

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DOS PARÂMETROS E IDENTIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES QUÍMICAS PRESENTES NOS JATOS DE PLASMA ORIUNDAS DA EXCITAÇÃO DE HÉLIO E ARGÔNIO PARA FINS ODONTOLÓGICOS

Data de aceite: 01/07/2024

Ricardo Anderson da Cruz

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil
<https://www.linkedin.com/in/ricardo-anderson-cruz-091255a5/>

Angelo Roncalli Oliveira Guerra

Maria Luiza de Medeiros Cachina

Ana Luiza Ohara de Queiroz

Nicolas Guedes Nunes

Leticia Amanda Fontes de Moraes

Ana Beatriz Villar Medeiros

Samara Dália Tavares Silva

Rafael Cavalcanti Contreras

Custódio Leopoldino de Brito Guerra Neto

tecnologia como bastante relevante. O momento em que as espécies químicas do plasma atingem as superfícies tratadas ainda requer estudos, com isso a busca atual visa obter um conhecimento mais profundo para aplicações na odontologia. É dada atenção especial aos efeitos biológicos e superficiais das espécies reativas geradas por plasma. Esta pesquisa tem como objetivo a utilização da técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica (EEO), uma ferramenta para o diagnóstico de plasma, para detecção de espécies reativas e sua identificação, assim como, a análise de como estas se comportam mediante os parâmetros adotados no processo de obtenção do plasma por Descarga em Barreira Dielétrica (DBD). Para a realização dessa análise, foi preciso seguir as etapas de busca de artigos para a realização da revisão bibliográfica, experimentos laboratoriais para obtenção de dados e análise das espécies reativas. Os resultados incluem gráficos do espectro do plasma, com seus respectivos parâmetros, assim como a identificação de suas espécies químicas, com imagens térmicas de algumas amostras sob incidência da pluma do plasma, consideradas críticas para a odontologia. Conclui-se que o estudo das

RESUMO: O estudo da tecnologia de plasma à pressão atmosférica tornou-se uma área em destaque nas pesquisas devido às suas diversas aplicações em saúde. As áreas como controle de poluição, processamento de materiais, eletroquímica e engenharia como um todo tem essa

espécies reativas é bastante importante para diversas áreas, em especial a odontologia, pois as espécies químicas além de realizarem modificações superficiais, aumentando a energia aplicada, também, inativa microrganismos indesejados, com efeito esterilizante.

PALAVRAS-CHAVE: Plasma atmosférico, descarga em barreira dielétrica, espectroscopia de emissão óptica, espécies reativas, odontologia.

ABSTRACT: The study of atmospheric pressure plasma technology has become a prominent area of research due to its diverse applications in health. Areas such as pollution control, materials processing, electrochemistry and engineering as a whole have this technology as very relevant. The moment in which the chemical species in the plasma reach the treated surfaces still requires studies, so the current search aims to obtain deeper knowledge for applications in dentistry. Special attention is paid to the biological and surface effects of plasma-generated reactive species. This research aims to use the Optical Emission Spectroscopy (EEO) technique, a tool for plasma diagnosis, detection of reactive species and their identification, as well as the analysis of how they behave according to the parameters adopted in the process of obtaining plasma by Dielectric Barrier Discharge (DBD). To carry out this analysis, it was necessary to follow the steps of searching for articles to carry out the bibliographic review, laboratory experiments to obtain data and analysis of reactive species. The results include graphs of the plasma spectrum, with its respective parameters, as well as the identification of its chemical species, with thermal images of some samples under the influence of the plasma plume, considered critical for dentistry. It is concluded that the study of reactive species is very important for several areas, especially dentistry, as chemical species not only carry out surface modifications, increasing the energy applied, but also inactivate unwanted microorganisms, with a sterilizing effect.

KEYWORDS: Atmospheric plasma, dielectric barrier discharge, optical emission spectroscopy, reactive species, dentistry.

INTRODUÇÃO

O plasma pode existir de várias formas e pode ser criado de diferentes maneiras. Em muitas aplicações tecnológicas pode existir a baixas pressões de gás (plasma térmico), por exemplo, tratamento de superfícies de metais, assim como a pressão atmosférica (plasma não térmico), o raio é um exemplo de plasma a pressão atmosférica (KOSTOV, K.G., 2022 e Brito et al, 2022).

Os termos térmico e não térmico, não são muito precisos. No plasma não térmico, o resfriamento de íons e moléculas não carregadas é mais eficaz que a transferência de energia dos elétrons, e o gás permanece em baixa temperatura. Por esse motivo, o plasma não térmico também é chamado de plasma sem equilíbrio, ou seja, suas partículas carregadas estão sempre em busca de equilibrar-se. Em um plasma térmico, por outro lado, o fluxo de energia dos elétrons para as partículas pesadas, equilibra o fluxo de energia das partículas pesadas para o ambiente, somente quando a temperatura dessas partículas se torna quase igual à temperatura do elétron (FRIDMAN et al., 2008 e KOSTOV, K.G., 2022 e Brito et al, 2022).

O plasma por descarga em Barreira Dielétrica (DBD) é um representante de plasmas não térmicos, com vantagens de descargas altamente transitórias, baixas temperaturas e alta quantidade de espécies reativas. O típico plasma DBD pode ser formado por dois eletrodos, onde pelo menos um é revestido por material dielétrico, uma forma de resistência para o material, que é apropriado para a atomização de espécies voláteis (ZHANG et al., 2019). Quando a amplitude do campo elétrico é suficiente para a quebra da rigidez dielétrica, a descarga através do gás é formada, gerando espécies neutras e eletricamente carregadas como elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas (PAIVA et al., 2019 e KOSTOV, K.G., 2022 e Brito et al., 2022).

O jato de plasma DBD vem sendo empregado em pesquisas recentes na modificação de materiais termicamente sensíveis, metais nobres, esterilização de bactérias e descontaminação fúngica (NASCIMENTO NETO et al., 2015 e KOSTOV, K.G., 2022 e Brito et al., 2022), além disso, existem pesquisadores estudando aplicações promissoras na área de odontologia, aplicando o plasma diretamente para eliminar um dos microrganismos mais significativos no desenvolvimento de cáries, *Streptococcus Mutans* (GHERARDI; TONINI; COLOMBO, 2018), incluindo modificações na superfície de implantes dentários, adesão de materiais de proteção aos dentes, tratamento endodôntico e clareamento (ŠANTAK et al., 2017).

Também, é possível o tratamento com plasma em outras áreas, como por exemplo na dermatologia, onde o profissional faz uso de “canetas” de jato de plasma, em regime filментар, para promover a “regeneração” da pele, por meio da produção de calor, induzindo um “dano” térmico na superfície da pele causando uma nova produção de colágeno, fibras elásticas, modificação e reestruturação da derme (GUERRA et al., 2018 e MEYER, P. F. et al., 2024). Outra perspectiva nessa linha de pesquisa, é o uso do plasma como um facilitador da hidrofiliçidade da pele, sendo utilizado como procedimento facial pré-cosmético para a hidratação da pele. Isso desempenha um papel significativo na melhoria dos efeitos de vários produtos disponíveis no mercado de cosméticos (GUERRA et al., 2018 e MEYER, P. F. et al., 2024).

