

Desenvolvimento de um Sistema de Eletrização Eletrostática para Pulverização Agrícola

Vitor M. Macedo* Fábio P. Terra* José U. N. Nunes*

* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul), Pelotas, RS (e-mail: macedomvitor@gmail.com, fabioterra@gmail.com, jnunes@pelotas.ifsul.edu.br)

Abstract:

The world's population growth in the last decades demanded a great increase in agricultural production, especially in food. Therefore, in order to reduce possible losses and guarantee productivity, farmers depend more and more on the application of agrochemicals in their crops. This massive use of pesticides represents not only a high cost to the farmers but also a risk to their health, to the environment and even to the safety of the food consumed by the population. One way to reduce the amount of pesticides applied to crops, and to improve their efficiency, is through electrostatic spraying, which consists of inducing an electrical charge in the spray mix (pesticides diluted in water) through the application of unidirectional high voltage, of the order of tens of thousands of Volts. Thus, this paper proposes the development and the physical implementation of a modular solution to perform the electrification of the spray mix. The equipment is based on a flyback CC-CC converter associated with a battery, and stands out for its simplicity and low cost in relation to similar existing solutions in the market. The results obtained with the equipment developed prove its validity for applications in several types of agricultural crops.

Resumo:

O crescimento populacional das últimas décadas demandou grande aumento na produção agrícola, especialmente nos gêneros alimentícios. Com isso, visando reduzir perdas e garantir produtividade, os agricultores tornam-se cada vez mais dependentes da aplicação de agrotóxicos em suas lavouras. Esse uso massivo dos defensivos agrícolas representa alto custo para o produtor, além de trazer riscos a sua saúde, ao meio ambiente e à própria segurança alimentar da população. Uma forma de reduzir a quantidade de agrotóxico aplicada nas lavouras, e melhorar sua eficiência, é por meio da pulverização eletrostática, que consiste em induzir uma carga elétrica na calda (agrotóxico diluído em água) através da aplicação de alta tensão unidirecional, da ordem de dezenas de milhares de Volts. Assim, com este trabalho, propõe-se o desenvolvimento e a implementação física de uma solução modular para realizar a eletrização da calda. O equipamento é baseado em um conversor CC-CC *flyback* associado a uma bateria, e destaca-se por sua simplicidade e baixo custo em relação às soluções similares existentes comercialmente. Os resultados obtidos com o equipamento desenvolvido comprovam a sua validade para aplicações em diversas culturas de produção agrícola.

Keywords: Electrostatic induction; Flyback converter; Agricultural spraying; Pesticides reduction.

Palavras-chaves: Indução eletrostática; Conversor *flyback*; Pulverização agrícola; Redução de agrotóxicos.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acontece de forma exponencial. Segundo a ONU (2019), a população mundial chegou a 7,6 bilhões de habitantes em 2017 e se espera um crescimento de 20% na próxima década. Com essa taxa de crescimento, a demanda por alimentos também cresce. Estima-se que até 2050 a demanda por alimentos estará 40% mais alta (Bacci, 2018). Dentro deste cenário, o uso dos agrotóxicos tem se mostrado indispensável para o

manejo agrícola no controle de pestes e pragas, permitindo produtividades cada vez maiores.

De acordo com de Carvalho and Chagas (2018), os agrotóxicos são produtos e agentes químicos, físicos ou biológicos, usados na produção agrícola, que alteram a composição da flora e da fauna com o objetivo de evitar a ação de seres vivos considerados nocivos, como determinados insetos ou plantas daninhas (vegetações espontâneas). Inibidores de crescimento, dessecantes, desfolhantes e estimuladores, por exemplo, são considerados agrotóxicos. Segundo o dossiê

publicado em 2015 pela Associação Brasileira de Saúde Coletiva (ABRASCO), 64% dos alimentos no Brasil são contaminados por agrotóxicos; 34.147 intoxicações por esses produtos foram notificadas no Sistema Único de Saúde (SUS) entre 2007 e 2014. O uso indevido e o desrespeito ao período de carência são prejudiciais ao corpo humano (de Carvalho and Chagas, 2018).

Contudo, os produtores afirmam não ser possível manter as elevadas taxas de produção sem o uso dos agrotóxicos. O que se busca, então, são novas tecnologias capazes de reduzir seus efeitos danosos, por exemplo, melhorando a eficiência da aplicação da calda¹. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) tem desempenhado um papel importante na busca por essas tecnologias. De acordo com Vicente (2016), há pesquisas e patentes brasileiras que demonstram ser possível aumentar o rendimento dos agrotóxicos. Uma dessas técnicas, trata da eletrização da calda, na chamada pulverização eletrostática.

Com a eletrização da calda, de acordo com a Lei de Coulomb, surge uma força de atração entre as gotículas eletrizadas e as plantas, que podem ser consideradas como corpos neutros, reduzindo o efeito da deriva² e melhorando a eficiência da aplicação. Com essa técnica, é possível reduzir significativamente a quantidade de agrotóxico aplicada, reduzindo os custos de produção e contribuindo para a sustentabilidade e a qualidade de vida das pessoas (Chaim, 2006).

