

Desenvolvimento e Caracterização de um Sistema de Descarga por Barreira Dielétrica

Thomas T. de O. Pereira, Júlio C. P. Barboza,
Clodomiro. Alves Jr.
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Rio Grande do Norte, Brasil
thomas_tadeu@hotmail.com, cesar@ufersa.edu.br,
clodomiro.jr@hotmail.com

Reuber R. de Melo, Hugo Fernandes M. da Silva
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Rio Grande do Norte, Brasil
reuberegis@gmail.com, hugofernandes20@hotmail.com

Abstract—The electrical and optical characteristics of an asymmetrical surface dielectric barrier discharge in atmospheric air have been investigated experimentally. Voltages in the range of 18-29kV and 18-22kHz frequencies were applied to the DBD system, producing filamentous and diffuse discharges on the surface of a glass dielectric. These discharges reached peak currents up to 4mA. In terms of efficiency, the system obtained minimum power 5W required to produce plasma diffuse regime. The best conditions found in the system were found for the distance between electrodes 0.8mm.

Index Terms--Dielectric barrier discharge, plasma applications, plasma devices.

I. INTRODUÇÃO

ESTUDOS na área de plasma em pressão atmosférica estão em crescente destaque devido sua versatilidade, por ser ambientalmente correto e possuir baixo custo de implantação. A técnica de plasma atmosférica conhecida como Descarga por Barreira Dielétrica (DBD) vem sendo usada em vários processos, como ativação e limpeza de superfícies, tratamento de materiais, esterilização de material hospitalar e tratamento médico [1]. No ramo alimentício pode-se destacar o uso do plasma para descontaminação de alimentos [2]. Na agricultura estudos mostram a aplicação de plasma para inativação de fungos e bactérias, assim como o pré-tratamento de sementes para estimular a germinação [3-8].

O DBD ocorre quando uma alta tensão pulsada é aplicada entre dois eletrodos metálicos onde pelo menos um é coberto com material dielétrico. Quando essa tensão rompe a barreira dielétrica, várias microdescargas se distribuem na superfície do dielétrico dando origem ao plasma DBD em regime filamentar. Quando essas microdescargas são mais numerosas, homogêneas e distribuídas dão origem ao plasma DBD em regime difuso [9]. Algumas propriedades básicas do DBD e aplicações em tratamentos de superfícies podem ser visto em [10].

O plasma DBD pode ser caracterizado de acordo com a configuração dos eletrodos. Existem basicamente quatro configurações de eletrodos: planar, cilíndrico, descarga em superfície e descarga coplanar. Os materiais tipicamente usados para a barreira dielétrica são o vidro, quartzo e cerâmica. Também podem ser usado como material dielétrico: folhas de

plástico, placas de PTFE-Politetrafluoretileno e outros materiais isolantes [10].

O plasma DBD na forma de descarga em superfície pode ser disposto assimetricamente como apresentado em [11]. Alguns estudos mostram a aplicação desse tipo de plasma em atuadores e até mesmo em tratamento de sementes [12,13]. O trabalho realizado em [12] aborda o uso de um sistema DBD feito por dois eletrodos colocados em ambos os lados de uma placa de vidro (comprimento 120mm, largura 90mm, espessura 1.5mm). O eletrodo de alta tensão é uma matriz de 13 fios de cobre, cada fio com 100 μ m de diâmetro e comprimento de 44mm. As distâncias entre os fios são de 6mm. O eletrodo terra é feito com uma fita de alumínio (comprimento 90mm, largura 48mm). As sementes de trigo tratadas por este sistemas obtiveram efeito positivo no crescimento. Devido às vantagens como: tratamento uniforme, não destruição da semente, sem uso de produtos químicos; o plasma pode tornar-se uma alternativa eficaz na agricultura.

Em [13] um estudo completo de um atuador aerodinâmico a plasma é realizado, relatando os materiais dielétricos utilizados, como PTFE-Politetrafluoretileno e Quartzo, assim como a influência da frequência e tensão aplicada na potência dissipada pelo atuador. Também é verificado o comportamento do atuador quando muda a distância entre eletrodos.

Existe uma série de trabalhos envolvendo estudos sobre sistemas DBD assimétricos, onde a caracterização elétrica é uma forte fonte de conhecimento para ter o controle desses tipos de sistemas [14-17]. Além da caracterização elétrica, outro fator importante é saber as espécies ativas no plasma gerado.