O caráter químico do plasma DBD é produzido devido a colisões, que formam produtos básicos como oxigênio atômico, oxigênio metaestável e o nitrogênio, com colisões reativas subsequentes que produzem uma mistura de espécies neutras, iônicas e/ou excitadas (NASCIMENTO NETO, 2013 e GUERRA et al., 2018) que podem atuar como bactericida, desinfecção e cicatrizaçãõ da pele, coagulaçãõ sanguínea, modificação de materiais poliméricos e materiais termicamente sensíveis para terapia médica, aplicações em odontologia, entre outras ações (GUERRA et al., 2018 e NISHIME et al., 2017 e MEYER, P. F. et al., 2024).

Portanto, os jatos de plasma DBD apresentam várias vantagens e condições muito importantes para aplicações na área biomédica, pois é formado por uma baixa potência, deixando a temperatura do jato próxima a do ambiente, e também, devido à utilização do

dielétrico, reduz a formação de arcos (NASCIMENTO NETO, 2013 e GUERRA et al., 2018 e MEYER, P. F. et al., 2024).

Para estudar esse tipo de plasma, várias técnicas de detecção são utilizadas, como por exemplo, a Espectroscopia de Emissão Óptica (EEO) que é uma técnica típica com alta precisão e sem intrusividade, registrando a intensidade de emissão (EI) de cada comprimento de onda (ZHANG et al., 2019); fornecendo informações sobre a cinética de geração do plasma, as espécies ativas e a quantidade relativa de espécies, como energia reagem com o gás ou misturas de gases de trabalho durante as reações físico-químicas no plasma (KOSTOV, K.G., 2022 e Brito et al, 2022).

Este trabalho teve como objetivo principal a utilização da técnica EEO para detecção de espécies ativas e sua identificação, assim como, a análise dos parâmetros de obtenção do plasma DBD para aplicações na odontologia, visando obter um conhecimento mais profundo a respeito da cinética de produção de plasma DBD atmosférico, auxiliando assim a sistematizar o uso dessa técnica na odontologia.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estados físicos da matéria (Figura 1) correspondem aos moldes pelos qual a matéria pode se exibir na natureza. Esses estados são definidos de acordo com a pressão, temperatura e sobretudo, pelas forças que atuam nas moléculas. A matéria é constituída de pequenas partículas (átomos e moléculas), corresponde a tudo aquilo que possui massa e que ocupa determinado lugar no espaço. Podendo se apresentar em quatro estados: sólido, líquido, gasoso e plasma.

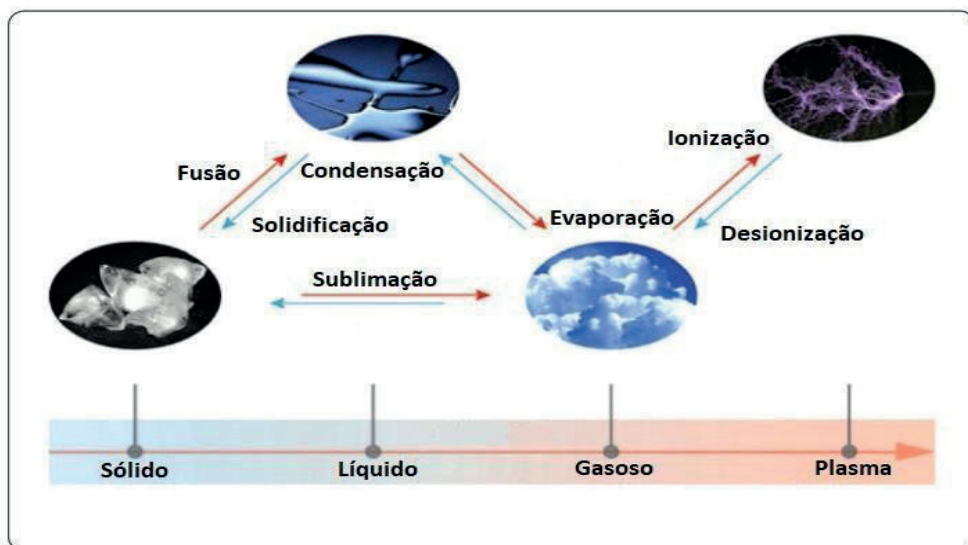


Figura 1 – Os quatro estados da matéria adaptada de (C.; C.; J., 2013).

O termo plasma foi introduzido por Irving Langmuir em 1928 para descrever o estado da matéria, Meghnad Saha, um físico indiano, estimou que mais de noventa e nove por cento do universo é composto de plasma (KOSTOV,K.G., 2022).

O plasma pode ser gerado artificialmente através de vários métodos para aplicações específicas. Lâmpadas fluorescentes, letreiros publicitários de neon e painéis de plasma são exemplos típicos que usam a luz ultravioleta emitida pelo plasma.

A expressão “plasma” aplica-se a um gás que através de ionização, contém espécies neutras e eletricamente carregadas como elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas, podendo ser caracterizado, também, por ser um conjunto de partículas, carregadas e neutras, quase-neutra, que exibem um comportamento coletivo (KOSTOV,K.G., 2022).

Nos últimos anos, plasmas frios atraíram muita atenção em vários campos da ciência e da tecnologia (Figura 2). As descargas de plasma a pressão atmosférica são praticamente utilizadas devido à sua simplicidade e baixo custo. O jato de plasma é usado para aplicações como produção de ozônio, controle de poluição ambiental, tratamento de água, ignição e combustão, tratamento de superfície, tratamento médico, cirurgia, coagulação sanguínea, esterilização, remoção de bactérias, terapia de câncer, odontologia, oncologia, agrícolas e biológicos (ONO, 2016; TANAKA et al., 2017).

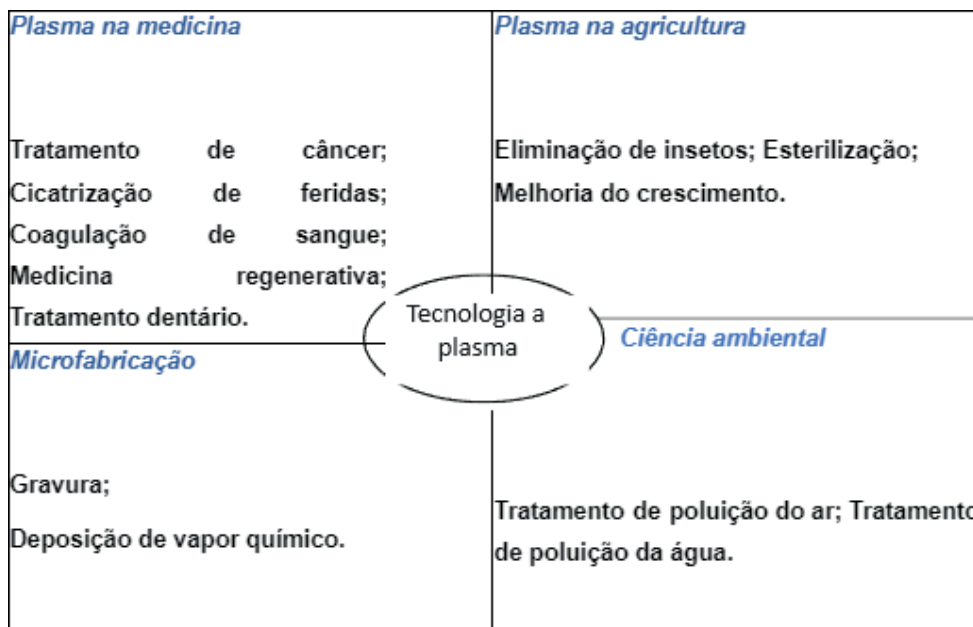


Figura 2 - Ampla variedade de aplicações em tecnologia de plasma (Adaptada) (TANAKA et al., 2017).