Segundo Vicente (2016), o equipamento baseado na eletrização foi criado para aplicação de caldas fitossanitárias, químicas ou biológicas, fitorreguladores, inseticidas, produtos veterinários e outros usos rurais. O equipamento pode ser usado em todas as culturas, especialmente na olericultura e na fruticultura, permitindo reduções de até 90% no volume de calda, com um índice de controle fitossanitário em torno de 97%.

Para a eletrização das gotículas, é necessário um alto potencial elétrico. Antonov (2019) apresenta o desenvolvimento de uma fonte de alta tensão para pulverização de plantas com aerossol ionizado. O autor utiliza topologia inversora e um arranjo de diodos e capacitores atuando como multiplicador de tensão na saída da fonte. Com isso, obtém tensões entre 15 e 28 kV.

Já em Khatawkar et al. (2020a,b), é apresentado um sistema de indução eletrostática para eletrização do spray, usando eletrodo embutido no porta bico. O sistema é alimentado a partir de uma bateria de 6 Vcc, possui circuito inversor com gerador de pulsos via CI NE555, um transformador e um multiplicador de tensão Cockcroft-Walton. Os autores fabricaram cinco circuitos com tensão de saída de 1 kV a 5 kV. Reconhecem que a medição dessas tensões é um dos fatores críticos do projeto. Utilizam um multímetro digital com ponta de prova de alta tensão. Dessa forma, negligenciam as distorções decorrentes da forma de onda não senoidal e consideram apenas o valor eficaz equivalente informado pelo voltímetro.

¹ A calda é o nome dado ao líquido efetivamente aplicado e consiste na diluição do agrotóxico em água conforme receituário agrônomo e especificação do fabricante

² A deriva é o movimento do produto no ar, durante ou depois da aplicação, desviando-se de seu alvo planejado (Dexter, 1993).

Outro circuito semelhante é apresentado em Patel et al. (2016), que trata de um gerador de alta tensão para eletrização de líquidos pulverizados. Novamente, utiliza-se indução eletrostática. O circuito consiste de uma etapa de conversão CC-CA, usando um CI NE555, e outra CA-CC, composta por transformador elevador e multiplicador Cockcroft-Walton. O sistema é alimentado por uma bateria recarregável de 9 Vcc. A saída é medida com osciloscópio por meio de ponteira atenuadora com fator de 2000. Assim, são medidas tensões entre 0,5 kV e 3 kV.

Diante do problema da pulverização eletrostática exposto, este trabalho visa desenvolver um equipamento capaz de gerar a alta tensão unidirecional necessária para a eletrização da calda, a partir de uma bateria 12 Vcc. Para tal, usa-se um conversor CC-CC *flyback* associado a um circuito elétrico oscilador. O equipamento desenvolvido é de baixo custo em comparação aos produtos existentes no mercado e os resultados experimentais obtidos comprovam a sua validade, com possibilidade de aplicações em diversas culturas agrícolas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Efeito de Deriva

Um dos maiores problemas na aplicação de agrotóxicos é a deriva. Esse efeito ocorre quando o agrotóxico não atinge o local desejado, seja por evaporação, escorrimento ou deslocamento por motivo de vento (Inquima, 2016). Os principais fatores que resultam na deriva são:

- Diâmetro e peso das gotas: gotas muito finas e leves são facilmente deslocadas a locais indesejados;
- Direção do vento: quando o vento não está favorável à aplicação, as gotículas do agrotóxico podem ser levadas para áreas sensíveis próximas.
- Temperatura: altas temperaturas favorecem a evaporação das gotas pequenas. Também o aquecimento do solo produz correntes de ar ascendentes, dificultando a deposição imediata das gotas de agrotóxico.
- Turbulência do ar: gotas expostas a correntes de ar ascendentes são arrastadas para distâncias maiores.
- Altura da aplicação: quanto maior a altura, mais chances das gotas estarem sujeitas à deriva.

Há tecnologias para a redução do efeito de deriva, seja diretamente na formulação do agrotóxico, com o uso de adjuvantes de calda, ou através de intervenção externa à aplicação, como pelo uso de barreiras físicas para que o agrotóxico não seja arrastado para áreas adjacentes.

Outras técnicas envolvem atuar na calibração da pressão de trabalho do pulverizador, alterar as pontas de pulverização, entre outros. Esses métodos interferem diretamente no tamanho das gotas. Quanto maior a gota, mais rapidamente ela vai se deslocar em direção à planta, porém a fixação pode não ser a mais desejada, pois gotas muito grandes tendem a não conseguir atingir a parte inferior das folhas, além de escorrerem com mais facilidade, resultando numa aplicação pouco eficiente.

Uma possível tecnologia para minimizar esse problema é por meio da eletrização das gotas, permitindo que se trabalhe com gotas menores e fazendo com que elas sejam atraídas e depositadas mais facilmente no alvo.

