



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo de técnicas de indução eletrostática aplicadas a pulverizadores

Anderson Dias Gomes

João Monlevade, MG
2021

Anderson Dias Gomes

**Estudo de técnicas de indução eletrostática
aplicadas a pulverizadores**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Marcelo Moreira Tiago

Coorientador: Prof. Edgard Gregory Torres Saravia

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633e Gomes, Anderson Dias .
Estudo de técnicas de indução eletrostática aplicadas a
pulverizadores. [manuscrito] / Anderson Dias Gomes. - 2021.
48 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.
Coorientador: Prof. Me. Edgard Gregory Torres Saravia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia
Elétrica .

1. Eletrificação. 2. Engenharia de protótipos . 3. Máquinas elétricas
de indução - Eletrostática . 4. Pragas agrícolas - Controle. I. Saravia,
Edgard Gregory Torres. II. Tiago, Marcelo Moreira. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.3

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Anderson Dias Gomes

Estudo de técnicas de indução eletrostática
aplicadas a pulverizadores

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 02 de dezembro de 2021

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Edgard Gregory Torres Saravia - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Igor Dias Neto de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Juan Carlos Galvis Manso - Universidade Federal de Ouro Preto

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/01/2022



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/01/2022, às 21:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0265039** e o código CRC **5EA216F8**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.000192/2022-65

SEI nº 0265039

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

Agradecimentos

Início agradecendo a Deus pela vida que se mostrou tão fragilizada pela Covid-19 nesse período pandêmico.

À minha família, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis. Meu pai, Edson Gomes, pelo suporte. Minha mãe, Maria Gomes, pelos cuidados. Aos meus irmãos Adriana e Alexandre por cada sábia palavra. Ao Lucca, pela alegria. Aos avós, tios, primos pelo carinho.

Deixo um agradecimento especial ao Professor Marcelo Moreira Tiago pela condução criativa, com a paciência e a dedicação dos grandes mestres. Ao Professor Edgard Gregory Torres Saraiva pela visão estratégica tão fundamental no início deste projeto de pesquisa.

Aos colegas de turma, que se tornaram grandes amigos neste percurso.

Finalmente Agradeço ainda a Universidade Federal de Ouro Preto pelo compromisso com a excelência e qualidade do ensino público em tempos tão obscuros e a Universidade Estadual Paulista por conceder o acesso ao *software* COMSOL Multiphysics.

"Open mind for a different view"
– James Hetfield & Lars Ulrich

Resumo

A pulverização eletrostática é uma técnica utilizada para melhorar o aproveitamento na aplicação de defensivos, produtos utilizados no combate a pragas no ramo agrícola. O fenômeno está associado à indução de altos níveis de tensão para criação de um forte campo eletrostático, que no momento da deposição de pequenas gotas iniciará o processo de eletrificação, polarizando-as. Este trabalho apresenta as etapas de projeto e desenvolvimento de um protótipo em pequena escala de um pulverizador eletrostático. Na etapa de projeto, duas abordagens distintas são analisadas, sendo a primeira considerando simulações por métodos de elementos finitos e a segunda envolvendo expressões algébricas derivadas de artigos de referência presentes na literatura. Na etapa de desenvolvimento do protótipo, são apresentadas as etapas de construção do sistema mecânico, definição do circuito de excitação de alta tensão e configuração do sistema de medição. Para analisar a eficiência do sistema, foram realizadas medições de corrente, usando um medidor de precisão e um anteparo metálico. Aplicando-se uma tensão de excitação de 2 kV, considerando uma vazão de $1,62 \times 10^{-7}$ m³/s, foram obtidas correntes de nuvem da ordem de 50 nA, o que corresponde a uma relação carga/massa de 0,31 mC/kg. Esses valores correspondem a 10% do alcançado teoricamente, demonstrando uma abordagem incompleta das equações que modelam sistemas de pulverização eletrostática.

Palavras-chave: Indução eletrostática, Eletrificação de gotas, Pulverizadores.

Abstract

Electrostatic spraying is a technique used to improve the use of pesticides, products used to combat pests in the agricultural sector. The phenomenon is associated with the induction of high voltage levels to create a strong electrostatic field, which at the moment of deposition of small drops will start the electrification process, polarizing them. This work presents the design and development stages of a small-scale prototype of an electrostatic sprayer. In the design stage, two distinct approaches are analyzed, the first considering simulations by finite element methods and the second involving algebraic expressions derived from reference articles in the literature. In the prototype development stage, there are the stages of construction of the mechanical system, definition of the high voltage excitation circuit and configuration of the evaluation system. To analyze the efficiency of the system, they were selected according to current, using a precision meter and a metallic shield. Applying an excitation voltage of 2 kV, considering a flow of $1.62 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, were cloud currents of the order of 50 nA, which corresponds to a load/mass ratio of 0.31 mC/kg. These values correspond to 10 % to be theoretically achieved, demonstrating an incomplete approach to the equations that model electrostatic spraying systems.

Keywords: Electrostatics, Droplet electrification, Spraying

Lista de ilustrações

Figura 1 – Geometria referente às partículas sendo carregadas.	9
Figura 2 – Fenômeno de atração explicado pela eletrostática.	11
Figura 3 – Esquema de carregamento por indução.	11
Figura 4 – Relação Carga/Massa em diferentes vazões e tensões.	12
Figura 5 – Curva resultante de um processo de ionização do efeito corona.	15
Figura 6 – Sistema de eletrificação por efeito corona.	16
Figura 7 – Sistema de eletrificação direta.	17
Figura 8 – Sistema de eletrificação indireta.	18
Figura 9 – Fluxograma - Parte 01.	22
Figura 10 – Diagrama ilustrando a geometria construída no <i>software</i>	23
Figura 11 – Fluxograma - Parte 02.	26
Figura 12 – Fluxograma - Parte 03.	27
Figura 13 – Fluxograma - Parte 04.	27
Figura 14 – Circuito utilizado em raquetes mata mosquito.	28
Figura 15 – Circuito de carregamento da bateria.	29
Figura 16 – Circuito de chaveamento e elevação de tensão.	29
Figura 17 – Circuito triplicador de tensão.	30
Figura 18 – Protótipo montado em laboratório	31
Figura 19 – Diagrama do sistema montado em laboratório.	32
Figura 20 – Comparação entre simulação e dados experimentais	34
Figura 21 – Valores de corrente aferidos em laboratório	35
Figura 22 – Ilustração do gotejamento no momento do expurgo dos jatos.	38
Figura 23 – Perspectivas da adaptação no pulverizador manual.	45
Figura 24 – Perspectivas da adaptação no pulverizador manual.	45
Figura 25 – Perspectivas da adaptação no pulverizador manual.	46
Figura 26 – Alvo para aquisição da corrente de nuvem i_c	46
Figura 27 – Pulverizadores costais convencionais.	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO TEÓRICA	7
2.1	A Pulverização	7
2.2	Eletrificação de gotas	9
2.3	Relação Carga/Massa	11
2.4	Efeito Corona	14
2.5	Eletrificação por Efeito Corona	16
2.6	Eletrificação Direta	16
2.7	Eletrificação Indireta	18
2.8	Considerações Parciais	21
3	METODOLOGIA	22
3.1	Análise Teórica	22
3.1.1	Método de Elementos Finitos	23
3.1.2	Abordagem Algébrica	24
3.2	Análise Experimental	25
3.2.1	Adaptação do pulverizador manual	27
3.2.2	Base para fixação do alvo	28
3.2.3	Circuito de excitação	28
3.2.3.1	Carregamento da bateria	29
3.2.3.2	Circuito de chaveamento e amplificação da tensão	29
3.2.3.3	Circuito Triplicador	30
3.2.4	Protótipo de Sistema	30
3.2.5	Aquisição de dados	32
3.3	Considerações Parciais	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Simulações com método de elementos finitos	34
4.2	Ensaio com o protótipo do pulverizador	35
4.3	Comparação entre valores estimados e medidos	36
4.4	Problemas observados durante o ensaio	38
4.5	Considerações Parciais	39

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5.1	Propostas para trabalhos futuros	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – PERSPECTIVAS DO PROTÓTIPO	45
	ANEXO A – TIPOS DE PULVERIZADORES	47

1 Introdução

Em decorrência de ataques de pragas nas plantações, é comum que os produtores utilizem compostos químicos defensivos buscando combater diversos tipos de insetos. Historicamente, Nunes e Ribeiro (1999) mostram que a aplicação de compostos aconteciam desde antes do século XI.

De acordo com Chaim (2006), os primeiros equipamentos para aplicação de defensivos consistiam unicamente de um tubo de espessura fina por onde fluía o composto líquido que, através de fricção e da resistência do ar, resultavam na formação de grandes gotas. No entanto, antes mesmo de mecanismos automatizados, as aplicações eram realizadas utilizando-se panos ou escovas aplicadas diretamente nos alvos (CHAIM, 1999).

Em função do avanço tecnológico impulsionado principalmente pelas disputas ocorridas durante as duas Guerras Mundiais no século XX, técnicas inovadoras para aumentar o volume de produção e, ao mesmo tempo, ampliar a qualidade dos produtos ganharam força, com novas configurações de bicos, reservatórios, bombas entre outros mecanismos para auxílio durante as aplicações (CHAIM, 2006).

Atualmente, pulverizadores costais pneumáticos são equipamentos muito utilizados por pequenos produtores. Eles consistem basicamente de um reservatório, onde encontra-se armazenado o composto químico a ser utilizado, uma haste para manuseio acompanhada de um gatilho para realizar a liberação do líquido e, em sua extremidade, um bico com características geométricas que permitem ajustar o tipo de jato, que pode ser dos tipos leque, cone entre outros, dependendo da necessidade. Para aplicações envolvendo maiores áreas, há ainda opções de pulverizadores costais motorizados (PAIXÃO, 2016), pulverizadores de barra (NETO; COSTA; OLIVEIRA, 2007), dentre outros modelos.

Apesar de ser eficiente e muito utilizado por produtores, um ponto bastante negativo por trás de pulverizadores considerados convencionais diz respeito ao desperdício dos compostos químicos (CHAIM; PESSOA; FERRACINI, 2002). Na cultura de porte rasteiro, por exemplo, a perda em deposição atinge 50% da aplicação na produção de arroz irrigado. Nas culturas de porte arbustivo, os números também são críticos. As estatísticas mostram que as perdas na produção de videiras são de 35 a 49%. Em culturas de porte arbóreo, como macieiras ou laranjeiras, as perdas para o solo variam entre 2 a 39%, e as perdas devido à deriva (parcela de defensivo que não alcança a planta devido ao vento) encontra-se entre 23 a 45% (CHAIM, 2006).

Dentre os vários estudos que surgiram com o objetivo de reduzir essas perdas, pode-se destacar a pulverização eletrostática. Basicamente, seu funcionamento consiste na eletrificação de gotas através da aplicação de uma diferença de potencial ao líquido a ser polarizado. Este potencial deve ser suficientemente alto para que possa ser criado um campo elétrico capaz de induzir cargas elétricas nas gotas, polarizando-as (CHAIM,

2006).

As gotas carregadas eletricamente são atraídas pelas plantas, possibilitando que partes inferiores das mesmas sejam alcançadas, reduzindo a deriva e a quantidade volumétrica de defensivos necessários para a cobertura da superfície da plantação.

Numericamente, a eficiência na indução de cargas nas gotas pode ser calculada através da relação carga/massa, definida como a quantidade de carga por unidade de massa, normalmente representada em mC/kg (SASAKI et al., 2014), de modo que quanto maior o valor desta relação, maior será a eficiência do pulverizador. Vale ressaltar que elevar este resultado depende de alguns fatores que devem ser levados em consideração para análises conclusivas, tais como a intensidade dos níveis de tensão, o tamanho das gotas à serem carregadas e a vazão dos bicos de pulverização.

Dentre os modelos de pulverizadores existentes, encontram-se no mercado pulverizadores costais, pulverizadores autopropelidos (que dispõem de um veículo para auxílio e movimentação do pulverizador), além de pulverizadores tratorizados, que podem operar com barras fixas, com dutos direcionados ou com tubos em formato de canhões. Os pulverizadores costais costumam ser mais utilizados por pequenos produtores, por apresentarem custo reduzido em relação aos demais.

No Brasil, a Embrapa, em parceria com a Bell's Indústria Eletrônica Ltda., produz um modelo (Jetbras) com um reservatório de 18 l, bateria recarregável de 12 V com uma corrente de 9 A-h e carregador bivolt (110/220 V). Nesse sistema, um potenciômetro é utilizado para regular a pressão utilizada na aplicação. A tensão de excitação do sistema não é informada pelo fabricante.

Um segundo modelo é fabricado pela empresa Yamaho (modelo EY-16). O equipamento possui um tanque com capacidade de 16 l, bateria recarregável de 12 V com uma corrente de 7 A-h. De acordo com o fabricante, a tensão de saída pode variar entre 15 e 30 kV, com dois bicos (tipo chapéu e regulável) fornecendo um tamanho de gota que varia entre 60 e 100 μm . Os dois produtos apresentam um sistema de eletrificação de gotas direto, tendo os níveis de alta tensão aplicados diretamente ao líquido.

Estudos envolvendo abordagens teóricas dos processos de eletrificação de gotas vem sendo realizados ao longo das últimas décadas. Law (1978) apresentou equações que buscam descrever os fenômenos presentes nesses sistemas, buscando relacionar as propriedades físicas do sistema com os níveis de carga induzida nas gotas. Além da modelagem algébrica, existem métodos baseados em técnicas de elementos finitos, como o trabalho desenvolvido por Al-Mamury et al. (2015), por exemplo. Este tipo de simulação busca considerar outros efeitos do ambiente que podem interferir nos níveis de carga induzida, como por exemplo, variações de temperatura, pressão e umidade do ar. Finalmente, alguns autores optaram por abordagens empíricas, onde os resultados foram obtidos levando-se em consideração testes realizados em bancada, como no trabalho apresentado por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002).

Essas diferenças entre as abordagens do problema motivaram o estudo deste trabalho, que tem como objetivo relacionar as etapas de projeto e montagem do sistema, relacionado a teoria que envolve o processo de indução eletrostática com os resultados medidos em bancada utilizando um protótipo de baixa vazão ($1,62 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$), pequenos tamanhos de gotas (aproximadamente $13 \mu\text{m}$) e excitado com uma fonte de alta-tensão (2 kV).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral estudar técnicas de eletrificação de gotas aplicadas a pulverizadores eletrostáticos. Os objetivos específicos são:

- Projetar o sistema elétrico de excitação, calculando os valores teóricos de tensão e carga induzida para um ponto de operação;
- Montar um protótipo de pulverizador de baixa vazão ($1,62 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$), usando um bico com pequenos tamanhos de gotas ($13 \mu\text{m}$);
- Montar um sistema de testes, composto por anteparo metálico e multímetro de precisão, para medição dos níveis de corrente induzidos nas gotas;
- Comparar os resultados obtidos aos resultados encontrados na literatura, avaliando o desempenho do sistema desenvolvido neste trabalho.

1.2 Revisão Bibliográfica

Como já mencionado, há vários tipos de sistemas de pulverização disponíveis no mercado, e a escolha de cada modelo deve levar em consideração o tipo de cultura, tamanho da propriedade e custos do equipamento. Esses pontos também devem ser observados quando os equipamentos envolvidos utilizam sistemas de indução eletrostática, que apresentam maior eficiência do que os modelos tradicionais, mas possuem custo mais elevado.

