

A PRODUÇÃO DE ÁGUA ATIVADA POR PLASMA POR MEIO DE PLASMA NÃO-TÉRMICO DO TIPO DESCARGA DE ARCO DESLIZANTE (GLIDING ARC)

Production of plasma-activated water using non-thermal plasma of the gliding arc discharge type

RESUMO

O plasma foi descoberto a partir dos estudos sobre raios catódicos em 1876 e desde então tem sido utilizado em diversas aplicações. Tal tecnologia vem ganhando destaque com a ativação da água para aplicação tanto no controle de microorganismos, na desinfecção de superfícies quanto na agricultura para a supressão da dormência e no aumento do vigor fisiológico de sementes na germinação/emergência. Este estudo teve como objetivo apresentar o funcionamento de um sistema Gliding Arc para a ativação da água por plasma. As modificações na água ativada foram analisadas, incluindo acidificação do pH e o aumento de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), identificadas por espectroscopia UV-Vis. Os resultados são promissores, reafirmando a eficiência do sistema de arco deslizante para aplicações nos setores agrícola e de tratamento de superfícies.

Palavras-chave: PAW; Quebra de Dormência; Sustentabilidade; Desinfecção.

ABSTRACT

The plasma technology was discovered from the studies of cathode rays, and since this has been used in many applications. Such technology has been gain prominence with the plasma activation for the control of microorganisms, in desinfection of surfaces as in agriculture to suppressed dormancy and increased physiological vigor during germination. This study aims to show the working of the system Gliding arc in the plasma activation water (PAW). The changes in activated water were analyzed, including pH acidification and an increase in reactive oxygen and nitrogen species (RONS) identified through UV-Vis spectroscopy. The results are promising, reaffirming the efficiency of the gliding arc system for applications in agriculture and surface treatment.

Keywords: PAW; Dormancy breaking; Sustainability; Disinfection.

L.S. Nascimento *

ORCID: 0000-0001-6829-3258

Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, Brasil

R.C.L. Rocha

ORCID: 0009-0002-8880-5710

Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, Brasil

G.X.A. Barbosa

ORCID: 0009-0007-1748-8929

Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, Brasil

D.S. Covizzi

ORCID: 0000-0002-9536-1583

Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, Brasil

G.H. Vazquez

ORCID: 0000-0002-0957-329X

Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, Brasil

R.S. Pessoa

ORCID: 0000-0001-7600-9747

Universidade Brasil, São Paulo, SP, Brasil

**Autor correspondente*

luan.nascimento@ub.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O plasma foi descoberto em 1850 por William Crookes durante os estudos sobre os raios catódicos. Somente em 1923 Irving Langmuir e Tonks utilizaram o termo “plasma” para descrever o gás ionizado. Desde então, o plasma tem sido amplamente estudado e classificado em duas categorias principais: térmico e não térmico.

Dentre essas categorias o plasma não térmico (NTP) ascende como um novo viés tecnológico que é de uso em nas esferas agrícola, na medicina, nos tratamentos odontológicos, como tecnologia dos materiais e ciências dos alimentos¹. Além disso, o NTP apresenta vantagens ambientais significativas, como a fixação de nitrogênio diretamente da atmosfera, o que contribui para reduzir o

consumo de insumos e energia em processos tradicionais.

Embora seja conhecido como o quarto estado da matéria, o plasma não constitui um novo tipo de substância. Ele apresenta características do estado gasoso, sendo composto por partículas carregadas e neutras que interagem coletivamente. Esse comportamento coletivo, mediado por colisões, é resultado da ionização parcial ou total do gás após a ruptura de sua barreira dielétrica, mantendo a neutralidade macroscópica do sistema²⁻³.

A geração de plasma ocorre a partir da aplicação de alta tensão elétrica que provoca a ruptura dielétrica do gás, acompanhada de colisões entre partículas que resultam na sua ionização. Diferentes configurações de geradores de plasma têm sido desenvolvidas, incluindo o Arco Deslizante (*Gliding Arc*)⁴, a Descarga Luminescente⁵ e a DBD (Descarga de Barreira Dielétrica)⁶, cada uma com características específicas que ampliam seu potencial de aplicação.

