5.2, são apresentados resultados relativos à tensão mínima necessária para o modo cone-jet. A secção 5.3 está relacionada com a obtenção de velocidades, descrevendo os métodos e os problemas que se encontraram. Por fim, a secção 5.4 apresenta resultados relativos à emissão de gotículas e transição entre os diferentes modos.

5.1 Verificação visual do modo cone-jet

Como já foi referido anteriormente, o modo “cone-jet” identifica-se facilmente através da observação da geometria e da emissão do líquido na ponta do emissor, uma vez que possui um aspeto bastante distinto. Apresentam-se nesta secção imagens que provam o bom funcionamento da instalação, sendo que esta é capaz de atingir o modo de funcionamento pretendido em diferentes condições.

Nas imagens aqui apresentadas, foi utilizado um tempo de exposição de 60 ms, de forma que a câmara captasse luz suficiente no modo de captura “Internal”. Mesmo assim, foi necessário utilizar duas fontes de luz colocadas (cada uma) num ângulo de 135° com a câmara como se mostra na figura 5.1. Foram realizados vários testes com diferentes posições para as fontes de luz e câmara, mas como já tinha sido também referido em outros estudos [34], esta demonstrou ser a configuração que fornece melhores imagens.

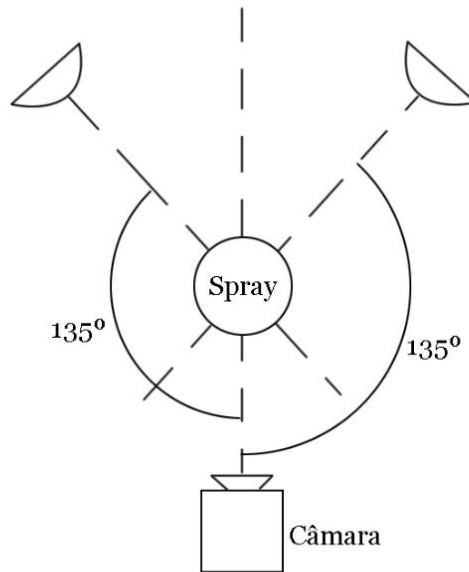


Figura 5.1: Configuração utilizada para as imagens retiradas a 60 ms.

Apresentam-se então as figuras 5.2 e 5.3 para a confirmação do modo “cone-jet”, sendo que as condições em que se obtiveram as imagens são apresentadas nas legendas das figuras (L representa a distância entre o emissor e o coletor e D_e representa o diâmetro externo do emissor).

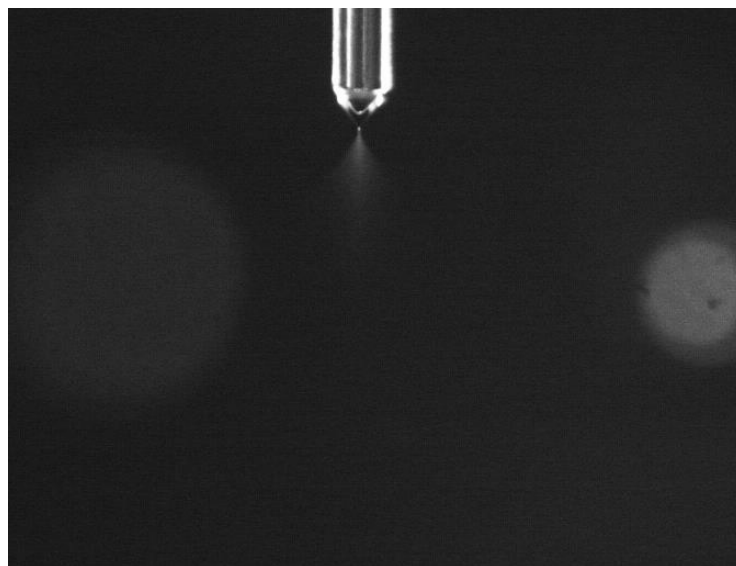


Figura 5.2: Etanol no modo “cone-jet” a 0,8308 mL/hr, 4,75 kV, $L=3,6$ cm, $D_e=0,6$ mm.

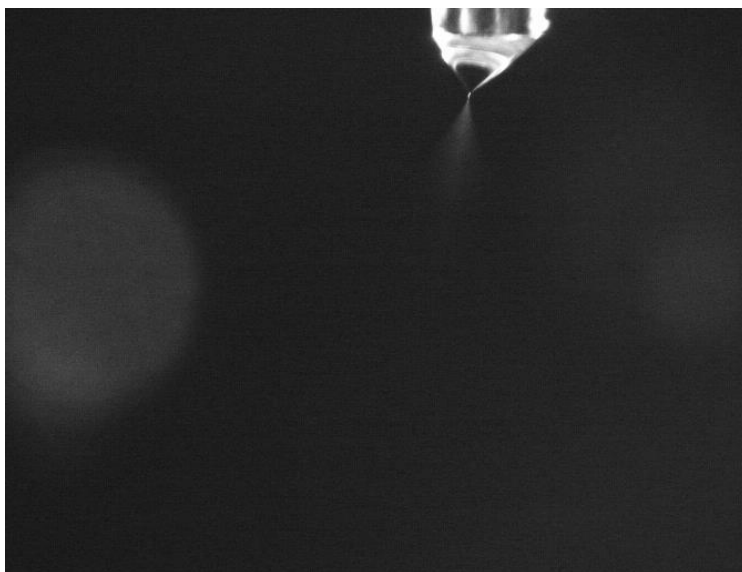


Figura 5.3: Etanol no modo “cone-jet” a 1,3139 mL/hr, 5,48 kV, L=3,0 cm, $D_e=1,1$ mm.

Através da utilização da maior lente com uma ampliação de cerca de 300x, verificam-se mais facilmente os vários componentes do electro-spray neste modo, sendo que neste caso específico (com a utilização de etanol) o comprimento do jato é extremamente curto e por vezes não visível (dando a ideia de que o spray de partículas se inicia diretamente no vértice do cone). Apresentam-se nas figuras 5.4 e 5.5 duas imagens captadas com esta lente, onde se observa também que a utilização desta lente (que capta menor quantidade de luz devido à sua maior magnificação) faz com que o spray se torne menos visível.

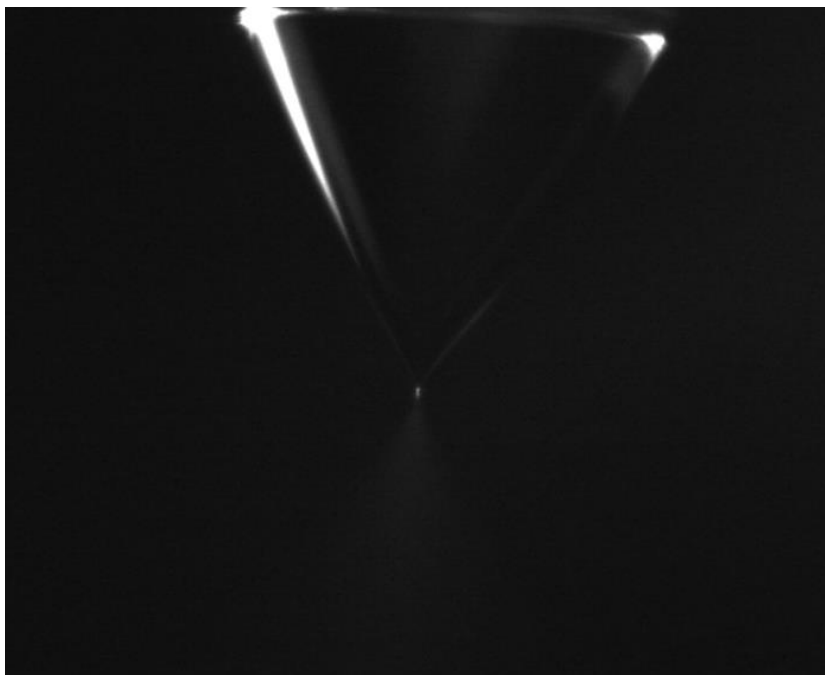


Figura 5.4: “Cone-jet” de etanol observado com uma ampliação de cerca de 300x.



Figura 5.5: “Cone-jet” de etanol observado com uma ampliação de cerca de 250x.

Foram também obtidas imagens para o modo “microdripping” em que o “jato” que se observa é dominado por instabilidades axiais, provocando a emissão de gotículas com uma frequência de emissão extremamente elevada de forma bastante uniforme. Devido aos elevados tempos de exposição de 60 ms (quando comparados com as velocidades das gotículas), pode parecer que existe um jato no modo “cone-jet” que simplesmente não quebra. No entanto, baixando o tempo de exposição, verifica-se que de facto não se trata de um jato contínuo, mas sim da emissão de várias gotículas todas na mesma direção. Pode-se observar nas imagens 5.6 e 5.7 esta transição entre os modos de funcionamento.



Figura 5.6: Etilenoglicol a 2,5237 mL/hr, 4,65 kV, L=0,9 cm, $D_e=1,1$ mm.



Figura 5.7: Etilenoglicol a 2,5237 mL/hr, 4,70 kV, L=1,2 cm, $D_e=1,1$ mm.

Conseguiu-se obter ainda umas imagens interessantes que demonstram o que acontece quando o modo “cone-jet” ocasionalmente quebra (devido a caudais demasiado altos ou tensões demasiado elevadas que tornam o cone mais instável). Estas imagens são apresentadas na figura 5.8 onde a sequência de eventos está exibida da esquerda para a direita.

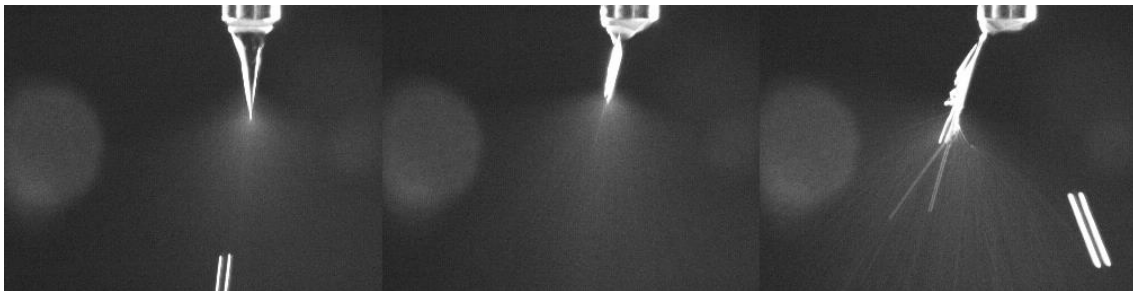


Figura 5.8: Sequência de imagens captadas durante a quebra do modo “cone-jet”.

5.2 Identificação experimental da tensão mínima para operar em modo cone-jet

Como já foi referido anteriormente, apenas se consegue obter o modo cone-jet a partir de um determinado valor de tensão, que varia com a tensão superficial, o diâmetro externo do emissor e a distância até ao coletor (equação 3.10). Sabe-se também que o caudal tem impacto na margem de valores de tensão, sendo também um parâmetro importante.

Foram então realizados vários testes de forma a observar a alteração do valor da tensão necessária consoante a alteração destas variáveis. Aponta-se ainda que apesar dos valores apresentados abaixo corresponderem ao valor necessário para que o modo cone-jet se estabeleça em cada um dos casos, uma vez dentro deste modo é possível reduzir a tensão ligeiramente abaixo destes valores sem que o cone se quebre. Ao mesmo tempo, o cone-jet encontra-se no seu estado mais estável quando é aplicada uma tensão ligeiramente superior ao valor mínimo.

Tabela 5.1: Tensões mínimas obtidas para o estabelecimento do modo cone-jet em diferentes casos.

	Líquido	Q (mL/hr)	L (cm)	D _e (mm)	V _{min} (kV)
Caso 1	Etanol	0,8308	4	1,1	5,7561
Caso 2	Etanol	2,5237	4	1,1	5,8422
Caso 3	Etanol	0,8308	2,5	1,1	5,0747
Caso 4	Etanol	0,8308	4	2,1	6,3974
Caso 5	Etilenoglicol 40%	0,8308	2,5	1,1	≥8,1128

Nos casos 1 a 4, onde foi utilizado etanol, foi sempre obtido um cone-jet no regime pulsado, sendo que se manteve estável durante 3 ou 6 segundos (dependendo principalmente do caudal). Após esse tempo, o cone quebrou devido ao aumento gradual do seu volume, voltando-se a formar de forma a repetir este ciclo. No próximo capítulo será fornecida uma justificação para a presença deste regime após serem comparados os valores dos diferentes casos.

No entanto, no caso 5 não foi possível obter um cone-jet adequado, sendo que a partir do valor de tensão apresentado na tabela o cone se tornou extremamente instável, separando-se em vários cones e jatos. Em outros momentos observou-se um movimento caótico do cone a movimentar-se ao longo da periferia do emissor enquanto se tentava formar. Aumentando mais a tensão, tornou-se possível ouvir um ruído e eventualmente ocorreu uma descarga elétrica quando a tensão atingiu o valor necessário para a ionização do ar. Serão apresentadas no próximo capítulo as justificações para esta incapacidade de produzir um cone-jet estável.

Juntando os dados apresentados na tabela 5.1 com os valores esperados tendo em conta a equação 3.10, obtém-se a seguinte tabela:

Tabela 5.2: Comparação entre os valores de tensão mínima medidos e os valores esperados analiticamente.

	V _{min,experimental} (kV)	V _{min,analítico} (kV)	Erro Relativo (%)
Caso 1	5,7561	5,8216	1,1379
Caso 2	5,8422	5,8216	0,3526

Caso 3	5,0747	5,2721	3,8899
Caso 4	6,3974	6,9992	9,4069
Caso 5	≥8,1128	9,2880	N/A

Serão analisados nesta fase de comparação apenas os casos 1 a 4, uma vez que no caso 5 não foi possível obter um cone-jet adequado. Observando os valores da tabela 5.1, pode-se verificar que de facto como seria de esperar pela equação 3.10, o valor da tensão mínima aumenta com o aumento da distância ao coletor, do diâmetro externo do emissor e da tensão superficial do líquido. No entanto, essa equação não dá importância ao caudal e como tal, pode apresentar erros maiores quando são utilizados caudais mais baixos do que aquele utilizado no caso 1. Segundo a equação, o caso 1 e o caso 2 (que possui um caudal maior) deveriam apresentar o mesmo valor de tensão mínima, algo que não se verifica. Sabe-se que diminuindo o caudal, o valor mínimo da tensão também diminui (embora muito ligeiramente) e assim sendo, a diminuição do caudal (mantendo os outros valores de L e D_e) leva ao aumento do erro.