Há vários tipos de sistemas disponíveis no mercado quando se trata desse tipo de aplicação. Monteiro, Carvalho e Baesso (2002) adaptaram numa aeronave modelo EMB-202-A um sistema de indução composto por uma fonte operando a 9,1 kV, com uma corrente induzida de $350 \mu\text{A}$ nas gotas. Esse sistema permite alcançar grandes áreas de forma rápida, entretanto, trata-se de um projeto extremamente caro, sendo utilizado apenas por grandes empresas.

Tavares et al. (2017) desenvolveram um sistema eletrostático visando aumentar a eficiência no controle de psilídeo (um tipo de praga) em goiabeiras. Os experimentos realizados foram divididos em duas partes: a primeira para análise da influência da distância entre o pulverizador e o alvo e a segunda para avaliar a influência da vazão de calda de

pulverização. Para as aplicações, foi utilizado um pulverizador costal motorizado (*Stihl*, modelo SR450) com tanque de capacidade para 14 l. Os autores utilizaram um processo de eletrificação indireta, obtido a partir da utilização de um *kit* comercial (*Spectrum*, modelo 3010). Para determinação da relação carga/massa, foi utilizada uma gaiola de Faraday, conforme descrito por Chaim (1998). Os autores encontraram uma relação carga/massa de 0,21 mC/kg e uma corrente não informada pela referência.

Scherm, Savelle e Law (2007) avaliaram a eficiência de pulverizadores eletrostáticos para controle de um fenômeno conhecido como doenças de múmias (do inglês, *mummy berry disease*), causado por um fungo que infecta flores de mirtilo, conhecido também como *blueberry*. A ideia consistiu em manipular compostos bioquímicos aplicados através da pulverização eletrostática com o objetivo de aumentar a eficiência em deposição nos alvos, protegendo-as contra os fungos. Os resultados obtidos indicam um aumento de eficiência de 4,5 vezes em comparação com a aplicação utilizando pulverizadores hidráulicos convencionais.

No projeto desenvolvido por Al-Mamury et al. (2015), Al-Mamury (2015), um robô foi adaptado para pulverizar plantações de algodão utilizando um sistema eletrostático. Portanto, uma câmera era responsável por identificar os focos de ataque das pragas nas plantas. Este robô percorreu a plantação, acionando o sistema de pulverização que irá aplicar o defensivo somente nas regiões em que foram detectados focos de praga. Esse sistema apresenta duas boas características, que envolvem aplicação localizada de defensivo e redução de perdas para o solo ou por deriva. Em contrapartida, por ser um sistema mais complexo, trata-se de um sistema caro.

Apesar de ser amplamente utilizado no meio agrícola, as técnicas envolvendo a eletrostática foram aplicadas também em um dispositivo de bronzeamento artificial do corpo humano, conforme descrevem Cooper e Law (2006). Bicos de carga de indução foram adaptados à uma câmara de pulverização, com o objetivo de uniformizar as aplicações dos compostos de bronzeamento. Os resultados obtidos mostram que a efetividade das aplicações dobraram em comparação com um sistema que não utilizava técnicas de indução eletrostática, uma vez que algumas áreas do corpo humano que antes não eram alcançadas pelos jatos foram alcançadas a partir desse sistema.

Maski e Durairaj (2010) apresentaram um estudo considerando pulverizadores eletrostáticos operando com água, com seis valores de vazão diferentes. Através do processo de eletrificação indireta, os autores variaram os níveis de tensão, observando a relação carga/massa obtida. O sistema, denominado *Air-assisted electrostatic-induction spray-charging* (AEISC), é composto por um bico de carregamento por indução, uma fonte de alimentação de alta tensão, um tipo de ventilador portátil alimentado por um motor à gasolina, um reservatório para o defensivo e uma mangueira de pulverização. Foram aplicados pulsos de alta tensão a um eletrodo, e o tanque da calda foi aterrado. A vazão do líquido foi controlada por um regulador de fluxo, e uma ponta de prova de alta tensão foi

utilizada para medir o potencial elétrico da fonte de alimentação. O sistema de medição utilizado era composto por uma gaiola de Faraday, um conversor de carga-tensão e um computador para aquisição e processamento de dados. Os autores observaram que o valor da relação carga/massa está diretamente relacionado à variação da tensão de aplicação e da vazão líquida, abordados em duas diferentes configurações de sistema, onde são apresentadas curvas ilustrando que, ao aumentar-se os níveis de alta tensão, assim como a vazão líquida, irá alterar o resultado da relação carga/massa.

Sasaki et al. (2013) realizou testes práticos em uma plantação de café com um pulverizador eletrostático (*Electrostatic Spraying Systems*, modelo ESS MBP 4.0) com tanque de capacidade para 15 l, buscando comparar o sistema aos modelos convencionais. Os testes foram realizados em plantas com 1,8 m de altura e uma vazão de $0,2 \text{ l min}^{-1}$, com um sistema de indução indireta para eletrificação das gotas. Utilizando o mesmo equipamento, os autores realizaram testes com o sistema de eletrificação ligado e desligado. Para analisar os resultados, após o processo de pulverização, as plantas foram fotografadas e as imagens obtidas foram processadas. Os autores concluíram que o sistema eletrostático proporcionou um aumento de aproximadamente 37% na deposição com relação à um sistema convencional.

Al-Mamury et al. (2014) apresentaram um estudo envolvendo simulações através de *software* que trabalha com o método de elementos finitos, buscando modelar fenômenos relacionados ao ambiente, temperatura, umidade e pressão no desempenho de pulverizadores eletrostáticos. Um protótipo do sistema simulado foi desenvolvido e avaliado em laboratório, onde foram aplicadas tensões entre 0,3 kV e 1,07 kV, pressões entre 5 e 35 psi e diferentes tipos de bicos. Para as medições de campo elétrico, os autores utilizaram uma gaiola de Faraday e um eletrômetro programável. Como resultados, os autores mediram experimentalmente valores muito próximos aos obtidos através de simulação, destacando-se os resultados obtidos com bicos do tipo cone, que apresentaram uma relação carga/massa de aproximadamente 14,60 mC/kg.

Os trabalhos mostram que para o projeto de um pulverizador, é importante inicialmente modelar os parâmetros para que seja possível estimar os valores de relação carga/massa necessários para que de fato ocorra um aumento de eficiência do sistema eletrostático em relação ao sistema convencional. Os autores também relatam que é necessário levar em consideração vários efeitos que envolvem outros parâmetros físicos do sistema, de modo a ajustar os valores de tensão e vazão de forma a maximizar a quantidade de carga induzida nas gotas. Esses fatores serão abordados na próxima seção deste trabalho, que apresenta uma revisão teórica com alguns dos métodos propostos pelos autores citados.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos. No capítulo 1, apresenta-se uma contextualização geral sobre o tema proposto, destacando-se os pontos que motivaram o estudo do tema. Além disso, o capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, onde apresentam-se trabalhos que serviram como referência para o desenvolvimento deste projeto.

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica a cerca dos principais pontos que devem ser considerados ao longo do projeto de um sistema de pulverização eletrostático. São descritas as principais características de pulverizadores tradicionais, técnicas de eletrificação existentes e modelagem matemática necessária para estimar a relação carga/massa.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada ao longo do trabalho, tanto para a etapa de projeto quanto para a etapa experimental.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos tanto abordagem teórica quanto na abordagem experimental, comparando o desempenho do pulverizador proposto com o desempenho de outros sistemas descritos na literatura.

Por fim, no capítulo 5 são descritas as considerações finais, apresentando propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 Revisão Teórica

Para compreensão do funcionamento de um pulverizador eletrostático é preciso definir alguns parâmetros físicos assim como suas características construtivas. Apresentar o que é a pulverização inicialmente para que o conceito de indução eletrostática seja introduzido, assim como os tipos de eletrificação, a relação carga/massa e sua importância, dando ênfase na eficiência da tecnologia comparando-as com pulverizadores convencionais.

2.1 A Pulverização

Um dos pulverizadores mais utilizados e conhecidos é o pulverizador costal manual. Seu uso é predominante entre os agricultores de pequeno porte, devido ao seu custo mais acessível e de simples manuseio (RUAS; BALAN; SAAB, 2011). O dispositivo consiste, basicamente, de um reservatório onde são armazenados os produtos químicos (ou defensivos), uma haste por onde acontece a vazão do líquido, gatilho e bicos. Uma figura ilustrativa pode ser encontrada no Anexo A. O tipo de geometria dos bicos depende, basicamente, do tipo de alvo no qual serão realizadas as aplicações, e para pulverizadores costais, normalmente são do tipo cone ou do tipo leque.

Uma das dificuldades apresentadas por este tipo de pulverizador está no quesito controle de pressão e vazão, pois trata-se de um sistema que não possui nenhum dispositivo que possa regular a quantidade e intensidade no momento de aplicação dos líquidos. Este é um critério importante que deve ser analisado para escolha do bico a ser utilizado, uma vez que o tamanho das gotas geradas interferem diretamente na eficiência em deposição. Usualmente, os tamanhos das gotas são informados pelos manuais dos fabricantes, organizados através de classes, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela com as classes de tamanhos de gotas

Muito Fina	<150 μm
Fina	150 a 250 μm
Média	250 a 350 μm
Grossa	350 a 450 μm
Muito Grossa	450 a 550 μm
Extremamente Grossa	>550 μm

Fonte: Adaptado de Teejet Technologies (2014).

As tabelas fornecidas pelos fabricantes também apresentam informações de vazão (l/min) e pressão (psi ou bar), que costumam ser utilizados pelos agricultores para definir a velocidade de deslocamento do pulverizador em função da vazão aplicada dese-

jável (TEEJET TECHNOLOGIES, 2014). Em relação as características construtivas, são encontrados bicos fabricados em cerâmica, bastante resistentes a abrasão, bicos de aço inox, mais resistentes em ambientes com alta umidade, e bicos de plástico, que possuem um custo menor em comparação com os anteriores, mas, em contrapartida, possuem uma durabilidade inferior devido ao desgaste natural do material.

Na tentativa de minimizar os problemas envolvendo o controle de pressão e vazão, surgiram pulverizadores com dispositivos elétricos para auxiliar os aplicadores e otimizar as formas de deposição. Estes tipos de pulverizadores utilizam-se de uma bomba para controle de vazão, mantendo-a constante uma vez que os tamanhos das gotas têm influência direta com a pressão exercida (FERNANDES et al., 2007). A alimentação da bomba é feita através de uma bateria, um sensor é utilizado para monitorar a pressão do sistema e o reservatório possui capacidade próximas a 18 l, em pulverizadores comerciais. Uma ilustração pode ser verificada no Anexo A. Apesar de sua eficiência e praticidade, estes equipamentos possuem um preço superior quando comparado aos costais manuais. Vale ressaltar que pulverizadores elétricos são diferentes dos pulverizadores eletrostáticos.

Além dos pulverizadores costais manuais e elétricos, existem dispositivos capazes de operar com gotas muito finas, chamados atomizadores. Esses dispositivos podem ser utilizados tanto na agricultura quanto em aplicações de dedetização, onde um spray bastante fino deve ser aplicado no ambiente. Em geral, esses sistemas possuem um sistema de ventilação, que impulsiona as micro gotas geradas a longas distâncias.

Na agricultura, os atomizadores conseguem alcançar distâncias maiores em comparação com os pulverizadores costais, que possuem características de aplicação mais locais. Alguns modelos de atomizadores para utilização em campos da agricultura trabalham com motores a combustão, que apresentam uma potência maior no momento das aplicações alcançando maiores distâncias.

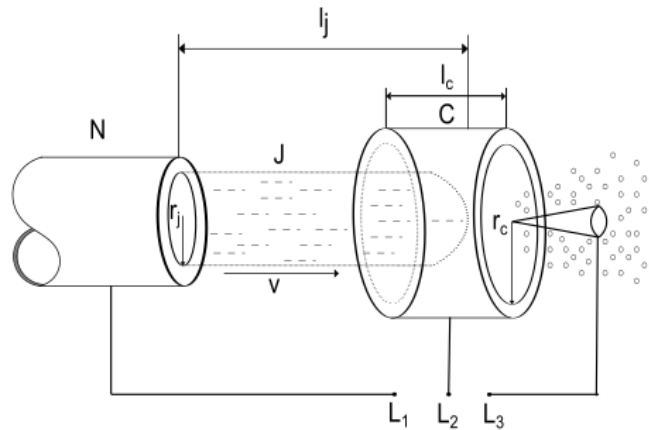
Como já mencionado, uma das formas de se aumentar a eficiência na aplicação de defensivos em plantações é através da utilização de sistemas eletrostáticos. Para casos envolvendo pulverizadores costais, há no mercado algumas empresas que comercializam os chamados *kits* eletrostáticos, compostos por uma ponteira eletrostática (onde serão aplicados os níveis de alta tensão), dois cabos de alta tensão, dois cabos juntamente com uma corrente de aço para aterramento conectados ao circuito gerador, uma vela de ignição e um *niple* de mangueira (SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO ELETROSTÁTICO, 2017).

Há diferentes formas de se eletrificar as gotas, e a maneira como o processo é realizado irá influenciar diretamente nos níveis de corrente induzida nas gotas. Na sequência, serão descritos alguns dos principais métodos apresentados na literatura.

2.2 Eletrificação de gotas

Na Figura 1, Law (1978) apresenta um arranjo composto por bico, anel e ponteira, utilizado para representar três métodos de eletrificações de gotas distintos. Um bico N com raio r_j é utilizado para aplicar um jato J com velocidade v através de um anel de raio r_c com comprimento l_c , separados por uma distância l_j . Através das conexões elétricas entre L_1 , L_2 e L_3 , é possível alterar o tipo de sistema de eletrificação desejado.

Figura 1 – Geometria referente às partículas sendo carregadas.



Fonte: Adaptado de Law (1978).

Antes de detalhar cada uma destas técnicas, alguns conceitos da física precisam ser apresentados, além dos fenômenos de indução utilizados para o carregamento de cargas.

Inicialmente, é preciso definir o conceito de carga elétrica, definida de forma escalar como (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1994)

$$q = ne, \quad (2.1)$$

onde q representa a carga elétrica (C), n é o número de elétrons perdidos ou recebidos e $e = 1,60 \times 10^{-19} C$ é a carga elementar constante.

De acordo com a lei de *Coulomb* (C), cargas de mesmo sinal se repelem e cargas de sinais opostos se atraem (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1994). Essa definição é importante para a compreensão física dos fenômenos de eletrificação, pois esse processo envolve, basicamente, a atração entre gotas e alvo.

Algebricamente, a força elétrica (F_e) entre duas cargas pontuais (q_1) e (q_2) é descrita de forma escalar como

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad (2.2)$$

onde $k_e = 8,98 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ é a constante de *Coulomb*, q_1 e q_2 são as cargas pontuais dadas em (C) e r é a distância entre as mesmas, dada em metros (m) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1994).

Por definição, o campo elétrico é, de forma resumida, um campo de força provocado por ações de cargas elétricas, com características vetoriais (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1994). Algebricamente, o campo elétrico (\vec{E}) pode ser definido como

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0}, \quad (2.3)$$

onde \vec{F}_e é a força eletrostática e q_0 é a carga (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1994).

Post (2018b) apresenta uma análise que descreve fisicamente o comportamento das gotas no momento da aplicação em folhas, tendo-as como alvo. O autor relata que o limiar da força eletrostática aplicada deve ser maior do que o peso da queda da gota e, ao mesmo tempo, suficiente para superar as barreiras aerodinâmicas do alvo.