Este trabalho apresenta um estudo sobre um sistema DBD com um dielétrico de vidro e dois eletrodos de cobre dispostos assimetricamente nos dois lados do vidro. Este trabalho tem o objetivo de caracterizar eletricamente esse sistema DBD, buscando entender o comportamento da corrente, energia no ciclo de descarga e potência consumida. Além da caracterização elétrica esse trabalho busca entender a característica espectral do plasma gerado. A contribuição deste trabalho visa também aplicações como as realizadas em [18], onde houve um resultado positivo na molhabilidade e germinação quando sementes de “Sabiá” (*Mimosa caesalpiniiifolia Benth.*) foram submetidos a presença do plasma por diferentes período de tempo.

II. CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO

A. O Sistema DBD

O sistema DBD apresentado neste trabalho produz uma descarga na superfície de uma placa dielétrica plana, com dois eletrodos entre a placa e configurados assimetricamente, como é ilustrado na Fig. 1. Um dos eletrodos é conectado a uma fonte de alta tensão (30 kV_{p-p}) que fornece uma forma de onda senoidal da tensão. O eletrodo oposto é ligado ao terra, com uma resistência ou capacitância em série. O dielétrico é feito de vidro com uma espessura de 1.2mm. Os eletrodos consistem de finas tiras de cobre de comprimento 33mm, largura 11mm e uma distância d de 0.4mm a 1.6mm entre eletrodos. A tensão senoidal com amplitude máxima próxima de 15kV, ou seja, 30kV pico a pico, é aplicada entre os eletrodos com uma frequência de 18-22kHz.

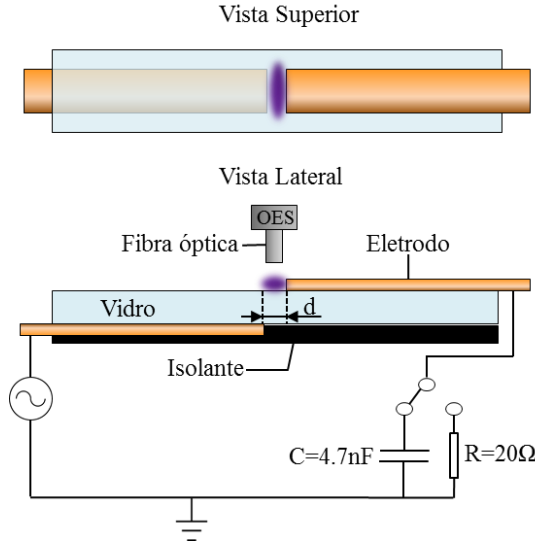


Figura 1. Diagrama do aparato experimental

B. Medidas Elétricas

As medidas elétricas do sistema DBD foram feitas usando um osciloscópio de dois canais (Keysight DSOX2002A). Os dados capturados pelo osciloscópio foram armazenados em um dispositivo de memória removível, e posteriormente visualizados graficamente no PC pelo software Origin® 8. Para medir a diferença de potencial aplicada sobre o sistema foi usado uma ponta de prova de alta tensão 1000:1 (Keysight N2771B). A corrente i em função do tempo na descarga foi calculada pela equação (1) de acordo com a Lei de Ohm, onde foi medida a queda de tensão V_R sobre um resistor R de 20Ω em série com o sistema. Para a medida dessa queda de tensão usou-se uma ponta de prova 10:1 (Keysight N2871A).

$$i(t) = \frac{V_R(t)}{R} \quad (1)$$

A carga transferida por cada ciclo de descarga foi medida experimentalmente usando um capacitor C de 4.7nF em série ao sistema. A tensão V_C sobre o capacitor é medida pela ponta de prova 10:1, e o valor da quantidade de carga Q no capacitor é calculado pela equação (2).

$$Q(t) = CV_C(t) \quad (2)$$

Com essa medida de carga foi possível calcular a potência consumida pela descarga usando o método da figura de

Lissajous, que consiste em plotar a carga transferida em função da tensão periódica aplicada. Baseado nos estudos de [19], a energia elétrica E consumida no processo de descarga por barreira dielétrica é dada pelo cálculo da área interna da figura de Lissajous, descrita por:

$$E = \int_0^t V(t)dQ \quad (3)$$

Onde V é a tensão aplicada nos eletrodos e dQ a carga infinitesimal do capacitor C . Dessa forma, a potência P é obtida multiplicando a energia elétrica pela frequência f do pulso de tensão aplicada, como demonstrado na equação (4).

$$P = fE \quad (4)$$

A área absoluta da figura de Lissajous foi calculada de forma computacional usando a ferramenta matemática de integração do programa Origin 8.