Na tabela 5.2, observa-se também um maior erro no caso que corresponde ao aumento do diâmetro do emissor, podendo ser este um ponto fraco da equação 3.10 ou podendo este resultado ser apenas devido a um registo incorreto do momento exato em que o electro spray entra no modo cone-jet (sendo o aumento do erro na tabela proveniente do erro humano).

Verificou-se ainda nos casos 1 a 4 que o cone-jet operou no regime pulsado, estando presente um ciclo de formação, aumento e quebra. Verificou-se que a causa da quebra era o aumento do volume do cone, uma vez que quando este volume atingia um determinado valor o spray de partículas parava e era emitida uma gota de volume muito maior (que por vezes emitia o seu próprio spray enquanto caía). O aumento do volume do cone foi também observável através da utilização das lentes mais fortes. A justificação para o aumento do volume e a consequente quebra do cone, passa pelo equilíbrio (ou falta dele neste caso) que ocorre entre a quantidade de líquido que “entra” no cone e a quantidade de líquido que é expelido pelo jato/spray. Pensa-se que esteja a ser alimentado um caudal demasiado elevado à ponta do emissor, levando a que o cone cresça uma vez que o jato não consegue expelir um caudal maior. No entanto, com o motor utilizado não é possível atingir valores menores de caudal, sendo o resto dos resultados referentes aos momentos em que o cone se encontra estável (ou em crescimento).

Por fim, o caso 5 apresenta a incapacidade de formar um cone-jet que se justifica de várias formas. Em primeiro lugar, a tensão superficial do líquido utilizado pode ser demasiado elevada, uma vez que este líquido é uma solução de 40% etilenoglicol em água. Líquidos com uma tensão superficial demasiado elevada (como é o caso da água), necessitam de valores de tensão mais elevados do que a tensão necessária para a ionização do ar. Assim sendo, torna-se muito difícil obter um cone-jet com estes líquidos, sendo que as únicas opções envolvem a utilização de outros gases em redor do electro spray (como dióxido de carbono). Por outro lado, é possível que esteja a ser utilizado um caudal com valor mais elevado que o caudal máximo da margem caudal-tensão para um cone-jet estável. Esta justificação é suportada pelo facto de a solução de etilenoglicol utilizada apresentar (baseado na solução apresentada na tabela 5.3) um valor de condutividade maior, o que reduz o valor do caudal mínimo e conseqüentemente o valor do caudal máximo (equações 3.3, 3.9 e 4.1).

Tabela 5.3: Propriedades relevantes para etanol e uma solução de etilenoglicol em água.

	ϵ	K [S/m]	γ [N/m]	Referência
Etanol	24,5	$1,30 \times 10^{-5}$	0,0224	[DOI 10.1007/s10404-011-0882-6]
Etilenoglicol 50%	64,8	$5,20 \times 10^{-4}$	0,056	https://www.meglobal.biz/wp-content/uploads/2019/01/Monoethylene-Glycol-MEG-Technical-Product-Brochure-PDF.pdf

5.3 Cálculo das velocidades através das imagens obtidas

O método PIV (Particle Image Velocimetry) permite obter a distribuição de velocidades num escoamento, através de um par de imagens consecutivas. Em muitos casos, de forma a visualizar o escoamento são utilizadas partículas marcadoras que refletem a luz proveniente de um laser de forma a serem a única parte do escoamento que a câmara capta. Obviamente, estas partículas não devem perturbar o escoamento de forma que as imagens representem devidamente o seu comportamento. Este método tem-se provado bastante adequado à avaliação de escoamentos de electro spray [49, 50, 51, 52, 35, 53] ou escoamentos bastante parecidos a estes [54, 55, 56].

Uma regra para o bom funcionamento deste método é a utilização de partículas extremamente pequenas (na ordem dos μm ou menores) e de uma fonte de iluminação (tipicamente um laser) suficientemente forte [57]. A intensidade do laser torna-se mais importante com a diminuição do tempo de exposição, uma vez que a câmara irá captar menores quantidades de luz e a imagem irá ficar mais escura. No entanto, a utilização das partículas também requer o seu cuidado, uma vez que caso exista uma baixa

densidade de partículas na imagem são necessários métodos de rastreamento (Particle Tracking Velocimetry) e caso exista uma densidade demasiado elevada, pode-se tornar muito difícil de diferenciar as partículas, sendo que às vezes se podem até sobrepor umas às outras.

Recentemente, em 2014, foi desenvolvida uma ferramenta open-source no MATLAB de forma a tornar o processamento das imagens num processo simples e relativamente rápido. Esta ferramenta, que será utilizada neste trabalho, é conhecida como PIVlab [58].

Apesar de funcionar no MATLAB, o PIVlab fornece a sua própria interface. Em primeiro lugar, devem ser inseridas as imagens pretendidas, através do botão “Load Images”. É possível visualizar estas imagens antes de serem importadas. O PIVlab aceita imagens numa grande variedade de formatos e possibilita a ordenação das imagens consecutivas de diferentes formas como se observa na figura 5.9.

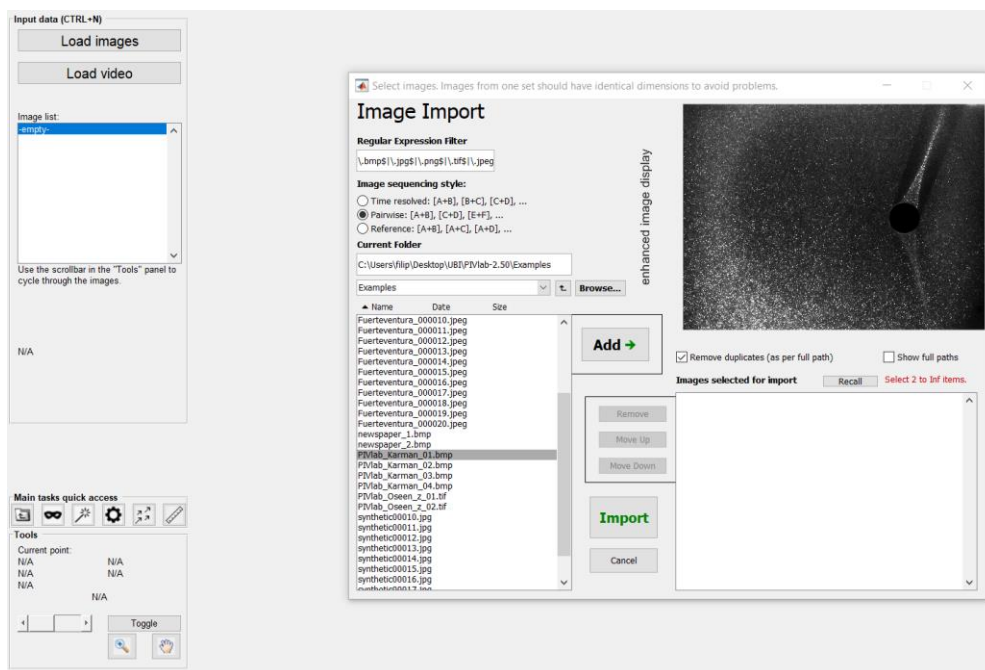


Figura 5.9: Introdução de imagens no PIVlab.

De seguida, carregando em “Image Settings -> Exclusions”, pode-se determinar a região de interesse e criar uma máscara de forma que o software ignore essa região. Apresenta-se na figura 5.10 um exemplo destas duas regiões.

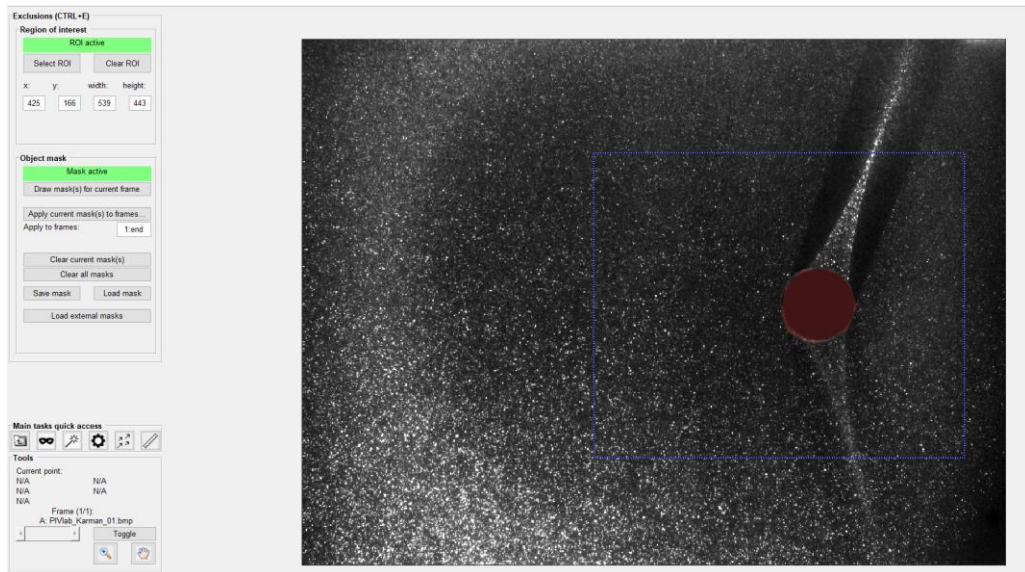


Figura 5.10: Definição da região de interesse e criação de uma máscara.

A seguir, em “Image Settings -> Image pre-processing”, é oferecida a possibilidade de melhorar a imagem antes de dar início ao processo de correlação. Permite-se melhorar o contraste através do método CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), introduzir um filtro passa-alto de forma a eliminar as partículas menos salientes, estabelecer um limite na intensidade e aplicar um filtro que permite reduzir o ruído da imagem. Estas opções e o resultado de algumas são apresentadas na figura 5.11.

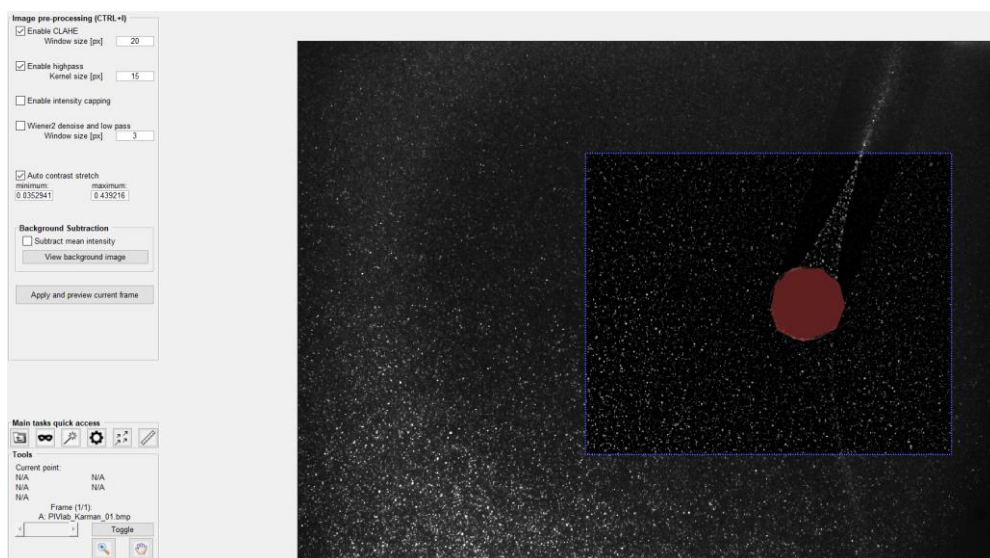


Figura 5.11: Opções de pré-processamento da imagem.

Após terem sido melhoradas as imagens, definem-se no separador “Analysis” o algoritmo a usar e as áreas de interrogação pretendidas. É aconselhável que a primeira área de interrogação possua um tamanho igual ou superior a quatro vezes o maior deslocamento

de qualquer partícula na imagem. Após definidos estes parâmetros, mostrados na figura 5.12, pode-se dar início à análise do escoamento.

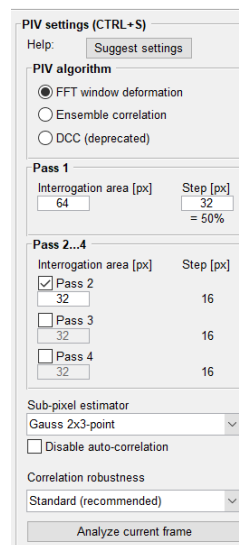


Figura 5.12: Parâmetros relativos à simulação dos algoritmos.

Deve-se então realizar agora a calibração da imagem, indicando uma distância bem definida e o tempo entre as duas imagens consecutivas. Este processo é realizado no separador “Calibration”, segundo o que se observa na figura 5.13. Como se verifica, pode-se utilizar uma outra imagem (desde que a câmara esteja na mesma posição), podendo assim utilizar por exemplo uma escala milimétrica.

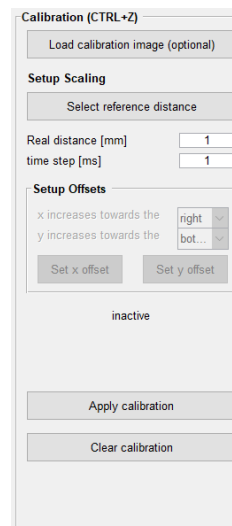


Figura 5.13: Interface para realizar a calibração da distância e tempo.

Na parte do pós-processamento existem duas opções. A primeira permite eliminar vetores através da escolha dos limites de velocidade. Qualquer vetor que não esteja presente dentro destes limites será eliminado da imagem. Em segundo lugar, é possível eliminar vetores consoante a sua intensidade luminosa e contraste, de forma que se possa

eliminar algum ruído que tenha permanecido na imagem. Estas duas opções estão apresentadas na figura 5.14.

