RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 03/06/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

KLEBER ALEXANDRE PETROSKI

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM JATO DE PLASMA FRIO NO FINAL DE UM TUBO PLÁSTICO FLEXÍVEL PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

Guaratinguetá-SP
2024

KLEBER ALEXANDRE PETROSKI

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM JATO DE PLASMA FRIO NO FINAL DE UM TUBO PLÁSTICO FLEXÍVEL PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Doutor em Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia em Física.

Orientador: Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov
Coorientador: Prof. Dr. Fellype do Nascimento

Guaratinguetá-SP
2024

Petroski, Kleber Alexandre
P497c Caracterização elétrica de um jato de plasma frio no final de um tubo plástico flexível para aplicações biomédicas / Kleber Alexandre Petroski - Guaratinguetá, 2024.
138 f : il.
Bibliografia: f. 133-138

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov
Coorientador: Prof. Dr. Fellype do Nascimento

1. Jato de plasmas 2. Plasmas (Gases ionizados). 3. Pressão atmosférica. 4. Descargas elétricas. I. Título.

CDU 533.9(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8/3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O trabalho faz parte de um projeto para o desenvolvimento de um dispositivo jato de plasma de baixo custo para fins medicinais que pode futuramente proporcionar tratamentos à plasma de menor custo para a população. Espera-se também que este trabalho contribua para a compreensão do funcionamento do jato de plasma frio transferido.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The work is part of a project to develop a low-cost plasma jet device for medical purposes that could in the future provide lower-cost plasma treatments for the population. It is also hoped that this work will contribute to the understanding of how the transferred cold plasma jet works.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

KLEBER ALEXANDRE PETROSKI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM FÍSICA"

PROGRAMA: FÍSICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

gov.br Documento assinado digitalmente
ERNESTO VIEIRA NETO
Data: 08/03/2024 16:26:24-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto
Coordenador

B A N C A E X A M I N A D O R A:

gov.br Documento assinado digitalmente
KONSTANTIN GEORGIEV KOSTOV
Data: 07/03/2024 14:43:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. KONSTANTIN GEORGIEV KOSTOV
Orientador - UNESP

gov.br Documento assinado digitalmente
WILLIAM CHIAPPIM JUNIOR
Data: 07/03/2024 14:34:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. WILLIAM CHIAPPIM JUNIOR
UNESP

gov.br Documento assinado digitalmente
FELIPE VICENTE DE PAULA KODAIRA
Data: 07/03/2024 14:53:03-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. FELIPE VICENTE DE PAULA KODAIRA
UNESP

gov.br Documento assinado digitalmente
CLODOMIRO ALVES JUNIOR
Data: 07/03/2024 09:30:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. CLODOMIRO ALVES JUNIOR
ITA

gov.br Documento assinado digitalmente
CARINA BARROS MELLO
Data: 07/03/2024 14:03:40-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. CARINA BARROS MELLO
INPE

***MARÇO* de 2024**

DADOS CURRICULARES

KLEBER ALEXANDRE PETROSKI

NASCIMENTO	20 de setembro de 1994 – Joinville / SC
FILIAÇÃO	Jair Petroski Rosália dos Santos Petroski
2012/2016	Licenciatura em Física Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil.
2016/2018	Mestrado em Física Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Brasil.
2019/2024	Doutorado em Física Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e por ter me proporcionado a força, a inteligência e as condições necessárias para concluir este trabalho.

Agradeço a minha família: meu pai, Jair Petroski, minha mãe, Rosália dos Santos Petroski e meu irmão Lucas Jair Petroski que me deram grande suporte emocional e cujos incentivos e apoios foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Konstantin Georgiev Kostov, cujas instruções, paciência e orientações foram importantíssimas na realização das investigações aqui apresentadas.

Agradeço ao meu coorientador, Fellype do Nascimento, que teve grande paciência em me instruir na realização da coleta de dados experimentais corretamente e forneceu dicas e instruções de grande relevância para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus colegas de laboratório Ana Carla, Ananias, Bruno, Felipe Kodaira e Rafael, cujas companhias e conversas fizeram essa jornada um pouco mais fácil.

Agradeço aos professores membros da banca os professores Dr. Konstantin Georgiev Kostov, Dr. Willian Chiappim Jr, Dr. Felipe Vicente de Paula Kodaira, Dr. Clodomiro Alves, e Dra. Carina Barros Mello por aceitarem o convite para a composição da banca e por dedicarem parte seu tempo à leitura desse trabalho e por suas contribuições para melhorá-lo.

RESUMO

Um sistema de jato de plasma frio transferido foi caracterizado quanto à corrente de fuga através das paredes do tubo flexível do jato, bem como a potência dissipada na pluma do jato. Para caracterizar a corrente de fuga, uma seção do tubo do jato de plasma transferido foi envolvida por uma folha de Al aterrada e a corrente que passava por esse foi medida enquanto o jato de plasma incidia sobre um alvo metálico aterrado, e a influência de alguns parâmetros sobre o sistema foi analisada. Para determinar a potência dissipada na pluma, além da configuração usualmente utilizada do jato de plasma com a pluma acesa, empregou-se uma configuração em que a pluma de plasma foi suprimida. Então, a influência dos principais parâmetros da descarga sob a potência em ambas as configurações foi analisada. As capacitâncias dielétricas e do sistema também foram analisadas para ambas as configurações. Em relação a corrente de fuga através do tubo, verificou-se que a corrente de fuga depende da relação entre as impedâncias Z_{Folha} e Z_{Alvo}, e da tensão de ruptura da pluma. A corrente de fuga não depende da posição do tubo em que a folha de Al está. Quanto à potência da pluma, concluiu-se que, comparativamente, a potência dissipada na descarga primária e tubo flexível pode ser considerada constante em relação a potência dissipada na pluma com a alteração da maioria dos parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: plasma em pressão atmosférica; caracterização elétrica; jato de plasma; jato de plasma transferido; aplicação biomédica.

ABSTRACT

A cold transferred plasma jet system was characterized in terms of the leakage current through the walls of the flexible jet tube, as well as the power dissipated in the jet plume. To characterize the leakage current, a section of the transferred plasma jet tube was wrapped in a grounded Al foil and the current passing through it was measured while the plasma jet was impinging on a grounded metal target, and the influence of some parameters on the system was analyzed. To determine the power dissipated in the plume, in addition to the usual configuration of the plasma jet with the plume on, a configuration was used in which the plasma plume was suppressed. The influence of the main discharge parameters on the power in both configurations was then analyzed. The dielectric and system capacitances were also analyzed for both configurations. With regard to the leakage current through the tube, it was found that the leakage current depends on the relation between the impedances Z_{Folha} and Z_{Alvo}, and also on the breakdown voltage of the plume. The leakage current does not depend on the position of the tube in which the Al foil is located. As for the plume power, it was concluded that, comparatively, the power dissipated in the primary discharge and flexible tube can be considered constant in relation to the power dissipated in the plume with the alteration of most of the parameters.