C. Espectroscopia de Emissão Óptica

Para a análise da intensidade luminosa do plasma gerado foi realizada medições de Espectroscopia de Emissão Óptica (OES, do inglês *Optical Emission Spectroscopy*). O equipamento utilizado para essas medições foi um espectrômetro modelo USB4000 UV-VIS (Ocean Optics) juntamente com o software *SpectraSuite*. A aquisição do espectro foi obtida projetando a fibra óptica do equipamento aproximadamente 1mm do plasma gerado pelo sistema DBD, como ilustrado na vista lateral da Fig. 1.

A intensidade luminosa I proveniente do plasma atmosférico foi calculada pela equação (5), que basicamente significa a área sob a curva do espectro luminoso [1, 20]. As medidas de OES são interessantes para identificar espécies atômicas, moleculares e íons formados no plasma. As principais espécies ativas típicas no DBD são as da molécula de N_2 , e se concentram mais na faixa de 300nm a 420nm [21].

$$I = \int_{300}^{420} I(\lambda)d\lambda \quad (5)$$

Também foi calculada a eficiência do sistema DBD a partir da razão I/E . Essa medida permitiu visualizar qual a frequência e distância entre eletrodos tornavam o sistema DBD mais eficiente.

Por fim, a área sob a curva representada pela a integral da equação (5) também foi calculada de forma computacional com o auxílio do programa Origin 8.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A produção de plasma precisa de condições e parâmetros ideais para que ele seja formado. No estudo deste trabalho, o sistema DBD foi submetido a diferentes tensões, frequências e distâncias entre eletrodos. A seguir são apresentados os resultados de cada um dos parâmetros estudados.

O primeiro parâmetro estudado foi a influência da frequência da tensão aplicada sobre os eletrodos do sistema DBD, que serviu como base para as próximas análises. Nesse estudo, inicialmente manteve-se fixo uma tensão máxima fornecida pela fonte de tensão ($V = 29\text{ kV}_{p-p}$), e variou-se a frequência dessa tensão de 18-22kHz. Essa faixa de frequência foi encontrada por meio de observações em testes experimentais.

A análise foi iniciada com a aplicação da tensão fixa para o eletrodo com distância $d = 1.6\text{ mm}$ e frequência $f = 18\text{ kHz}$, onde foi observado o início da formação de plasma no sistema

DBD. Posteriormente foi aplicada a mesma tensão fixa com frequências de 20kHz e 22kHz. Dessa mesma forma foi analisada a geração de plasma para as distâncias de 0.4mm, 0.8mm e 1.2mm.

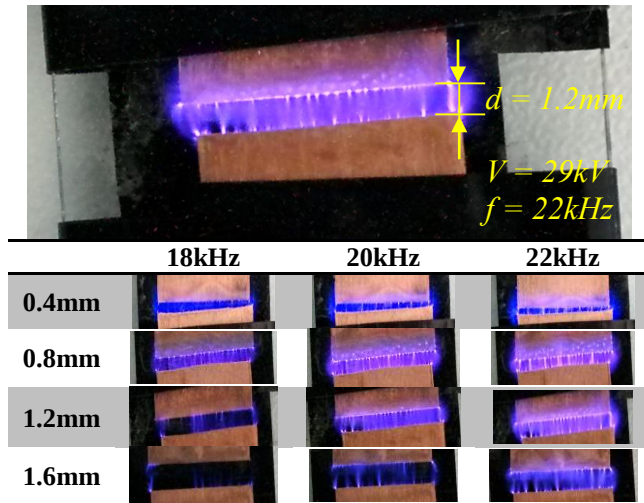


Figura 2. Comparação dos diferentes eletrodos submetidos a uma tensão fixa de $29kV_{p-p}$ com frequências de 18kHz, 20kHz e 22kHz.

Na Fig. 2 são mostradas as fotos dos diferentes plasmas gerados, sendo notória a influência da frequência e distância no comportamento do plasma. A partir desse estudo inicial foi feito a caracterização elétrica e óptica do sistema DBD, assim como a eficiência energética provocada pelas mudanças de parâmetros.