A Figura 2 apresenta uma representação do sistema utilizado por Post (2018b). Na Figura 2a, cargas opostas separadas a uma distância r se atraem, como definido pela lei de *Coulomb*. Na Figura 2b, a presença de uma superfície de potencial neutro entre as duas cargas faz com que as cargas positivas sejam atraídas para esta superfície, tornando-as nêutrons. Na Figura 2c, ao ser aplicada uma diferença de potencial, um campo elétrico é induzido, direcionando as partículas ali presentes.

Levando-se esta análise para a prática, se uma folha estiver em um potencial zero (ou aterrado) conforme mostrado na Figura 2d, o elétrons, carregados negativamente, serão atraídos pelo potencial mais positivo da folha fazendo com que a atração entre as cargas aconteça.

De acordo com Post (2018b), uma combinação entre campo aplicado, cargas e forças aerodinâmicas é necessária para que ocorra a atração das gotas pelas plantas. A modelagem matemática que rege este tipo de procedimento físico é complexa, pois a força representadas na Figura 2 são não-lineares, fazendo com que as trajetórias das gotas de pulverização tenha um comportamento difícil de prever. Além disso, há inúmeras opções geométricas e operacionais num sistema de pulverização, e uma simples substituição de um bico pode alterar a eficiência do sistema.

Exitem três formas de se carregar uma carga neutra, sendo: o carregamento por fricção, por contato ou por indução. O processo mais comum e o escolhido para o desenvolvimento deste trabalho consiste em um carregamento por indução, onde uma barra ou superfície cilíndrica é carregada positivamente, e próxima a ela está presente uma esfera inicialmente neutra.

Uma imagem ilustrativa do processo de indução é apresentada na Figura 3. Tal fenômeno físico é explicado por Camara et al. (2018), descrevendo que ao se aproximar uma esfera da barra carregada positivamente, as cargas positivas presentes nesta esfera

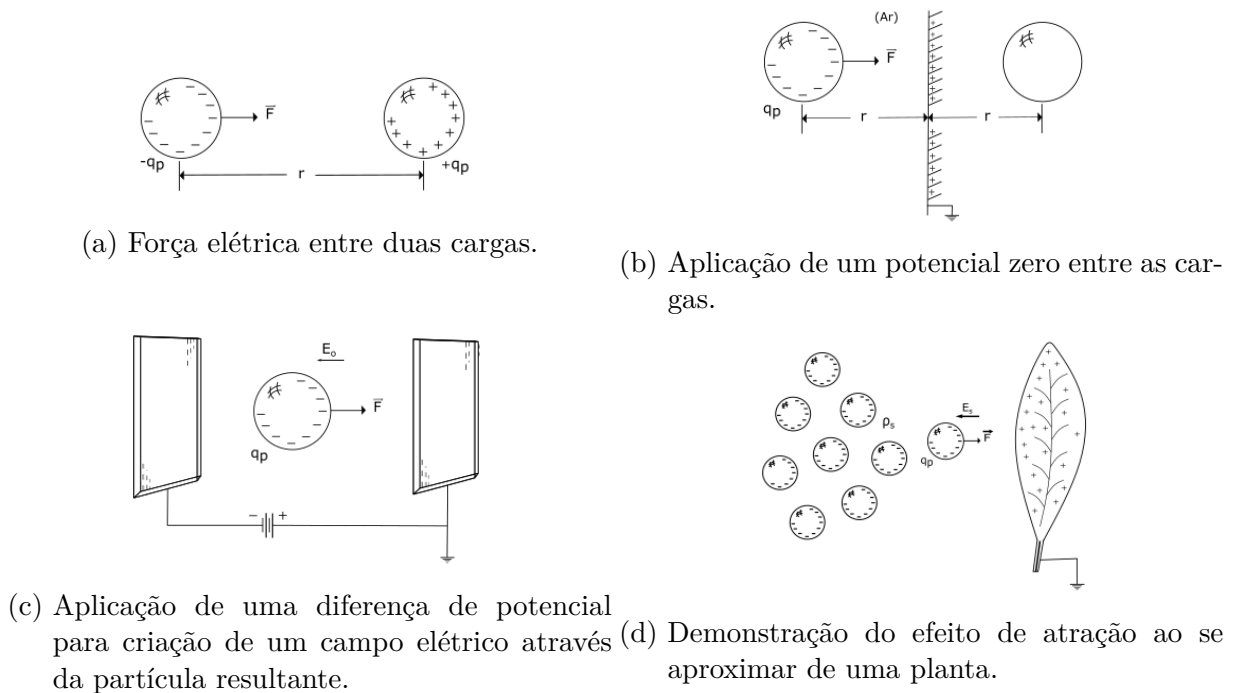
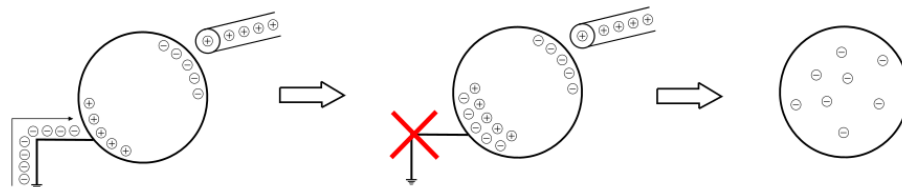


Figura 2 – Fenômeno de atração explicado pela eletrostática.

são repelidas pelas cargas positivas presentes no cilindro. Em contrapartida, as cargas negativas são atraídas pela barra, separando dessa forma as cargas presentes na esfera.

Figura 3 – Esquema de carregamento por indução.



Fonte: Adaptado de Camara et al. (2018).

Para finalizar o processo de indução, é preciso neutralizar o excesso de cargas positivas da esfera. Para isso, a carga é conectada ao potencial zero para que ocorra a separação entre os prótons e elétrons. Por fim, o potencial zero é removido da esfera e a barra carregada é levada para longe, encerrando o processo de carregamento por indução.

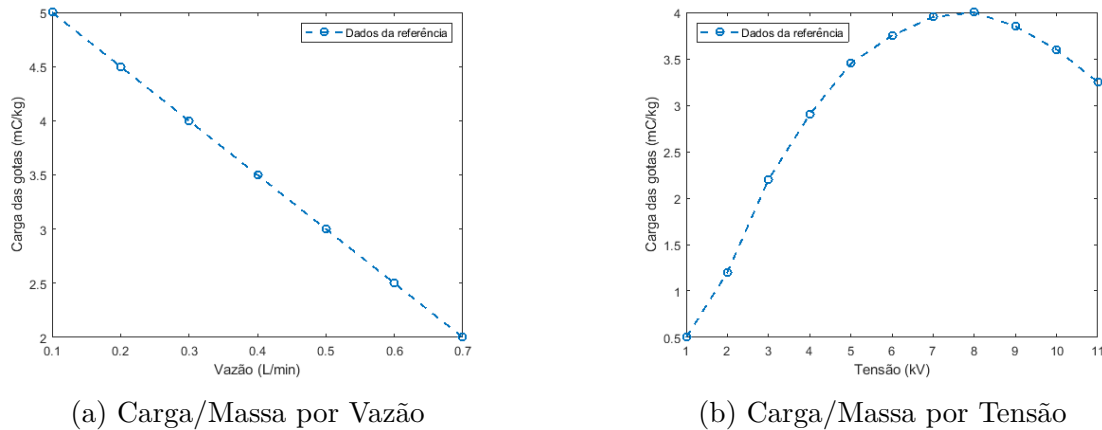
2.3 Relação Carga/Massa

Uma das formas de se determinar o quão eficiente é um pulverizador eletrostático consiste em definir a quantidade de carga que se pode induzir numa gota em função de sua massa. De forma direta, quanto maior o valor da relação carga/massa, mais gotas serão possíveis carregar e, conseqüentemente, mais eficiente se torna um pulverizador. Como em sistemas de eletrificação tem-se cargas muito pequenas, é comum a unidade ser definida

em mC/kg. Em testes realizados por Maski e Durairaj (2010), a relação carga/massa alcançou um pico de, aproximadamente, 19 mC/kg, para uma tensão de 7,5 kV com vazão de 30 ml/min.

Nos testes realizados por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002), foram levantadas duas curvas, visando analisar a relação carga/massa para diferentes tensões e vazões, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Relação Carga/Massa em diferentes vazões e tensões.



Fonte: Adaptado de Chaim, Pessoa e Ferracini (2002)

Na primeira curva, os autores variaram a vazão numa faixa compreendida entre 0,1 e 0,7 l/min (Figura 4a) e na segunda, variaram a tensão aplicada entre 1 kV e 11 kV (Figura 4b).

É possível observar os valores de carga das gotas diminuem em função do aumento da vazão do bico, e que há um valor de tensão aplicado (aproximadamente 8 kV) que maximiza a relação carga/massa. Essa característica da curva de tensão está relacionada ao efeito corona, que será discutido posteriormente. Vale ressaltar que dependendo dos compostos químicos utilizados os resultados encontrados pelos autores podem ser diferentes.

A Tabela 2 representa numericamente a eficiência encontrada nos experimentos executados por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002). Observe que, para uma relação de carga/massa de 4 mC/kg, obteve-se um aumento de eficiência de 62% em comparação com sistemas de pulverização tradicionais.

No trabalho apresentado por Law (1978), são descritas as etapas necessárias para estimar o valor de carga que será induzido nas gotas a partir da geometria do sistema de pulverização, tamanho de gota, vazão, velocidade de escoamento do fluido e dos níveis de tensão aplicados.

Primeiramente, calcula-se o valor da carga (q_p) (C),

$$q_p = \frac{\epsilon_0 r_p V}{\ln \frac{2r_c}{r_p}}, \quad (2.4)$$

Tabela 2 – Eficiência obtida utilizando alvo artificial esférico de 0,2 m de diâmetro, com vazão calibrada para 0,3 l/min.

Deposição do Traçador	Intensidade de Carga (mC/kg)				
-	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Quantidade Média Depositada	3,6	5,6	8,4	10,8	12,3
Eficiência (%)	18	28	42	54	62

Fonte: Adaptado de Chaim, Pessoa e Ferracini (2002).

onde r_p é o raio (m) da partícula (ou da gota), r_c é o raio (m) do eletrodo de indução, V é a tensão aplicada em Volts (V) e $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ é a constante de permissividade do vácuo.

Sabendo-se que o volume de uma esfera é definido como

$$V_{esf} = \frac{4}{3}\pi r_p^3, \quad (2.5)$$

onde V_{esf} é o volume (m^3), pode-se estimar a massa (kg) de uma gota a partir da relação

$$massa = \rho_l V_{esf}, \quad (2.6)$$

onde ρ_l é a densidade do líquido (kg/m^3).

Finalmente, a relação carga/massa (C/kg) pode ser obtida por

$$\frac{carga}{massa} = \frac{q_p}{massa}. \quad (2.7)$$

No entanto, esta não é a única maneira de encontrar este parâmetro. Mamidi et al. (2012) apresentam duas formas distintas da abordada anteriormente que se complementam de forma teórica. Na primeira delas, utiliza-se a relação entre intensidade do campo elétrico formado quando se aplicam os níveis de alta tensão e o tamanho das gotas a serem carregadas. Dessa forma, tem-se

$$\frac{carga}{massa} = \frac{3\epsilon_0(1.64E_j)}{\rho_l r_p}, \quad (2.8)$$

onde E_j é o campo elétrico (V/m). A intensidade deste campo elétrico pode ser calculada em função do raio do eletrodo e da tensão aplicada através da expressão (ATTWOOD, 1967; LAW, 1978),

$$E_j = \frac{V}{r_j \ln\left(\frac{r_c}{r_j}\right)}, \quad (2.9)$$

onde V é a tensão aplicada (V), r_j é o raio do bico (m) e r_c é o raio do eletrodo (m).

Na segunda forma para o cálculo da relação carga/massa, relaciona-se a corrente de nuvem (i_c) com o fluxo de líquido que flui através do bico de pulverização. Algebricamente, tem-se

$$\frac{\text{carga}}{\text{massa}} = \frac{i_c}{Q_m}, \quad (2.10)$$

onde i_c é a corrente de nuvem (A) e Q_m é o fluxo líquido (kg/s). Q_m pode ser calculado através da vazão (m^3/s) vezes a densidade do líquido (kg/m^3), ou seja

$$Q_m = Q\rho_l, \quad (2.11)$$

obtendo dessa forma a relação carga/massa através da corrente de nuvem, parâmetro este que será primordial para a análise experimental apresentada neste trabalho.

Por fim, Post (2018a), Mamidi et al. (2012) apresentam uma expressão que descreve o valor máximo possível a ser obtido considerando como parâmetros a tensão e a densidade superficial do líquido, além do raio das partículas. De forma direta,

$$\frac{\text{carga}_{\text{max}}}{\text{massa}} = \frac{12\sqrt{2}\sqrt{\epsilon_0\sigma}}{\rho_l d^{3/2}}, \quad (2.12)$$

onde d é o diâmetro (m) das gotas e σ é a tensão superficial do líquido (N/m).

Estas equações podem apresentar diferenças entre os resultados por não considerarem em suas variáveis todos os fenômenos e efeitos produzidos no momento de aplicação do defensivo. Algumas diferenças serão consideradas neste trabalho.

2.4 Efeito Corona

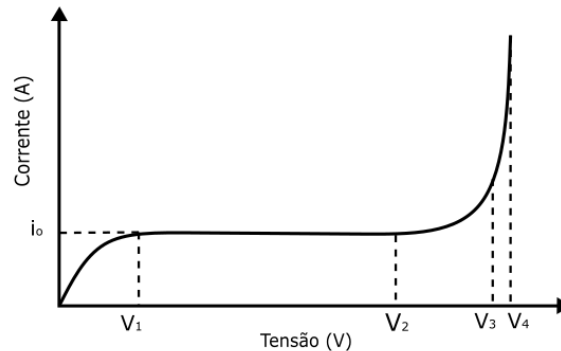
O efeito corona é definido como uma descarga elétrica, que surge após um processo de ionização gerado a partir do contato entre um campo elétrico de grande intensidade com partículas de umidade e poeira presentes no ar. Trata-se de um fenômeno que ocorre normalmente próximo a regiões ou estruturas energizadas (SOUZA, 2009).

A intensidade elevada do campo elétrico supera a rigidez dielétrica do ar, provocando o surgimento de descargas. Dessa forma, o efeito é também conhecido como uma descarga parcial. O processo de formação do efeito corona é definido por um mecanismo de avalanche de elétrons. Com a variação da tensão aplicada ao eletrodo, a corrente inicialmente aumenta de forma proporcional, até que a mesma permaneça constante, conforme ilustrado na Figura 5 entre os pontos V_1 e V_2 .

Essa corrente é gerada devido aos elétrons livres presentes no ar que, sob a ação de um campo elétrico, são acelerados fazendo com que a energia cinética adquirida por eles se torne suficiente para que, ao colidirem com partículas neutras, sejam ionizadas num processo denominado como colisão elástica (SOUZA, 2009).

O crescimento exponencial observado entre os pontos V_2 e V_3 na Figura 5 parte do princípio de que, na ionização, a molécula neutra libera elétrons, tornando-se um íon positivo. Com a aceleração deste elétron e com a repetição do processo descrito anteriormente, ocorre um aumento de elétrons livres a cada nova colisão. Dessa forma, para

Figura 5 – Curva resultante de um processo de ionização do efeito corona.