Descarga em barreira dielétrica

A descarga em barreira dielétrica tem uma longa história. Sua descoberta é atribuída a Werner von Siemens, que em 1857 desenvolveu um tubo de descarga para produção de ozônio (GUERRA et al., 2018).

A descarga em barreira dielétrica (Figura 3), ocorre quando uma alta tensão é aplicada na região entre dois eletrodos metálicos quando pelo menos um dielétrico é inserido entre os mesmos para formar o plasma (NASCIMENTO NETO, 2013 e GUERRA et al., 2018).

Quando a alta tensão é fornecida aos eletrodos, que podem ser por fontes de tensão alternada, contínua ou por rádio frequência (BUDA et al., 2015), cargas elétricas acumulam-se na superfície do dielétrico, processo que ocorre devido a polarização do mesmo. Em determinado momento, esse acúmulo é o suficiente para romper a rigidez dielétrica do gás e ocorre uma micro descarga, após isso, elétrons são ejetados em direção ao ânodo diminuindo a concentração de carga e conseqüentemente o campo elétrico pontual, que originou essa descarga, e o microfilamento se extingue (Lira/Pluritec, 2020).

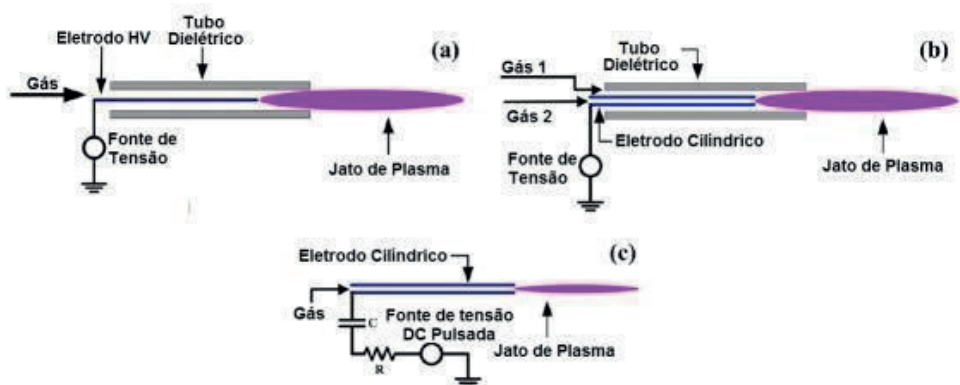


Figura 3 - Desenho esquemático de dispositivos de jato de plasma DBD (NASCIMENTO NETO, 2013).

O uso de dielétrico é imprescindível para o funcionamento de um dispositivo DBD, pois limita a corrente na descarga e distribuindo-a sobre toda a área dos eletrodos, evitando a formação de arcos (NASCIMENTO NETO, 2013). Essa descarga constitui um método seguro e econômico de gerar plasma não térmico a pressão atmosférica.

Existem dois regimes diferentes de operação para o plasma DBD: o regime filamentar e o difuso. Na maioria das aplicações industriais com o plasma, as descargas produzidas pela técnica DBD são feitas em modo filamentar apesar de, no regime difuso, a descarga ser mais homogênea, não apresentando formação de arcos.

Regime filamentar

O plasma DBD em regime filamentar surge no momento em que a tensão de ruptura é alcançada, tendo como principal característica uma alta densidade de corrente, devido à pouca uniformidade das micro descargas. A descarga DBD em regime filamentar possui uma gama de variedades de radicais livres, moléculas, átomos, elétrons com grande energia e radiação ultravioleta, que ao interagir com a superfície dos materiais podem causar desde mudanças na topografia da superfície (rugosidade), quanto aumento da habilidade de um líquido em manter contato com uma superfície sólida, chamado de molhabilidade, devido a formação de grupos funcionais compostos (ZHANG, Y. et al., 2016 e ZHANG, B. et al., 2019). Porém tudo isso ocorre de forma não uniforme na superfície do material devido falta de uniformidade energética no plasma produzido (Lira/Pluritec, 2020).

Regime difuso

Após a ruptura elétrica ocorrida no regime filamentar, se for aumentado o número de micro descargas e elas se distribuírem em toda superfície do dielétrico, dará origem ao plasma DBD no regime difuso. A transição de uma descarga filamentar para um modo de descarga difuso, pode acontecer quando a descarga DBD funciona por alguns segundos, sendo controlada pela frequência e largura de pulso de tensão. Existe a possibilidade de estabilizar DBD's em regime difuso, proporcionando condições especiais para o processo de geração do plasma como, o material dos eletrodos e/ou do dielétrico, distância entre eletrodos e a mistura de gás, que desempenham um papel importante na ignição do plasma DBD em regime difuso (KOSTOV,K.G., 2022 e Brito et al, 2022).

O regime difuso é obtido com maior facilidade em gases como hélio, neônio e nitrogênio ou mistura de gases inertes com oxigênio molecular, nitrogênio, dentre outros (FALAHAT et al., 2018). Sendo um importante regime para o processo à pressão atmosférica, quando se deseja uniformidade das modificações geradas pelo plasma sobre os materiais. Contudo, se no ambiente da descarga houver concentração de impurezas ou instabilidade dos parâmetros de operação, poderá levar a descarga ao regime filamentar que em determinadas aplicações não é adequada (NASCIMENTO NETO, 2013 e ZHANG, B. et al., 2019).

A diferença visual entre os dois regimes está presente na Figura 4, em que o regime difuso está presente em (a), em (b) onde os filamentos da descarga são bem espaçadas e aparentes, justificando a alta densidade de corrente (KOSTOV,K.G., 2022).