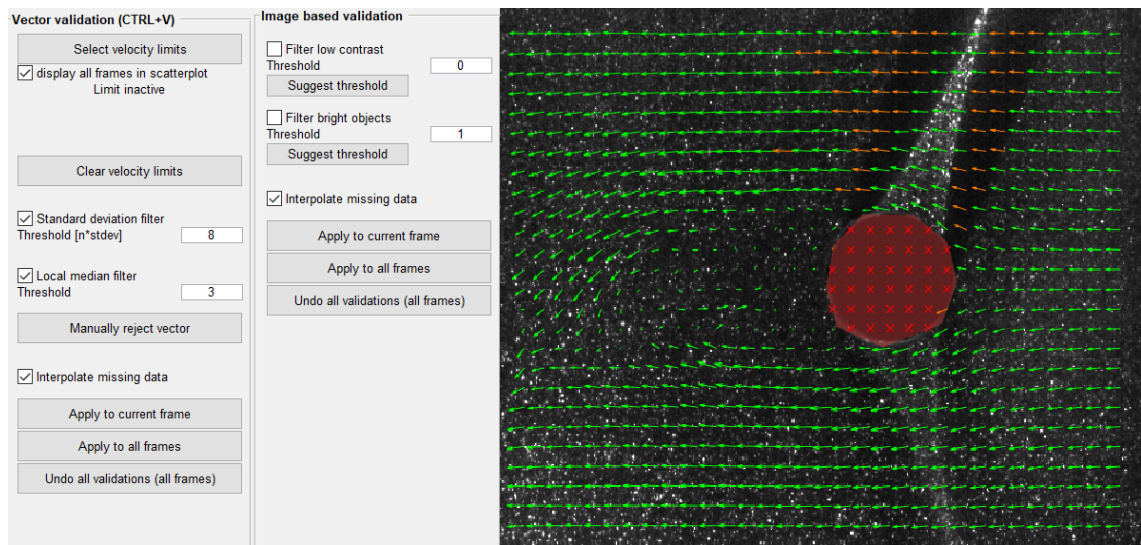


Figura 5.14: Opções de pós-processamento dos resultados/vetores.

Por fim, é possível analisar estes resultados diretamente no software, no separador “Plot”. Na figura 5.15 apresenta-se um exemplo do campo de magnitudes para as velocidades.

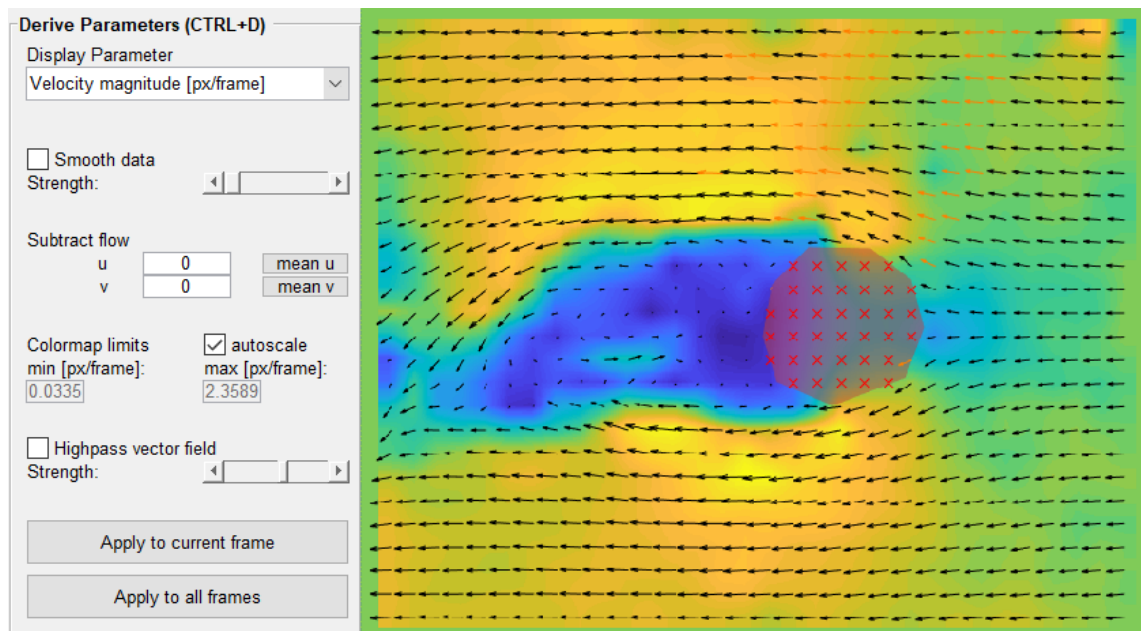


Figura 5.15: Visualização do campo de velocidades no exemplo escolhido.

Através do método de aquisição previamente descrito, foram obtidas inicialmente imagens com quantidades extremas de ruído, como as que se apresentam na figura 5.16. Com o ajuste de parâmetros como a exposição utilizada, o ganho e até mesmo a lente,

conseguiu-se reduzir o ruído para a quantidade visível na figura 5.17 (embora em certos casos continuasse pior do que neste apresentado).

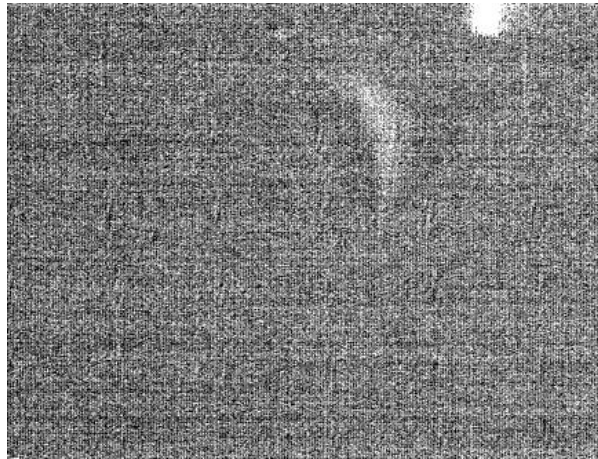


Figura 5.16: Imagem obtida inicialmente com baixas exposições.

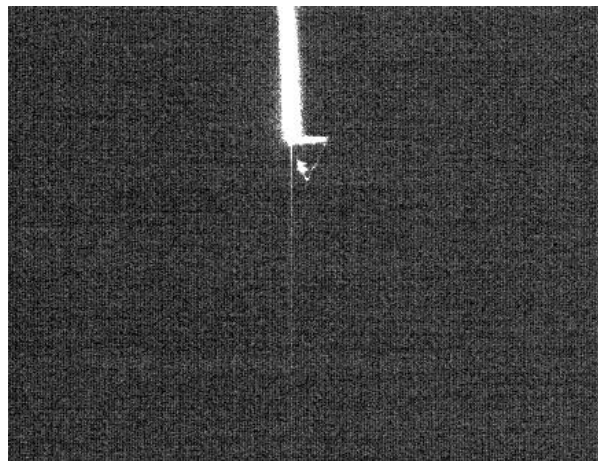


Figura 5.17: Melhoria na quantidade de ruído através do ajuste de parâmetros.

Como se pode imaginar, estas imagens são incapazes de fornecer bons resultados quando utilizadas no PIVlab. Estas enormes quantidades de ruído sobrepõem a imagem no seu total, fazendo com que o software seja incapaz de distinguir os pixéis de ruído com os pixéis das gotículas. Qualquer velocidade que seja retirada destas imagens corresponde ao “movimento” do ruído e não ao movimento das gotículas. A situação torna-se ainda pior quando o PIVlab ajusta ainda mais o contraste (ajuste que já foi realizado pelo software da câmara de forma automática), fornecendo uma zona de análise como a que se observa na figura 5.18.

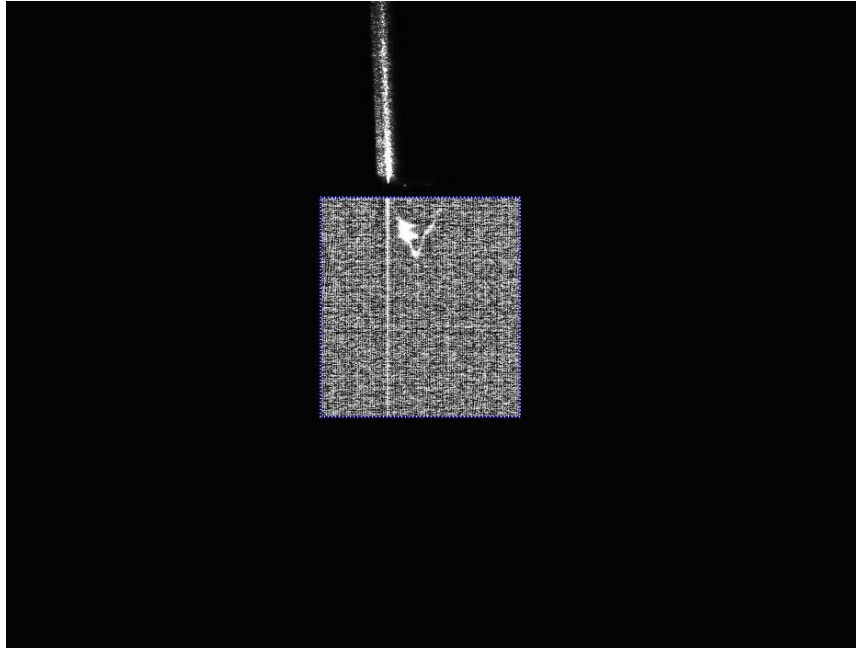


Figura 5.18: Quantidade de ruído após o ajuste de contraste pelo PIVlab.

Verificaram-se todos os aspectos da instalação e do equipamento de aquisição de forma a encontrar a causa deste ruído, mas apenas se descobriu que todo o equipamento estava montado e a funcionar de forma correta. Foram realizados testes nas mesmas condições que um outro estudo [53], mas ao contrário das imagens apresentadas nesse trabalho, as imagens aqui obtidas continuavam com o ruído.

Após a verificação do equipamento descobriu-se que o software da câmara, ao captar a imagem, realiza um ajuste automático do contraste. Esta função tem como objetivo realçar as partículas pretendidas para uso em PIV, procurando destacar os pontos mais claros na imagem do fundo escuro. No entanto, devido à baixa quantidade de luz que é refletida pelas gotículas, e devido à quantidade de luz que a lente utilizada é capaz de captar, os pontos mais claros estão (na escala de luminosidade) muito próximos do fundo totalmente escuro. Ao reduzir a região de luminosidade em que o software ajusta o contraste, o ruído que ocorre naturalmente neste equipamento (câmara digital) é também salientado. Retirou-se então que o ruído que está presente nas imagens é uma função da capacidade de reflexão das gotículas, sendo que quanto menos luz refletem, maior será a quantidade de ruído.

As boas imagens apresentadas no estudo referido acima devem-se muito provavelmente a uma configuração de lentes que permite captar uma maior quantidade de luz do que as aqui utilizadas, e/ou à utilização de um laser com uma potência mais elevada fazendo com que a luz seja mais intensa.

Na figura 5.19 apresenta-se a melhor imagem que se conseguiu captar (onde se consegue observar o jato), sendo que até mesmo esta apresentou demasiado ruído quando inserida no PIVlab. Esta foi também a imagem que apresentou o cone mais próximo do cone de Taylor, com um ângulo de aproximadamente 49° entre o eixo do cone e a superfície líquida. No entanto, como se verifica, a emissão do spray está desviada do eixo vertical. Isto deve-se a esta imagem ter sido captada no regime pulsado do cone-jet, nos primeiros momentos após a formação do cone. Com o aumento do volume do cone que ocorre neste regime, o ângulo do cone vai diminuindo até que este se quebra.

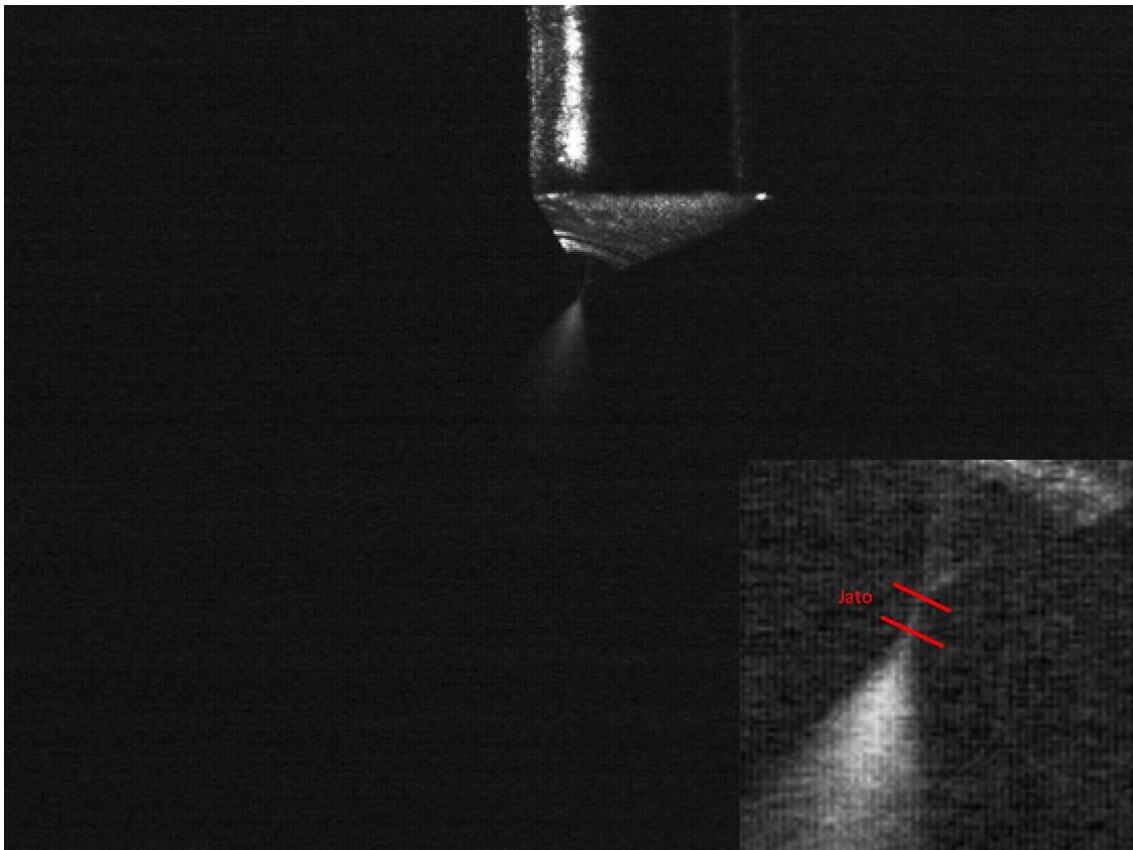


Figura 5.19: Spray e jato visíveis, com a menor quantidade de ruído possível.