Fonte: Adaptado de Souza (2009).

tensões elevadas, a corrente aumenta mais rapidamente, produzindo uma descarga maior (SOUZA, 2009).

Law (1978), Chaim, Pessoa e Ferracini (2002) verificaram que este fenômeno interfere diretamente no processo de eletrificação, uma vez que um valor mínimo de tensão deve ser aplicado para o carregamento de gotas, mas esse valor não pode ultrapassar um certo limite para que não ocorram perdas por efeito corona.

Law (1978) apresenta uma equação que possibilita o cálculo aproximado do valor limite de tensão que pode ser aplicada para que este fenômeno não aconteça. Esse parâmetro, denominado tensão de corona (V_o), é definido como

$$V_o = (30r_j\delta + 9\sqrt{r_j\delta}) \log\left(\frac{r_c}{r_j}\right), \quad (2.13)$$

onde V_o é a tensão (kV), r_j é o raio do bico (m), r_c é o raio do anel de indução (m) e $\delta \approx 1 \text{ kg/m}^3$ é a constante da densidade relativa do ar, ilustrados através da Figura 1.

Através da Equação (2.13), é possível estimar o limite máximo de tensão que, por teoria, será capaz de realizar o processo de eletrificação da maneira mais eficiente possível, respeitando as demais configurações necessárias para o projeto de um pulverizador eletrostático. Uma vez ultrapassado este valor, haverá possíveis decaimentos no valor da relação carga/massa devido ao surgimento do efeito corona.

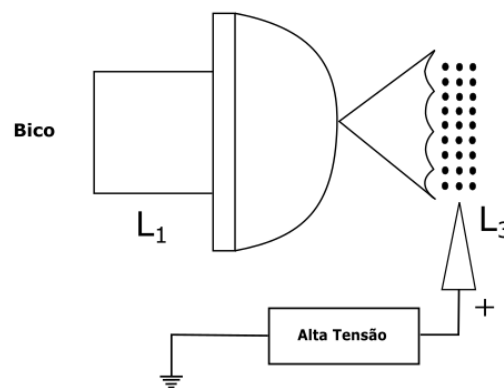
Há alguns trabalhos em que os autores propõe sistemas de eletrificação de gotas que utilizam o princípio do efeito corona para carregar eletricamente as gotas. Como já mencionado, o sistema apresenta uma série de desvantagens, que serão descritas na próxima seção.

2.5 Eletrificação por Efeito Corona

Neste processo de eletrificação, valores elevados de tensão são aplicados a um eletrodo pontiagudo, ionizando o ar. No instante em que as gotas produzidas pelo bico se chocam com as cargas livres, ocorre o carregamento dessas gotas.

Nessa configuração, considerando os pontos L_1 , L_2 e L_3 na Figura 1, tem-se o ponto L_3 conectado ao terminal positivo de uma fonte de alta tensão, enquanto o bico não possui conexão através do ponto L_1 , não utilizando o anel de indução e conseqüentemente o ponto L_2 da Figura 1, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Sistema de eletrificação por efeito corona.



Fonte: Adaptado de Chaim (2006).

De acordo com Law (1978), nesse tipo de eletrificação as gotas devem apresentar tamanhos menores do que $0,5 \mu\text{m}$, enquanto Chaim (2006) afirmam que este tipo de procedimento pode abranger gotas de até $20 \mu\text{m}$ com boa eficiência.

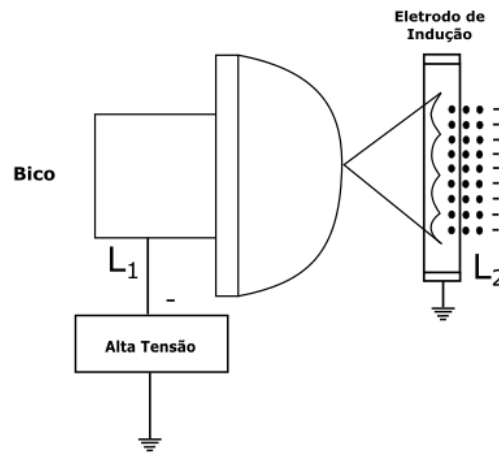
Segundo Chaim (2006), gotas maiores não adquirem carga com intensidade suficiente para durante esse processo, influenciando diretamente no valor da relação carga/massa. Como gotas de tamanhos maiores não são muito utilizadas em aplicações agrícolas, e por operar com valores elevados de tensão (gerando uma preocupação no quesito segurança), esta técnica não é comumente utilizada em aplicações industriais e comerciais.

2.6 Eletrificação Direta

Na eletrificação direta, a aplicação da alta tensão para criação do campo eletrostático acontece diretamente ao bico, mantendo-se o eletrodo de indução fixado ao potencial zero, conforme mostrado na Figura 7.

Fazendo uma análise comparativa com a Figura 1, para a configuração de um sistema por eletrificação direta, conecta-se ao ponto L_1 uma fonte de alta tensão (bico

Figura 7 – Sistema de eletrificação direta.



Fonte: Adaptado de Chaim (2006).

N) e aterra-se o eletrodo de indução (ponto L_2), não utilizando neste caso o eletrodo pontiagudo (ponto L_3).

Este procedimento costuma ser aplicado em pulverizadores eletro-hidrodinâmicos. Além disso, para líquido com baixa condutividade elétrica, a alta tensão aplicada ao bico favorece a transferência de carga para as gotas (CHAIM, 2006).

Em pulverizadores eletro-hidrodinâmicos, líquidos são submetidos a grandes campos eletrostáticos, fazendo com que cargas surjam na superfície. Essas cargas provocam uma força contrária a produzida pela tensão aplicada que, ao ser superada, provoca um desequilíbrio hidrodinâmico. Nesse momento, pequenas cristas aparecem na superfície, produzindo pequenos filetes líquidos que acumulam cargas em suas extremidades. Para casos extremos, onde tensões muito elevadas são aplicadas, níveis críticos de força são aplicados as gotas, rompendo as mesmas (CHAIM, 2006).

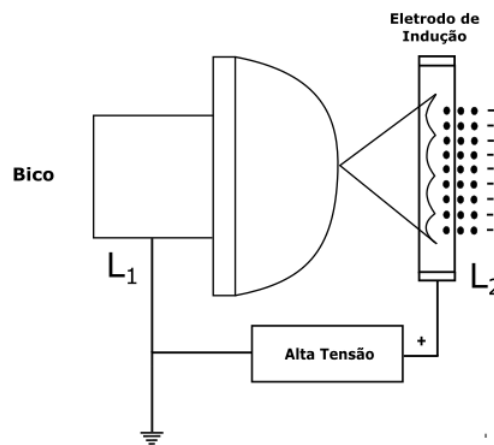
Em sistemas por eletrificação direta, os valores de campo eletrostático, tensão superficial e taxa de escoamento do líquido são mantidos constantes, fazendo com que a formação das gotas tenham carga e tamanho constantes. O tamanho das gotas depende necessariamente da tensão superficial e da intensidade do campo. Dessa forma, somente líquidos especiais podem ser pulverizados utilizando este processo. Óleos minerais e vegetais possuem características físicas desejáveis para utilização desta técnica, sendo necessário apenas a adição de solventes polares com o objetivo de melhorar a condutividade elétrica do líquido (CHAIM, 2006).

Apesar de ser um processo utilizado em sistemas industriais, existe um risco envolvendo os aplicadores quando se trata de um pulverizador costal devido aos níveis de alta tensão estarem diretamente fixados ao bico do pulverizador, fazendo com que o aplicador tenha o risco de contato direto com as conexões, como observado por Law (1978).

2.7 Eletrificação Indireta

Neste processo, o líquido (e conseqüentemente o bico) permanecem aterrados (potencial zero), como mostrado através da Figura 8. Comparando com o esquema apresentado na Figura 1, ocorre uma inversão da configuração estabelecida para o caso da eletrificação direta. Conecta-se ao ponto L_2 o nível de alta tensão referente ao anel de indução, mantendo o bico N aterrado através do ponto L_1 , não utilizando o eletrodo pontiagudo referente ao ponto L_3 .

Figura 8 – Sistema de eletrificação indireta.



Fonte: Adaptado de Chaim (2006).

Nesse tipo de eletrificação, as gotas adquirem a carga na presença de um campo eletrostático muito forte formado entre o eletrodo de indução mantido na alta tensão e o jato de gotas. Para o funcionamento, o eletrodo de indução deve ser posicionado na região da borda do jato onde as gotas se formam, em uma distância mínima suficiente para evitar centelhas de descarga entre o eletrodo e o líquido (CHAIM, 2006).

A posição onde o eletrodo deve estar localizada (Figura 1) pode ser estimada através do equacionamento apresentado por Law (1978). De acordo com o autor, é possível determinar o alcance horizontal do jato, denominado como l_j , através da relação

$$l_j = vt_f, \quad (2.14)$$

onde t_f é o tempo (ms) de aplicação do jato e v é a velocidade (m/s) de deslocamento do fluído, de acordo com as especificações do bico.

No entanto, trata-se de uma estimativa, pois o valor de t_f e da velocidade de aplicação v podem variar caso ocorram variações de pressão no momento da aplicação.

Num procedimento de eletrificação indireta, as gotas adquirem cargas de sinal contrário ao do eletrodo onde são aplicados altos níveis de tensão. Dessa forma, o material carregado é atraído de volta para o pulverizador, podendo causar escorrimento de líquido.

Esse efeito pode causar um colapso no sistema, comprometendo a eletrificação das gotas. Dessa forma, é preciso que o eletrodo seja posicionado de forma estratégica para que o efeito de carregamento aconteça, conforme ilustrado na Figura 1 (CHAIM, 2006). Além disso, pode-se utilizar ventiladores ou ar-comprimido para aumentar a velocidade de escoamento das gotas, reduzindo o acúmulo indesejado de líquido.

Para que as gotas sejam eletrificadas, é necessário que as mesmas permaneçam próximas ao campo eletrostático por um tempo mínimo, chamado de tempo para a transferência de carga, definido como

$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma}, \quad (2.15)$$

onde ϵ é a permissividade do líquido ($C^2/N \cdot m^2$) e σ é a condutividade elétrica do líquido (Ω/m).

Em termos da constante dielétrica do líquido K e da resistividade ρ ($\Omega \cdot m$),

$$\tau = K\rho\epsilon_0, \quad (2.16)$$

onde $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ é a constante de permissividade do vácuo.

De forma teórica, Law (1978) afirma que o tempo de transferência τ deve ser menor que o período de tempo t_f , ou seja,

$$\tau < t_f, \quad (2.17)$$

para que ocorra um carregamento de carga consistente baseado nas técnicas de eletrificação indireta.

Outra característica física que precisa ser definida num processo de indução eletrostática é a intensidade do campo elétrico exercido no momento da aplicação dos níveis de alta tensão no eletrodo.

Considerado uma geometria com dimensão finita, é necessário estabelecer através da Lei de *Gauss* a densidade superficial (ρ_s) presente no jato. Com ela, será possível encontrar um importante parâmetro da modelagem matemática do processo de eletrificação indireta, conhecido como a nuvem de pulverização. Por definição

$$\rho_s = \epsilon_0 E_j, \quad (2.18)$$

onde ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo.

A nuvem de pulverização (ou corrente de nuvem i_c) é, em termos elétricos, a corrente que surge após a criação do campo elétrico exercido através da diferença de potencial aplicado. Algebricamente,

$$i_c = 2\pi r_j \rho_s v, \quad (2.19)$$

onde r_j é o raio do jato (m), ρ_s é a densidade superficial (C/m²) e v é a velocidade de aplicação (m/s) (LAW, 1978).

Desenvolvendo a equação (2.19) em função da tensão aplicada (V) e da vazão (Q), tem-se

$$i_c = 2\pi r_j \epsilon_0 E_j v. \quad (2.20)$$

Substituindo o campo elétrico encontrado através da equação (2.9) na equação (2.20), pode-se estimar o valor i_c em termos da tensão aplicada (V) através da relação

$$i_c = \frac{2\pi\epsilon_0 V v}{\ln \frac{r_c}{r_j}}. \quad (2.21)$$

A vazão Q pode ser definida como

$$Q = vA, \quad (2.22)$$

onde Q é a vazão (m³/s), v é a velocidade de escoamento do fluido (m/s) e A é a área da seção transversal do bico (m²), definida também como πr_j^2 .

Isolando a velocidade v na equação (2.22) e substituindo na equação (2.21), pode-se definir a corrente de nuvem de pulverização em função da tensão aplicada e da vazão associada a partir da relação

$$i_c = \frac{2\epsilon_0 V Q}{r_j^2 \ln \frac{r_c}{r_j}}. \quad (2.23)$$

No entanto, em decorrência de análises envolvendo o surgimento de cristas devido à formação de gotículas no momento das aplicações, pode-se modificar a equação (2.23), resultando em

$$i_c = \frac{\epsilon_0 V Q}{t_s r_j \ln \frac{r_c}{r_j}}, \quad (2.24)$$

onde t_s é a espessura do tubo por onde o líquido passa (m) (LAW, 1978; JYOTI, 2017).

Na abordagem apresentada por Mamidi et al. (2012), o raio da gota foi considerado como parâmetro para cálculo da corrente de nuvem, culminando na equação

$$i_c = \frac{3Q}{r_p} \rho_s, \quad (2.25)$$

onde r_p é o raio da gota (m) e ρ_s é a densidade superficial da carga (C/m²).

Com relação ao tamanho das gotas expurgadas, o fabricante não apresenta esta informação no manual técnico. Dessa forma, foi realizada uma análise algébrica com objetivo de estimar esses valores. Cloupeau e Prunet-Foch (1989) desenvolveram equações para diversas situações envolvendo jatos do tipo cone (o mesmo utilizado neste trabalho).

Em uma das expressões é descrito o diâmetro médio baseado na vazão (Q) do líquido e na frequência (f) de gotas que saem do jato, da seguinte forma

$$\phi_{D,m} = \left(\frac{6Q}{\pi f} \right)^{1/3} \quad (2.26)$$

onde Q é a vazão (m^3/s) e f é a frequência de emissão de gotas.

A corrente de nuvem de pulverização é um dos parâmetros mais importantes para analisar o comportamento do sistema implementado. Este será o parâmetro analisado nos ensaios realizados em laboratório, descritos nos próximos capítulos.

2.8 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram apresentadas as características, qualidades e problemas envolvendo técnicas de pulverização, abordando as diferenças entre pulverizadores convencionais, elétricos e atomizadores.

Foram apresentados alguns conceitos sobre pulverizadores eletrostáticos aplicados a agricultura, definidos três métodos distintos de eletrificação de gotas, e definidos alguns conceitos que serão importantes ao longo do desenvolvimento do trabalho, tais como relação carga/massa e efeito corona.

Finalmente, foram apresentadas as expressões necessárias para que seja realizado o projeto de um pulverizador eletrostático, levando-se em consideração os níveis de tensão, vazão, pressão e tamanho de gota desejados.

