ESTRATÉGIAS PARA DETERMINAÇÃO DA DOSE DE PLASMA DE UM JATO DE PLASMA REMOTO

Matheus Henrique Lemos de Oliveira, Nathan Henrique de Melo Quintino da Silva, Julio César Sagás

INTRODUÇÃO

Dentre as tecnologias de plasma emergentes, jatos de plasma em pressão atmosférica têm se destacado em aplicações biomédicas (Kostov et al., 2015), nas quais é necessário evitar a formação de arcos. Uma estratégia para realizar isso é a inserção de um dielétrico entre os eletrodos, formando uma descarga de barreira dielétrica (DBD) (Bruggeman; Iza; Brandenburg, 2017). Neste contexto, a dose de plasma surge como parâmetro global para comparação entre formas de tratamento; diferentes definições são propostas, mas todas demandam o conhecimento da potência transferida do plasma para a superfície. No caso da DBD, isto pode ser obtido por meio da técnica de figuras de Lissajous.

Pelo modelo proposto por Pipa e Brandenburg (2019), um sistema DBD pode ser representado pelo circuito equivalente da figura 1-a. Durante a fase passiva, o gás atua como um dielétrico de capacitância C_g que se associa com C_d, a capacitância do material dielétrico, para formar uma capacitância equivalente C_{cell}. Durante a fase ativa, C_g idealmente tende a zero devido à passagem de corrente de condução relacionada à resistência variável R, considerada infinita enquanto não há plasma. Para a medida experimental, um capacitor externo (C_{ext}) é associado em série ao circuito. Seu valor é escolhido de modo que a capacitância do circuito permaneça praticamente inalterada.

Por estar associado em série, a carga em C_{ext} é igual à carga total Q do circuito. Ao longo de um período, a relação entre a carga Q do circuito e a tensão V aplicada pela fonte forma uma figura de Lissajous como o paralelogramo mostrado na figura 1-b. As capacitâncias podem então ser determinadas pela inclinação das curvas nas diferentes fases, enquanto a energia transferida (logo, a potência) é obtida a partir da área da curva.

Estes cálculos são usualmente realizados curva a curva, o que pode se tornar uma tarefa laboriosa e demorada; com base nesse cenário, o presente trabalho se propõe a desenvolver um algoritmo para análise automatizada das Figuras de Lissajous, a fim de criar uma estratégia consistente e de rápido funcionamento para determinar a dose de plasma de um jato de plasma remoto.

DESENVOLVIMENTO

Para desenvolver o código, escolheu-se a linguagem de programação *Python* por conta de sua simplicidade e disponibilidade de bibliotecas. O algoritmo possui 7 etapas: leitura de dados, cálculo de potência, separação das fases, cálculo bruto de retas, filtragem dos dados, escolha da melhor reta e criação de gráficos. A primeira etapa consiste na leitura do arquivo com os dados experimentais no formato csv contendo os dados de tensão da fonte, tensão no capacitor externo e tempo. Calcula-se a carga em função do tempo a partir da tensão no capacitor, enquanto a frequência da fonte é obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier (PRESS et al., 2007). A obtenção da frequência por este método permite que o usuário possa trabalhar com dados em frequências diversas sem necessidade de informá-la em cada arquivo. Na segunda etapa, a potência é determinada a partir da frequência e da área da curva, calculada numericamente pelo método de Simpson (Ruggiero; Lopes, 1998).

Na terceira etapa, separa-se o período em quatro partes referentes às fases da descarga; isso é feito identificando os picos de tensão (fim da descarga ativa) e as mudanças de sinal da fonte (fim da descarga passiva). De acordo com o modelo ideal, cada fase forma uma reta cuja inclinação pode ser calculada por meio de uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados (Barbetta; Reis;

Bornia, 2010). No entanto, a maioria das curvas reais apresentará comportamento linear apenas em um trecho do intervalo devido, entre outros fatores, à variação da capacitância na fase ativa.
Usualmente, um usuário treinado seleciona o intervalo adequado para o cálculo das capacitâncias, mas criar um algoritmo que faça isso requer um método mais sistemático. Deste modo, a quarta etapa é feita da seguinte maneira: sendo n o número de pontos, P_i o primeiro e P_n o último ponto do intervalo (fase), calcula-se a reta de regressão entre P_i e P_n, depois entre P_{i+1} e P_n, e assim sucessivamente até P_{n-2} e P_n. Após isso, o cálculo é feito fixando P_i e variando o ponto final da reta desde P_n até P_{i+2}. Retas com coeficiente de determinação (R^2) menor que 0,90 são descartadas devido ao desvio da linearidade. Os coeficientes angulares e lineares destas retas são normalmente distribuídos, então a quinta etapa consiste em retirar do conjunto as retas cujos coeficientes angulares estão a mais de um desvio padrão de distância da média do conjunto.
Na sexta etapa não basta apenas selecionar a reta que possua o melhor coeficiente de determinação dentro do conjunto, já que seriam simplesmente selecionadas as retas com menor quantidade de pontos. Para evitar isso, criou-se o parâmetro Coeficiente de Determinação Ponderado:

$$CDM = (1 - R^2) + \left(\frac{q_{max} - q}{q_{max}}\right) \quad (1)$$

No qual q é a quantidade de pontos na reta avaliada e q_{max} a quantidade de pontos total no intervalo (determinado na etapa três) ao qual essa reta pertence. Escolheu-se, então, a reta com menor CDM, garantindo um equilíbrio entre quantidade de dados utilizados e precisão dos resultados.
A etapa final consiste simplesmente em apresentar o gráfico com os dados experimentais, as retas calculadas pelo programa e o valor numérico dos coeficientes.

RESULTADOS

A figura 2 mostra dois exemplos de Figuras de Lissajous obtidas experimentalmente. Observa-se que as retas foram identificadas razoavelmente apesar da irregularidade da curva. Para o caso mostrado na figura 2-a, a qual se assemelha mais do caso ideal, o algoritmo desenvolvido obteve os valores de C_d = 2,98 pF, C_{cell} = 0,54 pF e potência de 1,50 W, sendo essas as médias para quatro períodos. Os valores obtidos via o cálculo "manual", também sobre quatro períodos, foram de C_d = 2,88 pF, C_{cell} = 0,50 pF e potência de 1,45 W, correspondendo a erros menores que 4% para C_d e a potência e 8% para C_{cell}, usando o cálculo tradicional como referência. Para a figura 2-b, a qual é extremamente irregular, se obteve C_d = 3,89 pF, C_{cell} = 0,67 pF e potência de 0,69 W, mostrando que o programa não está restrito a curvas próximas do ideal ao passo que foi capaz de identificar corretamente as retas.
Estes resultados demonstram a efetividade do algoritmo no cálculo automatizado das grandezas de interesse. No quesito de rapidez, o algoritmo supera facilmente qualquer usuário realizando cálculos individuais: a análise completa de um conjunto de dados leva menos de dez segundos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que o programa desenvolvido ao longo deste projeto é capaz de produzir resultados equivalentes aos de uma pessoa munida com as devidas ferramentas de análise, mas em um tempo notavelmente menor e de forma mais sistemática e reprodutível. As próximas etapas do projeto consistirão em otimizar o código, incluir o cálculo dos outros parâmetros da descarga, validar o código a partir da análise de um grande conjunto de dados previamente analisadas por usuários treinados e, então, aplicá-lo para a análise da dose de plasma de reatores reais.

Palavras-chave: plasma, Figuras de Lissajous, circuito equivalente.