A. Caracterização Elétrica

Na caracterização elétrica, a corrente na descarga foi calculada para as quatro distâncias estudadas, mantendo-se constante a tensão e frequência em $V = 29kV_{p-p}$ e $f = 22kHz$. Na medida em que a distância entre os eletrodos aumenta, a amplitude da corrente na descarga diminui em decorrência do aumento da resistência. Para a distância de 0,4 mm o gráfico da Fig. 3 mostra a corrente com diversos picos bem acentuados, isto caracteriza a formação de arcs elétricos entre os eletrodos, devido à proximidade e a alta tensão aplicada.

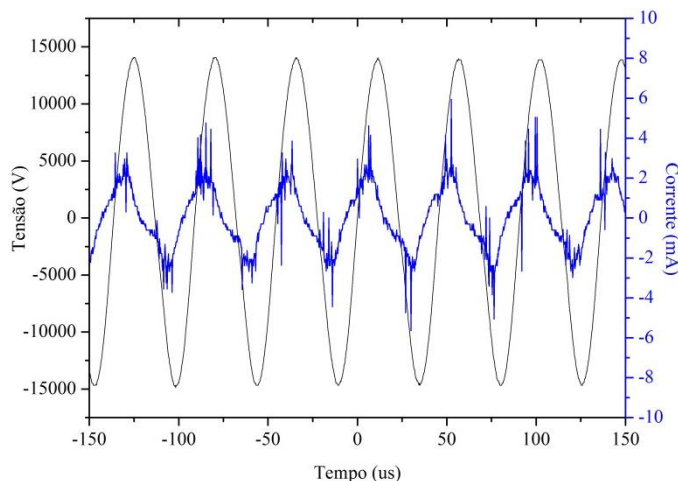


Figura 3. Tensão e corrente versus tempo ($V = 29kV_{p-p}$, $f = 22kHz$, $d = 0.4mm$).

Também na Fig. 3 pode ser observada uma pequena defasagem da corrente quando comparado com o sinal de tensão, causado pelo efeito capacitivo entre os eletrodos e igualmente observado nos estudos de [11, 22, 23]. Já na distância de 1,6 mm a amplitude da corrente é a menor como também a presença de arcs elétricos.

Outro parâmetro analisado foi a energia consumida por ciclo de produção de plasma para as quatro distâncias estudadas. Essa energia foi calculada pela área da figura de Lissajous e representada pela equação (3). A frequência de 22kHz apresentou maior energia em relação as demais, então foi analisado os gráficos de Lissajous para as diferentes distâncias nesta frequência, como pode ser observado na Fig. 4. Notou-se que com o aumento da distância entre os eletrodos ocorre a diminuição da energia consumida. O mesmo comportamento foi constatado para as frequências de 18kHz e 20kHz, só que em proporções menores.

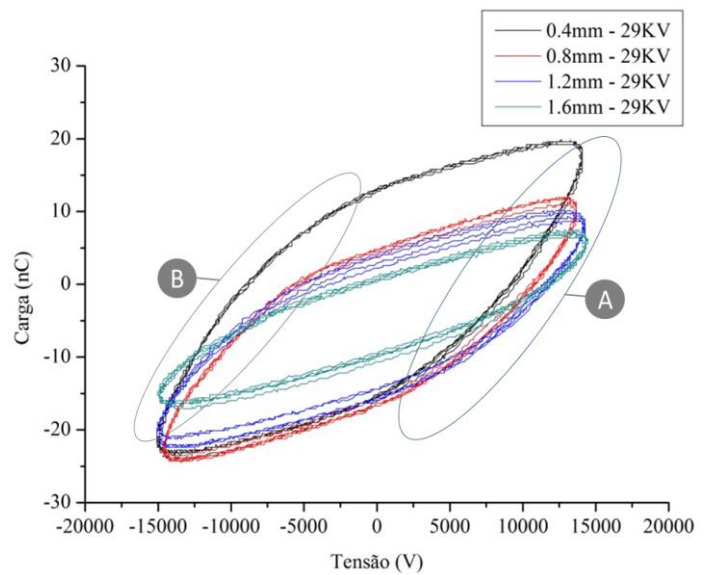


Figura 4. Figuras de Lissajous para $V = 29kV_{p-p}$, $f = 22kHz$ e distância d de 0.4mm a 1.6mm.