3 Metodologia

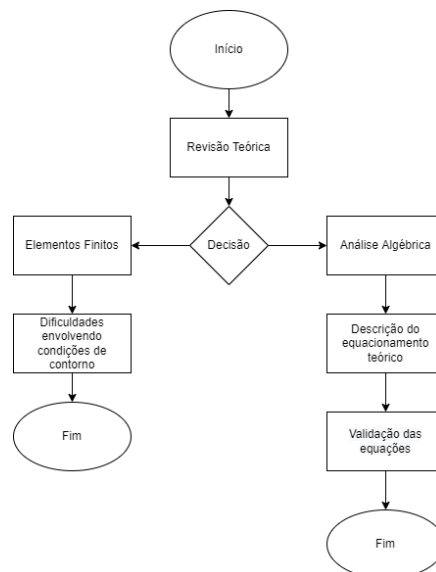
Nesta seção, serão discutidos os métodos utilizados para desenvolver o projeto de um pulverizador eletrostático, analisando as características teóricas que buscam descrever as questões físicas do sistema assim como os critérios escolhidos para realização de testes laboratoriais.

3.1 Análise Teórica

Inicialmente, considerou-se uma abordagem através do método de elementos finitos para simular o fenômeno físico de eletrificação de gotas. Para isto, utilizou-se como referência o processo demonstrado experimentalmente por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002), onde o sistema foi excitado por uma fonte de alta tensão DC variável, com tensões entre 0 e 30 kV, alimentado por uma bateria de 9 V. Os autores empregaram o método de eletrificação indireta, e os níveis de alta tensão foram aplicados à um eletrodo de indução posicionado próximo ao bico, fixado a uma distância de 8 mm, com vazão definida em 0,3 l/min.

Na segunda abordagem, o projeto do sistema foi realizado utilizando como referência as expressões apresentadas no Capítulo 2. Esses resultados foram utilizados para definir os parâmetros do protótipo testado em bancada, cujas características serão descritas nas próximas seções. A Figura 9 apresenta o fluxograma com as etapas referentes a abordagem teórica utilizada ao longo deste trabalho.

Figura 9 – Fluxograma - Parte 01.

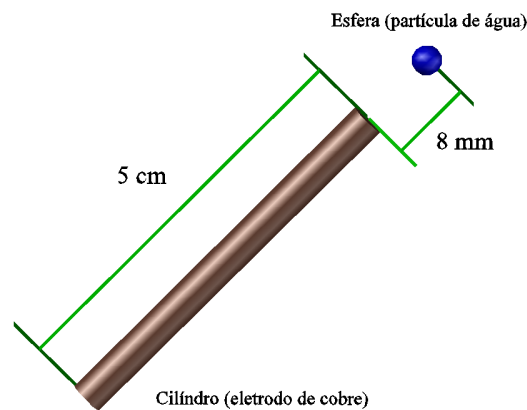


Fonte: Do Autor.

3.1.1 Método de Elementos Finitos

Utilizando o *software* COMSOL Multiphysics baseado nos métodos de elementos finitos, uma adaptação do sistema aplicado por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002) foi implementado. Seu procedimento numérico consiste em determinar soluções aproximadas. Basicamente o domínio criado é subdividido em partes menores com objetivo de descrever geometrias complexas. Na simulação, um cilindro foi criado para representar o eletrodo responsável por receber os níveis de alta tensão, com dimensões definidas em 1,5 mm de raio e 5 cm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 10. Para representação da gota, foram considerados valores definidos na Tabela 1 para descrever seu tamanho.

Figura 10 – Diagrama ilustrando a geometria construída no *software*.



Fonte: Do Autor.

Além dos parâmetros geométricos, foi preciso definir o tipo de material utilizado no cilindro e na esfera, assim como o meio que contorna ambos, determinando desta forma a região de contorno no qual serão realizados o processamento computacional pelo simulador. Nos testes, definiu-se um cilindro de cobre e uma esfera de água, com uma camada de ar entre o eletrodo de alta tensão e a esfera a ser polarizada.

Uma vez definida a geometria do processo, é preciso aplicar os níveis de tensão ao eletrodo para obtenção de valores de densidade de superfície da gota (C/m^2). Variou-se o potencial no eletrodo entre 1 e 11 kV, mesmos valores utilizados nos experimentos realizados por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002), em passos de 1 kV, coletando-se o valor da densidade de superfície (ρ_s) da gota em função da distância entre a esfera e o cilindro, fixada na simulação em 8 mm.

A Tabela 3 descreve, para cada nível de tensão, o resultado da densidade de superfície encontrado, considerando uma esfera de 550 μm . Os testes foram realizados para um tamanho de gota de cada classe de tamanhos da Tabela 1, considerado apenas o maior valor de tamanho de gota para as análises.

Para que seja possível estimar a relação carga/massa, é necessário inicialmente utilizar os resultados apresentados na Tabela 3 para determinar a quantidade de carga

Tabela 3 – Densidade de superfície para variações da tensão no eletrodo para uma esfera de 550 μm .

Tensão do eletrodo (kV)	Densidade de superfície de carga ρ_s ($\mu\text{C}/\text{m}^2$)
1,0	15,7
2,0	31,5
3,0	47,3
4,0	63,0
5,0	78,8
6,0	94,6
7,0	110,0
8,0	126,0
9,0	141,0
10,0	157,0
11,0	173,0

Fonte: Do Autor.

(Q) da esfera, relacionando o valor obtido com o valor de massa calculado de forma teórica. Os resultados serão discutidos no próximo capítulo.

3.1.2 Abordagem Algébrica

Dentre todas as possibilidades apresentadas até o momento, foram consideradas as equações apresentadas por Law (1978) (revisitadas por Maski e Durairaj (2010), JYOTI (2017)), algumas delas já demonstradas neste texto, mas que necessitam de validação para o projeto.

As equações foram implementadas em *MatLab*. Para validar a implementação do sistema, inicialmente foram utilizados os mesmos parâmetros descritos por Law (1978).

Nos testes iniciais realizados, utilizando uma tensão (V) de 1,9 kV, vazão de $1,21 \times 10^{-6}$ m^3/s , t_s igual a 0,40 mm, r_j igual a 0,51 mm e r_c definido como 1,78 mm (que assim como para os valores de t_s e r_j precisam ter seus valores convertidos para metros (m), conforme descrito no capítulo anterior), calculou-se um valor de i_c de 0,082 μA através da equação (2.21).

O segundo parâmetro determinado diz respeito ao cálculo do valor máximo de tensão que pode ser aplicado sem que ocorram perdas por efeito corona. Ao aplicar a equação correspondente, obteve-se como resultado um valor igual a 1,93 kV, que se aproxima do resultado obtido por Law (1978).

Para determinar a carga máxima (q_{max}) que pode ser carregada na gota, utilizou-se a expressão (LAW, 1978)

$$q_{max} = 8\pi\sqrt{\epsilon_0\sigma}r_p^{3/2}, \quad (3.1)$$

onde σ (N/m) é a tensão superficial do líquido.

Conhecendo-se as especificações dos bicos e considerando o valor do raio da partícula produzido pelo mesmo, é possível estimar o valor máximo de carga que pode ser induzida. Utilizando os valores de referência, encontrou-se um valor de 0,635 pC.

O autor relata em seu trabalho uma diferença entre valores de carga estimados e medidos. Essa diferença está diretamente relacionada ao conjunto de parâmetros físicos que não foram modelados pelo autor ao longo do desenvolvimento das expressões apresentadas anteriormente.

Para que seja possível utilizar o método de eletrificação indireta, é necessário definir as características geométricas do anel responsável por receber os níveis de alta tensão, tais como comprimento, raio e tipo de material. O comprimento do anel (l_c) pode ser calculado a partir da expressão

$$l_c = \frac{3\pi\eta r_p v_a (r_c^2 - r_j^2) \ln(r_c/r_j)}{q_p V}, \quad (3.2)$$

onde $\eta = 17,20 \times 10^{-6}$ Pa·s é a constante da viscosidade do ar e v_a é a velocidade axial do ar (m/s). Em seu trabalho, Law (1978) utilizou um anel posicionado a 1,27 mm do bico do pulverizador. No entanto, aplicando diretamente a equação (3.2), o resultado encontrado foi de 2,70 mm. Apesar da diferença entre o valor apresentado e o calculado, entende-se que tal fórmula fornece uma boa estimativa da especificação geométrica do anel à ser utilizado.

A constante de tempo para transferência de carga estimada a partir da equação (2.16) foi de 71 ns. Para determinar o tempo necessário para formação de gotas (t_f), utilizou-se a expressão

$$t_f = \frac{l_j}{v}, \quad (3.3)$$

onde v é a velocidade do fluido (m/s). A partir dos cálculos, obteve-se um tempo de resposta de 1,56 ms, para uma velocidade (v) estimada de 1,94 m/s.

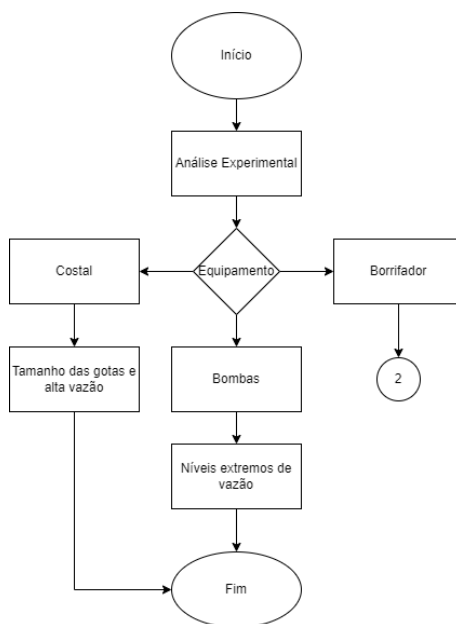
Assim como no caso dos valores de carga máxima calculado e medido, houve diferença entre os valores de relação carga/massa calculado (6,85 mC/kg) e apresentado pela referência (4,80 mC/kg). Essas variações também foram relatadas por outros autores, que também obtiveram na prática valores menores do que os estimados teoricamente. Finalmente, é importante ressaltar que, por questões econômicas, não foram abordados neste trabalho os métodos de eletrificação por efeito corona ou pelo método direto.

3.2 Análise Experimental

Tomando como base os estudos envolvendo a descrição teórica sobre técnicas construtivas e funcionais dos pulverizadores eletrostáticos pelo método da eletrificação indireta, foi idealizado um protótipo que demonstrasse experimentalmente os resultados

apresentados pela teoria. Por se tratarem de equipamentos de custo elevado, buscou-se criar um equipamento que mantivesse sua eficiência com recursos de menor valor econômico, atendendo as expectativas teóricas. Por este motivo, será visto que a aplicação terá eficácia em plantações de pequeno porte, de maneira até casual devido as características construtivas do projeto. Os fluxogramas da Figura 11, 12 e 13 buscam representar de forma resumida as análises feitas durante todo o processo de implementação do protótipo.

Figura 11 – Fluxograma - Parte 02.



Fonte: Do Autor.

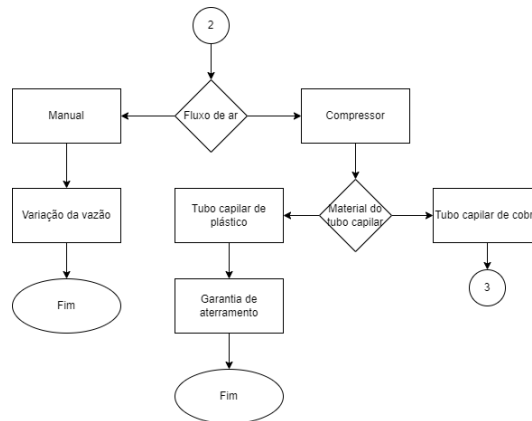
Como pode ser visto no fluxograma da Figura 11, inicialmente foram considerados três tipos de equipamentos: pulverizadores costais, pulverizadores com bombas elétricas e pulverizadores manuais. Devido a condições de vazão e tamanho de gotas apresentados pelos modelos costais e pulverizadores com bombas elétricas, para o desenvolvimento do projeto o último modelo foi escolhido.

O fluxograma da Figura 12 descreve as abordagens analisadas considerando a utilização ou não de um compressor ao longo do processo.

Como já mencionado, o projeto apresentado foi construído utilizando como base um pulverizador manual. Pulverizadores manuais do tipo *Export* possuem uma alavanca que deve ser pressionada para aplicação do líquido nos alvos. Esse tipo de mecanismo sofre grande influência do operador, que pode bombear o líquido com velocidades diferentes de escoamento dependendo da pressão aplicada. Para minimizar esse problema, o sistema de bombeamento manual foi substituído por um compressor a ar com controle de pressão.

O líquido a ser pulverizado passa por um pequeno tubo antes de alcançar o bico do pulverizador. Ao longo do ensaio, dois tipos de tubo diferentes foram analisados: um tubo plástico e um tubo de cobre.

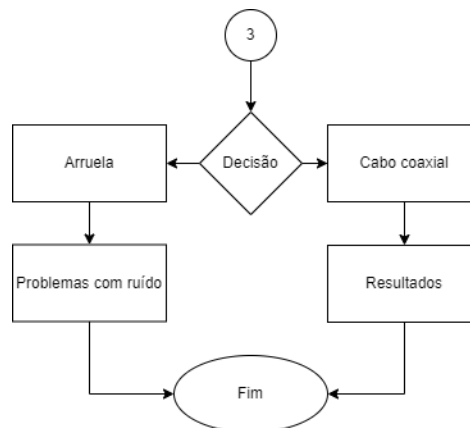
Figura 12 – Fluxograma - Parte 03.



Fonte: Do Autor.

Finalmente, o fluxograma apresentado na Figura 13 mostra as opções envolvendo a escolha do tipo de anel adotado ao longo dos ensaios. Foram realizados testes utilizando uma arruela de alumínio e cabos coaxiais de cobre enrolados em formato de espira.

Figura 13 – Fluxograma - Parte 04.



Fonte: Do Autor.

3.2.1 Adaptação do pulverizador manual

Nessa etapa, foram realizadas adaptações num pulverizador manual de estrutura plástica. Sua estrutura foi remodelada para atender aos requisitos construtivos de um pulverizador eletrostático pelo método de eletrificação indireta.

Como é necessário que tenha uma vazão com pressão constante, a válvula que estruturalmente deve ser pressionada para borrifar o líquido através do bico foi retirada e substituída por uma mangueira que receberá ar comprimido em uma extremidade tendo o bico (proveniente de fábrica) fixado na outra extremidade.

O diagrama da Figura 23 do Apêndice A mostra a perspectiva frontal, superior e lateral direita para melhor ilustração da adaptação realizada no pulverizador. Um suporte de madeira foi adaptado para apoiar o equipamento, fixando-o para realização dos testes.

3.2.2 Base para fixação do alvo

O último protótipo construído para otimizar os testes realizados em laboratório consiste em uma base para fixação do anteparo, por onde serão medidas as correntes de nuvem i_c . A Figura 25 do Apêndice A ilustra a perspectiva frontal, superior e lateral direita desta base, feito estritamente com material de madeira.

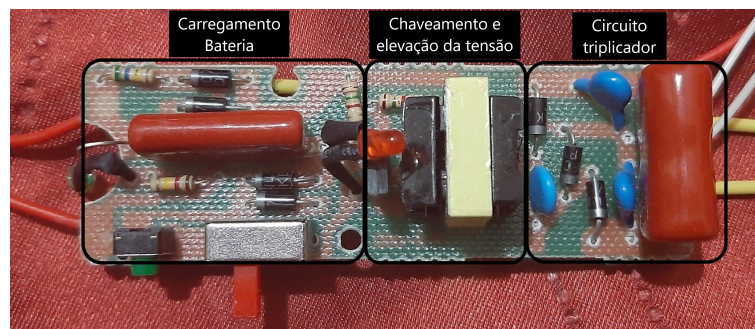
O anteparo utilizado é composto por uma estrutura metálica do tipo tela, fixada entre armações plásticas utilizado em raquetes popularmente conhecidas como mata mosquitos, conforme ilustrado na Figura 26 do Apêndice A.