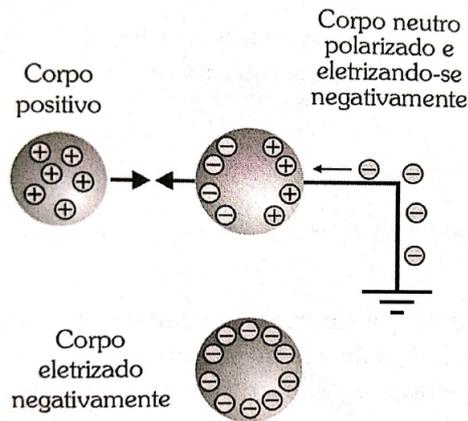


Figura 1. Eletrização por indução eletrostática.
Fonte: (Markus, 2011)

2.2 Eletrização de um Corpo Neutro

O processo de eletrização da calda baseia-se no princípio da eletrização por indução eletrostática e visa fazer com que as gotas pulverizadas adquiram carga elétrica. Assim, serão atraídas pelas plantas, que podem ser consideradas como corpos neutros.

A eletrização por indução pode ser explicada a partir do diagrama mostrado na Figura 1. Aproximando-se um corpo eletrizado positivamente de um corpo neutro isolado, os elétrons livres do corpo neutro são atraídos para a extremidade mais próxima do corpo positivo. Desta forma, o corpo neutro fica polarizado, ou seja, com excesso de elétrons em uma extremidade (polo negativo) e falta de elétrons na outra (polo positivo). Aterrando-se o polo positivo desse corpo, ele atrairá elétrons da Terra, até que essa extremidade fique novamente neutra. Em seguida, desfazendo-se o aterramento e afastando-se os corpos, observa-se que o corpo inicialmente neutro estará eletrizado com carga negativa (Markus, 2011).

Esse processo constitui a base teórica para o desenvolvimento do pulverizador eletrostático. Na solução registrada nas patentes da Embrapa (2016, 2017), a partir de uma fonte de alto potencial, os autores associam um eletrodo fixado na saída do bico pulverizador, como mostrado na Figura 2. Vale observar que a função do eletrodo trata apenas da geração de um campo elétrico no entorno do bico, já que ele não entra em contato com a calda.



Figura 2. Bico com pulverização eletrostática.
Fonte: (Chaim, 2006)

Na saída do bico, logo antes da formação da gota, a calda, que é uma solução aquosa não isolante, ainda está em contato com o restante do fluido até o reservatório e, portanto, pode apresentar polarização. Dessa forma, pode-se fazer o aterramento da calda no reservatório. Durante a pulverização, logo que as gotas são expelidas pelo bico, a calda perde esse contato, desfazendo-se o aterramento. Como está sujeita ao campo elétrico imposto pelo eletrodo, ocorre o processo de indução eletrostática descrito anteriormente. Assim, por meio desse processo, é possível obter gotas eletrizadas. Na Figura 3 apresenta-se um esquema desse processo.

Segundo Chaim (2006), há formas alternativas para se obter a eletrização da calda. Uma delas trata de eletrizar o reservatório diretamente e aterrar o eletrodo na zona de formação de gotas. Essa técnica é menos viável pelo fato da alta tensão ser aplicada em todos os componentes envolvidos. Além disso, demanda isolamento de todo o equipamento para evitar risco de danos aos circuitos e ao operador, aumentando assim seu custo de implementação.

Um dos problemas relacionados à eletrização do bico pulverizador é o fenômeno da retrotração. A retrotração consiste no retorno de gotas da pulverização para o eletrodo, devido ao seu alto potencial. Esse problema resulta em perdas da calda e para evitá-lo é necessário que o potencial aplicado não seja muito elevado. Esse é um problema que não pode ser eliminado completamente, mas pode ser atenuado mediante o uso de um eletrodo de pouca espessura, preferencialmente revestido de material hidrofóbico, que não permita o acúmulo de água em sua superfície (Chaim, 2006).

2.3 Fonte de Alta Tensão

A existência de um potencial elétrico elevado é fundamental no processo de eletrização por indução. A tensão deve ser contínua, uma vez que é necessário um polo positivo - ou negativo - no eletrodo para induzir a carga desejada no agrotóxico. No trabalho de Chaim (2006), a tensão utilizada para a indução foi de aproximadamente 10 kV. Uma das formas de obter essa tensão é usando-se um conversor CC-CC *flyback*, que consiste de um circuito de chaveamento associado a um transformador com alta relação de transformação.

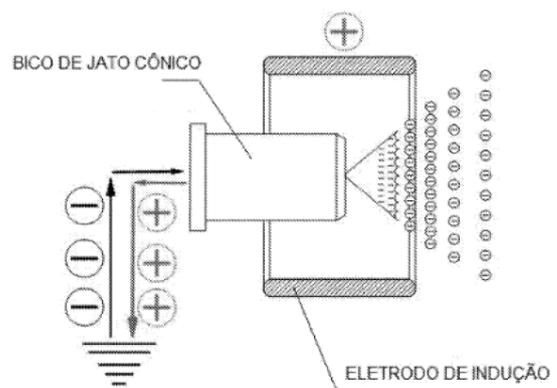


Figura 3. Esquema de eletrização da calda.
Fonte: (Chaim, 2006)