Decidiu-se então utilizar partículas de dióxido de titânio (TiO_2), que são comumente utilizadas quando se aplicam sistemas PIV, até mesmo em casos de análise de electrospray [52]. Estas partículas permitem que seja refletida uma maior quantidade de luz, de forma que o ajuste do contraste não possua uma região tão curta de valores de luminosidade. Com a utilização destas partículas pretende-se que as imagens possuam menores quantidades de ruído de forma que o PIVlab consiga realizar a análise devida.

Através da mistura destas partículas no líquido (neste caso em etanol), foi possível obter imagens onde os valores da intensidade luminosa foram de facto mais altos. No entanto,

a maior parte deste aumento de luminosidade foi apenas observado na parte do cone como se mostra na figura 5.20.

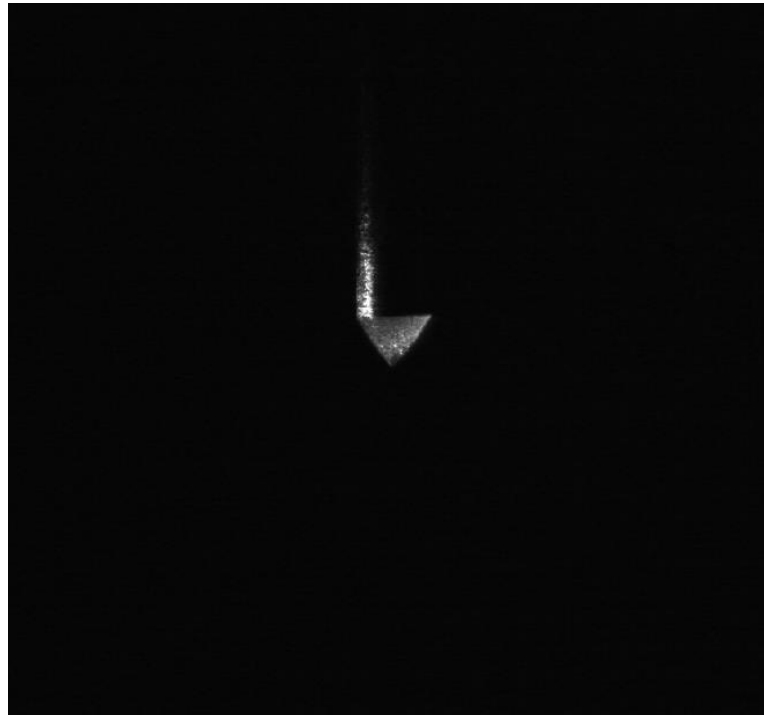


Figura 5.20: Imagem de um cone-jet estável com uma exposição de 200µs.

Ao introduzir esta imagem que aparentemente não possui ruído no software PIVlab, selecionando a zona do spray (onde não é visível nenhuma partícula) o software tenta mais uma vez ajustar o contraste, levando a que a única coisa que se observa nesta região seja ruído. Realizando o ajuste de contraste de forma manual, verifica-se que não existem valores para a margem de luminosidade que sejam capazes de diferenciar entre as partículas do spray e o ruído.

Utilizando uma lente com menor ampliação, embora seja capturada uma maior quantidade de luz, torna-se ainda mais impossível distinguir as partículas do spray devido às suas dimensões. Por outro lado, utilizando uma lente com maior ampliação, embora seja mais provável conseguir distinguir melhor o tamanho das partículas, a quantidade de luz captada é menor. Para além disso, com uma maior ampliação deve-se utilizar uma exposição mais baixa uma vez que as partículas podem percorrer uma distância maior que a dimensão da imagem.

Foram realizados os cálculos tendo em conta uma velocidade de emissão esperada de 9 m/s (com base em [52, 53]) para os parâmetros aqui utilizados. Assim sendo e tendo em conta as dimensões das imagens captadas com as várias lentes, obteve-se uma exposição

máxima de cerca de $300\mu\text{s}$ para a lente de 100x e de $200\mu\text{s}$ para a lente de 300x. Para a lente mais pequena seria possível usar exposições de 1ms mas a qualidade das imagens não seria adequada para a análise PIV. Com estas exposições, como já se verificou, as imagens apresentadas não possuem partículas suficientemente distinguíveis do fundo preto.

Infelizmente, graças a todos estes pormenores, torna-se impossível obter imagens suficientemente livres de ruído com este equipamento (câmara, lentes e laser) para que o PIVlab consiga realizar a análise das velocidades.

5.4 Análise da transição entre modos e das gotas emitidas

Com exposições por volta dos $200\mu\text{s}$ torna-se possível observar o funcionamento dos vários modos de emissão e até mesmo a transição entre eles. Esta transição deve-se principalmente à alteração do valor da tensão aplicada.

Em primeiro lugar apresenta-se na figura 5.21 o primeiro modo de emissão (para além do modo em que não se aplica tensão e as gotas são emitidas devido à ação gravítica), onde se observa a emissão de gotículas com frequências bastante elevadas (centenas ou milhares por segundo). Assim sendo, estas imagens representam o modo “microdripping” que foi já apresentado, embora com exposições maiores, nas figuras 5.6 e 5.7.

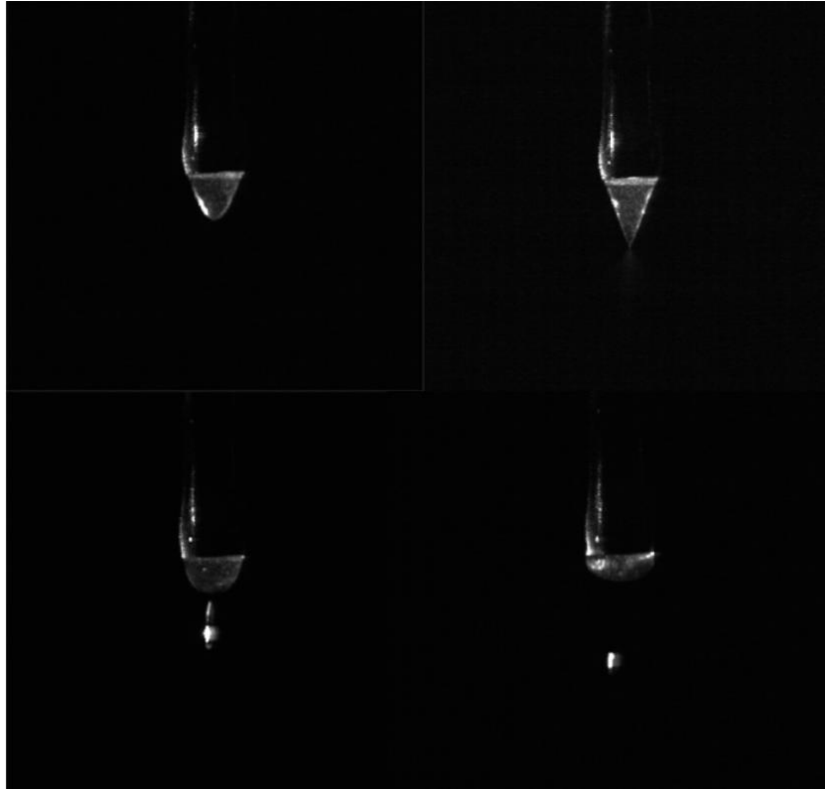


Figura 5.21: Sequência de imagens do modo microdripping a 1,929 mL/hr, 4,7 kV, $L=4$ cm e $D_e=1,1$ mm.

Com o aumento da tensão aplicada, dá-se início à transição entre este modo e o modo cone-jet, que se apresenta na figura 5.22. Mantendo todos os outros parâmetros, observou-se um fenômeno bastante interessante em que a emissão das gotículas é realizada de forma alternada no que toca à sua direção. Observando este regime a olho nu, pode parecer que existe uma bifurcação do volume de líquido em dois cones, sendo apenas possível ver a realidade com estas exposições baixas.

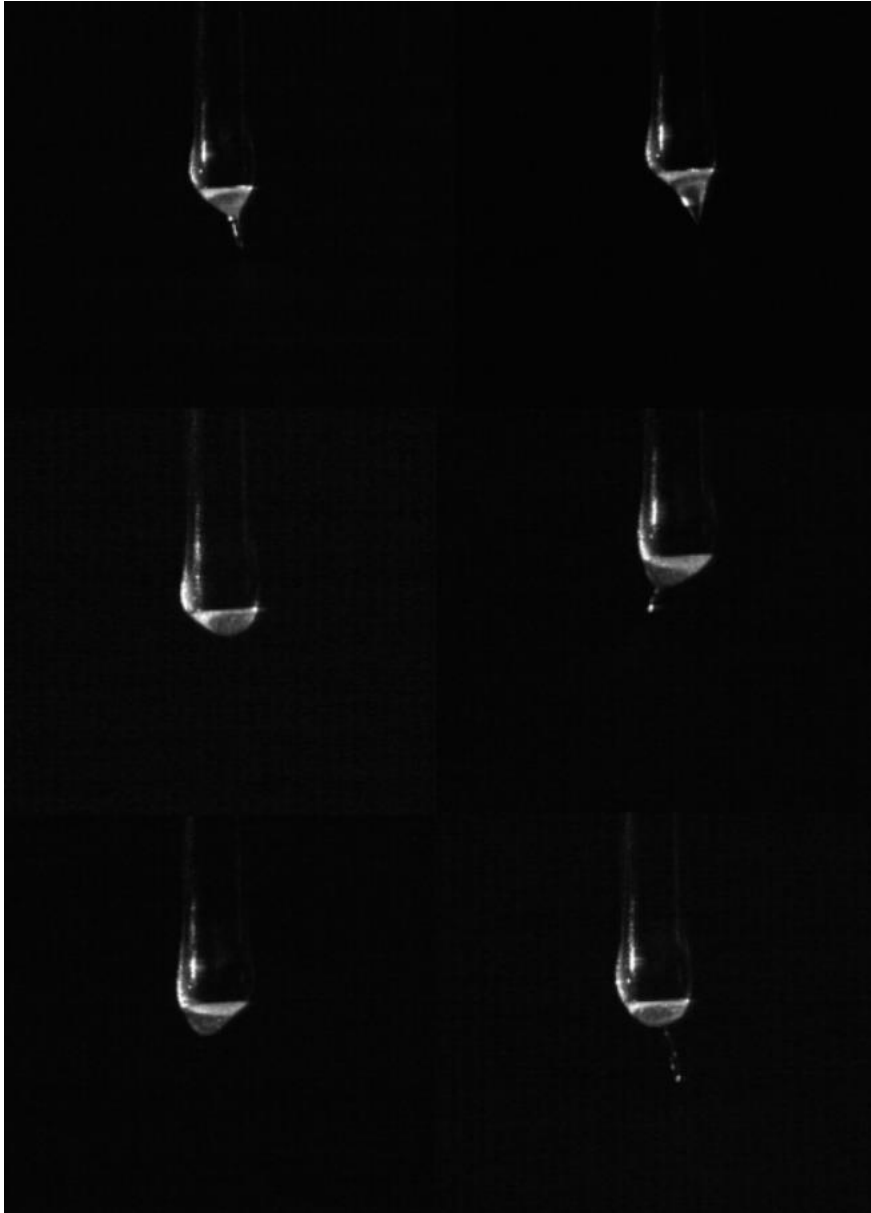


Figura 5.22: Sequência de imagens de um regime de emissão alternado/bifurcado a 1,929 mL/hr, 5,5 kV, $L=4$ cm e $D_e=1,1$ mm.

Ainda com o mesmo valor de caudal, passando um determinado valor de tensão estabelece-se o modo “cone-jet”, embora neste caso se tenha registado um regime pulsado. Como se observa na figura 5.23, o cone e o spray são estabelecidos, sendo que o volume de líquido no cone aumenta gradualmente até atingir um volume crítico em que é emitida uma grande parte desse volume em uma só gotícula, dando início a um novo ciclo de formação do cone.

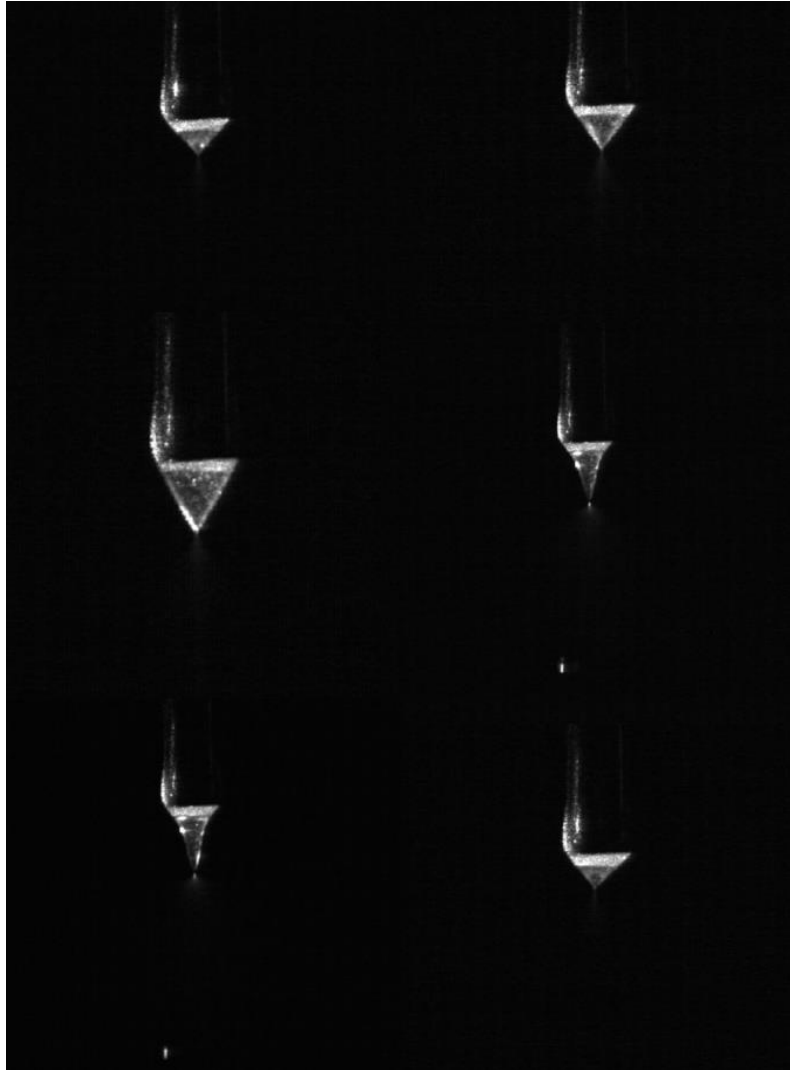


Figura 5.23: Cone-jet no regime pulsado a 1,929 mL/hr, 6,02 kV, L=4 cm, $D_e=1,1$ mm.