KEYWORDS: atmospheric pressure plasma; electrical characterization; plasma jet; transferred plasma jet; biomedical application.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Colisão entre duas partículas com a conservação da energia cinética 26
Figura 2 - Diagrama representativo da temperatura eletrônica e do gás versus a pressão de vapor de mercúrio em uma descarga 27
Figura 3 - Curva de Paschen para 5 gases diferentes 30
Figura 4 - Linha temporal da formação do *Streamer* 32
Figura 5 - Possíveis regimes de operação da descarga ao obedecer, ou não, ao critério de Meek..... 32
Figura 6 - Diferentes regimes do plasma em baixa pressão 33
Figura 7 - Plasma produzido em um sistema DBD 34
Figura 8 - Propagação da *Bullet* 36
Figura 9 - Diferentes configurações de jato de plasma DBD 37
Figura 10 - Plasma *needle* sem a presença de um alvo, à esquerda, e produzido dentro de um dente, à direita..... 37
Figura 11 - Na parte superior, um jato de plasma alto-pulsado sem barreira dielétrica operando em corrente contínua. Na parte inferior, um jato de plasma DBD alto-pulsado operando em corrente alternada 38
Figura 12 - Plasma *gun* 39
Figura 13 - Jato de plasma de Polak *et al* (2012) 40
Figura 14 - Jato de plasma de Winter *et al*, 2018 40
Figura 15 - Jato de plasma de Wang *et al* (2018) 41
Figura 16 - Jato de plasma de Kurosawa *et al*, 2019 42
Figura 17 - Jato de plasma frio não-térmico transferido em pressão atmosférica 43
Figura 18 - Descarga primária do jato de plasma frio não-térmico transferido 43
Figura 19 - Jato de plasma de Bastin *et al* (2019) 44
Figura 20 - Jato de plasma de Chung *et al* (2020) 45
Figura 21 - Aumento da quantidade de RONS no corpo humano 46
Figura 22 - Figura de Lissajous de um sistema DBD de placas paralelas alimentado com tensão senoidal na esquerda, e seu circuito equivalente segundo a teoria proposta por Manley, na direita..... 49
Figura 23 - Sinais de corrente e tensão versus tempo para um sistema DBD alimentado com uma tensão senoidal, à esquerda, e a figura de Lissajous do mesmo, à direita 50

Figura 24 - Sinais de corrente (indicado por 1) e tensão (indicado por 2) versus tempo para um sistema DBD alimentado com uma tensão nanopulsada, à esquerda, e a sua figura de Lissajous, à direita 51
Figura 25 - Circuito elétrico equivalente para um sistema DBD com a descarga sendo representada por uma resistência variável e um capacitor em paralelo 51
Figura 26 - Figuras de Lissajous para diferentes valores de tensão de pico a pico utilizando um sistema DBD coaxial alimentado com um sinal de tensão nanopulsado 53
Figura 27 - Circuito elétrico equivalente para um sistema DBD com a descarga preenchendo somente parte do volume do gás entre os eletrodos 55
Figura 28 - Diagrama explicativo da propagação do plasma em um reator DBD que contém uma "bolinha" dielétrica entre seus eletrodos (*a single pellet DBD reactor*) 56
Figura 29 - Valores de potência e corrente RMS versus percentagem de O_2 adicionada ao gás de trabalho do Jato de plasma frio não-térmico transferido em pressão atmosférica 56
Figura 30 - Configuração de jato de plasma utilizada em Gerling *et al*, 2017 para obtenção da potência transferida à pluma de plasma 58
Figura 31 - Reator primário do Jato de plasma frio transferido em pressão atmosférica 59
Figura 32 - Fontes de corrente contínua, alta tensão e gerador de sinal utilizados para produzir a descarga no sistema de jato de plasma 60
Figura 33 - (A) Visão panorâmica do sistema de jato de plasma, (B) imagens da pluma de plasma incidindo sobre o alvo e do (C) controlador de fluxo 61
Figura 34 - Dispositivos utilizados para a coleta de dados: (A) osciloscópio, (B) resistor, capacitor e (C) bobina Rogowski 61
Figura 35 - Configuração experimental utilizada para investigar a corrente de fuga através das paredes do tubo flexível 62
Figura 36 - Configuração experimental utilizada para investigar a potência dissipada pela descarga primária e pluma de plasma 64
Figura 37 - Figuras de Lissajous para o quinto ciclo de um *burst* dos casos com L_F de 5,0 cm e sem folha utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 65
Figura 38 - Circuito elétrico equivalente jato de plasma transferido incidindo sobre um alvo metálico aterrado para a situação em que a folha de Al envolve uma seção do tubo 71
Figura 39 – Sinais de V e I_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 5,0 cm de L_F, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 68
Figura 40 - Sinais de I_{Folha} e I_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 5,0 cm de L_F, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 68

Figura 41 - P_{Alvo} versus L_F utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 69
Figura 42 - $\bar{I}_{Alvo}$ e $\bar{I}_{Folha}$ versus L_F utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 70
Figura 43 - Circuito elétrico equivalente para a situação em que a folha de Al envolve uma seção do tubo do jato de plasma transferido incidindo sobre um alvo metálico aterrado 70
Figura 44 - Sinais de I_{Alvo} e I_{Folha} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 5,0 mm de D_{Alvo} 71
Figura 45 - I_{Folha} versus I_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 3,0 cm de L_F, e 5,0 mm de D_{Alvo} 73
Figura 46 – V_{bp}, V_{bp-} e V_{bp+} versus L_F utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 73
Figura 47 - P_{Alvo} versus V_{pp} com L_F de 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo} 76
Figura 48 – $\bar{I}_{Alvo}$ e $\bar{I}_{Folha}$ versus V_{pp} com L_F de 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo} 76
Figura 49 - V_{bp} versus V_{pp} com L_F de 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo} 77
Figura 50 - P_{Alvo} versus posição da bobina Rogowski no tubo utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 15,4 kV de V_{pp}, 75,0 cm de L_T, 10,0 cm de L_F e 5,0 mm de D_{Alvo} 78
Figura 51 - $\bar{I}_{Alvo}$, $\bar{I}_{Folha}$ e $\bar{I}_{Tubo}$ versus posição da bobina Rogowski no tubo utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 15,4 kV de V_{pp}, 75,0 cm de L_T, 10,0 cm de L_F e 5,0 mm de D_{Alvo} 79
Figura 52 - Corrente medida na sonda versus I_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 10,0 mm de D_{Alvo} 79
Figura 53 - P_{Alvo} versus L_T utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,6 kV e 14,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm e 5,0 mm de D_{Alvo} 81
Figura 54 - $\bar{I}_{Alvo}$ e $\bar{I}_{Folha}$ versus L_T utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,6 e 14,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm e 5,0 mm de D_{Alvo} 81
Figura 55 - V_{bp} versus L_T utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,6 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 5,0 mm de D_{Alvo} 82
Figura 56 - Picos de I_{Alvo} e I_{Folha} versus L_T utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,6 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 5,0 mm de D_{Alvo} 82
Figura 57 - Atualização do circuito elétrico equivalente com a colocação da folha de Al 84