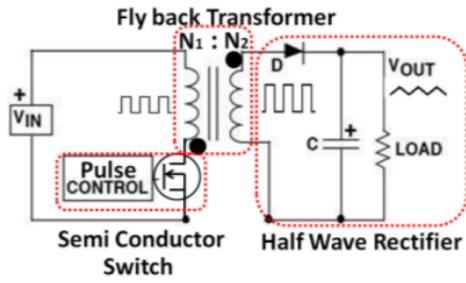


Figura 4. Esquema básico de um conversor CC-CC *flyback*.
Fonte: (Singhasathein et al., 2015)

Na Figura 4, mostra-se o esquema básico de um conversor *flyback*, em que o circuito recebe na entrada tensão de uma fonte contínua e alimenta um circuito oscilador, para a obtenção de pulsos de tensão no enrolamento primário do transformador. A partir de sua alta relação de transformação, produz-se no secundário uma alta tensão pulsante, da ordem de 30 kV. Na saída, usa-se um circuito retificador de meia onda associado a um filtro capacitivo, para que se obtenha uma alta tensão unidirecional contínua.

3. PULVERIZADOR ELETRÓSTÁTICO PROPOSTO

3.1 Sistema de eletrização baseado em conversor *flyback*

Para o entendimento do pulverizador eletrostático proposto, baseado em um conversor CC-CC *flyback*, considere o circuito mostrado na Figura 5. Nesse circuito, observa-se que o dispositivo é composto por uma fonte de tensão contínua, um circuito oscilador e um transformador *flyback* associado a um diodo de potência. O circuito oscilador NE 555 recebe uma tensão contínua de 12 Vcc e a converte para uma tensão alternada de mesmo valor de pico, com frequência definida pelo oscilador. O transformador *flyback*, por sua vez, recebe a tensão de 12 V alternada da saída do oscilador e a eleva para um nível de alta tensão, da ordem de milhares de Volts. Num dos terminais de saída do *flyback*, há um diodo de potência que permite a retificação dessa alta tensão para uma tensão unidirecional pulsante.

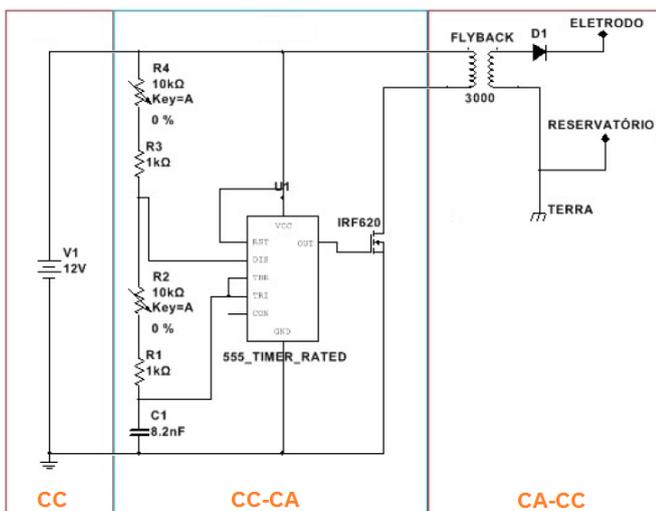


Figura 5. Diagr. esquemático conversor CC-CC *flyback*.
Fonte: Autores

O desenvolvimento do sistema apresentado na Figura 5 foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na simulação do circuito no Multisim (NI, 2019) a fim comprovar o funcionamento do circuito. Já na segunda etapa, é feita a implementação física do conversor CC-CC *flyback*. Nas subseções que seguem são apresentados os detalhes de cada uma dessas etapas.

Simulação do conversor CC-CC flyback: O circuito integrado 555 pode ser empregado em duas configurações básicas: astável e monoestável. Uma vez que é desejável a sua aplicação como oscilador é necessário que o mesmo seja ligado no modo astável. A saída do oscilador é conectada no *gate* de um MOSFET de potência IRF620, fazendo o chaveamento da tensão aplicada no primário do transformador. Nesse tipo de ligação, a tensão de saída é uma onda quadrada que oscila entre 0 V e 12 V. A frequência de oscilação, por sua vez, é definida pela rede resistiva e capacitiva conforme a seguinte equação (Tocci et al., 2007):

$$F_{osc} = \frac{1}{0,7 \cdot (R_a + 2 \cdot R_b) \cdot C} , \quad (1)$$

sendo F_{osc} a frequência da saída do oscilador, em Hz; R_a e R_b as resistências do divisor resistivo, em Ω ; e C o valor do capacitor de descarga, em F.

Aplicando (1) para o caso do oscilador simulado, com resistores $R_a = R_b = 1 \text{ k}\Omega$ e capacitor $C = 8,2 \text{ nF}$, tem-se:

$$F_{osc} = 58,07 \text{ kHz} .$$

Assim, uma onda quadrada de aproximadamente 55 kHz é aplicada a um resistor genérico de 1 M Ω , que simula o primário do transformador de *flyback* apresentado na Figura 4. O resistor é usado neste caso devido ao fato que o Multisim não dispõe de uma relação de transformação muito alta para transformadores ideais.