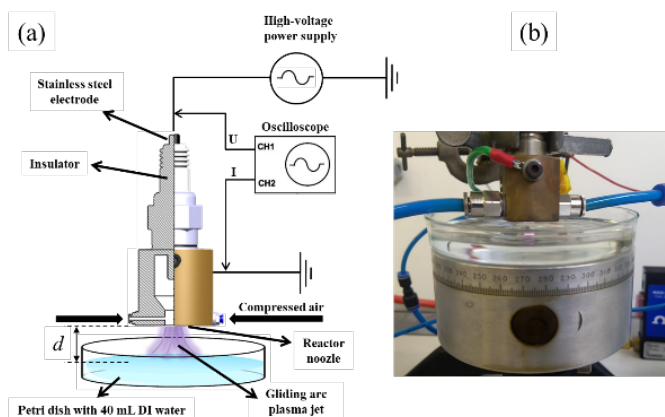
Entre suas aplicações, o plasma pode ser utilizado diretamente ou como um meio para ativar fluidos, como no caso da água ativada por plasma (PAW). Nesse contexto, este estudo busca apresentar os principais componentes de um gerador de plasma do tipo Arco Deslizante (*Gliding Arc*) e explorar suas aplicações mais relevantes na atualidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O gerador utilizado para a realização deste estudo consiste em um sistema composto por uma fonte de alta tensão operando a uma frequência de 20 kHz, conforme Figura 1. O sistema conta com um osciloscópio e um suporte para substrato. O plasma é gerado através de um jato de arco deslizante (*Gliding arc plasma jet*, GAPJ) configurado em um Reator de Fluxo Vórtice Avançado (FVFR), cuja pluma de plasma e as áreas de pós-descarga abrangem a região externa do equipamento.

O gás utilizado é o ar, fornecido por um sistema pneumático com vazão controlada de 5 L/min, o que assegura uma descarga contínua e estável com fluxo mínimo, conforme apresentado por Doria (2019)⁷. Todos os componentes do sistema foram subsidiados pelo Laboratório de Plasmas e Processos do ITA, com fins para a aplicação em ensaios na Universidade Brasil, campus Fernandópolis/SP.

Figura 1. (a) Ilustração esquemática do arranjo experimental e (b) fotografia do reator de arco deslizante FVFR utilizado para ativação da água deionizada (DI)⁷.



Fonte: Autoria própria

2. 1 Caracterização Elétrica da Descarga em Arco Deslizante

Para caracterizar as formas de ondas de tensão e corrente da descarga GAPJ emitidas pelo sistema de Arco Deslizante foram utilizadas uma sonda de alta tensão (Tektronix P6015A) e uma sonda de corrente autoajustável (Agilent N2869B), cujos sinais foram capturadas por um osciloscópio digital (Keysight DSOX1202A). A corrente foi inferida diretamente do eletrodo aterrado. A potência dissipada no plasma foi calculada pela Equação (1).

$$P_{\text{dissip}}(\text{W}) = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} V(t)I(t)dt \quad (1)$$

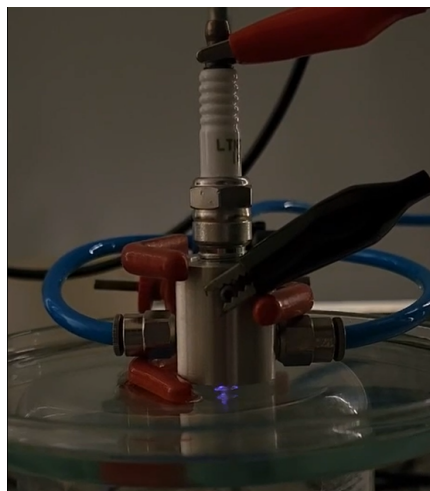
Onde, $V(t)$ equivale a tensão pico a pico, $I(t)$ é a corrente elétrica e $T_2 - T_1$ é o intervalo de tempo integrado no gráfico. Os parâmetros elétricos obtidos foram uma tensão pico a pico de 3,6 kV, uma corrente pico a pico de 33 mA e uma potência dissipada de 7 W.