Figura 58 - P_{Alvo} versus Φ_{He} utilizando 13,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm de D_{Alvo} 85
Figura 59 – $\bar{I}_{Alvo}$ e $\bar{I}_{Folha}$ versus Φ_{He} utilizando 13,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm de D_{Alvo} 86
Figura 60 - V_{bp} versus Φ_{He} utilizando 13,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm de D_{Alvo} 86
Figura 61 - Períodos de duração das descargas na folha e alvo versus Φ_{He} utilizando 13,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm de D_{Alvo} 87
Figura 62 - I_{Alvo} e I_{Folha} para Φ_{He} de 1,0 l/min e 2,0 l/min utilizando 13,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 5,0 cm de L_F, e 10,0 mm de D_{Alvo} 88
Figura 63 - P_{Alvo} versus posição da folha utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 13,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 1,5 cm de L_F, e 5,0 mm de D_{Alvo} 89
Figura 64 – $\bar{I}_{Alvo}$, $\bar{I}_{Folha}$ e $\bar{I}_{Tubo}$ versus posição da folha utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 13,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, 1,5 cm de L_F, e 5,0 mm de D_{Alvo} 89
Figura 65 - P_{Alvo} versus D_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 11,0 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 90
Figura 66 - $\bar{I}_{Alvo}$ versus D_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 11,0 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 91
Figura 67 - V_{bp} versus D_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 11,0 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 92
Figura 68 - I_{Alvo} para diferentes D_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 11,0 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 92
Figura 69 – I_{Alvo} para A) 5,0 mm e B) 10,0 mm de D_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 11,0 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 93
Figura 70 - I_{Alvo} para A) 1,0 mm e B) 8,0 mm de D_{Alvo} sem folha de Al utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 11,0 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 94
Figura 71 - P_{Alvo} versus D_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 5,0 cm de L_F 95
Figura 72 - $\bar{I}_{Alvo}$ e $\bar{I}_{Folha}$ versus D_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 5,0 cm de L_F 95
Figura 73 - V_{bp} versus D_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 5,0 cm de L_F 96
Figura 74 - I_{Alvo} e I_{Folha} para 2,0 mm e 6,0 mm de D_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 5,0 cm de L_F 97

Figura 75 - I_{Alvo} versus D_{Alvo} utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 12,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 5,0 cm de L_F 97
Figura 76 - P_{Alvo} para diferentes maneiras de apagar a descarga utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 99
Figura 77 - Figuras de Lissajous para os casos 1, 3 e 4 utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 100
Figura 78 - Figuras de Lissajous para os casos 3 e 4 utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 101
Figura 79 - Sinais de V e I_{Alvo} da configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 102
Figura 80 - Sinais de V e I_{Alvo} da configuração OFF ampliados para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 103
Figura 81 - Sinais de V e I_{Alvo} versus V_{pp} para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 104
Figura 82 - Picos de I_{Alvo} positivo e negativo versus V_{pp} para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,0 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 104
Figura 83 - Sinais de I_{Alvo} e V versus V_{pp} para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 105
Figura 84 - Picos de I_{Alvo} positivo versus V_{pp} para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 106
Figura 85 - P_{Alvo} versus D_{Alvo} para as configurações ON e OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 14,0 kV de V_{pp}, 32,0 kHz de f, modo *burst* de 10 ciclos, período de 1,7 ms, e 100,0 cm de L_T 107
Figura 86 - Fração de P_{Alvo} devido à descarga primária versus D_{Alvo} para as configurações ON e OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 14,0 kV de V_{pp}, 32,0 kHz de f, 100,0 cm de L_T. Modo *burst* de 10 ciclos e período de 1,7 ms 107
Figura 87 - P_{Alvo} versus V_{pp} para as configurações ON e OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo} 109
Figura 88 - P_{Alvo} versus L_T para as configurações ON e OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 10,0 mm de D_{Alvo} 110
Figura 89 - P_{Alvo} versus L_T para as configurações ON e OFF utilizando 1,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 10,0 mm de D_{Alvo} 110
Figura 90 - P_{Alvo} versus L_T para as configurações ON e OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 5,0 mm de D_{Alvo} 111

Figura 91 - P_{Alvo} versus L_T para as configurações ON e OFF utilizando 1,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 5,0 mm de D_{Alvo} 111
Figura 92 – (P_{Pluma}/P_{ON}) (%) versus L_T para as configurações ON e OFF com as 4 combinações de Φ_{He} e D_{Alvo} utilizadas e 16,4 kV de V_{pp} 112
Figura 93 - P_{Alvo} versus Φ_{He} para as configurações ON e OFF utilizando 16,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T e 5,0 mm de D_{Alvo} 113
Figura 94 - P_{Alvo} versus D_{Alvo} para as configurações ON e OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 114
Figura 95 - Circuito equivalente do sistema de jato transferido ao utilizar a configuração ON..... 115
Figura 96 - Circuito equivalente do jato de plasma transferido ao utilizar a configuração OFF..... 116
Figura 97 - Figura de Lissajous para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 117
Figura 98 - C_{Cell}, C_{d+}, C_{d-} e C_d versus V_{pp} para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 118
Figura 99 - C_{Cell}, C_{d+}, C_{d-} e C_d versus L_T para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 5,0 mm de D_{Alvo} 119
Figura 100 - C_{Cell}, C_{d+}, C_{d-} e C_d versus L_T para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 10,0 mm de D_{Alvo} 119
Figura 101 - C_{Cell}, C_{d+}, C_{d-} e C_d versus Φ_{He} para a configuração OFF utilizando 16,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 1202
Figura 102 - C_{Cell}, C_{d+}, C_{d-} e C_d versus D_{Alvo} para a configuração OFF utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 121
Figura 103 - As diferentes regiões das figuras de Lissajous da configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, 150,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo} 122
Figura 104 - Figuras de Lissajous para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, 150,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo}..... 123
Figura 105 - Figuras de Lissajous do sistema para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 125
Figura 106 - C_{Cell} e C_{d++} versus V_{pp} para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 100,0 cm de L_T, e 10,0 mm de D_{Alvo} 126
Figura 107 - Parte do sistema do jato de plasma transferido em que ele interage com o alvo, na direita, e a correspondente seção do circuito elétrico equivalente, na esquerda 127