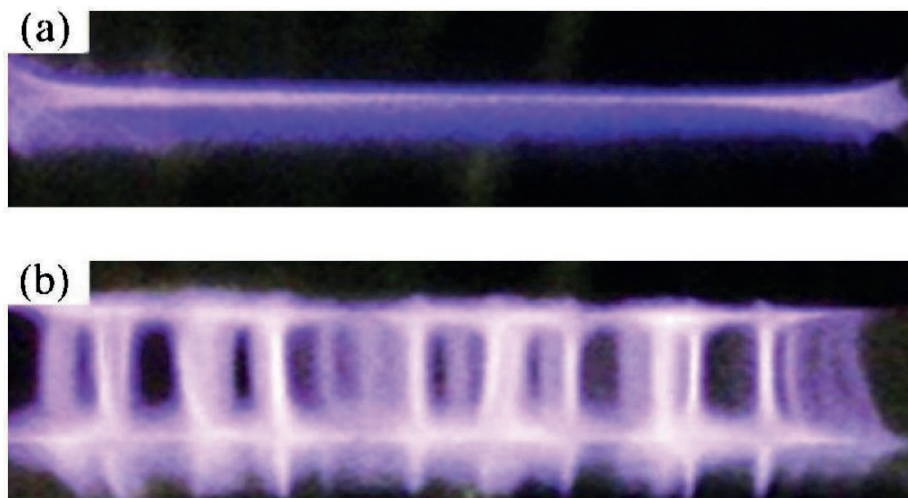


Figura 4 - Imagens de duas descargas típicas: (a) DBD difuso e (b) DBD filamentar (Liu et al., 2014).

Em resumo, os jatos de plasma DBD apresentam várias vantagens. Em primeiro lugar, devido à baixa potência entregue ao plasma, a temperatura do jato permanece próxima a do ambiente. Em segundo lugar, devido à utilização do dielétrico reduz-se a formação de arcos. Também, apresenta uma grande densidade de espécies quimicamente ativas (por exemplo, OH e oxigênio atômico) que são oxidantes e dessa forma, muito eficiente para a inativação bacteriana. Essas condições são muito importantes para aplicações na área biomédica, incluindo a produção de ozônio, tratamento de gases poluentes e resíduos tóxicos, excitação de lasers de CO₂, esterilização de materiais, deposição de filmes finos e modificação de superfícies (KOSTOV,K.G., 2022).

Aplicações do plasma (DBD)

Lâmpadas fluorescentes

A descarga DBD quando operada em gases nobres ou misturas de gases nobres com halogênios, emite intensa radiação ultravioleta, UV. Portanto, essa descarga é uma fonte eficiente e barata de luz UV. Nas lâmpadas fluorescentes, o espectro emitido pelos gases é convertido pelo revestimento dos tubos que os contêm em um espectro predominantemente de luz visível. Assim, as lâmpadas fluorescentes são bastante eficientes e econômicas, se comparadas com lâmpadas incandescentes (KOSTOV,K.G., 2022).

Tratamento do solo e agricultura

Pesquisas demonstraram que o tratamento em sementes com plasma DBD, utilizando gases de trabalho como Argônio (Ar) e Nitrogênio (N), produzem resultados significativos na taxa de germinação, provocando um acréscimo de 10-20%, e também no desenvolvimento da planta (JI et al., 2016; SOUZA).

Também, o plasma DBD atmosférico vem se apresentando como uma técnica promissora no campo da agricultura, pois apresenta uma alta taxa de formação de ozônio O₃ e radicais OH, que promovem a desacidificação do solo, ou seja, a degradação dos compostos ácidos que contaminam o solo (KOSTOV, K.G., 2022).

Esterilização

A esterilização tem como alvo bactérias, vírus e fungos e pode ser alcançada por calor, produtos químicos, irradiação e filtração. As autoclaves são amplamente utilizadas para esterilizar instrumentos médicos e biológicos, e usam vapor aquecido sob alta pressão (normalmente 121 °C a 100 kPa). O gás óxido de etileno é um método químico comum de esterilização, mas também é tóxico para os seres humanos e, portanto, os níveis residuais de óxido de etileno devem ser os mais baixos possíveis (TANAKA et al., 2017).

Assim, pesquisadores desenvolveram a esterilização a plasma, que consiste em expor os materiais contendo microrganismos ao gás ionizado e/ou excitado, onde, nele contém espécies reativas geradas que podem promover a completa eliminação de microrganismos, presentes em um determinado material em poucos minutos de tratamento, oferecendo vantagens em relação a outras já utilizadas, pois mostra-se mais eficientes quanto à redução da carga microbiana, além de se desenvolver em temperaturas próximas à temperatura ambiente, podendo realizar a esterilização de materiais termossensíveis, e não utilizar gases tóxicos (Sakudo A, Yagyu Y, Onodera T, 2019).

Tratamento de tecidos vivos

O uso de DBD em tecidos vivos como, por exemplo, a pele humana, também é possível devido à baixa temperatura do plasma que permite tratamento de agentes patogênicos diretamente sobre a pele, atuando também como agente antiinflamatório e anti coceira, o contato da pele com o plasma promove o processo de cicatrização de feridas, pois o mesmo age na limpeza, removendo o tecido necrosado e matando os organismos responsáveis pelos processos inflamatórios (NUNES; GUERRA, 2018 e MEYER, P. F. et al., 2024).

Também, o plasma atmosférico acelera a coagulação sanguínea servindo para agir em situações que incluem o pós-cirúrgico, pós-incisão dermatológica e procedimentos terapêuticos que envolvam sangramento (NUNES; GUERRA, 2018 e MEYER, P. F. et al., 2024).

Odontologia

A preparação ou reparação de cavidades dentárias antes do enchimento é feita pela remoção de tecido necrótico, infectado e desmineralizado por meio de perfuração mecânica, técnicas a laser ou tratamento com ozônio. Durante a perfuração mecânica e o tratamento a laser, o aquecimento ocorre e a maior parte do tempo é útil. Mas, as vibrações são induzidas e, por isso, causam sensação de dor no paciente. Além disso, esses métodos são muitas vezes destrutivos: um excesso de tecido saudável deve ser removido para garantir que a cavidade esteja livre de bactérias. Com isso, a estrutura dentária restante é enfraquecida e propensa a fraturas. O acúmulo de tais problemas, além de gerar dor no paciente, pode aquecer a polpa do dente, matando-o, com isso faz-se necessário a remoção do mesmo. Um método alternativo indolor e não destrutivo é o tratamento com ozônio. O ozônio é um oxidante poderoso, que é usado como desinfetante na indústria de alimentos, remédios e tratamento de água (KOSTOV,K.G., 2022).

Outra abordagem indolor e que poupa tecidos, que difere da terapia com ozônio, é o uso do plasma atmosférico frio. O princípio do tratamento com plasma é a inativação de bactérias em biofilmes dentários de uma maneira sem contato. A vantagem do tratamento com plasma é que ele permite que estruturas irregulares e canais estreitos dentro do dente doente sejam limpos. O tratamento é superficial e não destrutivo; não causa remoção de material a granel. Em contraste com os lasers, os plasmas podem acessar pequenas cavidades irregulares e espaços de fissura, por apresentar-se a temperatura ambiente, o mesmo não aquece a polpa do dente. A aplicação de plasmas não térmicos no tratamento da cárie é um problema de pesquisa multidisciplinar desafiador, que requer conhecimentos tanto da física/química de plasma quanto da odontologia. Por ser não destrutivo para tecidos humanos, pode ser aplicado in vivo. Devido sua temperatura ambiente o plasma não causa aquecimento significativo da polpa dentária e possui uma boa capacidade para matar bactérias.(LATA, S. et al., 2022).