Analisando as figuras de Lissajous da Fig. 4, as regiões A e B representam as descargas que produzem o plasma no sistema DBD [11, 24]. É possível perceber que com o aumento da distância entre os eletrodos essas regiões sofrem uma considerável diminuição, provocando um afinamento da figura de Lissajous. Isso significa que menos descargas são geradas com o distanciamento dos eletrodos, sendo perceptível também nas imagens da Fig. 2.

Para todos os parâmetros mostrados na Fig. 2 foram medidas as energias através da figura de Lissajous, e posteriormente calculado as potências de consumo para cada um usando a equação (4). Essas medidas são mostradas resumidamente na Fig. 5. O que se observou foi que assim como nos estudos apresentados em [11, 22, 23], o aumento da frequência provocou um aumento com característica linear da potência consumida para todas as distâncias estudadas. Verificou-se também que quanto menor a distância entre eletrodos, maior é a potência consumida.

No trabalho de [13], também se verifica um comportamento de aumento de potência quando um atuador aerodinâmico a plasma, denominado *One Atmosphere Uniform Glow*

Discharge Plasma (OAUGDP®), é submetido a aumento de frequência da tensão aplicada. Nesse atuador dois dos dielétricos testados pelo autor são de PTFE-Politetrafluoretileno e Quartzo. É preciso salientar que OAUGDP apresentado em [13] possui eletrodos de tamanhos diferentes aos estudados neste trabalho, mas a disposição dos mesmos está em conformidade muito próxima ao mostrado na Fig. 1.

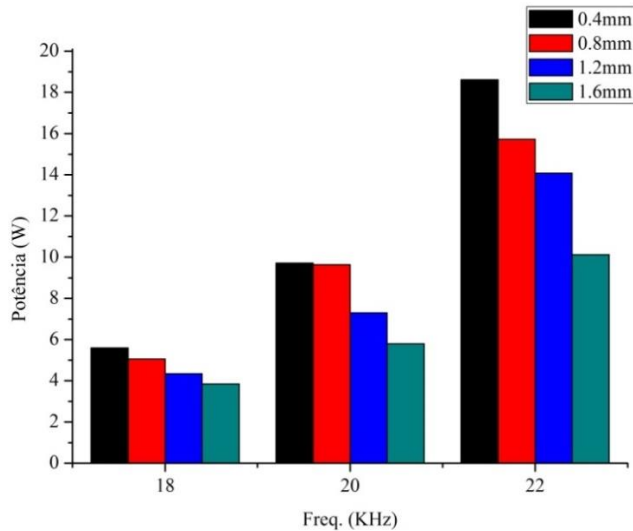


Figura 5. Potência consumida do sistema DBD em função da frequência e distância entre eletrodos ($V = 29kV_{p-p}$).

Na Fig. 6 foi analisada a potência consumida do sistema para três valores de tensão aplicada com frequência fixa de 22kHz. Com essa análise verificou que a potência consumida aumenta rapidamente com o aumento da tensão, evidenciando uma maior produção de microdescargas sobre o sistema DBD. Nessa mesma análise, quanto menor a distância entre eletrodos também é maior a potência consumida.

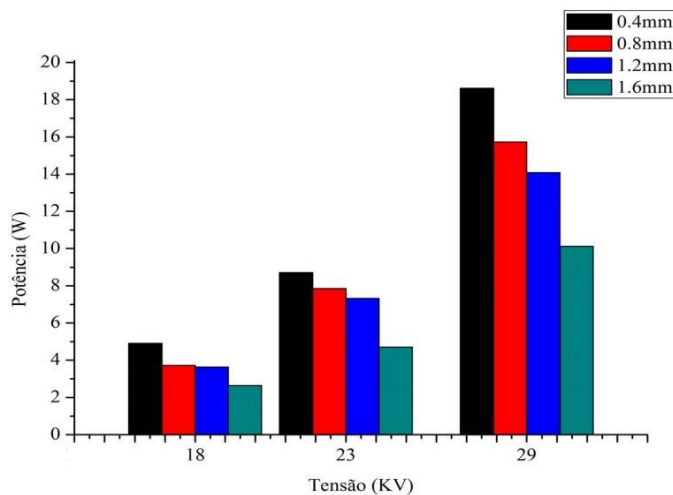


Figura 6. Potência consumida do sistema DBD em função da tensão aplicada e distância entre eletrodos ($f = 22kHz$).