ANEXOS

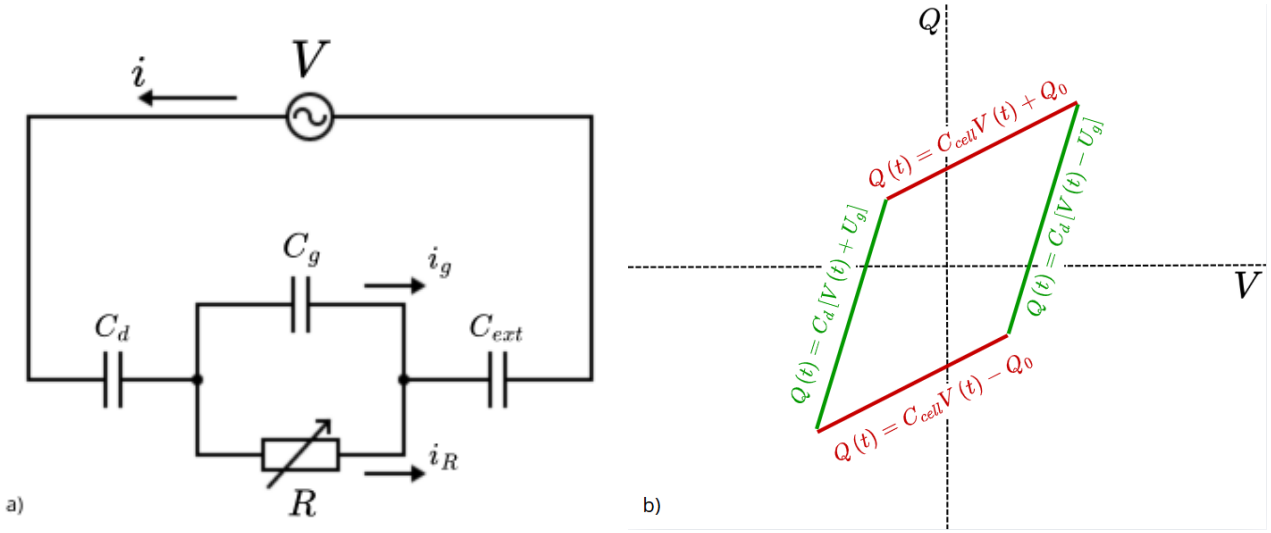


Figura 1. *Diagrama do circuito equivalente (a) e figura de Lissajous ideal, gráfico da carga no capacitor versus tensão da fonte (b), mostrando as retas correspondentes às fases ativa (verde) e passiva (vermelha), sendo U_g a tensão da descarga e Q_0 a carga acumulada no ciclo anterior.*

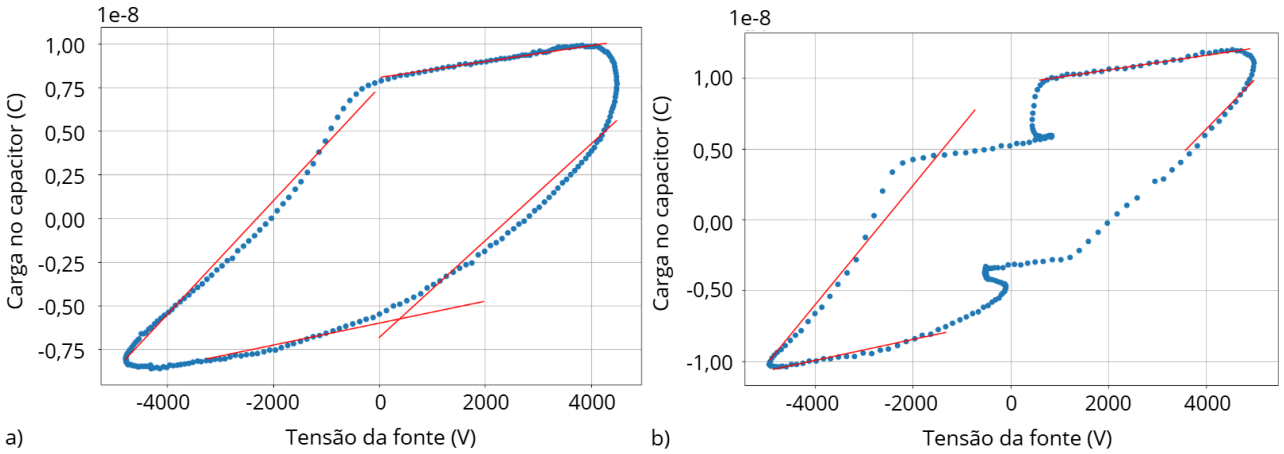


Figura 2. *Exemplo de figuras de Lissajous analisados com o algoritmo. Os dados experimentais são representados pelos pontos azuis e as retas determinadas para o cálculo das capacitâncias estão em vermelho.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 410 p. ISBN 9788522459940 (broch.).

BRUGGEMAN, Peter J.; IZA, Felipe; BRANDENBURG, Ronny. Foundations of atmospheric pressure non-equilibrium plasmas. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 26, n. 12, 123002, 2017. DOI: 10.1088/1361-6595/aa97af.

KOSTOV, Konstantin G.; MACHIDA, Munemasa; PRYSIAZHNYI, Vadym; HONDA, Roberto Y. Transfer of a cold atmospheric pressure plasma jet through a long flexible plastic tube. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 24, n. 2, 025038, 2015. DOI: 10.1088/0963-0252/24/2/025038.

PIPA, Andrei V.; BRANDENBURG, Ronny. The Equivalent Circuit Approach for the Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges: The Classical Theory and Recent Developments. **Atoms**, v. 7, n. 1, 14, 2019. DOI: 10.3390/atoms7010014.

PRESS, William H.; TEUKOLSKY, Saul A.; VETTERLING, William T.; FLANNERY, Brian P. **Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. cap. 12-13.

RUGGIERO, Marcia A. G.; LOPES, Vera L. da R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1998.