2.2 Ativação da Água

A ativação de água por plasma tem sido amplamente estudada devido ao seu potencial em diversas aplicações. Nesse estudo, a ativação é por contato direto da água deionizada (DI) com o fluxo de ar ionizado durante 30 ± 5 min, com fluxo de ar igual a 5 L/min, conforme a Figura 2.

O reator utilizado para a ativação da água foi projetado com base nas estruturas descritas por Zeghioud et al. (2020)⁸, garantindo condições adequadas para a geração e aplicação do plasma.

Figura 2. Ativação da água por plasma pelo sistema arco deslizante.



Fonte: Autoria própria

2.3 Caracterização da Água após Ativação

Após a ativação, foram realizadas análises em um volume amostral de aproximadamente 40 ± 5 mL de água para analisar as seguintes propriedades: o pH, a concentração de espécies reativa de nitrogênio e oxigênio, a condutividade elétrica e a temperatura. Os equipamentos previamente instalados em uma bancada apropriada.

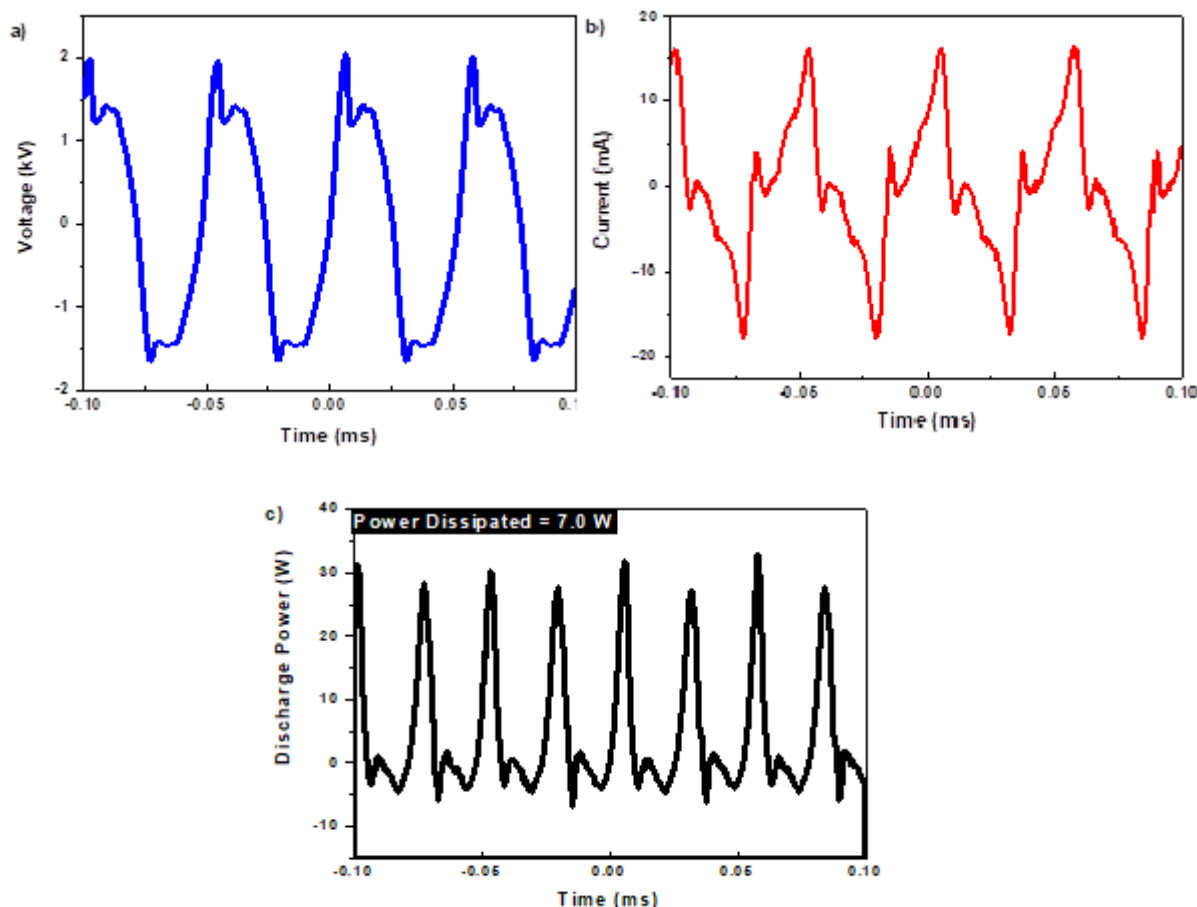
Para a identificação das espécies reativas de nitrogênio e oxigênio (RONS) foi utilizado um espectrofotômetro UV-vis com faixa de comprimento de onda 200 e 1100 nm com resolução de 1 nm em volume amostral de $1 \pm 0,5$ mL inserido em uma porta de amostra com um cubeta de quartzo, o qual contém o caminho óptico padrão de 10 nm.