Figura 108 - C_{Cell} e C_{d++} versus L_T para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 5,0 mm de D_{Alvo} 129
Figura 109 - C_{Cell} e C_{d++} versus L_T para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 10,0 mm de D_{Alvo} 129
Figura 110 - Valores das capacitâncias C_{Cell} e C_{d++} versus Φ_{He} para a configuração ON utilizando 16,4 kV de V_{pp}, 100,0 cm de L_T, e 5,0 mm de D_{Alvo} 130
Figura 111 - C_{Cell} e C_{d++} versus D_{Alvo} para a configuração ON para a configuração ON utilizando 2,0 l/min de Φ_{He}, 16,4 kV de V_{pp}, e 100,0 cm de L_T 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros gerais mantidos fixos durante o estudo de cada parâmetro para a configuração com o alvo metálico e a folha de Al envolvendo o tubo flexível 66
Tabela 2 - Parâmetros gerais mantidos fixos durante o estudo de cada parâmetro nas configurações ON e OFF com o alvo metálico coberto por material dielétrico..... 98
Tabela 3 - Capacitâncias obtidas por meio das retas traçadas na figura 108..... 124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBD	*Dielectric barrier discharge*
FEC	Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá
RMS	*Root Mean Square*
RONS	*Reactive Nitrogen and Oxygen Species*
RPN	Região do Pico Negativo
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UV-A	Ultravioleta A
UV-B	Ultravioleta B

LISTA DE SÍMBOLOS

Ar	Argônio
Au	Ouro
C_{cell}	Capacitância total do sistema
C_d	Capacitância do dielétrico
C_{df}	Capacitância do tubo dielétrico na região envolvida pela folha de Al
C_{d+}	Capacitância dielétrica quando a tensão é positiva na configuração OFF
C_{d-}	Capacitância dielétrica quando a tensão é negativa na configuração OFF
C_{d++}	Capacitância dielétrica quando a tensão é positiva na configuração ON
C_{g2}	Capacitância do gás na região em que a pluma de plasma se forma
C_{gf}	Capacitância do gás dentro do tubo na região envolvida pela folha de Al
CO_2	Gás dióxido de carbono
Cr	Cromo
He	Hélio
I	Corrente
n_0	Densidade de íons
N_2	Nitrogênio
N_D	Número de partículas presente na esfera de Debye
NO	Óxido Nítrico
O_2	Oxigênio
P_{ON}	Potência dissipada na configuração ON
P_{OFF}	Potência dissipada na configuração OFF
$R_2(t)$	Resistência devido à descarga na pluma de plasma
$R_f(t)$	Resistência devido à descarga dentro do tubo na região envolvida pela folha de Al
T_e	Temperatura eletrônica
V	Tensão
V_{bp}	Tensão de ruptura da pluma de plasma
V_{min}	Valor mínimo da tensão em um ciclo completo
V_{max}	Valor máximo da tensão em um ciclo completo
V_{pp}	Tensão de pico a pico
Z_{foil}	Impedância total sentida pela corrente que percorre a folha de Al

Z_{alvo}	Impedância total sentida pela corrente que percorre o alvo
α_{eff}	Primeiro coeficiente de ionização de Townsend efetivo
γ_{SE}	Coeficiente de emissão de elétrons secundários
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
k_b	Constante de Boltzmann

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24
2.1 PLASMA 24
2.1.1 Plasma térmico versus plasma não-térmico 26
2.2 TIPOS DE DESCARGAS À PLASMA 28
2.2.1 Avalanche de Townsend 28
2.2.2 Curva de Paschen 29
2.2.3 Streamer breakdown 31
2.2.4 Como evitar o regime de arco em pressão atmosférica 33
2.3 DBD (*DIELETRIC BARRIER DISCHARGE*) 34
2.4 JATOS DE PLASMA 35
2.4.1 Estrutura do jato de plasma 35
2.4.2 Diferentes configurações de jatos de plasma 36
2.4.3 Plasmas frios de cateter 39
2.4.3.1 Dispositivos sem a técnica de jato de plasma transferido 39
2.4.3.2 Dispositivos com a técnica de jato de plasma transferido 42
2.4.3.2.1 Jato de plasma frio não-térmico transferido em pressão atmosférica 42
2.4.3.2.2 Outros dispositivos com jato de plasma transferido 44
2.5 EFEITO DAS ESPÉCIES REATIVAS DO PLASMA NO CORPO 46
2.6 CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES 48
2.6.1 Descargas parciais e capacitâncias parasitas 54
2.7 CARACTERIZAÇÕES DE SISTEMAS A PLASMA PARA APLICAÇÃO BIOMÉDICA 57
3 MATERIAIS E MÉTODOS 59
3.1 CORRENTE DE FUGA ATRAVÉS DA PAREDE DE TUBO FLEXÍVEL 62
3.2 POTÊNCIA DA PLUMA DE PLASMA E DA DESCARGA PRIMÁRIA 63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO I: CORRENTE DE FUGA ATRAVÉS DA FOLHA 65
4.1 SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE 67
4.2 ESPECTRO ÓPTICO 69
4.3 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FOLHA DE AL 69
4.4 INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE PICO A PICO 75

4.5 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA BOBINA ROGOWSKI AO LONGO DO TUBO 77
4.6 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DO TUBO 80
4.7 INFLUÊNCIA DA TAXA DE FLUXO DE GÁS 84
4.8 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA FOLHA DE AL 88
4.9 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DO ALVO SEM A FOLHA DE AL 90
4.10 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DO ALVO COM A FOLHA DE AL 94
5 RESUSTADOS E DISCUSSÃO II: POTÊNCIAS DA DESCARGA PRIMÁRIA E DA PLUMA DE PLASMA 98
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES FORMAS DE APAGAR A DESCARGA 98
5.2 SINAIS DE CORRENTE E TENSÃO 101
5.2.1 Configuração OFF 102
5.2.2 Configuração ON 105
5.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DO ALVO COM AS CONFIGURAÇÕES DE NISHIME (2019) 106
5.4 INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE PICO A PICO 108
5.5 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DO TUBO 109
5.6 INFLUÊNCIA DA TAXA DE FLUXO DE GÁS 113
5.7 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DO ALVO 114
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES III: CAPACITÂNCIAS DIELÉTRICAS E DO SISTEMA NAS CONFIGURAÇÕES OFF E ON 115
6.1 CONFIGURAÇÃO OFF 117
6.1.1 Influência da tensão de pico a pico 117
6.1.2 Influência do comprimento do tubo 118
6.1.3 Influência da taxa de fluxo de gás 120
6.1.4 Influência da distância do alvo 120
6.2 CONFIGURAÇÃO ON 121
6.2.1 Influência da tensão de pico a pico 126
6.2.2 Influência do comprimento do tubo 128
6.2.3 Influência da taxa de fluxo de gás 130
6.2.4 Influência da distância do alvo 131
7 CONCLUSÃO 133
REFERÊNCIAS 135

1 INTRODUÇÃO

Tratamentos à base de plasma abrangem um amplo espectro de possíveis aplicações como deposição de filmes, *etching*, *sputtering*, combustão de lixo e esterilização de superfícies (ADAMOVICH *et al*, 2022; POGREBNYAK; TYURIN, 2005; SAINIEMI *et al*, 2011; TONMITR *et al*, 2020). Os sistemas de plasma empregados em tais tratamentos são operados principalmente em baixa pressão por causa da maior facilidade de controle dos parâmetros da descarga nessa faixa de pressão.