Na comparação com a Fig. 5 é possível ajustar uma mesma potência trabalhando com uma tensão baixa e uma frequência alta. Por exemplo, se um sistema DBD com eletrodos separados a uma distância de 0.8mm precisasse trabalhar com uma

potência de 3W, com base na figura Fig. 5 era preciso uma tensão de $29kV_{p-p}$ e uma frequência abaixo de 18kHz. Por outro lado, analisando a Fig. 6 para esse mesmo exemplo, era preciso uma tensão pouco menor que $18kV_{p-p}$ e uma frequência de 22kHz. Por questão de segurança na isolamento do sistema é preferível trabalhar com tensões menores e, portanto, ter uma fonte de tensão com maior frequência.

B. Caracterização Óptica

Além da caracterização elétrica, foi realizada a caracterização óptica do sistema DBD com o intuito de analisar as espécies ativas do plasma gerado. Primeiramente observou o efeito da frequência na intensidade espectral. Na Fig. 7 é mostrado o espectro luminoso obtido por OES para o sistema DBD com a distância entre eletrodos de 0.8mm. Nota-se que o espectro possui picos mais intensos na medida em que a frequência aumenta. Também foram verificados os espectros para as outras distâncias, mas constatou que os picos eram menores que os apresentados na Fig. 7.

Relacionando a intensidade luminosa com potência consumida, verificamos que a condição com maior energia consumida é também a que tem maior intensidade, o que é um indício de que a energia foi utilizada principalmente para ionização do ar atmosférico.

Na análise de OES, os picos em destaques foram a do $N_2(337nm)$ e $N_2(357nm)$, seguido de seis outros picos, todos na região UV. Estes resultados estão coerentes com aqueles obtidos na literatura [25].

Por fim, é importante ter o controle desses parâmetros para um bom desempenho de um processo que venha utilizar esse sistema DBD.

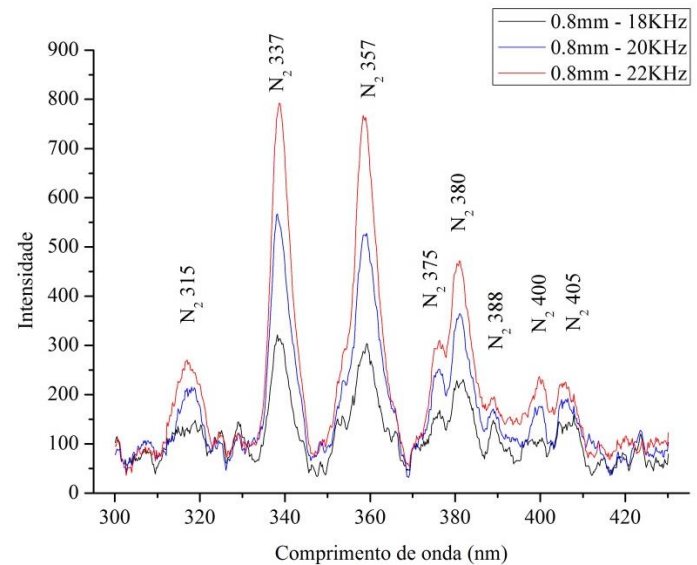


Figura 7. OES para o sistema DBD com $d = 0.8mm$ e submetido a diferentes frequências ($V = 29kV_{p-p}$).

Na Fig. 8 é observado os espectros do sistema para as quatro distâncias estudadas em uma frequência de 22kHz, e é verificado que a distância 0.8mm possui maior intensidade. É interessante observar que ao verificar a Fig. 5, a distância 0.4mm na frequência de 22kHz possui maior potência consumida, porém, na Fig. 8 possui a menor intensidade luminosa. Isso revela que boa parte do gasto energético não está

sendo gasto para ionização do ar, mas provavelmente na forma de calor pela resistência do dielétrico. As distâncias 1.2mm e 1.6mm possuem intensidades bem próximas, mas o que se percebe é que o aumento da distância acima de 1mm leva a uma perda de intensidade luminosa.