Parâmetros do plasma

Em plasmas DBDs foi demonstrado que a geração de plasmas difusos ou uniformes é possível com o controle de parâmetros operacionais específicos, como geometria do reator, gás de alimentação (gases nobres, diatômicos ou no ar), material dielétrico e controle da tensão e frequência de excitação. A Tabela 1 mostra os típicos valores dos parâmetros do plasma (KOSTOV,K.G., 2022).

Tensão	5 - 100 Kv
Frequência	50 Hz – 1 MHz
Densidade de elétrons	10_{14} cm_{-3}
Temperatura eletrônica	1 – 10 eV
Grau de ionização	10_{-1}
Pressão	1 bar

Tabela 1 – Parâmetros típicos de uma Descarga em Barreira Dielétrica.

Fonte: (SOUZA, 2018; WANG; ZHANG; WANG, 2012).

Assim, os DBDs podem ter geometria cilíndrica ou plana e configurações que podem variar as suas descargas de grande área a uma única micro descarga. Dependendo da configuração do jato e da excitação elétrica, diferentes características das descargas podem ser obtidas. Eles geralmente são fornecidos por alta tensão (High Voltage - HV), com corrente alternada (Alternating Current - AC), normalmente sinusoidal. Com algumas exceções, eles são executados no modo filamentar, isto é, um feixe de micro descargas que preenchem, mais ou menos, uniformemente o volume de descarga em um modo não repetitivo. As micro descargas individuais podem durar algumas dezenas de nanossegundos e ter uma espessura da ordem de $100 \mu\text{m}$ à pressão atmosférica. O diâmetro do tubo de fluxo/bico é frequentemente de 1 a 4 mm (DI LECCE, 2014; XIONG et al., 2013 e KOSTOV,K.G., 2022).

Fonte

O processo de ionização do gás acontece normalmente na presença de uma fonte de alta tensão, que produz energia suficiente para vencer a rigidez dielétrica do meio e provocar uma descarga elétrica capaz de arrancar, adicionar ou excitar elétrons, provocando sucessivas colisões gerando fótons (luz). Esse método segue a lei de Paschen (NUNES; GUERRA, 2018).

De acordo com essa lei, a tensão de ruptura elétrica de um gás, a temperatura constante, entre dois eletrodos é função do produto da pressão com a distância entre os eletrodos, dependendo do tipo de gás. Sendo descrita pela seguinte equação matemática:

(1)

Onde, A e B são constantes que dependem do gás, p é o valor da pressão, d a distância entre os eletrodos e γ o coeficiente de emissão de elétrons secundários. Na Figura 5 estão mostradas as curvas correspondentes à lei de Paschen em alguns gases estáticos. Em que, a tensão mínima necessária para que haja uma descarga diminui com o aumento do produto da pressão com a distância entre eletrodos (pd) até um valor mínimo,

designado por mínimo de Paschen (RASTEIRO, 2016).

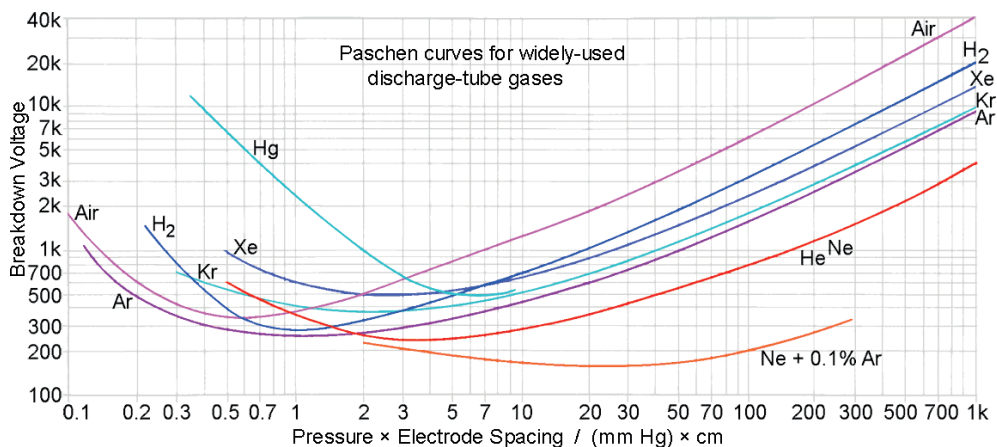


Figura 5 - Curvas de Paschen para diversos gases (RASTEIRO, 2016).

Logo, a diferença de potencial possui um efeito significativo na formação dos jatos de plasma. Comumente, as faixas de frequência de alimentação de fontes de tensão são divididas em faixas de baixa/alta frequência, radiofrequência e micro-onda, com isso, pode-se ser controlado desde o comprimento, intensidade até a temperatura dos jatos (NASCIMENTO NETO, 2013 e KOSTOV, K.G., 2022).

Em função da necessidade no campo da odontologia, de gerar e aplicar plasma com controle da elevação de temperatura das amostras, desenvolveu-se no Laboratório de Inovação Tecnológica em Saúde (LAIS), uma fonte de alta tensão e alta frequência com uma finalidade especialmente desenhada para este fim - trata-se de um modulador de duração de pulso.

Este modulador é um circuito eletrônico que chaveia o gerador de alta tensão e alta frequência o qual é utilizado para gerar o plasma. O sinal de tensão alternada gerado pela fonte, tem formato periódico com energia média por ciclo igual à zero, ou seja, é um sinal, aproximadamente, quadrado simétrico, em relação a zero, com amplitude ajustável entre 0 e 12 kV pico a pico (GUERRA NETO et al., 2024).