Implementação física do conversor CC-CC flyback: Nesta etapa, o circuito oscilador ilustrado na Figura 5 foi montado em uma matriz de contato (*proto board*) a fim de gerar na saída uma onda quadrada. A saída do oscilador, por sua vez, foi aplicada ao transformador de *flyback* associado ao diodo de potência para retificação em meia onda.

Para obter-se o melhor resultado desse arranjo, é necessário medir sua tensão de saída. Como não se dispunha de equipamento capaz de realizar medições acima de 1 kV, foi necessário adaptar uma medição indireta, a partir do comprimento do arco voltaico gerado. Conforme Villate (2015), cada milímetro de arco corresponde a aproximadamente 3 kV, que é a tensão necessária para romper a barreira dielétrica do ar e iniciar a condução de corrente. Com base nessa informação, foram realizados dois experimentos a fim de determinar a maior tensão gerada pelo mesmo.

No primeiro experimento, foi mantido um número fixo de dez de espiras no primário e a frequência de saída do oscilador foi alterada a partir de ajustes nos potenciômetros R2 e R4 (Figura 5). Para cada ajuste, foi obtido um valor de tensão na saída do *flyback*, medida indiretamente por meio de uma régua, conforme apresentado na Figura 6.

Os resultados obtidos com esses experimentos são mostrados no gráfico da Figura 7, a partir do qual, é possível

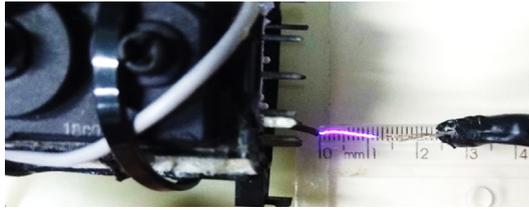


Figura 6. Medição do comprimento do arco voltaico.
Fonte: Autores

observar que o maior arco medido, que corresponde à maior tensão, foi obtido com frequência de 50 kHz.

Uma vez definido o “ajuste ótimo” para os potenciômetros, partiu-se para o segundo experimento, que consiste na determinação do número de espiras que produz a maior tensão. Nesse experimento, foi mantido o ajuste dos potenciômetros, enquanto o número de espiras no primário do transformador de *flyback* foi alterado, resultando em diversos valores de tensão de saída. Novamente, as tensões foram mensuradas através do comprimento do arco usando uma régua. Os resultados indicam que o número de espiras no primário do *flyback* que produz a maior tensão é igual a dez, como mostrado na Figura 8.

Na Figura 9, é mostrado o protótipo do conversor CC-CC *flyback* confeccionado em uma placa de circuito impresso. No projeto da placa, já foram consideradas dez espiras no primário do transformador e uma frequência de ajuste de 50 kHz para o oscilador, conforme os valores de melhor resultado nos experimentos anteriormente descritos.

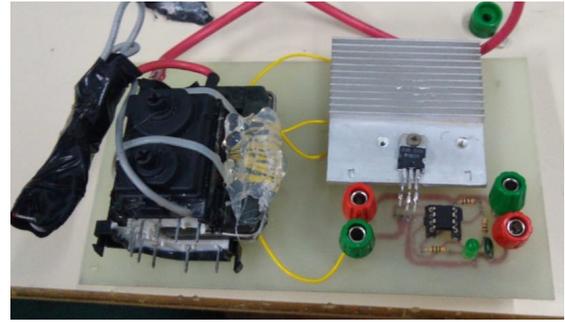


Figura 9. Placa do circuito conversor CC-CC *flyback*.
Fonte: Autores

Protótipo do Eletrodo: Para a condução de cargas elétricas do conversor ao eletrodo, foi usado um cabo coaxial. Já para a fixação do eletrodo ao bico pulverizador, foi usado um porta-eletrodo, projetado e fabricado em impressora 3D, com apoio da equipe do projeto AutoCERES, do Grupo de Automação e Robótica Inteligentes (NAUTEC), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O resultado pode ser visto na Figura 10. O eletrodo é responsável pela eletrização na zona de formação de gotas. O conversor CC-CC *flyback* associado a estrutura de eletrização descrita nesta subseção constitui o dispositivo pulverizador eletrostático desenvolvido neste trabalho.

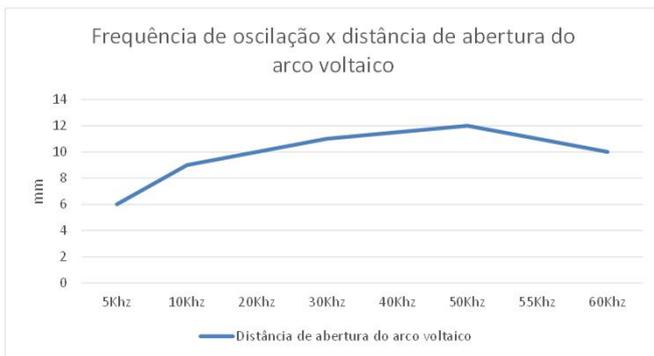


Figura 7. Comprim. do arco *versus* frequência de oscilação.
Fonte: Autores



Figura 8. Comprim. do arco *versus* n.º espiras no primário.
Fonte: Autores



Figura 10. Bico pulverizador com eletrodo.
Fonte: Autores

4. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

O desempenho do pulverizador eletrostático proposto neste trabalho (com eletrização) é avaliado mediante análises comparativas com um pulverizador convencional (sem eletrização). Para tanto, são fixados papéis hidrossensíveis³ na superfície inferior de algumas folhas da planta alvo. Considerando que a parte inferior dessas folhas possui pouca aderência da calda, são esperados os seguintes resultados dos experimentos:

- Pulverizador convencional: menor aderência na planta, representada pela presença de poucos pontos azul-escuros no papel hidrossensível.