Pelos motivos referidos na secção anterior, estas imagens de baixa exposição fazem com que seja muito difícil observar a zona do spray. No entanto, editando as imagens de forma a aumentar a luminosidade, torna-se mais fácil observar que o spray está de facto a acontecer. Na figura 5.24 onde se pode verificar o spray, o cone-jet encontra-se num dos dois momentos onde as gotas foram mais visíveis. O primeiro momento corresponde aos poucos microssegundos em que o cone-jet se forma ao início de cada ciclo deste regime, sendo o segundo momento correspondente aos poucos microssegundos antes de o cone-jet quebrar (sendo este o que se observa na imagem).

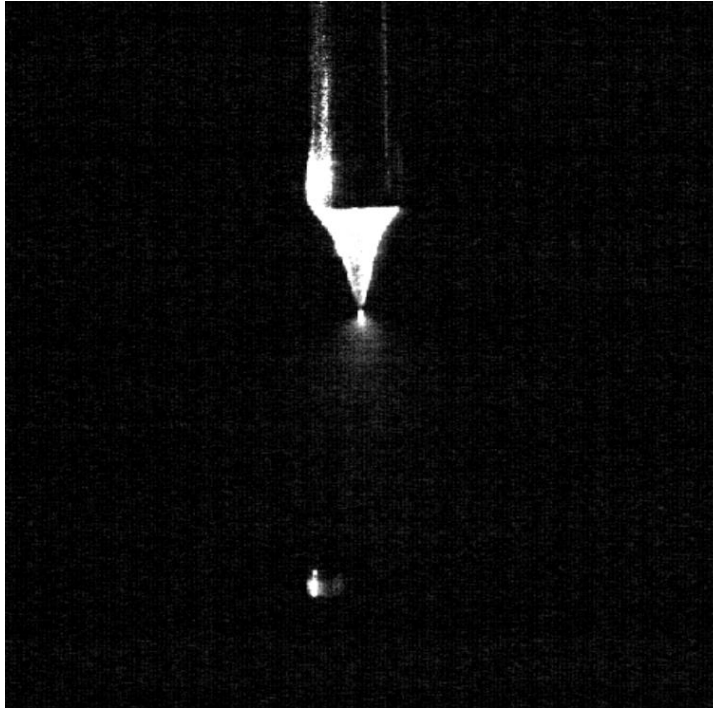


Figura 5.24: Verificação do spray a ocorrer no regime pulsado do cone-jet.

Aumentando ligeiramente a tensão acima do valor correspondente a este regime pulsado e baixando o caudal para 0,8308 mL/hr foi possível estabelecer um cone-jet que se manteve estável durante períodos mais longos de tempo (cerca de 8 segundos). Nas imagens deste regime (figura 5.25) não foi possível detetar o spray, nem mesmo com o ajuste da luminosidade e contraste. Isto deve-se muito possivelmente ao tamanho extremamente reduzido das partículas emitidas pelo cone-jet estável.

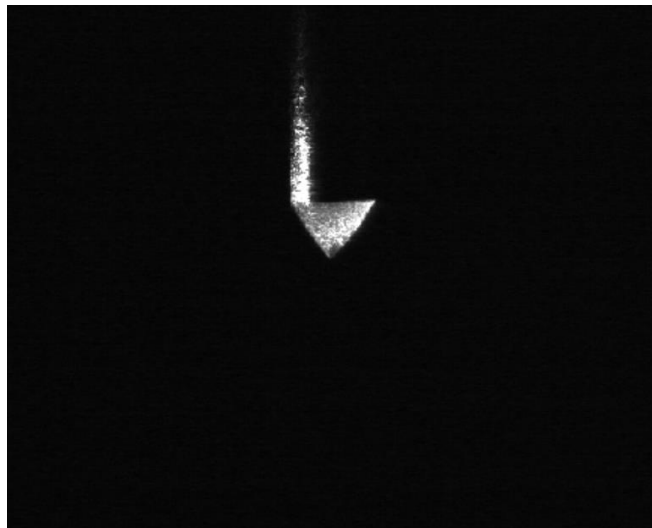


Figura 5.25: Cone-jet estável a 0,8308 mL/hr, 6,32 kV, L=4 cm e $D_e=1,1$ mm.

Através da figura 5.21, verifica-se que o modo microdripping funciona exatamente como é descrito na literatura. A superfície líquida na extremidade do emissor é esticada pelo

campo elétrico, sendo que eventualmente se separa uma porção desse volume e é emitida uma única gotícula. Este modo é caracterizado por produzir gotículas de tamanhos bastante uniformes, algo que se verificou ao longo das várias imagens obtidas. Observou-se também que as gotículas são emitidas a frequências elevadas, na ordem de centenas por segundo, podendo apenas ser observadas com exposições na ordem dos 200 μ s.

Através da comparação entre duas imagens consecutivas, conhecendo o intervalo de tempo entre as imagens e utilizando o diâmetro externo da agulha como referência, pode-se calcular a velocidade de uma destas gotículas, como aquela que se mostra na figura 5.26.

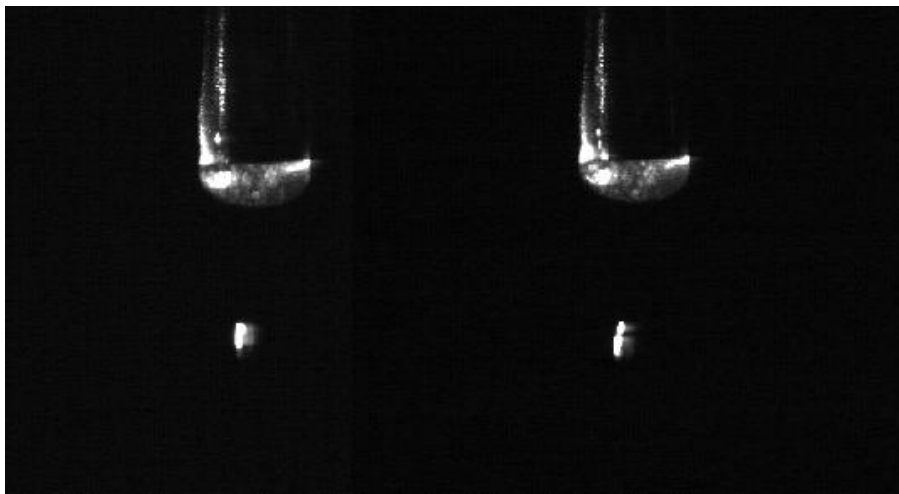


Figura 5.26: Imagens consecutivas da emissão de uma gotícula, com 202 μ s entre imagens.

Mediu-se nestas imagens que o diâmetro da agulha, de 1,1 mm, corresponde a 64,63 pixels e a distância entre a ponta da agulha e o centro da gotícula é de 101,62 pixels na primeira exposição e 106,59 pixels na segunda exposição. Realizando a diferença entre estes dois valores e comparando com o diâmetro da agulha, obtém-se que a gotícula se deslocou cerca de 0,0846 mm. Assim sendo, esta gotícula emitida no modo microdripping apresenta uma velocidade (v_e) de aproximadamente:

$$v_e = \frac{0,0846 \times 10^{-3}}{202 \times 10^{-6}} = 0,419 \text{ m/s} \quad (5.1)$$

O mesmo cálculo pode-se realizar quando se analisam as imagens da figura 5.27, onde se calcula a velocidade da gotícula emitida após a quebra do cone-jet no regime pulsado.

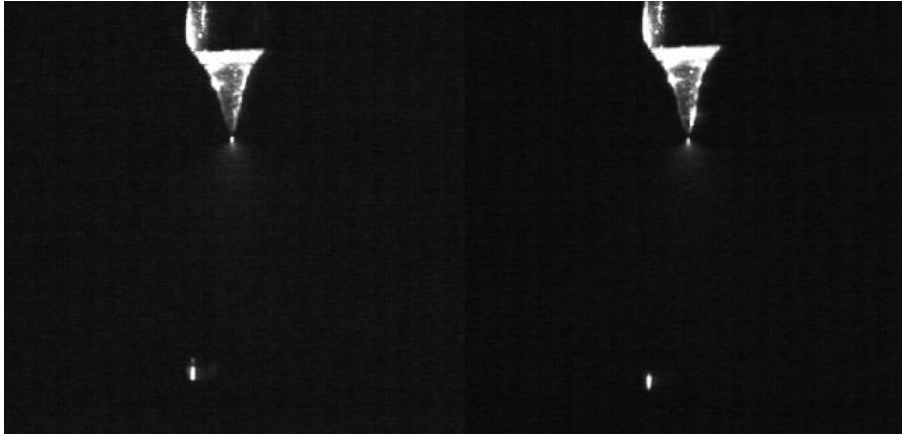


Figura 5.27: Imagens consecutivas após a quebra de um cone-jet no regime pulsado, com $202\mu\text{s}$ entre imagens.

Neste caso, calcula-se da mesma forma uma velocidade de $0,817\text{ m/s}$. O valor aqui calculado é superior ao do modo microdripping possivelmente devido ao maior valor de tensão aplicada que faz com que o campo elétrico acelere mais a gotícula emitida. É também possível que a causa da velocidade reduzida no primeiro caso seja o maior tamanho dessas gotículas.

Tentou-se obter neste trabalho um modo cone-jet com um jato longo que eventualmente quebra devido a instabilidades radiais (de preferência). Desta forma, as gotículas produzidas no modo cone-jet teriam diâmetros maiores e seria mais fácil de as distinguir nas imagens de forma que o PIVlab já conseguisse realizar a análise. No entanto, para o líquido aqui utilizado (etanol), a transição entre modos passou diretamente do modo microdripping para o modo de emissão alternada, que se observa na figura 5.22, e por fim para o modo cone-jet que se observa na figura 5.23. Em nenhum momento se conseguiu obter um jato longo com instabilidades radiais, sendo que quando o electrospray entrou no modo cone-jet, a emissão aconteceu logo próxima do vértice do cone (sendo o jato tão curto que nem é visível na maior parte das imagens).

As imagens em que o cone-jet se encontra mais estável, como a figura 5.25, são também as imagens em que o spray de partículas é menos visível, por vezes não sendo visível de todo mesmo com as partículas de TiO_2 a aumentar a refletividade e com a lente maior. Como já foi referido, o spray é mais visível nos momentos em que o cone se forma e nos momentos em que o cone se quebra, tendo em conta o regime pulsado. Isto deve-se muito provavelmente ao facto de as gotículas do spray produzidas nestes dois momentos possuírem tamanhos maiores.

Algo que se verifica com as imagens obtidas é a relação entre o diâmetro das gotículas e a tensão aplicada. Como seria de esperar, uma vez que a transição entre modos ocorre consoante a tensão aplicada, quanto maior for o valor da tensão menor é o diâmetro que as gotículas apresentam. No entanto, é de esperar que esta diminuição do diâmetro atinja um limite no modo cone-jet uma vez que existe um limite para a carga elétrica que uma gotícula pode conter.

Também é possível observar que a tensão aplicada tem impacto na velocidade das gotículas emitidas, de forma indireta através da diminuição dos seus tamanhos e de forma direta através do aumento da intensidade do campo elétrico que provoca uma maior aceleração das gotículas.

Capítulo 6

Conclusão

Na presente dissertação, foram inicialmente definidos dois objetivos principais. O primeiro corresponde ao projeto e construção de uma instalação, capaz de produzir um electropray no modo cone-jet. O segundo objetivo corresponde à utilização de um sistema PIV, para a obtenção das velocidades das partículas emitidas. Para tal, foi necessário ganhar um ótimo conhecimento deste fenómeno.

O conhecimento obtido com a realização deste trabalho, vai desde a compreensão dos princípios físicos por trás do electropray, aos modelos analíticos mais utilizados na literatura. As partes mais importantes deste conhecimento foram registadas nos primeiros capítulos desta dissertação. Foram ainda descobertos bastantes pormenores da análise experimental deste fenómeno, ganhando uma compreensão dos limites e requisitos que vêm com o seu estudo.

Foram apresentados o projeto e o funcionamento da instalação desenvolvida. Esta instalação provou ser suficientemente adequada à produção e análise de um electropray. Verificou-se que é possível obter vários modos de funcionamento, através da alteração do valor de tensão aplicada. Verificou-se também que é possível ajustar os outros parâmetros do electropray, como o caudal, o diâmetro do emissor, a distância do emissor ao coletor e o líquido utilizado.

Através desta instalação, foram analisadas as transições entre regimes, mais propriamente a transição para o modo cone-jet. Registaram-se as tensões mínimas para o estabelecimento deste modo, sendo comparadas com os valores que seriam de esperar através de métodos analíticos. Os resultados obtidos foram bastante bons, verificando até que o método analítico pode ser melhorado (uma vez que não tem em conta o impacto do caudal aplicado). Observou-se que para determinados líquidos, o modo cone-jet necessita de uma tensão com um valor demasiado elevado. Estes valores são maiores que aqueles necessários para a ionização do ar, algo que se deve em grande parte aos valores de tensão superficial elevados. Assim sendo, torna-se impossível obter um cone-jet (sem a utilização de outro gás), uma vez que ocorrem descargas elétricas antes de este modo se estabelecer.