Devido a seu efeito benéfico no processo de cicatrização de feridas e eliminação de espécies invasoras do corpo humano, técnicas à plasma também são empregadas em aplicações biomédicas (GRAVES, 2012). No entanto, aplicações biomédicas à plasma *in vivo* e *ex vivo* requerem dispositivos de plasma que operem em pressão atmosférica. Nesse regime de pressão, ocorrem mais facilmente instabilidades na descarga tanto em seu volume quanto nos eletrodos do sistema (BRUGGEMAN, IZA, BRANDENBURG, 2017), levando a altas corrente e temperatura, características indesejáveis em aplicações biomédicas (DIN-*specification* 91315, 2014; THANA *et al*, 2019; WELTMANN; WOEDTKE, 2011).

Para ser adequado a aplicações em pacientes humanos, um sistema de plasma precisa atender a alguns critérios em relação à corrente, temperatura e radiação UV. Correntes alternadas a partir de 50 µA podem conduzir um ser humano a óbito, temperaturas acima de 40°C levam a desnaturalização das proteínas, e altas doses de radiação UV aumentam o risco de crescimento de células cancerígenas (DIN-*specification* 91315, 2014; THANA *et al*, 2019; WELTMANN; WOEDTKE, 2011).

Os jatos de plasma DBD (*Dieletric Barrier Discharge*) são um dos modos de controlar a corrente e a temperatura na descarga em pressão atmosférica. Esses são capazes de formar plasma e expeli-lo ao ambiente externo por meio de fluxo de gás e permitem tratar objetos independente de sua geometria (LU *et al*, 2019). A corrente e o período de duração da descarga em jatos de plasma DBDs são limitados por meio da inclusão de barreira(s) dielétrica(s) entre os eletrodos do sistema, dificultando o aumento da corrente e da temperatura do plasma (LU *et al*, 2019).

Entre as configurações de jatos de plasma DBD frio em pressão atmosférica, está o sistema de jato de plasma frio transferido utilizado neste trabalho. Nesse sistema, uma descarga é formada em uma configuração DBD (reator DBD), em seguida, tanto a tensão quanto o fluxo de gás desta descarga são transportados por um tubo plástico flexível juntamente com um fio de cobre neste contido para a outra extremidade de tubo, onde se

forma jato de plasma (KOSTOV *et al*, 2015a). O dispositivo proporciona um fácil manuseio ao operador por intermédio do tubo flexível permitindo ajustar o ângulo e a proximidade do jato ao alvo de maneira relativamente simples e possui potencial para aplicações endoscópicas (KOSTOV *et al*, 2015b).

Devido à formação de descarga no reator DBD e ao longo do tubo, medidas da potência dissipada no sistema incluem a potência dissipada nessas descargas juntamente com a potência dissipada na pluma de plasma. Todavia, somente a potência dissipada na pluma é efetivamente transferida ao alvo, que pode ser um paciente, por exemplo. Logo, essa é a principal potência a se estimar visando o tratamento biológico.

Outro ponto importante para a caracterização elétrica do dispositivo é compreender as perdas resistivas e capacitivas no tubo flexível. Essas perdas influenciam a potência e corrente RMS do sistema, e que são, em parte, transferidos ao alvo tratado.

Neste trabalho, investigou-se a influência de alguns parâmetros do sistema sobre a corrente de fuga através das paredes do tubo flexível do jato. Para isso, uma seção do tubo foi envolta por uma folha de Al, e as mudanças da potência e das correntes no alvo e folha de Al foram avaliadas para alguns dos principais parâmetros da descarga.

A segunda parte desse trabalho dedicou-se ao estudo da potência dissipada na pluma de plasma. Para determiná-la, foram utilizadas duas configurações. Uma dessas é a configuração normalmente usada no dispositivo (KOSTOV *et al*, 2015a) com o jato incidindo sobre um alvo metálico coberto por uma placa de vidro. Na outra configuração, a ruptura da pluma de plasma é evitada por meio da adição de O_2 ao tubo flexível e um fio de cobre que se estende até a placa de vidro. Com auxílio dessas duas configurações, avaliou-se a influência de alguns dos principais parâmetros sobre as potências dissipadas na pluma, reator DBD e tubo flexível.

Ambas as partes do trabalho foram realizadas com um de jato de plasma transferido presente no laboratório de plasma da FEG (Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá) - UNESP (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”).

No capítulo 1, é feita a introdução. No capítulo 2, a revisão bibliográfica é apresentada explicando os conceitos importantes para se compreender a formação do jato de plasma frio não-térmico, a importância desse na aplicação biomédica e conceitos importantes na caracterização elétrica. Os equipamentos e métodos experimentais usados são explicados no capítulo 3. Nos capítulos de 4 a 6, as discussões e resultados são exibidos. A conclusão é realizada no capítulo 7.