Os dados obtidos pelo espectrofotômetro UV-Vis foram analisados utilizando o software Origin Pro, permitindo uma avaliação detalhada das modificações químicas na água ativada.

3 RESULTADOS

A corrente foi inferida diretamente do eletrodo aterrado. As curvas de tensão e corrente ao longo do tempo estão representadas nas Figuras 3a e 3b. A potência dissipada no plasma foi calculada pela Equação (1), como ilustrado na Figura 3c. A potência média foi obtida integrando o produto da tensão e da corrente sobre o intervalo de tempo correspondente. Os parâmetros medidos incluíram uma tensão pico a pico de 3,6 kV, corrente pico a pico de 33 mA e uma potência dissipada de 7 W.

Figura 3. (a) Forma de onda de tensão para o GAPJ operando com um fluxo de ar de 5 L min⁻¹, (b) Forma de onda de corrente para o GAPJ operando com um fluxo de ar de 5 L min⁻¹ e (c) Forma de onda de potência de descarga do GAPJ usada para calcular a potência média usando a Equação (1) ⁶.

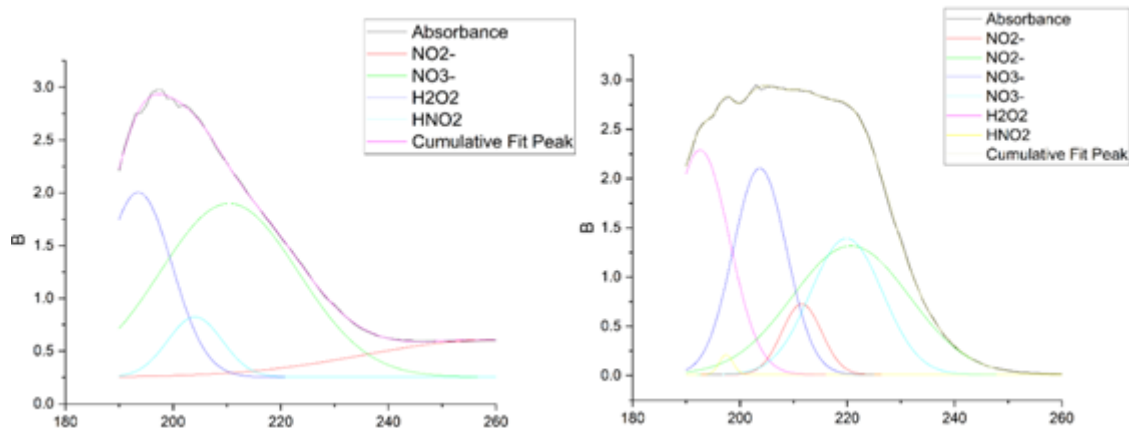


Fonte: Autoria própria

Quanto a ativação da água, os resultados podem ser observados pela diminuição do pH, que inicialmente para a água destilada foi de 6,65 e após a ativação foi reduzido para 3,32, valores estes já esperados pela literatura para um sistema de *Gliding Arc*⁶.

O surgimento de espécies reativas foi observado pelo espectrofotômetro UV-vis com comprimentos de ondas entre 200 e 260 nm, conforme a Figura 4 (a) antes da ativação e Figura 4 (b) após a ativação.

Figura 4: (a) Espectro UV-Vis da água antes da ativação, e (b) espectro da água após a ativação pelo plasma.



Fonte: Autoria própria

A água ativada apresenta potencial para diversas aplicações, incluindo a quebra de dormência e a promoção da germinação de sementes, bem como a esterilização de diferentes superfícies, entre outras utilidades destacadas em estudos recentes.