O anteparo foi fixado numa base de madeira e posicionado em frente ao bico do pulverizador. Para medição da corrente, pontas de prova foram conectadas entre a tela e o terra da fonte de alimentação do circuito de excitação.

3.2.3 Circuito de excitação

Como em sistemas envolvendo pulverizadores eletrostáticos são necessários elevadas tensões para que aconteça o fenômeno de carregamento de gotas, foi utilizado o circuito de excitação presente em raquetes mata mosquito (Figura 14) que possui em sua saída uma tensão que pode variar entre 1,5 e 2 kV, dependendo dos componentes utilizados.

Figura 14 – Circuito utilizado em raquetes mata mosquito.



Fonte: Do Autor.

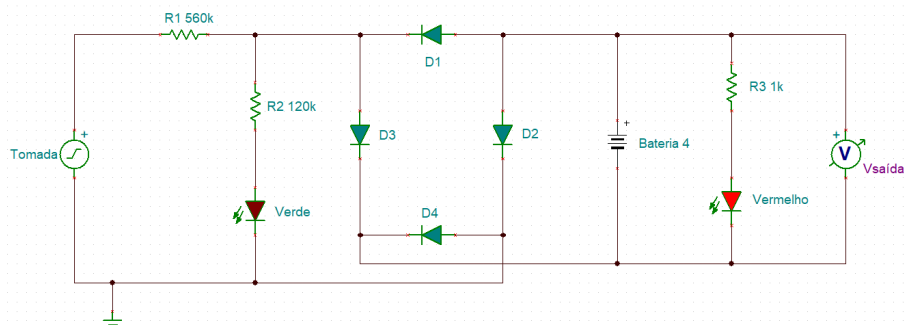
Para compreender o funcionamento do dispositivo, foi realizado o mapeamento do mesmo separando a análise em três partes: processo de carregamento da bateria, processo de chaveamento do transistor em conjunto com uma bobina auxiliar do transformador e o circuito multiplicador para elevar a tensão proveniente do secundário do transformador. Todas as simulações foram realizadas no *software* TINA-TI, fornecido pela empresa *Texas*

Instruments. O fato de ser um *software* gratuito foi levado em consideração para a escolha do mesmo.

3.2.3.1 Carregamento da bateria

O sistema de alimentação do circuito é composto por uma bateria com tensão de 4 V, recarregável através da rede elétrica monofásica (127 V). A Figura 15 apresenta o esquemático do circuito de carregamento empregado.

Figura 15 – Circuito de carregamento da bateria.



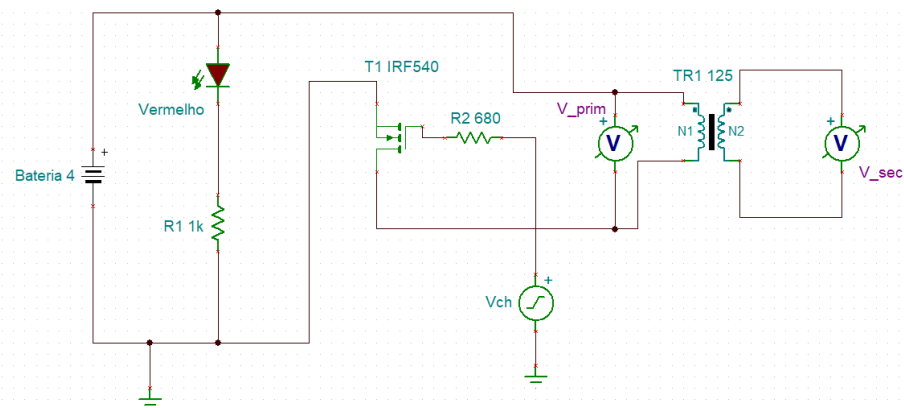
Fonte: Do Autor.

Basicamente, o circuito é composto por uma ponte retificadora de onda completa a diodos, e um LED (do inglês *Light-Emitting Diode*, em inglês) indicando o momento em que o circuito de carregamento é acionado.

3.2.3.2 Circuito de chaveamento e amplificação da tensão

A Figura 16 apresenta o esquemático do circuito de chaveamento e amplificação utilizado.

Figura 16 – Circuito de chaveamento e elevação de tensão.



Fonte: Do Autor.

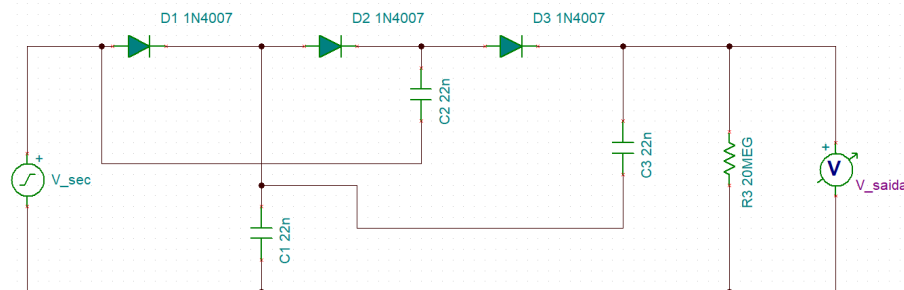
O transformador TR1 da Figura 16 possui em seu secundário duas bobinas separadas. Uma dessas bobinas atua controlando o chaveamento do gate do transistor MOSFET apresentado, com uma frequência de chaveamento de aproximadamente 18 kHz. O transistor realiza o chaveamento da tensão aplicada pela bateria à segunda bobina, que é responsável por elevar a tensão aplicada pela bateria. A junção dos trechos apresentados pelas Figuras 15 e 16 são conhecidos como fonte chaveada com conversor *flyback*.

Não foi possível medir em laboratório a tensão de saída no secundário do transformador, pois de acordo com as especificações do fabricante da raquete, essa tensão deveria apresentar um valor entre 500 V e 650 V, superior ao valor limite das pontas de prova disponíveis no laboratório.

3.2.3.3 Circuito Triplicador

A parte final do circuito é composta por um circuito multiplicador a diodos, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Circuito triplicador de tensão.



Fonte: Do Autor.

A saída do circuito apresentará uma tensão três vezes maior do que a presente no secundário do transformador elevador. Assim como no caso anterior, não foi possível medir os valores de tensão de saída do circuito multiplicador de tensão mas, de acordo com o fabricante, esses valores variam num intervalo entre 1,5 kV e 2 kV.

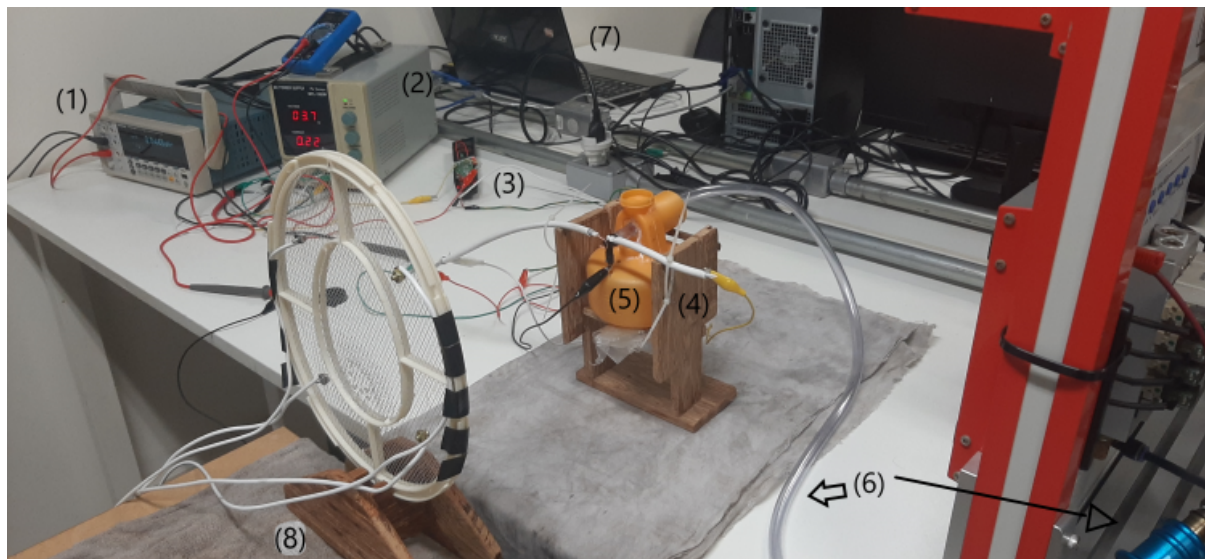
3.2.4 Protótipo de Sistema

A Figura 18 apresenta uma foto do protótipo do sistema proposto neste trabalho.

Todos os testes foram realizados com água natural e o reservatório de água foi mantido com, no mínimo, 50% de sua capacidade. Um bico de plástico, com raio de 1,0 mm foi utilizado, e um tubo capilar de cobre foi empregado para levar a água do reservatório para o bico.

A pressão do ar comprimido foi ajustada em 100 kPa. Como não havia informação de fabricante, a vazão do pulverizador foi obtida em laboratório utilizando técnicas de

Figura 18 – Sistema montado em laboratório - (1) Amperímetro digital. (2) Fonte DC. (3) Circuito de excitação. (4) Suporte de madeira do pulverizador. (5) Pulverizador Manual. (6) Mangueira e conexão com o sistema de ar comprimido. (7) Computador. (8) Anteparo com suporte de madeira.



Fonte: Do Autor.

aferição com balanças, registrando o tempo em que o sistema de pulverização reduzia a cada 5 g o seu peso, tomando como base seu peso inicial com o reservatório em sua capacidade máxima. Após a realização dos cálculos, a vazão do pulverizador obtida é de $1,62 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.

Como o tamanho das gotas emitidas não é informado pelo fabricante, uma estimativa foi calculada através da equação (2.26), onde Cloupeau e Prunet-Foch (1989) diz que a frequência de emissão de gotas do tipo água provenientes de bicos com raios muito pequenos é de aproximadamente 18 milhões de gotas por segundo, ou seja uma frequência de 18 MHz. Uma vez com a vazão obtida em laboratório calcula-se o raio da partícula, com valor de $r_p = 12,92 \mu\text{m}$.

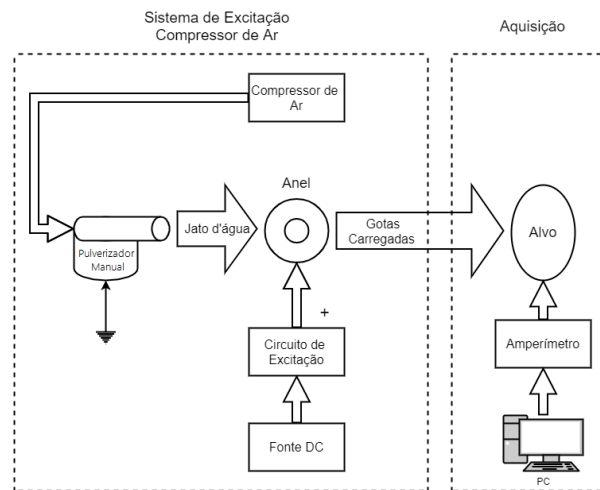
Observando a Figura 18, o suporte (4) onde está fixado o pulverizador (5) foi posicionado em uma bancada ao lado da saída de ar comprimido (6), com uma válvula e um medidor para controle da pressão aplicada. Um anteparo (8) foi posicionado em frente ao bico, possibilitando a medição dos valores de corrente obtidos a medida em que os jatos d'água atingem a superfície em formato de tela. Quatro fios de 1,5 mm foram fixados no alvo através de parafusos com porcas (pressionando o fio contra a tela) buscando garantir uma boa conexão elétrica.

Quanto ao circuito de excitação (3), a bateria de 4 V precisou ser substituída por uma fonte DC regulada (2) (Minipa, modelo MPL-1305M). A substituição foi necessária pois o alto consumo de corrente do sistema (aproximadamente 220 mA) acelerava o processo de descarga da bateria, que não conseguia manter o sistema em condições ideais de

tensão por mais de 5 min.

O terminal positivo de saída da fonte de alta tensão foi conectado ao anel posicionado à frente do bico, e o terminal negativo foi conectado ao tubo capilar, garantindo um terra para o líquido armazenado no reservatório. A Figura 19 ilustra o diagrama do sistema montado em laboratório.

Figura 19 – Diagrama do sistema montado em laboratório.



Fonte: Do Autor.

Para implementação do anel, utilizou-se um cabo coaxial. A região central do cabo foi decapada e enrolada, formando uma espira. O restante do cabo permaneceu com a blindagem, e a malha foi aterrada junto ao terra da fonte de alimentação. Foi necessário manter a blindagem aterrada para minimizar os efeitos causados por ruídos irradiados, uma vez que os níveis de tensão envolvidos no processo são elevados. O anel foi posicionado a uma distância de 2 mm do bico do pulverizador.

Finalmente, durante os ensaios, o anteparo foi posicionado numa superfície separada daquela utilizada pelo sistema de excitação/aquisição, garantindo o isolamento entre o circuito de excitação e o alvo, minimizando possíveis interferências e garantindo medições corretas da corrente de nuvem i_c .

3.2.5 Aquisição de dados

Para realização das medições, utilizou-se um amperímetro digital (item (1) na Figura 18) de precisão (Tektronix, modelo DMM 4040), que opera numa faixa de $100 \mu\text{A}$ até 10 A, com uma resolução de 100 pA e 6,5 dígitos (TEKTRONIX, 2013).

A aquisição de dados foi controlada remotamente por computador, por meio de um sistema de comunicação serial do tipo RS232 (item (7), Figura 18). Todo o processo de aquisição e processamento de dados foi realizado utilizando o *software* Matlab.

Foram realizadas aquisições com frequência de amostragem de 1 Hz, por um período de aproximadamente 300 s. No primeiro minuto, o sistema de pulverização foi ligado, mas o sistema de eletrificação permaneceu desligado. Do minuto dois em diante, acionou-se o sistema de eletrificação, monitorando os valores de corrente de nuvem através do multímetro.

A distância entre anteparo e bico foi ajustada inicialmente para 25 cm e, posteriormente, 50 cm com o objetivo de observar o comportamento da corrente de nuvem com o dobro da distância. O procedimento de medição foi repetido por três vezes para cada distância entre anteparo e bico, e os dados obtidos foram utilizados para estimar as incertezas dos valores de corrente medidos, calculadas através da seguinte expressão

$$s(\bar{X}_i) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{N}}, \quad (3.4)$$

onde s^2 indica a variância amostral, X_i representa a média e N é o número de amostras do sinal (AGUIRRE, 2013).

3.3 Considerações Parciais

Neste capítulo foram descritas as etapas envolvendo a metodologia utilizada ao longo deste trabalho. Inicialmente, foram abordadas simulações utilizando métodos por elementos finitos, tomando como referência os experimentos realizados por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002). Na sequência, foram realizadas análises utilizando um método de projeto baseado em expressões algébricas, que simplificam o processo mas não são capazes de modelar todos os fenômenos envolvidos.

Foram descritas as etapas para construção de um protótipo de pulverizador eletrostático, indicando as principais características do sistema mecânico e elétrico desenvolvido. Finalmente, foram descritos o sistema de aquisição de dados e os procedimentos de teste realizados ao longo do trabalho.