Durante este trabalho foi implementado um sistema PIV, com o objetivo de analisar o campo de velocidades do spray. Os componentes deste sistema foram devidamente montados. No entanto, não foi possível realizar a análise das imagens através do software PIVlab. As imagens obtidas possuíam quantidades elevadas de ruído, fazendo com que o software fosse incapaz de distinguir os pixels correspondentes às partículas, dos pixels correspondentes ao ruído. A causa deste ruído foi assumida como sendo o ajuste automático de contraste que os softwares realizam. Este ajuste tem como objetivo realçar as partículas contra o fundo preto, no entanto, devido aos tamanhos extremamente reduzidos das partículas emitidas, a câmara não consegue captar a pouca luz que refletem. O ruído aparece devido à diminuição da margem de valores de intensidade luminosa que acontece no ajuste do contraste.

Tentaram-se utilizar partículas de dióxido de titânio para que mais luz fosse refletida para a câmara. No entanto, embora as partículas tenham resultado em aumentar a luminosidade na imagem, tiveram maior impacto na zona do cone e não no spray. O problema atribui-se então em parte ao tamanho demasiado reduzido das partículas. Utilizando lentes com maior ampliação, de forma a aumentar o tamanho das partículas na imagem, traz os mesmos problemas uma vez que estas lentes não captam tanta luz e necessitam de tempos de exposição menores. Assim sendo, embora a tecnologia PIV seja adequada para a análise do spray, neste trabalho não foi possível obter estes resultados, em grande parte devido à câmara, lentes e laser utilizados.

6.1 Limitações do presente trabalho

O trabalho aqui descrito apresentou algumas limitações que foram sendo descritas e justificadas ao longo desta dissertação. A primeira limitação é o limite inferior da margem de caudais que é possível obter. Apesar de o valor de 0,8308 mL/hr ser bastante aceitável e útil para muitos estudos, alguns pormenores do electrospray requerem valores cerca de dez vezes mais baixos. Esta limitação é facilmente resolvida através da alteração do motor ou da implementação de um sistema de engrenagens.

Uma outra limitação que levou a que não fossem apresentados resultados do campo de velocidades do spray, foi o equipamento de aquisição utilizado. A câmara, lentes e laser utilizados provaram não ser suficientes para captar imagens sem ruído. É também possível que o problema seja do software de aquisição de imagens, uma vez que a baixas exposições, mesmo com um objeto bem iluminado, verifica-se ruído nas imagens. Esta limitação pode ser resolvida através da substituição de alguns componentes de aquisição

de imagens (devendo também garantir que não é um problema de software ou hardware interno).

6.2 Propostas de trabalho futuro

Continuando com a intenção de analisar o campo de velocidades do spray, com um sistema PIV, deve-se resolver o problema do ruído. Como já foi referido, pensa-se que este seja causado pelo equipamento de aquisição de imagens utilizado. Uma vez removido o ruído das imagens, o software PIVlab irá facilmente calcular o campo de velocidades. Assim sendo, poderá ser realizado o estudo das velocidades para diferentes líquidos e condições eletrohidrodinâmicas. A partir desses resultados será também possível retirar os valores da corrente e de variáveis como a força de impulso e o impulso específico.

De forma a estudar o electrospray nos limites inferiores de caudal, deverá ser substituído o motor ou implementado um sistema de engrenagens. Alternativamente, pode ser substituído todo o sistema de alimentação, trocando-o por uma opção mais cara (mas também mais precisa), uma bomba de seringa.

Por fim, propõe-se o estudo do electrospray mais dirigido a aplicações de deposição de partículas, através da incorporação de um anel extrator na instalação. Poderá ser estudado o impacto das variáveis como o caudal, a tensão e a distância entre o emissor e o extrator, de forma a encontrar os valores mais eficientes para a cobertura de superfícies, ou outras aplicações.

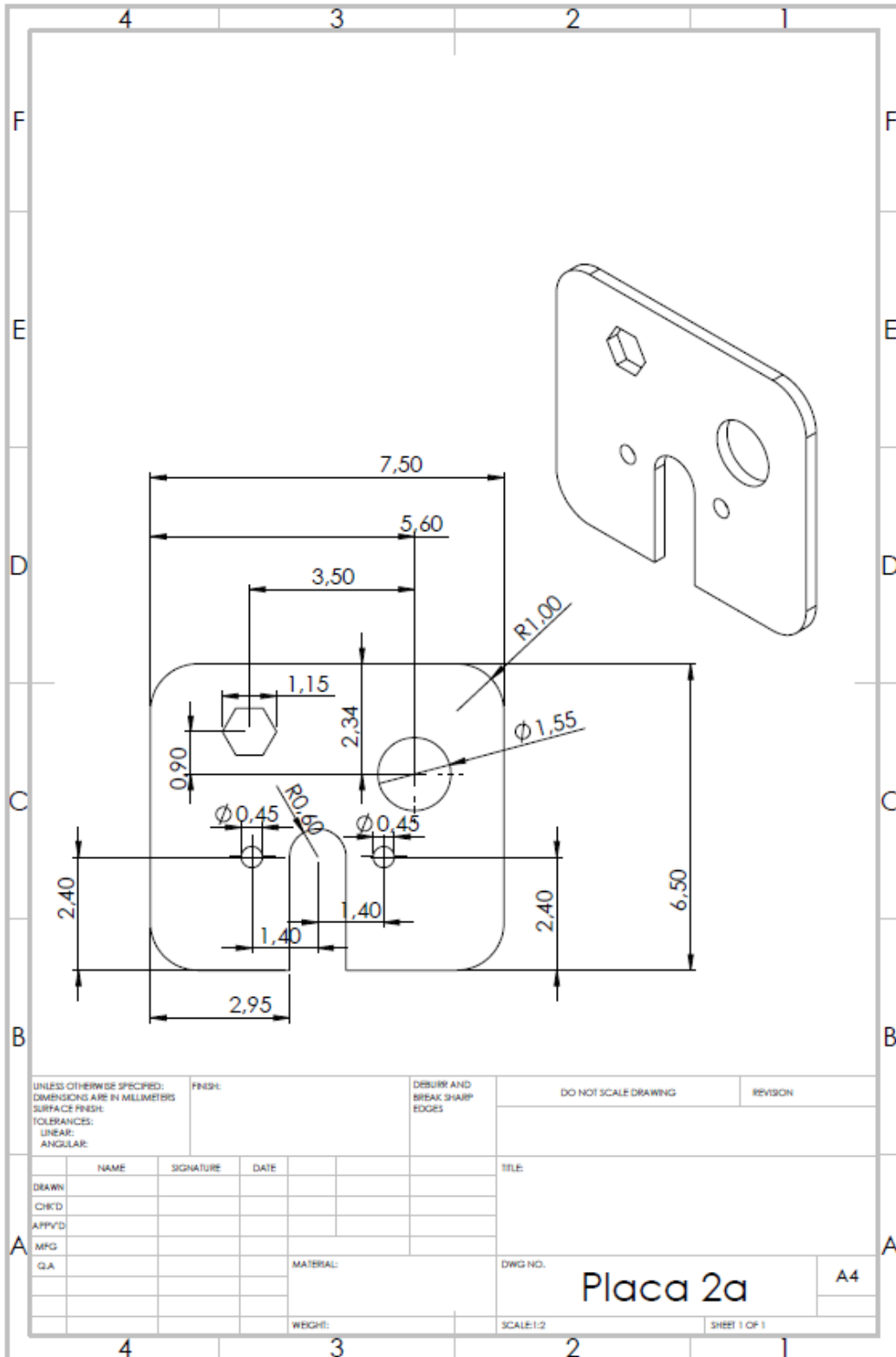
Bibliografia

- [1] Y.-H. Chui, B. L. Austin, R. A. Dressler, D. Levandier, P. T. Murray, P. Lozano e M. Martinez-Sanchez, “Mass spectrometric analysis of colloid thruster ion emission,” *Journal of Propulsion and Power*, nº 21(3), p. 416–423, 2005.
- [2] Y.-H. Chiu, G. Gaeta, T. Heine, R. Dressler e D. Levandier, “Analysis of the electrospray plume from the EMI-im propellant externally wetted on a tungsten needle,” em *In 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [3] Y.-H. Chiu e R. A. Dressler, “Ionic liquids for space propulsion,” *ACS Symposium Series, American Chemical Society*, vol. jul, pp. 138-160, 2007.
- [4] A. Thuppul, P. L. Wright, A. L. Collins, J. K. Ziemer e R. E. Wirz, “Lifetime considerations for electrospray,” *Aerospace*, vol. jul, nº 7(8), p. 108, 2020.
- [5] M. Z. Huang, H. J. Hsu, C. I. Wu, S. Y. Lin, Y. L. Ma, T. L. Cheng e J. Shiea, “Characterization of the chemical components on the surface of different solids with electrospray-assisted laser desorption ionization mass spectrometry,” *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, nº 21(11), p. 1767–1775, 2007.
- [6] P. B. Venter, N. D. Senekal, G. Kemp, M. Amra-Jordaan, P. Khan, S. L. Bonnet e J. H. and van der Westhuizen, “Analysis of commercial proanthocyanidins. part 3: The chemical composition of wattle (*acacia mearnsii*) bark extract,” *Phytochemistry*, vol. nov, nº 83, pp. 153-167, 2012.
- [7] A. Jaworek, “Micro and nanoparticle production by electrospraying,” *Powder Technology*, vol. jul, nº 176(1), pp. 18-35, 2007.
- [8] A. I. S. Morais, E. G. Vieira, S. Afewerki, R. B. Sousa, L. M. C. Honorio, A. N. C. O. Cambrussi, J. A. Santos, R. D. S. Bezerra, J. A. O. Furtini, E. C. Silva-Filho, T. J. Webster e A. O. Lobo, “Fabrication of polymeric microparticles by electrospray: The impact of experimental parameters,” *Journal of Functional Biomaterials*, vol. jan, nº 11(1), p. 4, 2020.
- [9] N. Spinoff, 2016. [Online]. Available: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2016/ip_9.html. [Acedido em 13 6 2021].
- [10] D. Krejci, “Space Propulsion Laboratory, MIT,” 2016. [Online]. Available: <https://spacepropulsion.mit.edu/electrospray-thruster-engineering>. [Acedido em 13 6 2021].
- [11] E. P. Systems. [Online]. Available: <https://angel.co/company/electrospray-propulsion-systems>. [Acedido em 13 6 2021].
- [12] J. Zeleny, “Instability of electrified liquid surfaces,” *Physical Review*, nº 10(1), pp. 1-6, 1917.
- [13] G. I. Taylor, “Disintegration of water drops in an electric field,” *Mathematical and Physical Sciences*, nº 280, pp. 383-397, 1964.
- [14] J. R. Melcher e G. I. Taylor, “Electrohydrodynamics: A review of the role of interfacial shear stresses,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, nº 1 (1), pp. 111-146, 1969.
- [15] M. Cloupeau e B. Prunet-Foch, “Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes,” *Journal of Electrostatics*, vol. 25, pp. 165-184, 1990.
- [16] J. F. D. L. Mora, “The effect of charge emission from electrified liquid cones,” *Journal of Fluid Mechanics*, nº 243, pp. 561-574, 1992.

- [17] J. F. D. L. Mora e I. G. Loscertales, “The current emitted by highly conducting taylor cones,” *Journal of Fluid Mechanics*, n° 260, pp. 155-184, 1994.
- [18] A. M. Gañan-Calvo, J. Dávila e A. Barrero, “Current and Droplet Size in the Electro spraying of Liquids. Scaling Laws,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 28, n° 2, pp. 249-275, 1997.
- [19] D. R. Chen e D. Y. H. Pui, “Experimental investigation of scaling laws for electro spraying: Dielectric constant ϵ ,” *Aerosol Science and Technology*, vol. 27, n° 3, pp. 367-380, 1997.
- [20] B. K. Ku e S. S. Kim, “Electrospray characteristics of highly viscous liquids,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 33, pp. 1361-1378, 2002.
- [21] P. Lozano e M. Martínez-Sánchez, “Ionic liquid ion sources: suppression of electrochemical reactions using voltage alternation,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 280, pp. 149-154, 2004.
- [22] J. M. López-Herrera, A. Barrero, A. Boucard, I. G. Loscertales e M. Márquez, “An Experimental Study of the Electro spraying of Water in Air at Atmospheric Pressure,” *American Society for Mass Spectrometry*, Outubro 2004.
- [23] I. Park, W. S. Hong, S. B. Kim e S. S. Kim, “Experimental investigations on characteristics of stable water electro spray in air without discharge,” *Physical Review*, vol. 95, 2017.
- [24] M. Gamero-Castaño e V. Hruby, “Electrospray as a Source of Nanoparticles for Efficient Colloid Thrusters,” em *American Institute of Aeronautics & Astronautics*, 2000.
- [25] P. C. Lozano, “Studies on the Ion-Droplet Mixed Regime in Colloid Thrusters,” Fevereiro 2003.
- [26] Y.-H. Chiu e R. A. Dressler, “Ionic Liquids for Space Propulsion,” em *ACS Symposium Series*, 2007.
- [27] E. T. Wolf, “Porous Emitter Colloid Thruster Performance Characterization Using Optical Techniques,” Março 2013.
- [28] J. D. Regele, M. J. Papac, M. J. A. Rickard e D. Dunn-Rankin, “Effects of capillary spacing on EHD spraying from an array of cone jets,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 33, pp. 1471-1479, 2002.
- [29] W. Deng, J. F. Klemic, X. Li, M. A. Reed e A. Gomez, “Increase of electro spray throughput using multiplexed microfabricated sources for the scalable generation of monodisperse droplets,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 37, pp. 696-714, 2006.
- [30] W. Deng e A. Gomez, “Full transient response of Taylor cones to a step change in electric field,” *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 12, p. 383–393, 2012.
- [31] A. Suhendi, M. M. Munir, A. B. Suryamas, A. B. D. Nandiyanto, T. Ogi e K. Okuyama, “Control of cone-jet geometry during electro spray by an electric current,” *Advanced Powder Technology*, vol. 24, pp. 532-536, 2013.
- [32] M. R. Morad, A. Rajabi, M. Razavi e S. R. P. Sereshkeh, “A Very Stable High Throughput Taylor Cone-jet in Electrohydrodynamics,” *Scientific Reports*, vol. 6, 2016.
- [33] Q. Wang, Z. Wang, S. Yang, B. Li, H. Xu, K. Yu e J. Wang, “Experimental study on electrohydrodynamic atomization (EHDA) in stable cone-jet with middle viscous and low conductive liquid,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 121, 2020.