4 DISCUSSÃO

A água ativada por plasma (PAW) demonstrou grande versatilidade em suas aplicações, incluindo a quebra de dormência, a promoção da germinação de sementes e a esterilização de superfícies variadas.

O estudo de Bormasheinko (2015)⁹ indicou que a interação das espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (H₂O₂, HNO₂, NO³⁻ e NO²⁻) com a parede tegumentar das sementes desencadeou a supressão da dormência, redução do seu período de latência e a quebra a barreira que impede a entrada de água. Esse processo dá início ao processo germinativo em sementes, por meio da sinalização oxidativa que desencadeia uma cascata metabólica de alterações hormonais, expressão gênica e modificações nas propriedades da parede celular¹⁰.

Outros estudos também apresentaram resultados satisfatórios da aplicação de Plasma Ativado em Água (PAW) na promoção da germinação de sementes¹¹⁻¹⁹, que sugerem que o PAW pode interferir de forma positiva no vigor fisiológico de sementes não dormentes. Com isso, essa vertente de pesquisa passa a oferecer uma perspectiva promissora para a sua aplicação em espécies de valor comercial e de modo a conferir maior resistência no momento da germinação em condições adversas de campo.

Outro aspecto relevante do PAW é sua capacidade antimicrobiana, que se manifesta pelo controle do crescimento de micro-organismos em superfícies. A desinfecção ocorre devido à ação das espécies reativas de nitrogênio e oxigênio (RONs), que promovem a desnaturação de proteínas e

danos ao DNA dos micro-organismos. Esse processo, intensificado pelo bombardeio de partículas oxidativas em nível celular, induz estresse oxidativo, no qual a presença intracelular de H₂O₂ (peróxido de hidrogênio) inicia uma cascata de reações que comprometem o citoplasma e a membrana celular²⁰⁻²¹. Dessa forma, o PAW consolida-se como uma ferramenta promissora para desinfecção e controle microbiano.

5 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram a eficiência do sistema de arco deslizante (*Gliding Arc*) na ativação de água, produzindo PAW com propriedades promissoras para diversas aplicações. A análise das características da água ativada revelou uma significativa acidificação do pH e o aumento na concentração de RONS, indicadores do impacto químico do plasma sobre a água.

Essas propriedades tornam o PAW uma ferramenta versátil e eficaz em áreas como agricultura, promovendo a quebra de dormência e o aumento do vigor fisiológico de sementes, e em desinfecção, devido à sua capacidade antimicrobiana.

O sistema de arco deslizante utilizado no estudo destaca-se por sua simplicidade e eficiência, consolidando-se como uma alternativa viável para a geração de PAW em larga escala. Assim, a continuidade de pesquisas nesta área pode ampliar ainda mais as perspectivas de uso, especialmente em setores estratégicos como agricultura, saúde e controle ambiental.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio da Universidade Brasil pelo bolsa pró-mestre no curso de Doutorado pelo Programa de Engenharia Biomédica, e ao Laboratório de Plasma do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) no desenvolvimento do Reator de Plasma *Gliding Arc*.

CONFLITO DE INTERESSE

Os autores declaram não possuir qualquer conflito de interesse relacionado a este estudo. Não há interesses políticos, financeiros ou comerciais associados a patentes, propriedade intelectual, provisão de materiais, insumos ou equipamentos utilizados, provenientes de fabricantes ou terceiros que possam influenciar os resultados ou a interpretação dos dados apresentados.