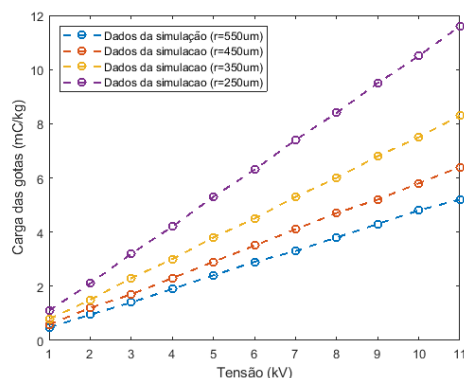
4 Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações envolvendo técnicas por elementos finitos, assim como os dados obtidos através da construção do protótipo descrito no capítulo anterior. Os resultados medidos foram comparados aos calculados, e também a valores de referência encontrados na literatura. Vale ressaltar que, devido a limitações financeiras, foram empregados equipamentos de custo reduzido, adaptados de acordo com o projeto proposto.

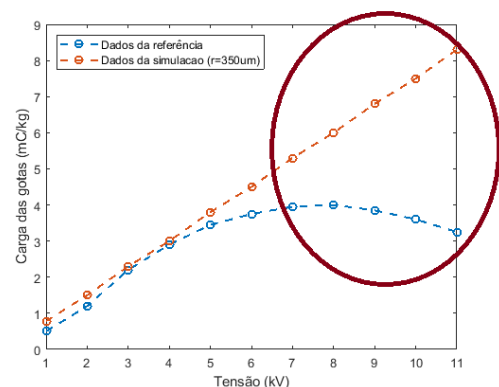
4.1 Simulações com método de elementos finitos

A Figura 20a apresenta os resultados obtidos a partir de simulação, relacionando carga/massa com a tensão aplicada, para diferentes tamanhos de gota, e a Figura 20b mostra uma comparação entre resultados obtidos a partir das simulações e resultados experimentais obtidos por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002).

Figura 20 – Comparação entre resultados simulados neste trabalho e resultados medidos por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002).



(a) Relação carga/massa em função da tensão aplicada.



(b) Comparação entre resultados.

Fonte: Do Autor.

O primeiro ponto a se observar é a obtenção do tamanho da gota a ser polarizada. Como já descrito anteriormente, uma variação entre 350 e 550 μm foi definido por Chaim, Pessoa e Ferracini (2002).

Uma segunda observação importante diz respeito aos valores de tensão acima dos 8 kV (Figura 20b). Nota-se que na simulação, os valores de carga/massa continuam aumentando em função da tensão, mesmo para valores superiores à 8 kV. Isso ocorreu pois nas simulações realizadas neste trabalho não foi possível incluir de maneira adequada os efeitos causados pelas perdas por efeito corona.

Além disso, vale ressaltar que a simulação considera uma análise estática, ou seja, não considera a vazão em seus parâmetros, uma vez que o objetivo é apenas observar qual o efeito que a aplicação de um potencial no eletrodo irá produzir em uma partícula, considerando o material e dimensões dos mesmos.

4.2 Ensaios com o protótipo do pulverizador

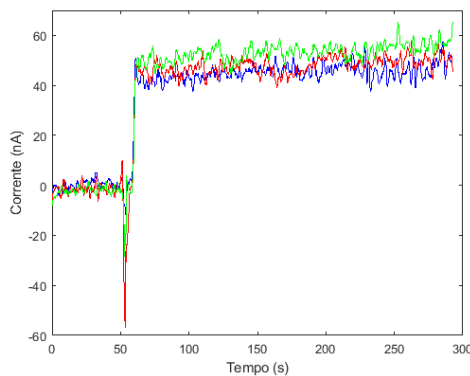
Nos testes conduzidos em laboratório, a principal grandeza medida foi a corrente de nuvem, adquirida a partir de um amperímetro digital. Os valores medidos foram comparados aos obtidos teoricamente a partir das equações (2.24) e (2.25).

Foram medidos valores da corrente de nuvem induzida pelo anel até atingir o anteparo metálico utilizado para medição. Os dados medidos foram adquiridos usando um computador, que também registrava o tempo entre uma medição e outra.

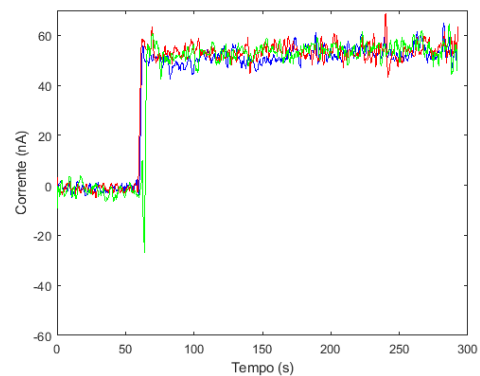
Conforme já mencionado, o procedimento considerou um tempo total de 5 min, onde no primeiro minuto o circuito de eletrificação permaneceu desligado. Foram realizadas três repetições para cada distância entre bico e anteparo (25 e 50 cm), a fim de estimar as incertezas nas medições realizadas durante o processo.

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos durante os ensaios mantendo uma distância de 25 cm e 50 cm entre anteparo e o bico do pulverizador. As correntes foram representadas em nA, e o tempo em s. As três curvas (azul, vermelho e verde) são referentes as três repetições realizadas.

Figura 21 – Valores de corrente de nuvem medidos usando um multímetro de bancada.



(a) Anteparo a 25 cm do bico.



(b) Anteparo a 50 cm do bico.

Fonte: Do Autor.

Como pode ser observado, nos dois casos os valores medidos ao longo das etapas de repetição são semelhantes, indicando que o sistema apresenta boa repetibilidade. Além disso, nota-se que os valores de corrente no minuto inicial (quando o sistema de pulverização está ligado, mas o sistema de eletrificação está desligado) são próximos de zero,

Tabela 4 – Relação de média e incerteza para cada medição adquirida.

	25 cm		50 cm	
	Média (nA)	Incerteza (nA)	Média (nA)	Incerteza (nA)
Nível zero	0,26	$\pm 0,26$	-1,26	$\pm 0,26$
	-1,45	$\pm 0,36$	-1,35	$\pm 0,26$
	-1,95	$\pm 0,27$	-1,94	$\pm 0,37$
Nível alto	45,28	$\pm 0,20$	51,98	$\pm 0,22$
	48,06	$\pm 0,18$	53,62	$\pm 0,22$
	53,38	$\pm 0,18$	53,59	$\pm 0,21$

conforme esperado. Observa-se ainda um transitório de corrente gerado no instante em que o sistema de eletrificação é energizado.

Para o cálculo das incertezas, foi aplicado a equação (3.4) dividindo em duas regiões as curvas obtidas, sendo a primeira referente aos pontos obtidos no minuto inicial e a segunda referente aos demais pontos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4. Calculando-se a média dos resultados, obteve-se um valor de $i_c = 48,90$ nA para anteparo afastado 25 cm do bico, e $i_c = 53,06$ nA para anteparo afastado 50 cm do bico.

4.3 Comparação entre valores estimados e medidos

Como a corrente de nuvem i_c foi o único parâmetro medido nos testes laboratoriais, todo o desenvolvimento prático foi feito para que estes valores adquiridos fossem comparados aos resultados fornecidos pelas equações (2.24) e (2.25), para que através delas consigamos obter algebricamente o resultado da relação carga/massa.

Ao utilizar a equação (2.24) com os parâmetros do sistema montado no laboratório, encontrou-se uma corrente de nuvem $i_c = 5,96$ nA, representando aproximadamente um valor 10 vezes menor que o obtido experimentalmente. Para o caso da equação (2.25), encontra-se $i_c = 415,40$ nA, representando um valor agora aproximadamente 10 vezes maior que o alcançado experimentalmente.

De acordo com Law (1978), os resultados obtidos a partir da equação (2.24) definem o limite inferior da corrente de nuvem, não representando exatamente o valor a ser encontrado nos experimentos práticos. Entre as causas pode-se destacar um possível aumento da densidade de carga superficial no momento de formação das gotas, fator este que não é considerado na modelagem desta equação, o que aproximaria o valor da corrente de nuvem dos valores obtidos de forma prática.

Outro ponto diz respeito ao valor de t_s , que define a espessura superficial do líquido (casca). Trata-se de um parâmetro difícil de se determinar de forma experimental, uma vez que ele é compreendido dentro de um intervalo entre 0,3 e 0,6 mm, de acordo com as referências. A incerteza do amperímetro utilizado também pode ser um fator influenciador desta diferença, uma vez que o equipamento utilizado não havia sido calibrado

recentemente.

Para o resultado mostrado pela equação (2.25), Toljic, Adamiak e Castle (2008) afirma que se uma gota carregada não tiver uma tensão superficial interna suficiente para suportar a tensão externa produzida pelo campo elétrico exercido no momento de formação das gotas, ocorrerá uma deformação das mesmas, impossibilitando a eletrificação. Caso isso ocorra, é provável que as gotas não possuam mais os mesmos tamanhos definidos de acordo com as especificações do bico. Para que alcançássemos valores próximos, esses fenômenos deveriam ser considerados na modelagem algébrica.

Apesar da divergência entre os resultados, o parâmetro que indica se o sistema de eletrificação é eficaz trata-se do valor da relação carga/massa. Serão utilizadas as equações (2.7), (2.8) e (2.10) para determinar este parâmetro. Não necessariamente os resultados devem ser iguais para os três casos, e existem algumas explicações para isto que serão abordadas na sequência.

Calculando primeiramente os valor máximo de relação carga/massa, encontra-se como resultado 103,60 mC/kg. Este seria o maior valor possível de carga que poderia ser obtido experimentalmente.

Na sequência, foram utilizadas as abordagens apresentadas pelas equações (2.7) e (2.8). No primeiro caso, onde a expressão se baseia diretamente da tensão aplicada (2 kV), dos raios das partículas (13 μm , obtidos teoricamente) e do anel de indução (com aproximadamente 1 cm de diâmetro) dividido pela densidade da água e do volume de uma partícula, a relação carga/massa obtida foi de 3,81 mC/kg.

Ao utilizar a equação proposta por Mamidi et al. (2012), obteve-se um resultado de 4,2 mC/kg. Observa-se que, para obtenção deste campo, existe uma relação direta entre tensão aplicada e o raio bico. Apesar de diferentes, essas equações demonstram resultados semelhantes por abordarem as mesmas variáveis, de forma geral.

A terceira expressão (equação (2.10)), considera explicitamente o valor de corrente de nuvem dividido pelo fluxo líquido, representado pela vazão vezes a densidade do líquido utilizado. Como o valor obtido experimentalmente através dos testes em laboratório é de aproximadamente 48,90 nA para a distância de 25 cm entre o bico e o alvo, a relação carga/massa para este cenário é de 0,30 mC/kg e, para distância de 50 cm, o resultado é de 0,32 mC/kg.

Os resultados representam aproximadamente 10% do valor obtido pelas equações (2.7) e (2.8). O mesmo efeito foi observado quando se comparam os valores de corrente de nuvem medida em laboratório com a corrente calculada pela equação (2.25).

Essas diferenças entre valores estimados e medidos foram observadas por Post (2018a), que apresenta uma tabela com a diferença (%) entre o valor real da relação carga/massa alcançado em testes laboratoriais e o estimado através da modelagem matemática. Num total de 12 observações, foram verificados valores que variam entre 2,1% e os 12,3% do valor máximo definido no projeto. Dessa forma, os resultados obtidos expe-

rimentalmente, apesar de menores do que os estimados, estão de acordo com valores de referência encontrados na literatura.

4.4 Problemas observados durante o ensaio

Como foi visto anteriormente os resultados atingiram aproximadamente 10% do encontrado experimentalmente. Alguns possíveis fatores foram listados, mas é difícil concluir precisamente quais foram os fatores que provocaram essa diferença.

Nos testes realizados em laboratório, observou-se a presença de gotejamentos na conexão do terminal comum ao tubo capilar de cobre, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Ilustração do gotejamento no momento do expurgo dos jatos.



Fonte: Do Autor.

Isso acontece devido ao princípio físico de atração de cargas opostas, uma vez que as gotas no momento em que ultrapassam a região do anel adquirem cargas mais positivas, enquanto a superfície do conector utilizado para aterrar o tubo capilar possui cargas opostas, atraindo àquelas mais positivas. Em projetos onde deseja-se obter maior eficiência em deposição para pulverizadores eletrostáticos, esse tipo de gotejamento não pode acontecer, pois interfere diretamente na quantidade de gotas depositadas e, conseqüentemente, irá influenciar nos valores de relação carga/massa. Para minimizar esses efeitos, uma possibilidade seria melhorar a isolação entre anel e a conexão do terminal comum com o tubo capilar, além de se utilizar um sistema de ventilação para forçar a movimentação das gotas através do sistema.

Em termos práticos, ainda seria possível realizar ensaios com outras configurações, como por exemplo, aumentar o diâmetro do eletrodo de indução ou verificar o limite máximo de distância entre bico e anteparo. Devido às restrições sanitárias impostas pela Covid-19, o uso do laboratório da Universidade Federal de Ouro Preto teve seu acesso restrito, impossibilitando a realização de novos testes com outras configurações do sistema.

4.5 Considerações Parciais

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos durante a realização deste trabalho. Uma primeira abordagem utilizando o método de elementos finitos foi avaliada, mas dificuldades para definição das condições de contorno e parâmetros físicos externos ao sistemas impossibilitaram o avanço dessa análise. Numa segunda abordagem, o projeto do sistema foi realizado seguindo um conjunto de equações algébricas definidas na literatura.

Os parâmetros de projeto definidos na segunda abordagem foram utilizados para desenvolver um protótipo de pulverizador eletrostático de pequeno porte, com gotas muito finas ($13 \mu\text{m}$) e vazão baixa ($1,62 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$). O sistema de eletrificação de gotas analisado operou com tensões entre 1,5 kV e 2 kV, e foi capaz de induzir correntes da ordem de 50 nA nas gotas, resultando numa relação carga/massa da ordem de 0,30 mC/kg. Os valores medidos representam, aproximadamente, 10% dos valores máximos estimados teoricamente, e estão de acordo com valores de referência encontrados na literatura.

5 Considerações Finais

No decorrer da elaboração deste trabalho foram encontradas algumas características bastante presentes nos estudos envolvendo pulverizadores eletrostáticos. Um dos principais objetivos foi abordar e compreender a descrição teórica dos métodos envolvendo pulverizadores eletrostáticos, considerando basicamente a eletrificação do tipo indireta. Inicialmente foi considerado implementar e desenvolver um sistema baseado em técnicas pelo método dos elementos finitos. Apesar de ser um dos caminhos promissores envolvendo estudos sobre o tema, ainda são métodos com alta complexidade de implementação e compreensão. Por isso, o foco se voltou para análises algébricas das equações que descrevem os sistemas de pulverização, de forma que consigamos reunir e simplificar seu entendimento.

Após busca por referências acadêmicas foi observado que, até os dias de hoje, o trabalho do Law (1978) é a principal referência para estudos de pulverizadores eletrostáticos. Ele apresenta uma vasta descrição teórica apresentando equações que descrevem os fenômenos físicos. A partir disso, o objetivo principal foi verificar até que ponto estas equações conferem com dados aferidos de forma prática. Uma vez realizadas abordagens teóricas, havia a necessidade de implementar um sistema de eletrificação, baseando-se na teoria.