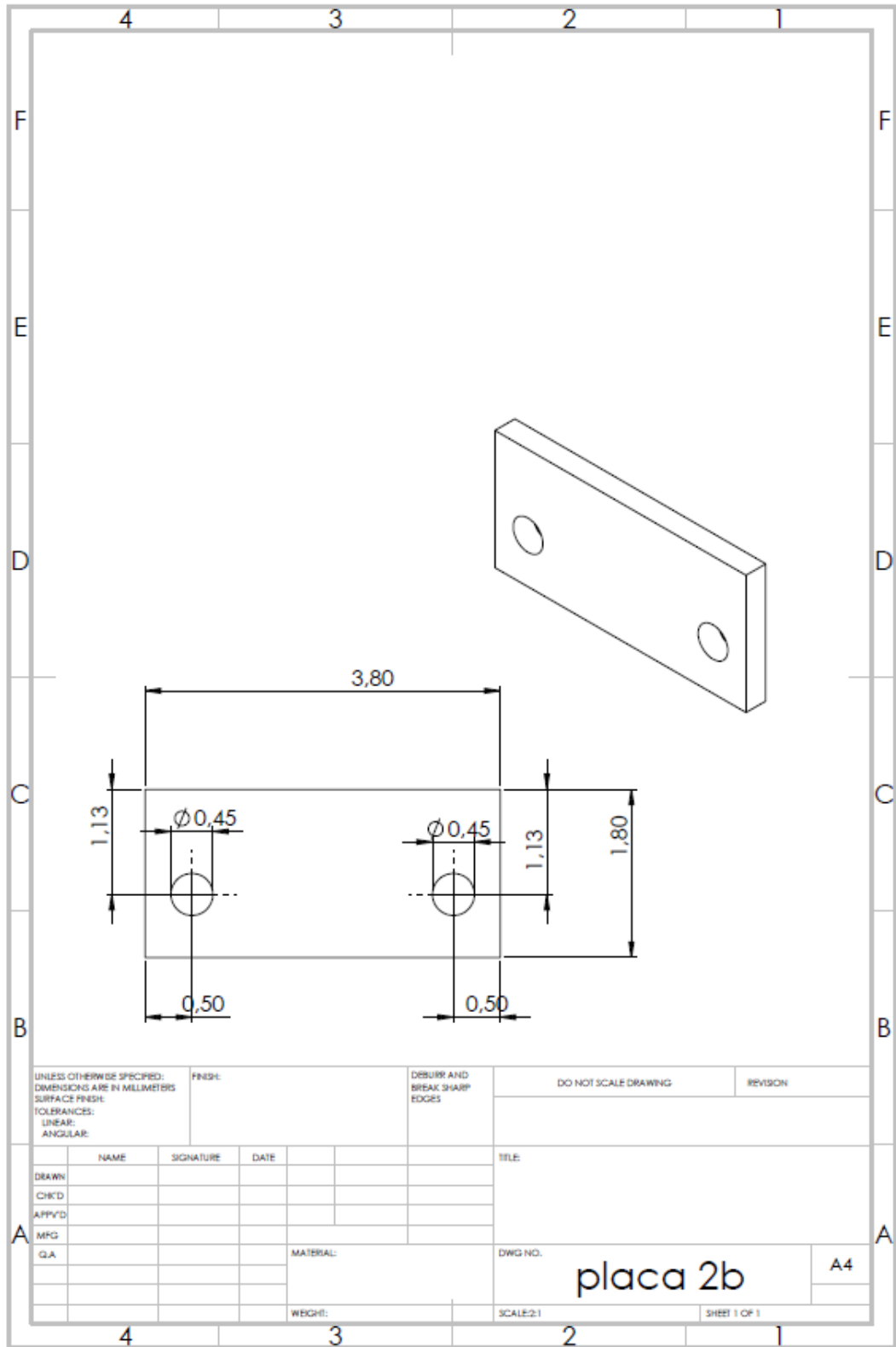
- [34] A. Barrero, A. M. Gañan-Calvo, J. Dávila, A. Palacio e E. Gómez-González, “Low and high Reynolds number flows inside Taylor cones,” *Physical Review*, vol. 58, n° 6, 1998.
- [35] J. Kim, S. B. Q. Tran, B. Seong, H. Lee, G. Kang, J. H. Ko e D. Byun, “Experimental study on fluid selection for a stable Taylor cone formation via micro-PIV measurement,” *Journal of Visualization*, vol. 23, pp. 449-457, 2020.
- [36] M. Cloupeau e B. Prunet-Foch, “Electrohydrodynamic Spraying Functioning Modes: A Critical Review,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 25, n° 6, pp. 1021-1036, 1994.
- [37] A. M. Gañan-Calvo, “Erratum: Cone-Jet Analytical Extension of Taylor's Electrostatic Solution and the Asymptotic Universal Scaling Laws in Electro spraying,” *Physical Review*, vol. 79, n° 2, 1997.
- [38] T. Morris, C. Malardier-Jugroot e M. Jugroot, “Characterization of electrospray beams for micro-spacecraft electric propulsion applications,” *Journal of Electrostatics*, vol. 71, pp. 931-938, 2013.
- [39] M. Tajmar, “Influence of Taylor cone size on droplet generation in an indium liquid metal ion source,” *Applied Physics A*, vol. 81, n° 7, pp. 1447-1450, 2005.
- [40] J. R. Melcher e G. I. Taylor, “Electrohydrodynamics: A Review of the Role of Interfacial Shear Stresses,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 1, pp. 111-146, 1969.
- [41] B. Q. T. Si, D. Byun e S. Lee, “Experimental and theoretical study of a cone-jet for an electrospray microthruster considering the interference effect in an array of nozzles,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 38, pp. 924-934, 2007.
- [42] H. Dastourani, M. R. Jahannama e A. Eslami-Majd, “A physical insight into electrospray process in cone-jet mode: Role of operating parameters,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 70, pp. 315-335, 2018.
- [43] R. Krpoun e H. R. Shea, “Micromachined electric propulsion using ionic liquids as fuel,” em *International Workshop on Physics of Semiconductor Devices*, 2007.
- [44] J. Nabity, G. Mason, J. Engel, J. Daily, R. Lagumbay e D. Kassoy, “Studies of MEMS Colloid Thrusters,” em *ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2006.
- [45] A. M. Powaser, “Colloid Thruster to Teach Advanced Electric Propulsion Techniques to Post-Secondary Students,” Junho 2019.
- [46] L. F. Velásquez-García, “The Design, Fabrication and Testing of Micro-fabricated Linear and Planar Colloid Thruster Arrays,” Maio 2004.
- [47] B. Gassend, L. F. Velasquez-Garcia, A. I. Akinwande e M. Martinez-Sanchez, “Fabrication of a fully integrated electrospray array with applications to space propulsion,” em *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2008.
- [48] F. M. F. Rodrigues, “Desenvolvimento de uma instalação experimental, e sistema PIV, para o ensaio de tuberias de efeito Coanda com atuadores a plasma,” Junho 2014.
- [49] B. Seong, S. Hwang, H.-S. Jang, H. Lee, J. Kim, V. D. Nguyen, D.-H. Cho, L. Lin e D. Byun, “A hybrid aerodynamic and electrostatic atomization system for enhanced uniformity of thin film,” *Journal of Electrostatics*, vol. 87, pp. 93-101, 2017.

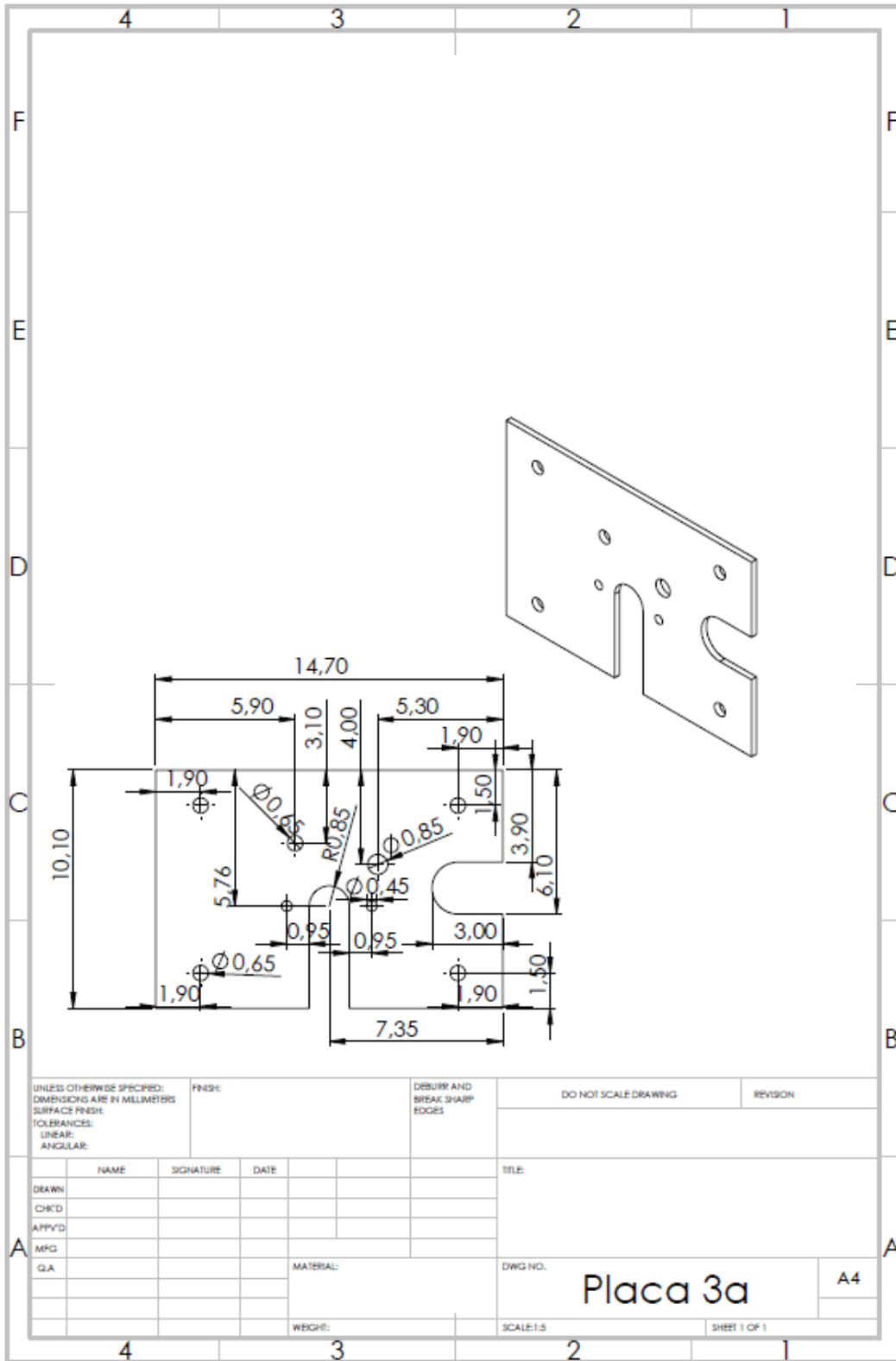
- [50] W. Junfeng, W. Jianlong e T. L., “Experimental Investigation on Turbulent Flow of Electro-spray by PIY,” em *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003.
- [51] A. N. Zorzos, J. S. Guasto e K. S. Breuer, “VISUALIZATION AND TRACKING OF ELECTROSPRAY DROPLET EMISSIONS USING FLUORESCENCE AND HOLOGRAPHIC TECHNIQUES,” em *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2007.
- [52] D. Pliszka, S. Sundarrajan, A. Jaworek, A. Krupa, M. Lackowski e S. Ramakrishna, “Optimization of Electro spray Process by PIV in Nanostructured Membrane Preparation,” *Advances in Science and Technology*, vol. 60, pp. 117-122, 2008.
- [53] X. Chen, J. Cheng e X. Yin, “Measurements of drop velocity in electro spray by PIV,” em *Proceedings Volume 5058, Optical Technology and Image Processing for Fluids and Solids Diagnostics*, 2003.
- [54] Z. P. Tan, L. Silwal, S. P. Bhatt e V. Raghav, “Experimental characterization of speech aerosol dispersion dynamics,” *Scientific Reports*, vol. 11, 2021.
- [55] J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe e R. J. Adrian, “A particle image velocimetry system for microfluidics,” *Experiments in Fluids*, vol. 25, pp. 316-319, 1998.
- [56] E. K. Anderson, A. P. Carlucci, A. Risi e D. C. Kyritsis, “Synopsis of experimentally determined effects of electrostatic charge on gasoline sprays,” *Energy Conversion and Management*, vol. 48, p. 2762–2768, 2007.
- [57] R. J. Adrian, “Twenty years of particle image velocimetry,” *Experiments in Fluids*, vol. 39, pp. 159-169, 2005.
- [58] W. Thielicke e E. J. Stamhuis, “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB,” *Journal of Open Research Software*, vol. 2, n° 1, 2014.
- [59] B. Prunet-Foch e M. Cloupeau, “Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes,” *Journal of Electrostatics*, n° 25 (2), pp. 165-184, 1990.