³ O papel hidrossensível é originalmente amarelo e adquire coloração azul-escuro nos pontos onde houve contato com a água. Como tem alta sensibilidade, mesmo as pequenas gotículas de água ficam visíveis no papel, auxiliando na identificação da deposição de calda.

- Pulverizador eletrostático proposto: maior aderência na planta, representada pela presença de muitos pontos azul-escuros no papel hidrossensível.

Assim, o objetivo principal é que as gotas pulverizadas tenham a maior aderência possível na planta, a fim de reduzir a deriva e a dissipação da calda sobre demais culturas nas quais a aplicação não é desejada. Para a realização dos experimentos, foi grampeado um papel hidrossensível abaixo de uma das folhas da planta. Na Figura 11, apresenta-se a fixação do papel e o resultado de duas aplicações distintas.

Após os experimentos de campo, os papéis hidrossensíveis são submetidos a um processamento de imagem, a fim de contabilizar os pontos escuros e avaliar a aderência da calda. Esse processamento e as rotinas usadas para a contagem dos pixels nos papéis foram desenvolvidos em ambiente Matlab (MathWorks, 2009).

4.1 Análise de Desempenho do Dispositivo Proposto

A seguir, são apresentadas análises comparativas de desempenho do pulverizador eletrostático proposto frente a um pulverizador convencional, considerando diferentes parâmetros de análise, como variação da pressão da calda, variação da tensão no primário do *flyback* e variação da velocidade do vento.

É importante ressaltar que a tensão foi mantida como parâmetro ajustável, visto que a solução ainda é um protótipo em fase de testes. Já a pressão da calda é um parâmetro que pode ser alterado tanto no pulverizador convencional quanto no pulverizador eletrostático proposto, pois é padrão o equipamento contar com um regulador manual de pressão. A velocidade do vento foi mensurada no momento de execução de cada um dos experimentos por meio de um anemômetro.

Os resultados são apresentados na Tabela 1 e discutidos a seguir, avaliando-se individualmente cada um dos parâmetros variáveis.

Variação da Pressão de Pulverização: Para a avaliação do pulverizador proposto, no que tange à variação da pressão de trabalho, consideram-se os resultados apresentados na Tabela 1. Com base na tabela, é possível observar que a solução proposta apresenta maior área percentual de aderência da calda no papel hidrossensível do que o pulverizador convencional, considerando diferentes valores de pressão de calda.

O caso de maior aderência da calda na planta (medido a partir do processamento da imagem do papel hidrossensível)

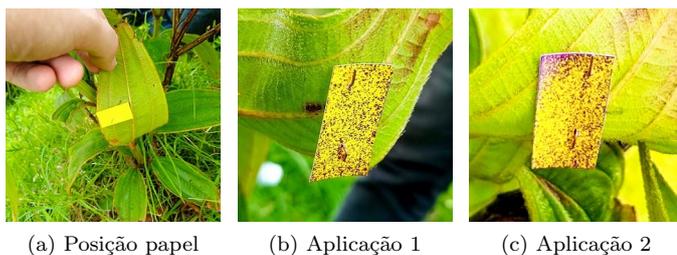


Figura 11. Exemplos de fixação dos papéis e resultados.
Fonte: Autores

Tabela 1. Desempenho do pulverizador convencional *versus* solução proposta.

Parâmetr. variável	Pressão (bar)	Tensão (V)	Vento (km/h)	Área de aderência (%)	
				Convenc.	Propost.
Pressão	4,1	12	10	9,69	16,87
	3,1			0,72	2,26
	2,0			0,98	1,37
Tensão	4,1	10	11	8,01	17,07
		8		0,73	4,98
		6		0,73	4,98
Vento	4,1	8	10	2,48	9,69
			13	1,41	6,30
			18	0,86	19,76

Fonte: Autores

vel) corresponde a maior pressão experimentada (4,1 bar). Nesse caso, observa-se que o sistema proposto apresenta uma área de aderência em torno de 17% enquanto o pulverizador convencional apresenta aproximadamente 10% de aderência, apenas.

Na Figura 12, apresenta-se uma comparação dos papéis hidrossensíveis resultantes da aplicação com o pulverizador convencional e com o pulverizador eletrostático proposto. O sistema proposto apresenta maior quantidade e melhor distribuição de “pixels escuros”, comprovando um melhor desempenho da técnica aqui apresentada.