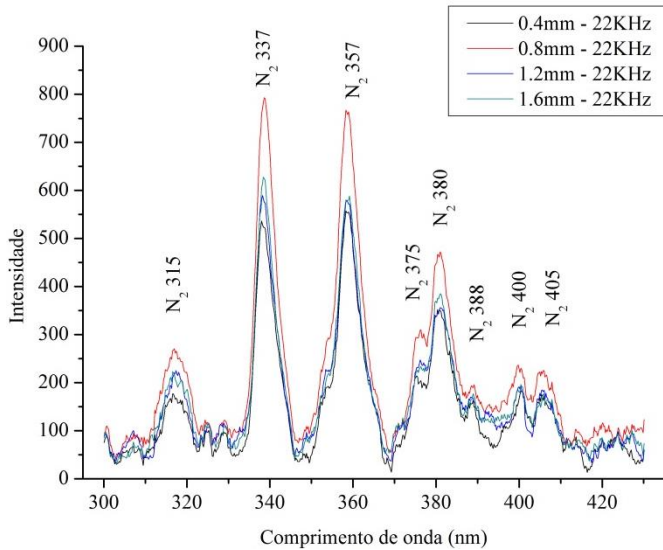


Figura 8. OES para o sistema DBD com $f = 22\text{kHz}$ e diferentes distâncias entre eletrodos ($V = 29\text{kV}_{p-p}$).

C. Eficiência do Sistema DBD

Tendo os valores de energia e intensidade dos plasmas gerados, foi calculada a eficiência do sistema DBD fazendo a razão entre a intensidade e energia consumida. Os valores de eficiência estão contidos na última coluna da Tabela I. A configuração que se apresentou mais eficiente foi a de distância 0.8mm entre os eletrodos para frequência de 18 kHz, já para a frequência de 22 kHz apesar de apresentar os maiores valores de energia e intensidade, não se demonstrou tão eficiente.

Para as três frequências estudadas, a distância de 0.8mm apresentou a maior intensidade luminosa gerada. Em algumas situações a distância 1.6mm obteve melhor eficiência, como no caso das frequências de 20kHz e 22kHz. Além de uma boa eficiência, outro fator importante no uso de sistemas DBD é a geração de plasma no regime difuso. Esse regime é o mais indicado para a maioria das aplicações industriais devido a sua capacidade de tratamento superficial mais uniforme [26]. Dentre os parâmetros usados neste trabalho, a potência mínima necessária ao surgimento do plasma DBD em regime difuso é 5W, obtida na frequência 18kHz e com 0.8mm de distância entre eletrodos.

Tabela I. Tabela com os parâmetros e medidas analisadas.

d (mm)	f (kHz)	V (kV _{p-p})	E (μJ)	P (W)	I	Eficiência (I/E)
0.4	18	29	311	5,598	12907,595	41,503
0.8	18	29	281	5,058	14929,917	53,131
1.2	18	29	241	4,338	12292,405	51,005
1.6	18	29	214	3,852	10194,438	47,637
0.4	20	29	486	9,720	16925,36	34,825
0.8	20	29	482	9,640	21175,502	43,932
1.2	20	29	365	7,300	17089,692	46,821
1.6	20	29	290	5,800	15349,941	52,930
0.4	22	29	846	18,612	18356,253	21,697
0.8	22	29	715	15,730	26872,058	37,583
1.2	22	29	640	14,080	20671,080	32,298
1.6	22	29	460	10,120	21158,506	45,996

IV. CONCLUSÕES

Este estudo tem ajudado a compreender o comportamento elétrico de um sistema DBD em pressão atmosférica e na caracterização óptica das espécies ativas do plasma gerado. O sistema DBD produziu picos de corrente na faixa de 4mA e potência média de 9.1W. De modo geral a energia por ciclo de descarga é maior para menores distâncias entre eletrodos. As principais espécies ativas na descarga por barreira dielétrica foi o da molécula de N_2 , com maiores intensidade na distância 0.8mm. A melhor condição encontrada no presente estudo foi na distância 0.8mm com frequência de 18kHz, devido ao fato

de obter melhor eficiência do sistema DBD e a produção de plasma em regime difuso.