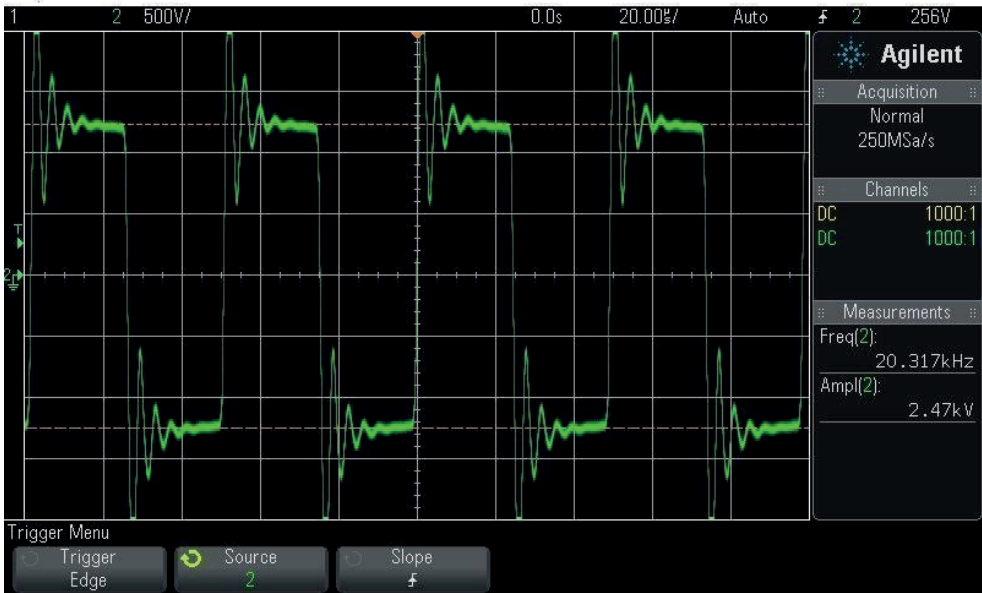


Figura 6 – Forma de onda gerada quando o controle de energia é ajustado para 100%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Se o controle de energia da fonte é ajustado para 100% o sinal alternado gerado por ela tem o formato “quadrado”, da Figura 6, ao longo do tempo (as pequenas oscilações de flanco são ocasionadas pela ressonância, causada pela indutância e capacitância distribuídas no circuito de alta tensão da fonte). Se observarmos este mesmo sinal, com um tempo de varredura maior selecionado em um osciloscópio observamos a imagem da Figura 7.

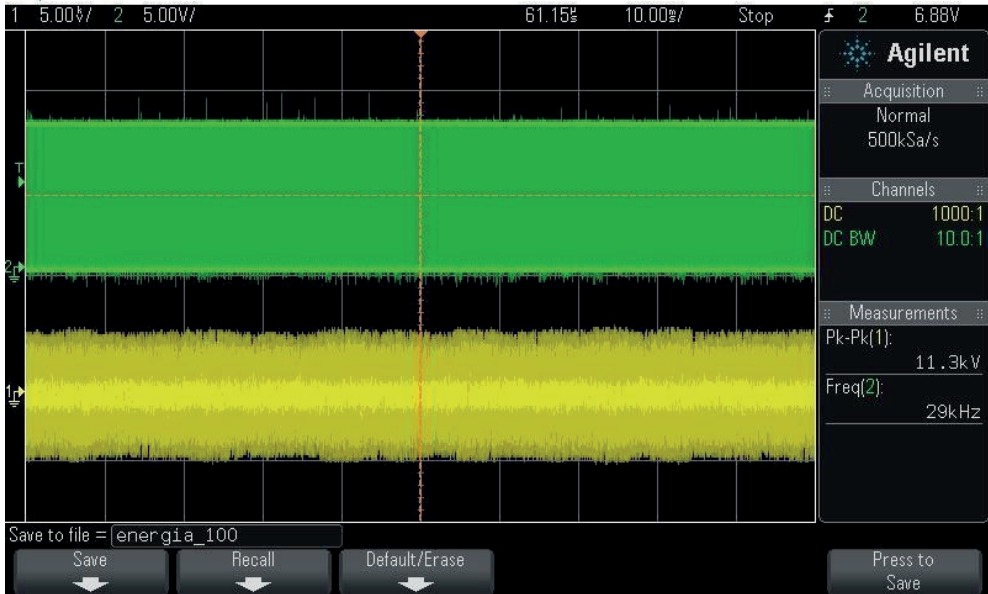


Figura 7 – Sinal observado no osciloscópio com um tempo de varredura muito maior que o período do sinal alternado gerado e com o controle de energia ajustado para 100% (em amarelo a tensão e em verde a corrente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como foi antes comentado, esse sinal precisa ter sua amplitude ajustada (alterando o campo elétrico dentro da caneta geradora de plasma) acima do mínimo de Paschen, abaixo do qual cessa a passagem de corrente elétrica e por conseguinte a ionização do gás e geração de plasma.

Espécies químicas reativas do plasma e suas funções

A ação do plasma produz espécies reativas como, moléculas contendo oxigênio reativo e nitrogênio, incluindo óxido nítrico (NO), superóxido (O₂⁻), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), oxigênio (O₂), o ozônio (O₃) íons de hélio (He), argônio (Ar) e até o radical hidroxila (OH) que são considerados os atores mais importantes no efeito biológico do plasma por meio da interação com a matéria viva. Supunha-se que a maioria dos processos bioquímicos importantes eram completamente dominados por grandes moléculas como proteínas, carboidratos e lipídios. No entanto, descobriu-se que espécies reativas, atuam como parte do complexo sistema de comunicação celular na biologia aeróbica (LU et al., 2016; NERETTI et al., 2018).

Assim, espécies reativas são importantes nas várias aplicações do plasma DBD. Muitos pesquisadores mediram os processos de densidade, distribuição espacial, tempo

de vida e produção e perda de espécies reativas no plasma por meio de várias técnicas. Vale destacar a EEO, que fornece o espectro do plasma contendo suas espécies químicas e as respectivas intensidades.

Espectroscopia de Emissão Óptica

A EEO é frequentemente utilizada para diagnosticar o plasma sob pressão atmosférica, pois é uma técnica altamente sensível, não invasiva e simples. Um espectro óptico emitido pelo plasma fornece importantes informações das espécies existentes no jato como, as espécies atômicas, moleculares e íons formados, identificando uma quantidade relativa representada pela intensidade luminescente associada às mesmas (ABDEL-FATTAH et al., 2017; SOUZA, 2018).

Essa técnica baseia-se essencialmente na análise da luz emitida por diferentes espécies, como átomos neutros ou ionizados, radicais ou moléculas do meio de descarga de plasma. Além disso, a EEO é usada para a caracterização das espécies excitadas, a determinação do fluxo de fótons em função do comprimento de onda e como diagnóstico do feixe de partículas carregadas (FALAHAT et al., 2018).

Uma das vantagens da EEO, é que as concentrações de várias partículas excitadas podem ser obtidas a partir da irradiância absoluta detectada, se as linhas de emissão correspondentes forem opticamente finas. De acordo com o princípio da EEO, a intensidade de emissão é proporcional à densidade dos estados excitados. Uma linha espectral pode ser representada como funções da intensidade (I), comprimento de onda (λ) e densidade de espécies do nível superior (N) (ROY; TALUKDER; CHOWDHURY, 2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dessa análise, foi preciso seguir as etapas de busca de artigos para a realização da revisão bibliográfica, experimentos para obtenção de dados e análise das espécies reativas e resultados obtidos.

Assim, para o desenvolvimento deste trabalho, foram usadas as seguintes bases de pesquisa, US National Library of Medicine National Institutes of Health (PubMed), Scientific Electronic Library Online (SciELO), SCOPUS, National Center for Biotechnology Information (NCBI), Portal Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Portal Periódicos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) foram pesquisadas no período de julho a setembro de 2019. Utilizando as seguintes palavras-chave “plasma technology” ou “plasma in dentistry” e “plasma emission spectra” e “optical emission spectroscopy” e “discharge by dielectric barrier” em combinação com “biomedical applications”.

Aplicou-se os seguintes parâmetros de inclusão para a busca e seleção dos estudos: artigos científicos publicados em periódicos entre 2000 e 2019, disponíveis no idioma inglês/

português e que atendessem a pelo menos duas palavras-chave “plasma technology” ou “plasma emission spectra”. Foram excluídos do estudo textos não disponíveis na íntegra.