REFERÊNCIAS

1. Misra N, Oliver Schlüter, Patrick J, Cullen, Eds. Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. Academic Press, 2016.
2. Chapman n. Glow discharge processes. New York: John Wiley & Sons, 1980.
3. Nasser E. Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics. New York: John Wiley & Sons, 1971.
4. Pawłat J, Terebun P, Kwiatkowski M, Tarabová B, Kovaľová Z, Kučerová K, Hensel, K. (2019). Evaluation of oxidative species in gaseous and liquid phase generated by mini-gliding arc discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39, 627-642. DOI: 10.1007/s11090-019-099749-9
5. Goossens O, Callebaut T, Akishev Y, Napartovich A, Trushkin N, Leys C. (2002). The DC glow discharge at atmospheric pressure. *IEEE Transactions on plasma science*, 30(1), 176-177. DOI: 10.1109/TPS.2002.1003981
6. Guan L, Chen R, Jiang T, Du H, Paramane A, Zhou H. (2020). Electrical modeling of dielectric barrier discharge considering surface charge on the plasma modified material. *Chinese Physics B*, 29(7), 075204. DOI: 10.1088/1674-1056/ab8a3f
7. Doria Ac, Figueira Fr, De Lima Js, Figueira Ja, Castro Ah, Sismanoglu BN, et al. Inactivation of *Candida albicans* biofilms by atmospheric gliding arc plasma jet: effect of gas chemistry/flow and plasma pulsing. *Plasma Res Express*. 2019; 1. DOI:10.1088/2516-1067/aae7e1.
8. Eghioud H, Nguyen-Tri P, Khezami L, Amrane A, Assadi A. A Review on discharge plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes. 2020. *Journal of Water Process Engineering*. DOI:10.1016/j.jwpe.2020.101664.
9. Bormashenko E, Shapira Y, Grynyov R, Whyman G, Bormashenko Y, Drori E. Interaction of cold radiofrequency plasma with seeds of beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Experimental Botany*, v.66, n.13, p. 4010-4021, 2015. DOI: 10.1093/jxb/erv206
10. Bailly c. ROS in seed germination. In: *Advances in Botanical Research*. Academic Press, 2023. p. 177-204. DOI: 10.1016/bs.abr.2022.10.003
11. Nambara, E., Okamoto, M., Tatematsu, K., Yano, R., Seo, M., Kamiya, Y. Ácido abscísico e controle da dormência e germinação de sementes. *Seed Science Research*, 2010. DOI: 10.1017/S0960258510000012.
12. Graeber K, Nakabayashi K, Miatton E, Leubner-Metzger G, Soppe Wj. Molecular mechanisms of seed dormancy. *Plant Cell Environ*. 2012. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2012.02542.
13. Yan, D., Duermeyer, L., Leoveanu, C., Nambara, E. As funções do endosperma durante a germinação da semente. *Fisiologia Vegetal e Celular*, 2014.
14. Shu K, Liu X. Duas faces de uma semente: regulação hormonal da dormência e germinação. *Planta molecular*, 2016. DOI: 10.1016/j.molp.2015.08.010.
15. Nonogaki H. Seed Biology Updates - Highlights and New Discoveries in Seed Dormancy and Germination Research. *Front Plant Sci*. 2017. DOI: 10.3389/fpls.2017.00524.

16. Steinbrecher T, Leubner-Metzger G. A biomecânica da germinação de sementes. *Journal of Experimental Botany*, 2017. DOI: 10.1093/jxb/erw428
17. Duermeyer L, Khodapanahi E, Yan D, Krapp A, Rothstein S, Nambara E. Regulação da dormência e germinação de sementes por nitrato. *Seed Science Research*, 2018. DOI: 10.1017/S096025851800020X
18. Grainge G, Nakabayashi K, Steinbrecher T, Kennedy S, Ren J, Iza F, Leubner-Metzger G. Molecular mechanisms of seed dormancy release by gas plasma-activated water technology. 2022. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 73, No. 12 pp. 4065–4078. DOI:10.1093/jxb/erac150.
19. Bailly, C. O papel de sinalização de ROS na regulação da germinação e dormência de sementes. *Biochemical Journal*, 2019. DOI: 10.1042/BCJ20190159
20. Bourke P, Ziuzina D, Han L, Cullen PJ And Gilmore BF. Microbiological interactions with cold plasma. *J Appl Microbiol*, 2017. DOI:10.1111/jam.13429.
21. Chiappim W, Sampaio A, Miranda, Fraga M, Petraconi G, da Silva Sobrinho A, Kostov K, Koga-Ito C, Pessoa R. Antimicrobial Effect of Plasma-Activated Tap Water on *Staphylococcus Aureus*, *Escherichia Coli*, and *Candida Albicans*. *Water (Switzerland)* 2021, 13, DOI: 10.3390/w13111480.