Em laboratório, o sistema criado é uma adaptação de um pulverizador manual. Não foi o foco deste trabalho desenvolver um equipamento de alta excelência, tendo como objetivo apenas verificar alguns resultados teórico-práticos. Pelo fato de utilizar equipamentos de baixo custo, é certo perceber que isso interferiu diretamente na qualidade dos resultados. Se avaliarmos as respostas de corrente de nuvem i_c , teoricamente foi obtido um valor 10 vezes maior daquele encontrado experimentalmente, assim como o resultado da relação carga/massa que atingiu teoricamente entre 3,8 e 4,2 mC/kg enquanto na prática seu valor está compreendido entre 0,30 e 0,32 mC/kg, representando mais uma vez algo próximo a superioridade teórica de 10 vezes. Este tipo de discordância é de certa forma comum na implementação destes tipos de pulverizadores. Em todas as referências aqui estudadas, que tiveram como objetivo comparar os resultados, não alcançaram em sua totalidade os dados calculados.

O principal ponto observado aqui é que a modelagem algébrica descrita atualmente não consegue abordar todos os parâmetros físicos que envolvem sistemas deste tipo. É improvável e inviável que exista uma forma algébrica que descreva exatamente o comportamento físico dos pulverizadores eletrostáticos, nos direcionando em busca de outras ferramentas de estudo.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Após ter percorrido boa parte do referencial teórico e abordado alguns conceitos práticos em laboratório sobre pulverizadores eletrostáticos, entende-se que o futuro dos estudos sobre este tema tem focado bastante na modelagem pelas técnicas de elementos finitos. Através desta ferramenta talvez seja possível abraçar mais parâmetros daqueles descritos algebricamente. Como exemplo, é possível via *software*, definir o tipo de material dos elementos a serem utilizados. No teste feito neste trabalho, foi descrito que a esfera criada seria do tipo água e que o cilindro que simula um eletrodo de alta tensão seria de material cobre, ou seja, são parâmetros que nas expressões não são possíveis definir. Isto é apenas uma das inúmeras possibilidades que as técnicas por elementos finitos podem oferecer, tornando talvez o método mais completo e capaz de alcançar novos passos nos estudos sobre os pulverizadores eletrostáticos.

Referências

- AGUIRRE, L. *Fundamentos De Instrumentação*. [S.l.]: PEARSON BRASIL, 2013.
- AL-MAMURY, M. *Smart electrostatic crop spraying using remote sensing technology*. Tese (Doutorado) — Brunel University London, 2015.
- AL-MAMURY, M. et al. Computation model of electrostatic spraying in agriculture Industry. In: *Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge*. [S.l.: s.n.], 2014.
- AL-MAMURY, M. et al. Mobile robot based electrostatic spray system for controlling pests on cotton plants in Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 646, p. 012008, out. 2015.
- ATTWOOD, S. S. *Electric and magnetic fields*; . 3rd. ed. New York, NY: Dover, 1967.
- CAMARA, A. d. R. et al. Study of Electric charge induction with a three-dimensional model using the finite elements method. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, n. 1, p. 1–5, jul 2018.
- CHAIM, A. Aperfeiçoamento de Bico de Pulverização Eletrostática para Geração de Gotas com Alto Nível de Carga. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 33, p. 463–470, 1998.
- CHAIM, A. História da pulverização. *EMBRAPA: Meio Ambiente. Jaguariúna*, 1999.
- CHAIM, A. Pulverização Eletrostática: Principais Processos Utilizados para Eletrificação de Gotas. *Embrapa Meio Ambiente*, p. 17, 2006.
- CHAIM, A.; PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINI, V. L. Eficiência de deposição de agrotóxicos obtida com bocal eletrostático para pulverizador costal motorizado. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 37, n. 4, p. 5, 2002.
- CLOUPEAU, M.; PRUNET-FOCH, B. Electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode. *Journal of electrostatics*, Elsevier, v. 22, n. 2, p. 135–159, 1989.
- COOPER, S.; LAW, S. Electrostatic sprays for sunless tanning of the human body. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 42, n. 2, p. 385–391, mar 2006.
- FERNANDES, A. P. et al. Caracterização do perfil de deposição e do diâmetro de gotas e otimização do espaçamento entre bicos na barra de pulverização. *Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 3, p. 728–733, dec 2007.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Física III - Fundamentos da Física - Volume 3*. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1994. 314 p.
- JACTO. *Knapsack Sprayer Jacto - PJ-16*. 2017. 53 p.
- JACTO. *Knapsack Sprayer Jacto - PJB*. 2019. 55 p.

- JACTO. *Jacto Power Knapsack Sprayer - PJM-25*. 2020. 120 p.
- JYOTI, B. *Design and development of electrostatic sprayer*. Tese (Doutorado) — Division of Agricultural Engineering, ICAR-Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, 2017.
- LAW, S. E. Nozzle : Theoretical and Engineering Design. *Transactions of the ASAE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), v. 21, n. 6, p. 1096–1104, 1978.
- MAMIDI, V. R. et al. Electrostatic hand pressure swirl nozzle for small crop growers. *International Journal of Applied Science & Technology Research Excellence*, v. 2, p. 164, 04 2012.
- MASKI, D.; DURAIRAJ, D. Effects of electrode voltage, liquid flow rate, and liquid properties on spray chargeability of an air-assisted electrostatic-induction spray-charging system. *Journal of Electrostatics*, Elsevier Ltd, v. 68, n. 2, p. 152–158, 2010.
- MONTEIRO, M.; CARVALHO, W.; BAESSO, R. Avaliação da eficácia da pulverização eletrostática por via aérea no controle de pulgões (*Aphis gossypii*), lagarta das maçãs (*Heliothis virescens*) e spodoptera (*Spodoptera frugiperda*) na cultura do algodão. In: *II Sintag*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 0–4.
- NETO, J. M.; COSTA, G.; OLIVEIRA, M. Segurança do trabalhador em aplicações de herbicidas com pulverizadores de barra em cana-de-açúcar. *Planta Daninha*, v. 25, n. 3, p. 639–648, sep 2007.
- NUNES, G. S.; RIBEIRO, M. L. *Pesticidas: Uso, Legislação E Controle*. Curitiba: R.Ecotoxicol e Meio Ambiente, 1999.
- PAIXÃO, G. P. da. *Caracterização de pulverizadores para aplicação de defensivos agrícolas na cultura do café*. 44 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- POST, S. Chargeability of Electrostatic Sprays. In: *14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Chicago, IL, USA: [s.n.], 2018.
- POST, S. L. Real-Time Control of Spray Drop Application. In: *14th International Conference on Precision Agriculture*. Montreal: Lincoln Agritech Ltd., 2018. p. 9.
- RUAS, J. M. F.; BALAN, R.; SAAB, O. J. G. A. Comparação da cobertura de pulverizadores costais de acionamento manual e motorizado. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 32, n. 4, p. 1417–1422, 2011.
- SASAKI, R. S. et al. Deposição e uniformidade de distribuição da calda de aplicação em plantas de café utilizando a pulverização eletrostática. *Ciência Rural*, v. 43, n. 9, p. 1605–1609, 2013.
- SASAKI, R. S. et al. Adjuvantes nas propriedades físicas da calda, espectro e eficiência de eletrificação das gotas utilizando a pulverização eletrostática. *Ciência Rural*, v. 45, n. 2, p. 274–279, 2014.

SCHERM, H.; SAVELLE, A. T.; LAW, S. E. Effect of electrostatic spray parameters on the viability of two bacterial biocontrol agents and their deposition on blueberry flower stigmas. *Biocontrol Science and Technology*, v. 17, n. 3, p. 285–293, 2007.

SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO ELETROSTÁTICO. *Manual de Operação - Atomizador Costal*. Porto Alegre, Brasil, 2017.

SOUZA, A. L. *Estudo de Modelos para Definição de um Critério de Início de Corona Através da Análise de Experimentos e Simulações Computacionais*. 80 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

TAVARES, R. M. et al. Estudo de um sistema de eletrificação de gotas em pulverizador costal pneumático pelo método de gaiola de Faraday. *Rev. Ceres*, v. 64, n. 5, p. 476–485, 2017.

TEEJET TECHNOLOGIES. *Catálogo 51A-PT*. Wheaton, Illinois, 2014.

TEKTRONIX. *Tektronix DMM4050 and DMM4040 Datasheet*. Southwest Karl Braun Drive Beaverton, USA, 2013.

TOLJIC, N.; ADAMIAK, K.; CASTLE, G. S. P. Determination of particle charge to mass ratio distribution in electrostatic applications: a brief review. In: *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*. Ontario, CA: [s.n.], 2008. p. 1–9.

APÊNDICE A – Perspectivas do protótipo

Para ilustrar de forma mais precisa, a Figura 23 tem como estruturas o bico (1) possuindo $\varnothing = 2$ mm (informado pelo fabricante), o reservatório (2) com capacidade para 370 ml, um tubo capilar (3) que originalmente era composto por uma material plastificado sendo substituído por um tubo capilar do tipo cobre com o objetivo de conectar o líquido ao potencial de zero *volts*. Este tubo é por onde o líquido flui proveniente do reservatório. Uma tampa (4) é utilizada para fechar a boca de abastecimento do reservatório e por fim foi utilizado uma mangueira (5) para aplicação do compressor de ar, com circunferência de 1,57 cm.

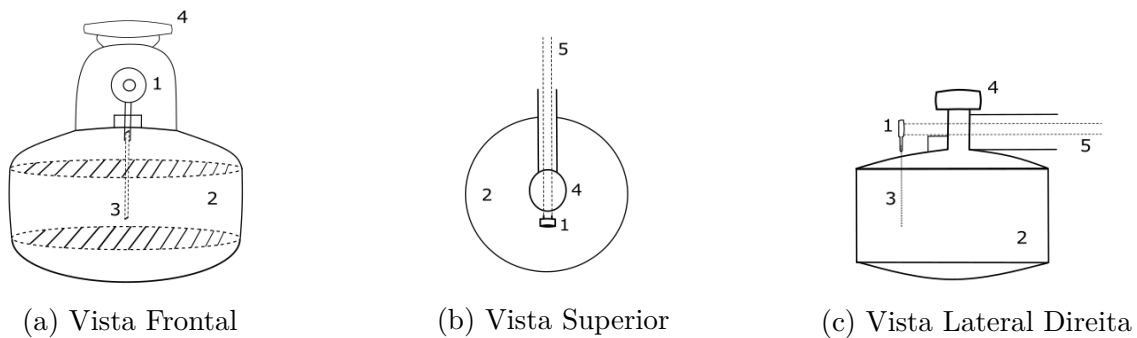
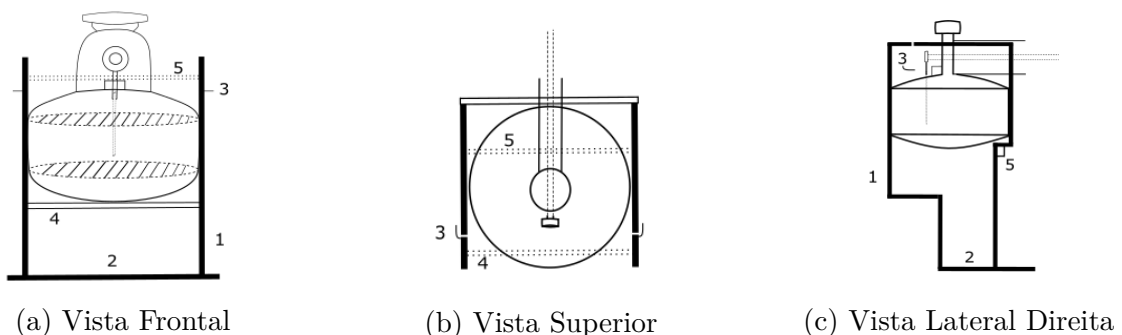


Figura 23 – Perspectivas da adaptação no pulverizador manual.

Como base na fixação do pulverizador, foi construída uma estrutura de madeira que possui uma parede lateral (1) com aproximadamente 18 cm de altura, um pé (2) com 8 mm de altura e 6,5 cm de largura, um pequeno ferro (3) utilizado para fixar parte do fio anexado ao anel que ficará posicionado à frente do bico, uma base apoiadora (4) para o fundo do pulverizador com aproximadamente 10 cm de largura e por fim um suporte (5) para apoio da parte traseira do pulverizador, fixando-o completamente.

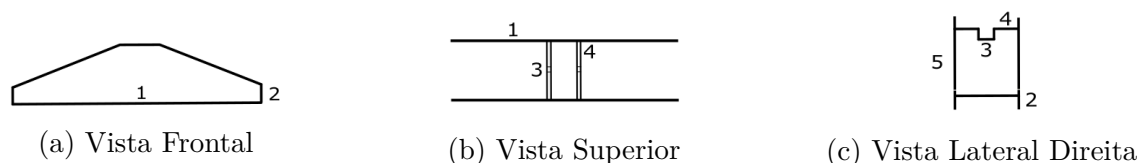
Figura 24 – Perspectivas da adaptação no pulverizador manual.



Fonte: Do Autor.

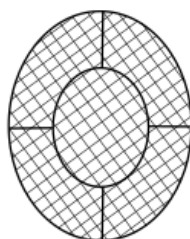
Para fixação do alvo (vide Figura 26), foi construída uma estrutura de madeira (vide Figura 25) composta por uma base horizontal (1) com aproximadamente 17,5 cm de comprimento, uma base vertical (2) com 2 cm de altura, uma fissura (3) que servirá de encaixe para o alvo com dimensões de 1 cm² feito em duas placas paralelas (4) de madeira fixado entre as paredes paralelas de maior comprimento, tendo por fim uma estrutura com altura total (5) de 6,5 cm.

Figura 25 – Perspectivas da adaptação no pulverizador manual.



Fonte: Do Autor.

Figura 26 – Alvo para aquisição da corrente de nuvem i_c .



Fonte: Do Autor.

ANEXO A – Tipos de pulverizadores

A Figura 27 apresenta três exemplos de pulverizadores costais diferentes, frequentemente utilizados em aplicações agrícolas.

Figura 27 – Pulverizadores costais convencionais.



(a) Costal Elétrico
Fonte: (JACTO, 2017).

(b) Costal Manual
Fonte: (JACTO, 2019).

(c) Costal Motorizado
Fonte: (JACTO, 2020).

Na Figura 27a, apresenta-se um pulverizador costal manual. Trata-se de um modelo mais simples e de menor custo, que costuma ser utilizado por pequenos produtores. Possui um tanque com capacidade para até 16 l, pressão aproximada de 100 psi e vazões variando de acordo com o bico utilizado e intensidade do bombeamento (JACTO, 2017).

A Figura 27b apresenta-se um modelo de pulverizador costal elétrico. Esse dispositivo possui tanque de capacidade para até 20 l, opera com pressão máxima de 70 psi e vazões de até 2,1 l/min. O sistema é alimentado por uma bateria de 14,4 V, com capacidade de 5800 mAh (JACTO, 2019).

Finalmente, a Figura 27c apresenta um pulverizador costal motorizado, indicado para situações onde se deseja pulverizar áreas maiores. Possui um tanque com capacidade para até 25 l, opera com pressão máxima de 360 psi e vazão de até 10 l/min. O tanque de combustível possui capacidade para armazenar 0,53 l, e o motor opera com rotação de 7200 rpm (JACTO, 2020).



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Estudo de técnicas de indução eletrostática aplicadas a pulverizadores” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 04 de Janeiro de 2022.

Anderson Dias Gomes

Anderson Dias Gomes