Ademais, após pesquisar o tema nas bibliotecas digitais para busca de artigos, utilizou-se algumas sugestões automáticas das bases eletrônicas que não estavam, inicialmente, diretamente ligadas à palavra-chave, a fim de incluir artigos correlacionados ao tema da pesquisa.

Posteriormente, para a seleção das publicações, realizou-se a leitura do resumo, da introdução e da conclusão de cada artigo encontrado no intuito de verificar a sua correspondência com as palavras-chave. Foram selecionados 123 artigos, dos quais 85 atenderam aos requisitos de busca.

Para o presente estudo, foi utilizado um equipamento gerador de plasma com flexibilidade suficiente para atender a várias demandas de pesquisa do LAIS da UFRN utilizando jato de plasma DBD.

Com o propósito de entender o comportamento do plasma na odontologia e analisar as temperaturas das amostras e espécies químicas reativas presentes no plasma DBD, sob pressão atmosférica, variando os parâmetros de voltagem, frequência e energia, foi utilizada uma fonte de alta tensão e alta frequência com um modulador de duração de pulso, em que é permitido variar a voltagem aplicada de 0 a 12 KV (pico a pico), frequência de 26,3 a 45 kHz e energia de 0 a 100%. Onde, a mesma é conectada ao reator de plasma que oferece a possibilidade de obtenção de plasma com qualquer gás de trabalho.

Assim, foram escolhidos He e Ar como gases de trabalho, que são introduzidos na parte traseira do reator por meio de um controlador de fluxo de massa com um limite máximo de 15 litros padrão por minuto (L/min) fluindo através de um circuito. A Figura 8 mostra a representação esquemática de toda a configuração experimental com a vista típica do jato de plasma projetado, recipiente de gás e espectrômetro.

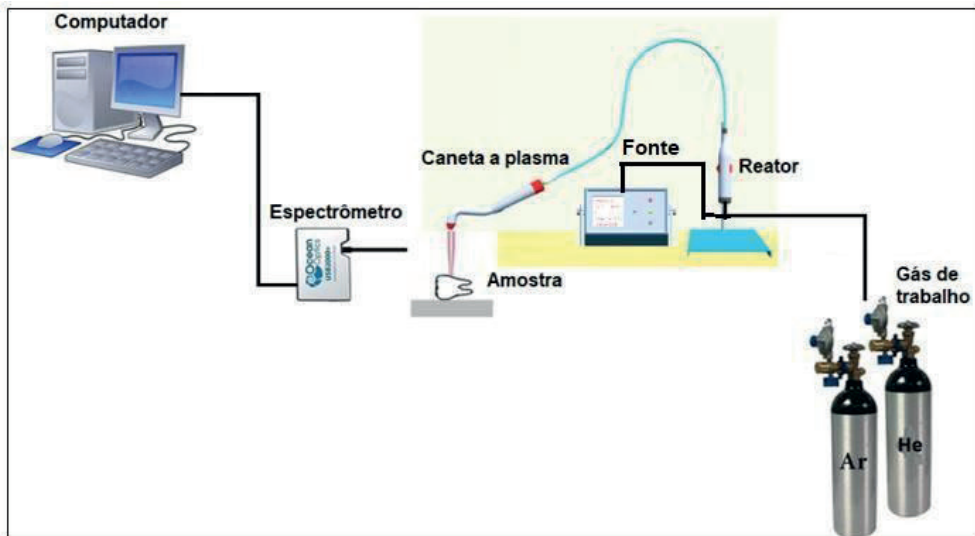


Figura 8 – Representação esquemática da configuração do experimento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando o fluxo de hélio/argônio está passando pelo reator, onde estão presentes os eletrodos, sendo um deles revestido com material dielétrico, característica essencial do sistema DBD, uma onda de ionização direcionada ao cátodo é gerada, onde o jato de plasma é direcionado a saída da caneta, convencionalmente denominada de caneta Split, pois a formação do plasma não ocorre na mesma, mas em um reator separado, e se torna uma pluma visível do jato de plasma.

Para a identificação e rotulagem das espécies emissoras atômicas e moleculares foram realizadas medições a partir de emissão óptica emitida pelo jato de plasma, em que foi coletada perpendicularmente ao jato por uma lente (distância focal: 20 mm), através de uma fibra óptica, na fenda de entrada do espectrômetro modelo Ocean-Optics FLAME-S-UV-VIS-ES, que possui uma resolução óptica de 0,1 a 10 nm (FWHM); isso foi alcançado usando um computador do LAIS, equipado com o software apropriado (Ocean view), tanto para direção quanto para aquisição. Todas as medições foram realizadas no ponto 5 mm abaixo do orifício do jato de plasma.

A coleta do espectrômetro (Figura 9) ocorre quando a luz proveniente do plasma percorre uma via até ser convertida em dados computacionais, na forma de gráfico. Onde, a luz emitida pelo jato de plasma entra no espectrômetro por meio do conector de fibra óptica. Em seguida, o espelho 1 reflete essa luz para o colimador, que separa os comprimentos de onda presente na luz emitida, logo após, o espectro formado é enviado para o espelho 2, que reflete o mesmo para o detector. O detector, por sua vez, converte os dados óticos em dados computacionais que são lidos pelo software Spectra Suite (SOUZA, 2013).

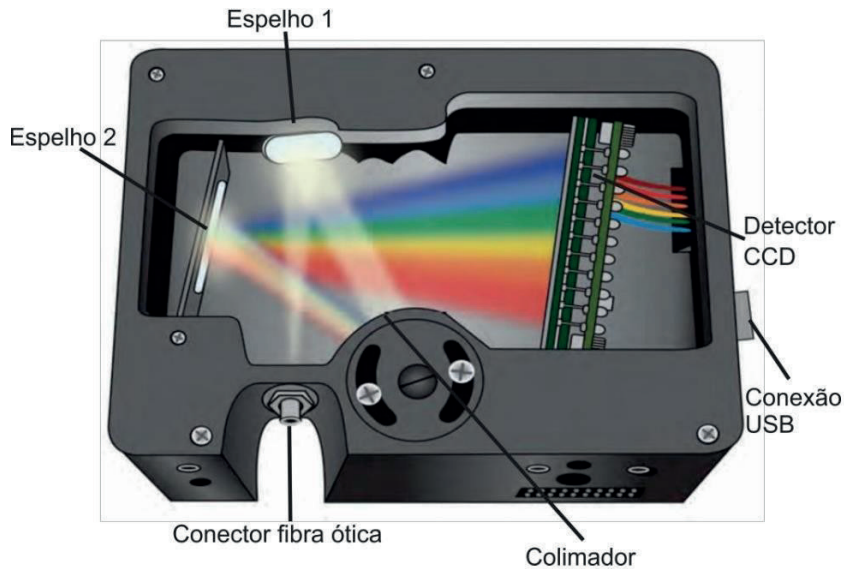


Figura 9 - O caminho óptico que a luz proveniente do plasma percorre (SOUZA, 2013).