Variação da Tensão no Primário do Transformador: O sistema proposto é avaliado também a partir da análise do efeito da variação da tensão no primário do transformador. Os resultados podem ser vistos na Tabela 1. Observa-se que o pulverizador proposto apresenta melhor cobertura percentual no papel hidrossensível do que o pulverizador convencional, para diferentes níveis de tensão no primário do transformador.

No caso de maior aderência, que corresponde a maior tensão de entrada experimentada (12 V), observa-se que o pulverizador proposto apresenta uma área de aderência em torno de 17%, enquanto o pulverizador convencional apresenta aproximadamente 8%. Para esse caso, ilustrado na Figura 13, mais uma vez, observa-se maior quantidade de “pixels escuros” com o pulverizador eletrostático, comprovando novamente um melhor desempenho da técnica proposta.

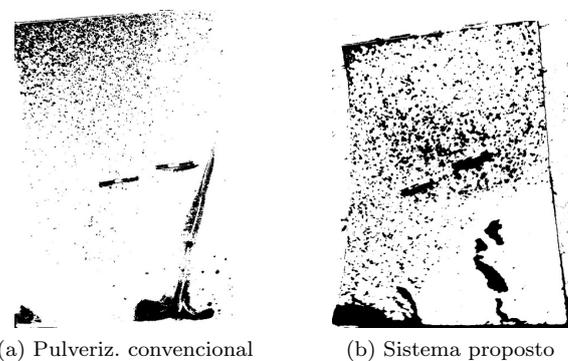


Figura 12. Papéis hidrossensíveis resultantes do pulverizador convencional (a) e do proposto (b), com: 12 V na entrada; 4,1 bar de pressão; e vento de 10 km/h.
Fonte: Autores

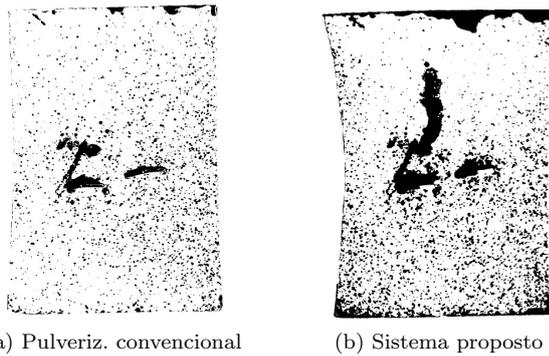


Figura 13. Papéis hidrossensíveis resultantes do pulverizador convencional (a) e do proposto (b), com: 10 V na entrada; 4,1 bar de pressão; e vento de 11 km/h.

Fonte: Autores

Variação da Velocidade do Vento: Para a avaliação da variação da velocidade do vento, observam-se os resultados apresentados na Tabela 1. Novamente, o pulverizador proposto apresenta maior área de aderência da calda no papel hidrossensível. Dessa vez, considerando diferentes velocidades de vento.

O caso de maior aderência corresponde a maior velocidade experimentada (18 km/h), observa-se que o pulverizador proposto apresenta uma área de aderência em torno de 19% enquanto o convencional apresenta baixíssima aderência, algo em torno de 1%.

Na Figura 14, podem-se ver os papéis hidrossensíveis resultantes das aplicações. Mais uma vez, o papel utilizado com o sistema proposto apresenta quantidade muito maior de “pixels escuros” do que o submetido ao pulverizador convencional, comprovando o melhor desempenho da técnica proposta.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentada uma solução de eletrização para um pulverizador agrícola eletrostático, fundamentada em um conversor CC-CC *flyback*. De modo geral, as análises comparativas com um pulverizador convencional mostram que a eletrização da calda aumenta a eficiência na aplicação do agrotóxico. Observou-se que o agrotóxico atinge a área de interesse de forma mais efetiva, podendo permitir redução na quantidade de produtos químicos apli-

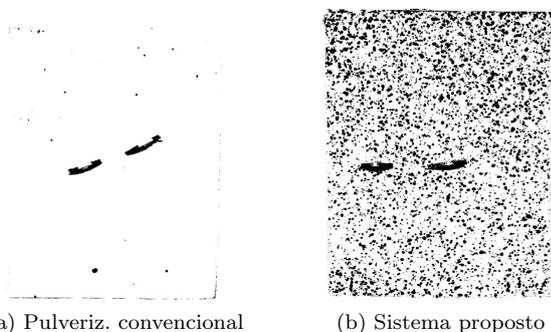


Figura 14. Papéis hidrossensíveis resultantes do pulverizador convencional (a) e do proposto (b), com: 8 V na entrada; 4,1 bar de pressão; e vento de 18 km/h.

Fonte: Autores

cados, além de evitar perdas e a consequente intoxicação de culturas de produção adjacentes. Portanto, os resultados observados neste trabalho são compatíveis com o que se esperava a partir dos dados indicados por outros autores, como Yanliang et al. (2017); Khatawkar et al. (2020a,b); Chaim (2006, 2007); Antonov (2019); Patel et al. (2016).