7 CONCLUSÃO

Do estudo da fuga de corrente através das paredes do tubo visando compreender como as perdas capacitivas e resistivas dentro do tubo flexível impactam a potência e corrente na pluma de plasma, as seguintes considerações podem ser levantadas:

- O aumento da condutividade elétrica na região da pluma quando a ruptura da pluma acontece intensifica o escoamento de elétrons para o alvo. O crescimento da condutividade pode ser observado pela mudança da razão entre Z_{Folha} e Z_{Alvo} no momento da ruptura da pluma. Essa análise pode ser estendida à fuga de corrente do tubo sem folha de Al. Nesse caso, a relação entre as impedâncias das correntes através das paredes do tubo e na pluma de plasma é considerada;
- A perda de corrente através das paredes do tubo na seção envolvida pela folha de Al é proporcional a L_F e não depende da sua posição ao longo do tubo;
- Com o aumento de L_T, V_{bp} também cresceu. O pico de I_{Folha}, por sua vez, não sofre mudanças significativas com L_T, mas o intervalo de tempo da ruptura da descarga na folha de Al até a ruptura da pluma – em que I_{Folha} tem maior amplitude – cresce, resultando no pequeno incremento de $\bar{I}_{Alvo}$ com L_T observado;
- Na investigação da influência de D_{Alvo} com e sem a folha de Al, observou-se três formas diferentes do sinal de I_{Alvo}. Na configuração sem folha, para D_{Alvo} menor que 8,0 mm, I_{Alvo} apresentou um pico mais largo e uma queda de seu valor em linha reta um pouco após o pico ser alcançado. Para D_{Alvo} a partir de 8,0 mm, o pico de I_{Alvo} – formado logo após a ruptura da descarga da pluma – é mais estreito e, em seguida, I_{Alvo} decresce de forma não linear, possivelmente de modo exponencial. Na configuração com a folha de Al, o sinal de I_{Alvo} para D_{Alvo} até 6,0 mm apresentou o mesmo formato do sinal de I_{Alvo} na configuração sem folha de Al a partir de 8,0 mm de D_{Alvo}. Para D_{Alvo} maior que 6,0 mm com a folha de Al, I_{Alvo} cresce e diminui suavemente formando uma pequena lombada;
- No geral, $\bar{I}_{Folha}$ depende principalmente de dois fatores: V_{bp}, e a relação entre Z_{Folha} e Z_{Alvo}.

Do estudo da potência dissipada na pluma, que é a potência efetivamente transferida ao alvo, pode-se realizar as seguintes conclusões:

- Na configuração OFF, a parte positiva do sinal de I_{Alvo} apresentou somente um valor de pico. Em contrapartida, na configuração ON, pelo menos dois picos aparecem.

Para V_{pp} menor que 16,2 kV na configuração ON, foram identificados dois picos, e, a partir de 16,2 kV, três picos foram identificados. Supõe-se que o primeiro pico se deve à descarga primária e os demais picos à descarga da pluma;

- A influência dos parâmetros sobre P_{OFF} é consideravelmente menor que sobre P_{ON} e, na maioria dos casos, P_{OFF} pode ser considerada constante. Isto significa que a potência dissipada na descarga primária e tubo flexível pode ser considerada constante em relação a P_{Pluma}, que é a potência efetivamente transferida ao alvo pelo sistema, conforme os parâmetros da descarga são modificados.

Na configuração ON, C_{d++} teve seu valor influenciado pelos parâmetros modificados devido aos seguintes motivos:

- Tensão de pico a pico: o aumento de V_{pp} fez com que a pluma ficasse com uma densidade maior de elétrons e íons e/ou o volume da pluma de plasma aumentasse (CHOI; HAN; BAIK, 2008; CUI *et al*, 2023);
- Comprimento do tubo: ao utilizar maiores L_T, as perdas resistivas dentro do tubo cresceram (BASTIN *et al*, 2020; KOSTOV *et al*, 2015b), diminuindo a tensão transferida para a ponta do fio de cobre e o valor de C_{d++};
- Taxa de fluxo de gás: com maiores Φ_{He}, a colisão e a recaptura de elétrons por moléculas do ar diminui, resultando em uma pluma mais densa de elétrons e/ou mais volumosa, aumentando C_{d++}.

Para futuros trabalhos, o comportamento da corrente de fuga através da folha de Al utilizando diferentes gases de trabalho como Ar poderá ser investigada. Outra possibilidade é utilizar um circuito elétrico que imita a impedância do corpo humano para avaliar a perda de corrente quando o tubo flexível é colocado em contato com o corpo humano, algo que ocorre em tratamentos endoscópicos.

A influência dos parâmetros alterados neste trabalho sobre P_{Pluma} e as capacitâncias dielétrica e do sistema também podem ser investigadas na configuração com a pluma incidindo sobre o alvo metálico.

REFERÊNCIAS

ADAMOVICH, I *et al*. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 55, n. 37, p. 373001, 2022.

BASTIN, O.; THULLIEZ, M.; SERVAIS, J.; NONCLERCQ, A.; DELCHAMBRE, A.; HADEFI, A.; DEVIÈRE, J.; RENIERS, F. Optical and Electrical Characteristics of an Endoscopic DBD Plasma Jet. **Plasma Medicine**, v. 10, n. 2, 2020.

BASTIN, O.; THULLIEZ, M.; SERRA, T.; NYSSEN, L.; FONTAINE, T.; DEVIÈRE, J., DELCHAMBRE, A., RENIERS, F.; NONCLERCQ, A. Electrical equivalent model of a long dielectric barrier discharge plasma jet for endoscopy. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 56, n. 12, p. 125201, 2023.

BEKESCHUS, S.; SCHMIDT, A.; WELTMANN, K.D.; VON WOEDTKE, T. The plasma jet kINPen–A powerful tool for wound healing. **Clinical Plasma Medicine**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 19-28, jul. 2016.

BORGES, A. C.; LIMA GdMG, NISHIME, T. M. C.; GONTIJO, A. V. L.; KOSTOV, K. G.; KOGA-ITO, C. Y. Amplitude-modulated cold atmospheric pressure plasma jet for treatment of oral candidiasis: *In vivo* study. **PLoS ONE**, v. 13, n. 6, p. 1-19, 2018.

BOUSBA, H. E.; SAHLI, S.; BENTERROUCHE, L. Effect of geometrical parameters on the plasma jet transported through a plastic tube. **2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)**, p. 1-4, 2019.

BOUSBA, H. E.; SAHLI, S.; NAMOUS, W.S.E. BENTERROUCHE, L. On the stability and turbulences of atmospheric-pressure plasma jet extracted from the exit of a long flexible PVC tube. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 50, n. 5, p.1218-1226, 2022.

BRUGGEMAN, P. J; IZA, F.; BRANDENBURG, R. Foundations of atmospheric pressure non- equilibrium plasmas. **Plasma Sources Sci. Technol**, v. 26, 2017.

BRUGGEMAN, P. J.; SADEGHI, N.; SCHRAM, D.C.; LINSS, V. Gas temperature determination from rotational lines in non-equilibrium plasmas: a review. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 23, n. 2, abr. 2014.

BUTTERWORTH, T.; ALLEN, R. W. K. Plasma-catalyst interaction studied in a single pellet DBD reactor: dielectric constant effect on plasma dynamics. **Plasma Sources Sci. Technol**, v. 26, n. 6, p. 1-16, maio, 2017.

CHAPMAN, B. **Glow discharges process**. John Wiley & Sons, New York, 1980.

CHEN, F. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion**. v.1, 2. ed, Plasma Physics, Plenum, 1984.