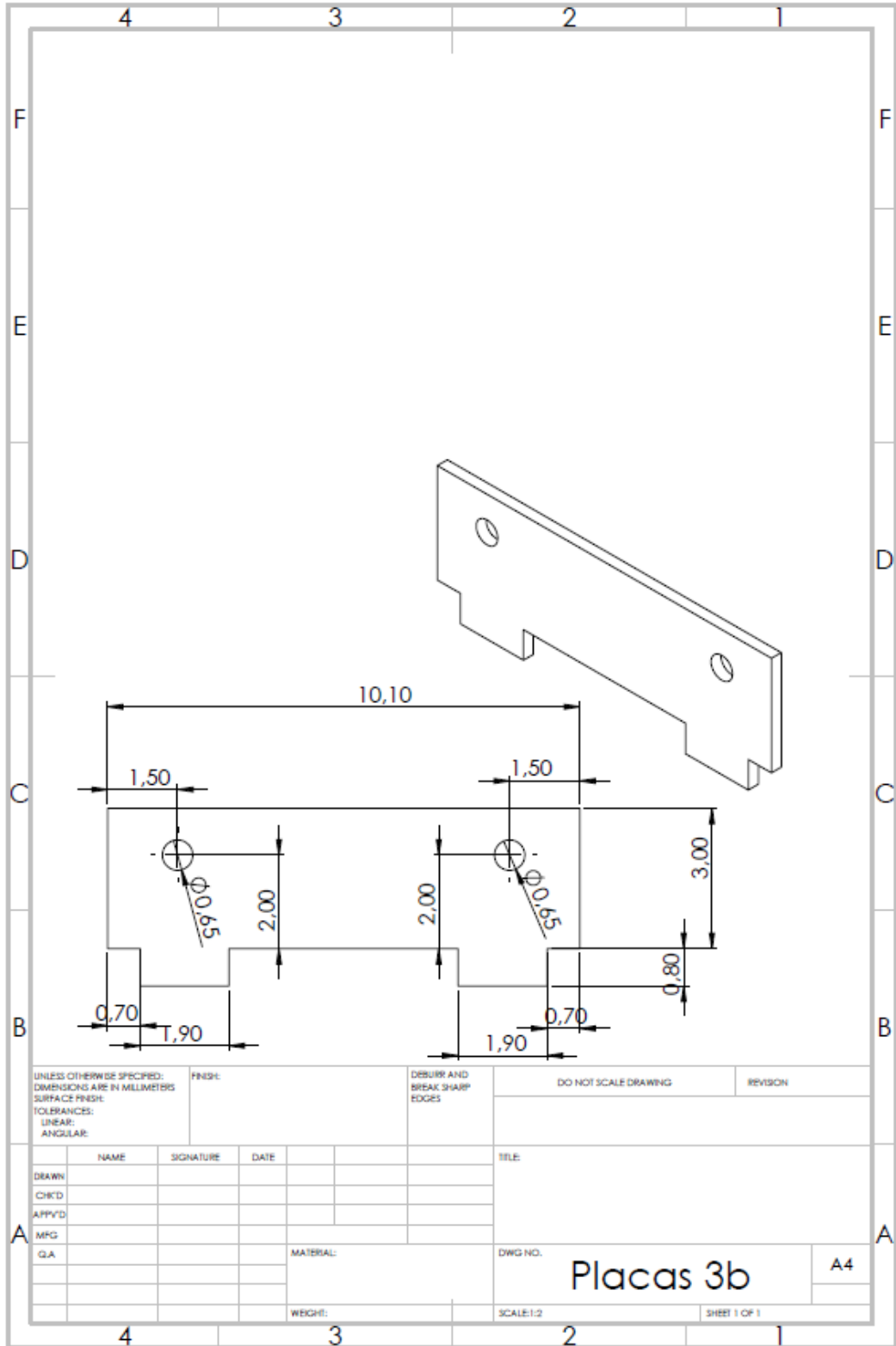


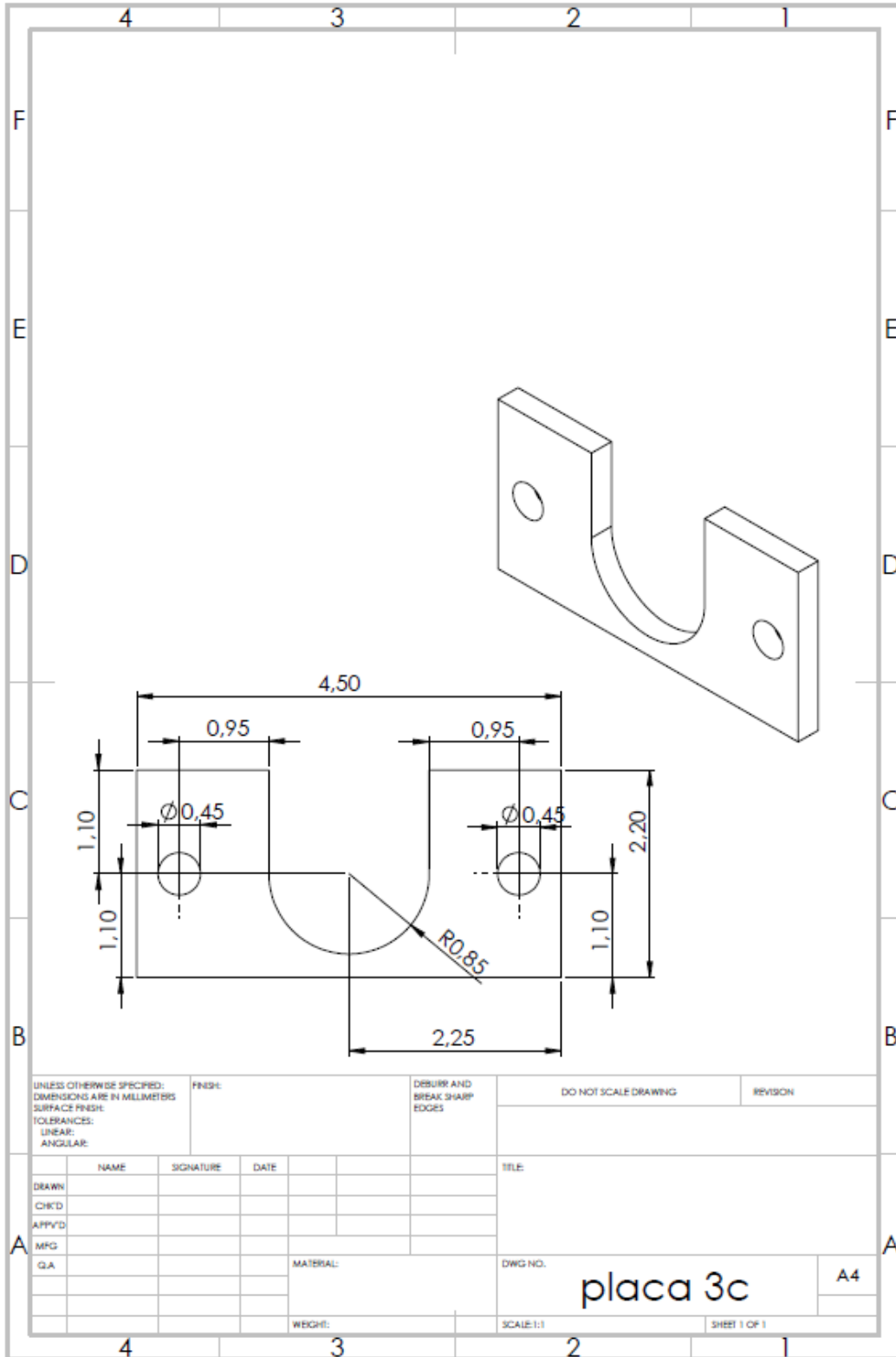
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH:			FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:						
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN						
CHK'D						
APP'Y'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG NO.	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

Placa 2a

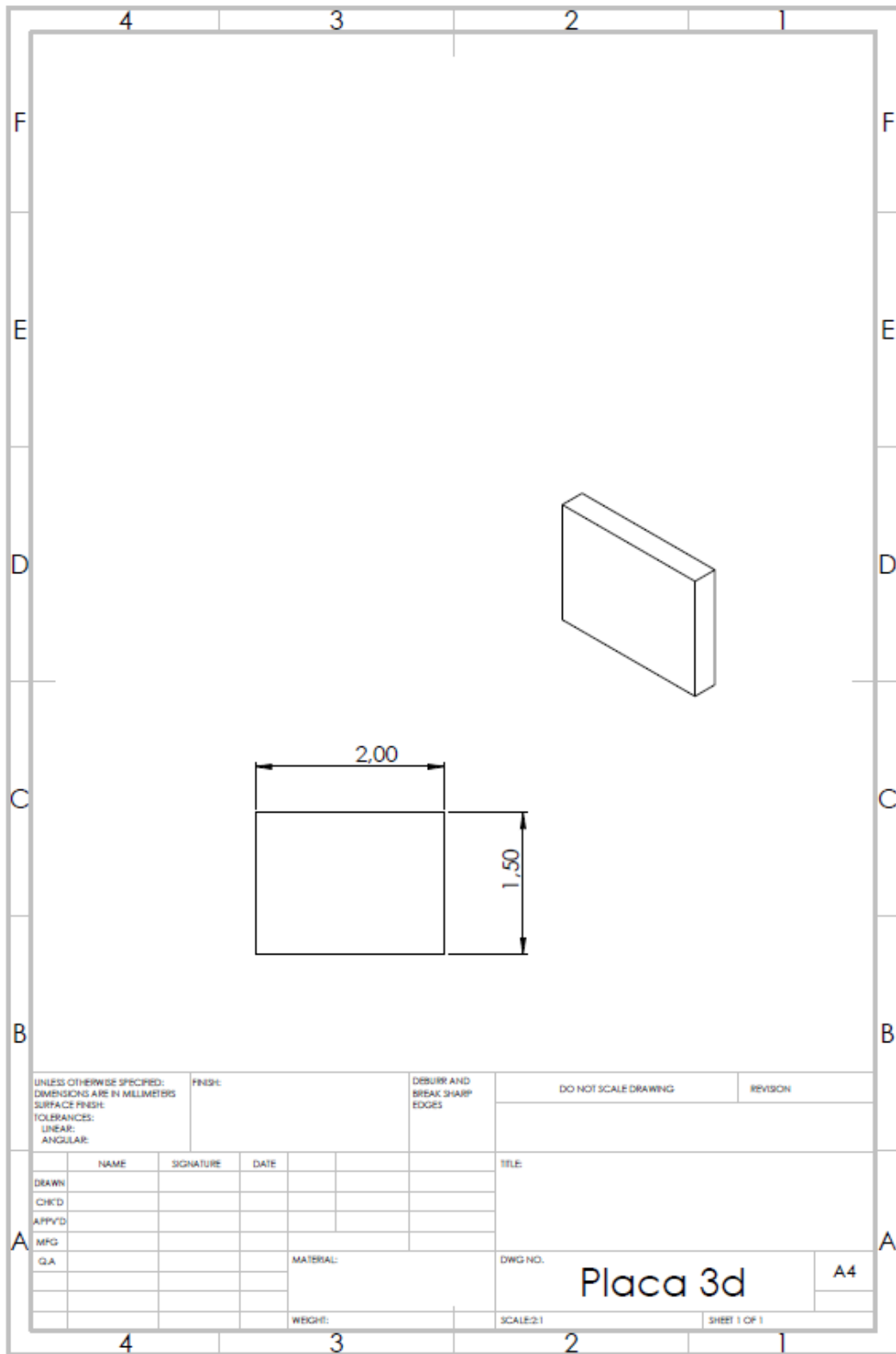








UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NAME</th> <th>SIGNATURE</th> <th>DATE</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>				NAME	SIGNATURE	DATE																																										TITLE:		
NAME	SIGNATURE	DATE																																																
MATERIAL:				DWG NO.																																														
WEIGHT:				SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1																																												
placa 3c					A4																																													



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
								Placa 3d	
						WEIGHT:		SCALE:2:1	
								SHEET 1 OF 1	

Anexo II: Código utilizado no controlo do motor (Arduino)

```
flowratecontrol.ino
// input pins association

int enA = 9; // pin 9 is capable of PWM
int in1 = 8;
int in2 = 7;

void setup()
{
  // set pins as outputs
  pinMode(enA, OUTPUT);
  pinMode(in1, OUTPUT);
  pinMode(in2, OUTPUT);
}
////////////////////////////////////// STOP MOTOR BETWEEN SWITCHING FROM FORWARD TO BACKWARDS OR VICEVERSA

//FORWARD: change forw to 1 and speedv to desired value
int forw = 0;
int speedv = 60;
//BACKWARDS: change back to 1 (motor will go back at full speed)
int back = 0;
//STOP: change pause to 1 (motor will stop and turn off)
int pause = 1;

//////////////////////////////////////

void forward(int forw, int speedv)
{
  if (forw==1) {
    // set speed of motor from 0 to 255 (off to full speed)
    analogWrite(enA, speedv);
    // turn motor on (running forward)
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);}
}

void backwards(int back)
{
  if (back==1) {
    // full speed when going backwards
    analogWrite(enA, 255);
    // turn motor on (running backwards)
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);}
}

void pausemotor(int pause)
{
  if (pause==1) {
    // reset speed to 0
    analogWrite(enA, 0);}
  // turn motor off
  digitalWrite(in1, LOW);
  digitalWrite(in2, LOW);}

//////////////////////////////////////

void loop()
{
  forward(forw, speedv);
  backwards(back);
  pausemotor(pause);
}
```

Anexo III: Código utilizado no controlo do laser

```
main.cpp x
1 #include "mbed.h"
2
3 InterruptIn input(p5);
4 DigitalOut output(p6);
5
6 void trigger() {
7     output=1;
8     wait_us(402);
9     output=0;
10 }
11
12 int main() {
13     input.fall(&trigger); // attach the address of the flip function to the rising edge
14     while(1) {           // wait around, interrupts will interrupt this
15     }
16 }
```

Anexo IV: Procedimento para obtenção do electrospray

- 1) Ajustar a distância entre o emissor e a placa coletora, através do ajuste da placa acrílica inferior
- 2) Ajustar a placa acrílica que empurra o êmbolo, tendo em conta o volume de líquido que se pretende inserir no reservatório
- 3) Colocar o líquido pretendido na seringa, até o êmbolo atingir a posição pretendida (deve encaixar na placa acrílica)
- 4) Prender a seringa e o êmbolo nas placas acrílicas
- 5) Conectar o Arduino ao computador através do cabo USB
- 6) Garantir que o código está a enviar o sinal que corresponde à paragem do motor
- 7) Ligar a fonte de tensão com o valor adequado para o motor de 12V
- 8) Ligar os cabos de alta tensão à agulha e à placa coletora
- 9) Atualizar o código do Arduino com o valor correspondente ao caudal pretendido, de forma que o motor comece a expulsar o líquido da seringa
- 10) Esperar cerca de 1 minuto para garantir que o líquido está a chegar à ponta da agulha e para que se forme um volume líquido suspenso na ponta da agulha
- 11) Ligar a fonte de alta tensão, ajustando para o valor de tensão pretendido, dando assim início ao electrospray
- 12) Após terem sido retirados os resultados, começar por desligar a fonte de alta tensão e de seguida alterar o código Arduino com a ordem de paragem
- 13) Desligar a fonte de tensão de 12V e após algum tempo de espera desconectar os cabos de alta tensão da agulha e da placa coletora
- 14) Pode-se por fim remover a seringa da instalação, desprendendo-a das placas acrílicas