Os experimentos mostraram que o pulverizador proposto apresenta melhor desempenho com jatos de maior pressão. Nesse caso, as gotas são menores e, portanto, mais suscetíveis ao processo de eletrização e mais facilmente atraídas pelas plantas, resultando em maior aderência.

Os experimentos de variação da tensão no primário do transformador de *flyback* mostraram que o aumento da tensão também implica em aumento na aderência da calda nas plantas. Contudo, esse resultado nem sempre reflete em maior desempenho, uma vez que, para tensões muito altas, grande parte das gotas são atraídas de volta pelo próprio conjunto eletrodo e bico pulverizador, caracterizando o fenômeno da retroatração. Essa foi a principal razão do ajuste final do equipamento ter sido feito com tensão de entrada de 8 V.

A análise do efeito de deriva mostra que o pulverizador eletrostático proposto é muito mais eficiente do que o convencional para controle da pulverização sob a ação do vento.

A implementação do dispositivo proposto é de baixo custo e fácil manutenção, facilitando o acesso e a aceitação dos produtores rurais de pequeno porte e agricultores familiares. Portanto, entende-se que este tema representa um nicho de pesquisa com forte interesse não só para a academia mas também para a sociedade.

Como trabalhos futuros, sugere-se implementar outros circuitos e topologias de fontes de alta tensão para comparar desempenho e consumo energético. Propõe-se também a implementação de um dispositivo de medição de alta impedância que permita comparar as formas de onda com auxílio de um osciloscópio.

REFERÊNCIAS

- Antonov, S. (2019). Development of high voltage source for spraying plants with ionized aerosol. In *Engineering for Rural Development*, 808–813.
- Bacci, C. (2018). Para alimentar o mundo, é preciso trazer inovação para a agricultura. URL <https://agrosmart.com.br/blog/alimentar-o-mundo-trazer-inovacao-para-agricultura/>. Acesso em: 09 out. 2019.
- Chaim, A. (2006). *Pulverização eletrostática: principais processos utilizados para eletrificação de gotas*. Embrapa Meio Ambiente.
- Chaim, A. (2007). Pulverização eletrostática com bicos hidráulicos. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, 17.
- de Carvalho, T. and Chagas, I. (2018). Brasil, campeão mundial em consumo de agrotóxicos. URL <https://www.politize.com.br/brasil-campeao-mundial-em-consumo-de-agrotoxicos>. Acesso em: 09 out. 2019.
- Dexter, A.G. (1993). Herbicide spray drift. *NDSU*.

- Embrapa (2016). Disposição construtiva aplicada à tecnologia de bico pneumático eletrostático. Patente: BR 10 2013 032646-1 A2. Inventor: CHAIM, Aldemir; WADT, Luiz Guilherme. Publicação: 23/08/2016 INPI.
- Embrapa (2017). Induction device for electrifying jets of droplets from hydraulic nozzles. WO 2017/063065 A1. Inventor: CHAIM, Aldemir. Publicação: 20 de abril de 2017.
- Inquima (2016). Deriva – o que é e como evitar durante a aplicação de defensivos agrícolas? URL <https://inquima.com.br/o-que-e-e-como-evitar-a-deriva-durante-a-aplicacao-de-defensivos-agricolas>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- Khatawkar, D.S., Dhalin, D., and James, P.S. (2020a). Electrostatic conversion kit for conventional knapsack mist-blower: Development and performance evaluation. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 9(3), 2227–2242.
- Khatawkar, D.S., Dhalin, D., James, P.S., and Subhagan, S.R. (2020b). Electrostatic induction spray-charging system (embedded electrode) for knapsack mist-blower. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 80–91.
- Markus, O. (2011). *Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada: teoria e exercícios*. Érica, São Paulo, 9 edition.
- MathWorks (2009). Matlab. The MathWorks, Natick, MA, USA.
- NI (2019). Multisim - National Instruments. URL <https://www.ni.com/pt-br/shop/select/multisim>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- ONU (2019). World population prospects: The 2019 revision. URL <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 09 out. 2019.
- Patel, M.K., Sahoo, H.K., and Ghanshyam, C. (2016). High voltage generation for charging of liquid sprays in air-assisted electrostatic nozzle system. *IETE Journal of Research*, 62(3), 424–431.
- Singhasathien, A., Kesi, W., Boonyayut, S., Suwanpingkarl, P., Pounsri, P., Pruksanubal, A., and Tanthanuch, N. (2015). Design and construction of 30 kv high voltage generator using fly-back converter. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 781, 361–365. Trans Tech Publ.
- Tocci, R.J., Widmer, N.S., and MOSS, G.L. (2007). *Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações*. Prentice Hall, Rio de Janeiro, 11^a edition.
- Vicente, M. (2016). Novas tecnologias reduzem uso de agrotóxicos. URL <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/11914867/novas-tecnologias-reduzem-uso-de-agrotoxicos>. Acesso em: 09 out. 2019.
- Villate, J.E. (2015). Eletricidade, magnetismo e circuitos. *Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia*.
- Yanliang, Z., Qi, L., and Wei, Z. (2017). Design and test of a six-rotor unmanned aerial vehicle (uav) electrostatic spraying system for crop protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(6), 68–76.