CHOI, J.H.; HAN, M.H.; BAIK, H.K. Experimental Analysis of Reduced Electric Field during Time-Variable Pulsed Dielectric Barrier Discharge. **Japanese Journal Of Applied Physics**, [S.L.], v. 47, n. 2, p. 1071, fev. 2008.

CHUNG, T. H.; STANCAMPIANO, A.; SKLIAS, K.; GAZELI, K.; ANDRÉ, F. M.; DOZIAS, S.; DOUAT, C.; POUVESLE, J. M.; SANTOS SOUSA, J.; ROBERT, É.; MIR, L. M. Cell Electropermeabilisation Enhancement by Non-Thermal-Plasma-Treated PBS. **Cancers**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 219, 16 jan. 2020.

CUI, Z.; LIU, Q.; CAI, Z.; WANG, J.; WU, Q. Modified equivalent circuit for coplanar dielectric barrier discharge considering undischarged areas. **Physics of Plasmas**, v. 30, n. 11, 2023.

DAS, S. P.; DALEI, G.; BARIK, A. A Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Reactor: an efficient tool to measure the sustainability of non-thermal plasmas through the electrical breakdown of gases. **Iop Conference Series**: **Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 410, 24 set. 2018.

DAWSON, G.A.; WINN, W.P. A model for streamer propagation. **Zeitschrift für Physik**, v. 183, n. 2, p.159-171, abr. 1965.

DEWHIRST, M. W.; VIGLIANTI, B. L.; LORA-MICHIELS, M.; HANSON, M.; HOOPES, P. J. Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia. **International journal of hyperthermia**, v. 19, n. 3, p. 267-294, 2003.

DECAUCHY, H.; PAVY, A.; CAMUS, M.; FOUASSIER, L.; DUFOUR, T. Cold plasma endoscopy applied to biliary ducts: Feasibility risk assessment on human-like and porcine models for the treatment of cholangiocarcinoma. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 55, n. 45, p. 455401, 2022.

DIN SPEC 91315:2014-06. **General Requirements for Plasma Sources in Medicine**. 2014. Disponível em: https://www.beuth.de/en/technical-rule/din-spec-91315/203493369 (acesso em: 1 nov. 2023).

DROGE, W. Free radicals in the physiological control of cell function. **Physiological reviews**, v. 82 47–95, 2002.

ELENBAAS, W. **The High Pressure Mercury Vapor Discharge**. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1951.

FOYER, C.H.; NOCTOR, G. Redox regulation in photosynthetic organisms: signaling, acclimation, and practical implications. **Antioxidants & redox signaling**, v. 11, n. 4, p. 861-905, 2009.

FREIN, D.; SCHILDKNECHT, S.; BACHSCHMID, M.; ULLRICH, V. Redox regulation: a new challenge for pharmacology. **Biochemical Pharmacology**, v. 70, n. 6, p. 811-823, 2005.

HONG, Y.C.; CHO, S.C.; KIM, J.H.; UHM, H.S. A long plasma column in a flexible tube at atmospheric pressure. **Physics of Plasmas**, v. 14, n. 7, 2007.

FRIDMAN, A. **Plasma chemistry**. Cambridge university press, 2008.

GERLING, T.; BRANDENBURG, R.; WILKE, C.; WELTMANN, K-D. Power measurement for an atmospheric pressure plasma jet at different frequencies: Distribution in the core

plasma and the effluent. **The European Physical Journal Applied Physics**, v. 78, n. 1, p. 10801, 2017.

GRAVES, D. B. The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 45, n. 26, p. 263001, 2012.

HUSAIN, E.; NEMA, R. Analysis of Paschen curves for air, N_2 and SF_6 using the Townsend breakdown equation. **IEEE transactions on electrical insulation**, n. 4, p. 350-353, 1982.

IBRAHIM, F. **Design and Construction of low-Pressure DC-Sputtering plasma system for preparing Gas Sensors**, University of Baghdad, 2013.

JOH, H. M.; KANG, H. R.; CHUNG, T. H.; KIM, S. J. Electrical and optical characterization of atmospheric-pressure helium plasma jets generated with a pin electrode: Effects of the electrode material, ground ring electrode, and nozzle shape. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 42, n. 12, p. 3656-3667, 2014.

LAROUSSI, M.; LU, X. Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications. **Applied physics letters**, v. 87, n. 11, 2005.

LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. **Principles of plasma discharges and materials processing.** 2. ed. John Wiley & Sons, 2005.

LIU, X. Y.; PEI, X. K.; LU, X. P.; LIU, D. W. Numerical and experimental study on a pulsed-dc plasma jet. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 23, n. 3, p. 035007, 2014.

LOEB, L. B.; MEEK, J. M. **The Mechanism of the Electric Spark**. Stanford University Press, Stanford, CA, 1941.

LU, X.; NAIDIS, G.V.; LAROUSSI, M.; REUTER, S.; GRAVES, D.B.; OSTRIKOV, K. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. **Physics Reports**, v. 630, p. 1-84, 2016.

LU, X. P.; REUTER, S.; LAROUSSI, M.; LIU, D. W. **Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma Jets**: fundamentals, diagnostics, and medical applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019.

LUQUE, A.; RAHISHNAYA, V.; EBERT, U. Positive and negative streamers in ambient air: modelling evolution and velocities. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 23, p. 234005, 2008.

KARAKAS, E.; AKMAN, M.A.; LAROUSSI, M. The evolution of atmospheric-pressure low-temperature plasma jets: jet current measurements. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 21, n. 3, p. 034016, 2012.

KOSTOV, K. G.; MACHIDA, M.; PRYSIAZHNYI, V.; HONDA, R. Y. Transfer of a cold atmospheric pressure plasma jet through a long flexible plastic tube. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 24, n. 2, p. 025038, 2015a.

KOSTOV, K. G.; NISHIME, T.M.; MACHIDA, M.; BORGES, A.C.; PRYSIAZHNYI, V.; KOGA-ITO, C.Y. Study of cold atmospheric plasma jet at the end of flexible plastic tube for microbial decontamination. **Plasma processes and polymers**, 12(12), pp.1383-1391, 2015b.

KUROSAWA, M.; TAKAMATSU, T.; KAWANO, H.; HAYASHI, Y.; MIYAHARA, H.; OTA, S.; OKINO, A.; YOSHIDA, M. Endoscopic Hemostasis in Porcine Gastrointestinal Tract Using CO_2 Low-Temperature Plasma Jet. **Journal of Surgical Research**, v. 234, p. 334-342, 2019.

MANLEY, T. C. The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge. **Transactions of the electrochemical society**, v. 84, n. 1, p. 83, 1943.

MCKAY, K.; OH, J. S.; WALSH, J. L.; BRADLEY, J. W. Mass spectrometric diagnosis of an atmospheric pressure helium microplasma jet. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 46, n. 46, p. 464018, 2013.