Apesar de um sistema pequeno e simples, o sistema DBD apresentado por este trabalho tem grande potencial para trabalhos futuros, onde poderá ser expandido para criar sistemas DBDs mais complexos. Por exemplo, é possível montar ao longo de uma superfície plana e retangular vários eletrodos assimétricos paralelamente para discorrer sobre essa superfície materiais a serem tratados pelo plasma gerado. Essa ideia vem sendo explorada pelo Labplasma da UFERSA em busca de um tratamento para sementes do semiárido brasileiro.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio estrutural da UFERSA e o apoio financeiro do CNPq juntamente com o Instituto Nacional de Engenharia de Superfícies.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Kuchenbecker, M., et al. "Characterization of DBD plasma source for biomedical applications." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.4 (2009): 045212.
- [2] Misra, N. N., et al. "In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries." *Journal of Food Engineering* 125 (2014): 131-138.
- [3] Filatova, I., et al. "The effect of plasma treatment of seeds of some grain and legumes on their sowing quality and productivity." *Romanian Journal of Physics* 56 (2011): 139-143.
- [4] Mitra, Anindita, et al. "Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma." *Food and Bioprocess Technology* 7.3 (2014): 645-653.
- [5] Dubinov, A. E., E. R. Lazarenko, and V. D. Selemir. "Effect of glow discharge air plasma on grain crops seed." *IEEE transactions on plasma science* 28.1 (2000): 180-183.
- [6] Šerá, Božena, et al. "How various plasma sources may affect seed germination and growth." *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012 13th International Conference on. IEEE, 2012.
- [7] Šerá, Božena, et al. "Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth." *Plasma Science, IEEE Transactions on* 38.10 (2010): 2963-2968.
- [8] Zhou, Zhuwen, et al. "Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds." *Agricultural Sciences* 2.01 (2011): 23.
- [9] Pietsch, G. J. "Peculiarities of dielectric barrier discharges." *Contributions to Plasma Physics* 41.6 (2001): 620-628.
- [10] Wagner, H-E., et al. "The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment." *Vacuum* 71.3 (2003): 417-436.
- [11] Pons, Jerome, Eric Moreau, and Gérard Touchard. "Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics." *Journal of Physics D: Applied Physics* 38.19 (2005): 3635.
- [12] Dobrin, Daniela, et al. "The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth." *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 29 (2015): 255-260.
- [13] J. Reece Roth, Xin Dai. "Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device." *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (2006).
- [14] Kriegseis, Jochen, Sven Grundmann, and Cameron Tropea. "Performance reduction of Dielectric Barrier Discharge plasma actuators at higher Mach numbers." *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VIII*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 209-217.
- [15] Enloe, C. L., et al. "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology." *AIAA journal* 42.3 (2004): 589-594.
- [16] Thomas, Flint O., et al. "Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control." *AIAA journal* 47.9 (2009): 2169-2178.
- [17] He, Chuan, Thomas C. Corke, and Mehul P. Patel. "Plasma flaps and slats: an application of weakly ionized plasma actuators." *Journal of Aircraft* 46.3 (2009): 864-873.
- [18] T. T. de O. Pereira, et al. "The effect of DBD plasma treatment of "Sabiá" (*Mimosa caesalpinhiifolia Benth.*) seeds". *XXXVI CBRAVIC / I WTMS* (2015): 171.
- [19] Rosenthal, Louis A., and Donald A. Davis. "Electrical characterization of a corona discharge for surface treatment." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 3 (1975): 328-335.
- [20] Rajasekaran, Priyadarshini, et al. "Filamentary and homogeneous modes of dielectric barrier discharge (DBD) in air: investigation through plasma characterization and simulation of surface irradiation." *Plasma Processes and Polymers* 7.8 (2010): 665-675.
- [21] Staack, David, et al. "DC normal glow discharges in atmospheric pressure atomic and molecular gases." *Plasma Sources Science and Technology* 17.2 (2008): 025013.
- [22] Takashima, Keisuke, et al. "Characterization of a surface dielectric barrier discharge plasma sustained by repetitive nanosecond pulses." *Plasma Sources Science and Technology* 20.5 (2011): 055009.
- [23] Forte, Maxime, et al. "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control." *Experiments in Fluids* 43.6 (2007): 917-928.
- [24] Kriegseis, Jochen, et al. "Light Emission, Discharge Capacitance and Thrust Production of DBD Plasma Actuators." *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA*. Vol. 155. 2011.
- [25] Qiu, Xunlin, et al. "Spectroscopic study of dielectric barrier discharges in cellular polypropylene ferroelectrets." *Applied Physics Letters* 91.13 (2007): 132905.
- [26] Fang, Z., et al. "Comparison of surface modification of polypropylene film by filamentary DBD at atmospheric pressure and homogeneous DBD at medium pressure in air." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.8 (2009): 085204.