NASCIMENTO, F.; PETROSKI, K.; KOSTOV, K. Effects of O2 Addition on the Discharge Parameters and Production of Reactive Species of a Transferred Atmospheric Pressure Plasma Jet. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6311, 2021.

NASSER, E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics**. Wiley-Interscience, New York, 1971.

NAUDE, N.; CAMBRONNE, J. P.; GHERARDI, N.; MASSINES, F. Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure Townsend discharge to a filamentary discharge. **Journal of physics D: applied physics**, v. 38, n. 4, p. 530, 2005.

NISHIME, T.M.C. **Development and characterization of extended and flexible plasma jets.** 2019. 129 f. Tese (Doutorado em Física) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

NISHIME, T.M.C. **Jato de plasma frio em pressão atmosférica para tratamento de materiais e esterilização.** 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2015.

PASCHEN, F. Ueber die zum funkenübergang in luft: wasserstoff und kohlensäure bei verschiedenen drucken erforderliche potentialdifferenz. **JA Barth**, 1889.

PEETERS, F. J. J.; VAN DE SANDEN, M. C. M. The influence of partial surface discharging on the electrical characterization of DBDs. **Plasma Sources Science and Technology,** v. 24, n. 1, p. 015016, 2014.

PIPA, A. V.; BRANDENBURG, R. The Equivalent Circuit Approach for the Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges: The Classical Theory and Recent Developments. **Atoms,** v. 7, n. 1, p. 14, 2019.

PIPA, A. V.; HODER, T.; BRANDENBURG, R. On the Role of Capacitance Determination Accuracy for the Electrical Characterization of Pulsed Driven Dielectric Barrier Discharges. **Contributions to Plasma Physics**, v. 53, n. 6, p. 469-480, 2013.

PIPA, A. V.; KOSKULICS, J.; BRANDENBURG, R.; HODER, T. The simplest equivalent circuit of a pulsed dielectric barrier discharge and the determination of the gas gap charge transfer. **Review of Scientific Instruments**, v. 83, n. 11, 2012.

POGREBNYAK, A. D.; TYURIN, Y. N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. **Physics-Uspekhi**, v. 48, n. 5, p. 487, 2005.

POLAK, M.; WINTER, J.; SCHNABEL, U.; EHLBECK, J.; WELTMANN, KD. Innovative plasma generation in flexible biopsy channels for inner-tube decontamination and medical applications. **Plasma processes and polymers**, v. 9, n. 1, p. 67-76, 2012.

RAETHER, H. **Electron Avalanches and Breakdown in Gases.** London, Butterworths, 1964.

RAIZER, Y. P. **Gas Discharge Physics**. 2. ed. Springer, Berlin, 1991.

REUTER, S.; VON WOEDTKE, T.; WELTMANN, K.D. The kINPen—A review on physics and chemistry of the atmospheric pressure plasma jet and its applications. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 51, n. 23, p. 233001, 2018.

ROBERT, E.; BARBOSA, E.; DOZIAS, S.; VANDAMME, M.; CACHONCINLLE, C.; VILADROSA, R.; POUVESLE, JM. Experimental study of a compact nanosecond plasma gun. **Plasma processes and polymers**, v. 6, n. 12, p. 795-802, 2009.

RODRIGUES, M.; KOSARIC, N.; BONHAM, C. A.; GURTNER, G. C. Wound Healing: A Cellular Perspective. **Physiological reviews**, v. 99, n. 1, p. 665-706, 2019.

SAINIEMI, L.; JOKINEN, V.; SHAH, A.; SHPAK, M.; AURA, S.; SUVANTO, P.; FRANSSILA, S. Non-reflecting silicon and polymer surfaces by plasma etching and replication. **Advanced materials**, v. 1, n. 23, p. 122-126, 2010.

SHI, X.; LIU, S., JIANG, R.; CHEN, J.; S., MEI, D.; ZHOU, R.; FANG, Z.; CULLEN, P.J. Development and characterization of touchable air plasma jet device for inactivation of oral bacteria. **Results in Physics**, v. 36, p. 105405, 2022.

SORCI, G.; FAIVRE, B. Inflammation and oxidative stress in vertebrate host–parasite systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1513, p. 71-83, 2009.

SIEMENS, W. Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähten. **Annalen der Physik**, v. 178, n. 9, p. 66-122, 1857.

SWERDLOW, C. D.; OLSON, W. H.; O'CONNOR, M. E.; GALLIK, D. M.; MALKIN, R. A.; LAKS, M. Cardiovascular collapse caused by electrocardiographically silent 60-Hz intracardiac leakage current. **Circulation**, v. 99, n. 19, p. 2559-2564, 1999.

TALVISTE, R.; JÕGI, I.; RAUD, J.; PARIS, P. The effect of dielectric tube diameter on the propagation velocity of ionization waves in a He atmospheric-pressure micro-plasma jet. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 49, n. 19, p. 195201, 2016.

THANA, P.; WIJAIKHUM, A.; PORAMAPIJITWAT, P.; KUENSAEN, C.; MEERAK, J.; NGAMJARUROJANA, A.; BOONYAWAN, D. A compact pulse-modulation cold air plasma jet for the inactivation of chronic wound bacteria: development and characterization. **Heliyon**, v. 5, n. 9, 2019.

THULLIEZ, M., BASTIN, O., REMY, A., NONCLERCQ, A., DEVIÈRE, J., DELCHAMBRE, A.; RENIERS, F. Effect of gas flow on a helium/oxygen endoscopic plasma jet. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 55, n. 41, p. 415202, 2022.

TOWNSEND, J. **Electricity in Gases**. Oxford: Oxford University Press, 1915.

TOWNSEND, J. **The theory of ionization of gases by collision**. Constable, Limited, 1910.

TONMITR, N.; MORI, T.; TAKAMI, M.; YONESU, A.; HAYASHI, N. Time-Modulated LF-Microwave Hybrid Plasma for Surface Sterilization. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 49, n. 1, p. 154-161, 2020.

WADHWA, C. L. High Voltage Engineering. 2. ed. **New Age International**, 2007.

WALSH, J. L.; IZA, F.; JANSON, N.B.; LAW, V. J.; KONG, M.G. Three distinct modes in a cold atmospheric pressure plasma jet. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, n. 7, p. 075201, 2010.

WELTMANN, K. D.; VON WOEDTKE, T. Basic requirements for plasma sources in medicine. **The European Physical Journal-Applied Physics**, v. 55, n. 1, p. 13807, 2011.

ZUO, X.; WEI, Y.; WEI CHEN, L.; DONG MENG, Y. Non-equilibrium atmospheric pressure microplasma jet: An approach to endoscopic therapies. **Physics of Plasmas**, v. 20, n. 8, 2013.