As respostas espectrais das etapas de variação dos parâmetros envolvidos nesta pesquisa foram verificadas em tempo real durante o processo de geração do plasma. Para que isso fosse possível todos os ensaios no reator DBD foram realizados com o mínimo de luz ambiente, visto que as emissões eletromagnéticas desse tipo de plasma na faixa do visível são muito baixas dificultando a captura de imagens com luz ambiente. Por isso todas as luzes da sala onde os processos foram realizados eram sempre apagadas durante as aquisições de dados, para não causar erros na aquisição de EEO.

Neste trabalho foram realizados trinta e cinco ensaios, selecionando os resultados mais críticos para a odontologia, sendo estes com dente feito de resina e uma esponja de poliuretano umedecida, simulando a gengiva, buscando aproximar-se de uma situação real da odontologia. A esponja úmida foi tratada em regime filamentar e difusa, enquanto que o dente, somente em regime difuso.

Os tratamentos consistiram em submeter a superfície das amostras a uma atmosfera de plasma gerados no reator, onde o gás de trabalho era hélio ou argônio. Em que, o sistema DBD foi submetido a diferentes tensões, frequências e energias e para análise das suas respectivas espécies reativas e controle de temperaturas das amostras.

Vale salientar, que a distância entre caneta a plasma e as amostras foram fixadas em 5 mm, assim como a distância focal do espectrômetro com 20 mm, com uso de limitadores produzidos em software apropriado e impressos na impressora 3D do LAIS, evitando erros de saturação na aquisição de dados.

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 energias, verificando as espécies reativas presentes no mesmo e analisando as temperaturas das amostras. A seguir, na Tabela 2 são apresentados os valores experimentais das variações de cada um dos parâmetros estudados.

	Tensão (kV)	Frequência (kHz)	Energia (%)	Umidade do ambiente (%)	Fluxo(L/min)	Temperatura da amostra (°C)
He	4,9 – 12,0	26,3 – 41,7	1 - 90	30,0 – 50,0	0,5 – 2,0	19,3 – 36,4
Ar	4,7 – 12,0	26,3 – 35,7	1 - 80	30,0 – 52,0	0,5 – 2,0	20,6 – 56,6

Tabela 2 – Valores experimentais das variações de parâmetros com os gases de trabalho, He e Ar.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante mencionar que, aplicando os parâmetros, ocorre a quebra da rigidez dielétrica do gás, conseqüentemente, uma grande variedade de radicais livres, moléculas, átomos, elétrons com grande energia e radiação ultravioleta, são produzidas no meio da descarga do jato de plasma DBD. O estado ionizado nos átomos e moléculas de gás acumulam-se até atingir valores significativos, e as espécies de plasma começam a irradiar em diferentes comprimentos de onda (FALAHAT et al., 2018).

Esses elementos quando interagem com a superfície dos materiais produzem diferentes efeitos biológicos, dependendo do tipo de radicais produzidos no jato (LEE et al., 2016). Além de causar mudanças nas superfícies tratadas gerando rugosidade. E, devido à formação de grupos funcionais compostos de oxigênio e nitrogênio na superfície, pode-se produzir uma superfície esterilizada, ou seja, isenta de bactérias e resistente ao surgimento das mesmas. Para reconhecer as espécies de descarga, são utilizados os espectros obtidos da técnica EEO para o jato de plasma de diferentes gases na pressão atmosférica, dando destaque aos resultados das pesquisas com He e Ar, que foram utilizados no presente trabalho, também, a base NIST Atomic Spectra Database Lines Form, foi de grande importância no reconhecimento de algumas das espécies reativas. O espectro luminoso para o sistema DBD obtido por EEO esperado é um gráfico semelhante ao do Gráfico 1, onde o gás de trabalho é o hélio e o argônio, respectivamente (NASCIMENTO NETO, 2015 e KOSTOV, K.G., 2022).

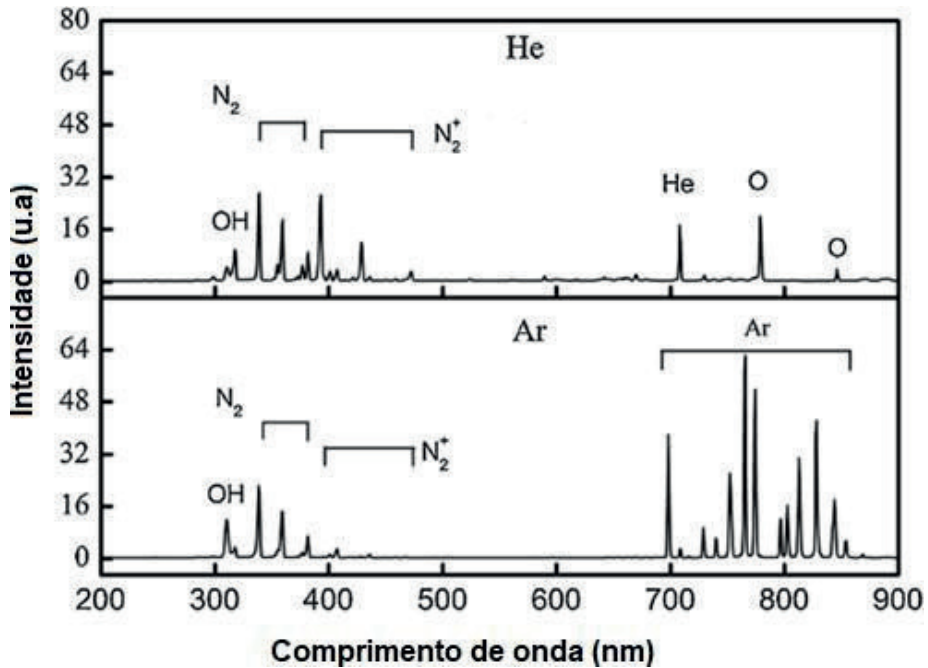


Gráfico 1 - Espectro característico de um plasma DBD onde o gás de trabalho é o hélio e o argônio, respectivamente, adaptada de (WANG et al., 2016).

Nos experimentos foram utilizados dentes de resina e uma esponja de poliuretano umedecida, simulando a gengiva humana, pois a mesma possui poros que se aproximam do tecido fibroso coberto por mucosa da gengiva. Os tratamentos foram feitos em regimes tanto difuso, quanto filментар, mas no dente de resina, por possuir uma maior resistência dielétrica, foi impossibilitado de obter-se um regime filментар.

Quando usados como gás de trabalho de um jato de plasma, gases nobres (principalmente He ou Ar) apresentam estados metaestáveis com a energia de excitação relativamente alta. É por isso que essas espécies podem desempenhar um papel importante nos processos químicos do plasma ou mesmo nos processos de ionização.

Os resultados práticos coincidiram com a literatura, que são apresentados nos Gráficos 2 e 3, em que mostra a EEO apresentada por um jato de plasma com He e Ar, respectivamente, usando os parâmetros críticos para o controle de temperatura em amostras de dente de resina, objetivando o uso na odontologia. Nestes casos, as formas das distribuições de intensidade investigadas ao longo do eixo x (comprimento de onda (λ (nm))).

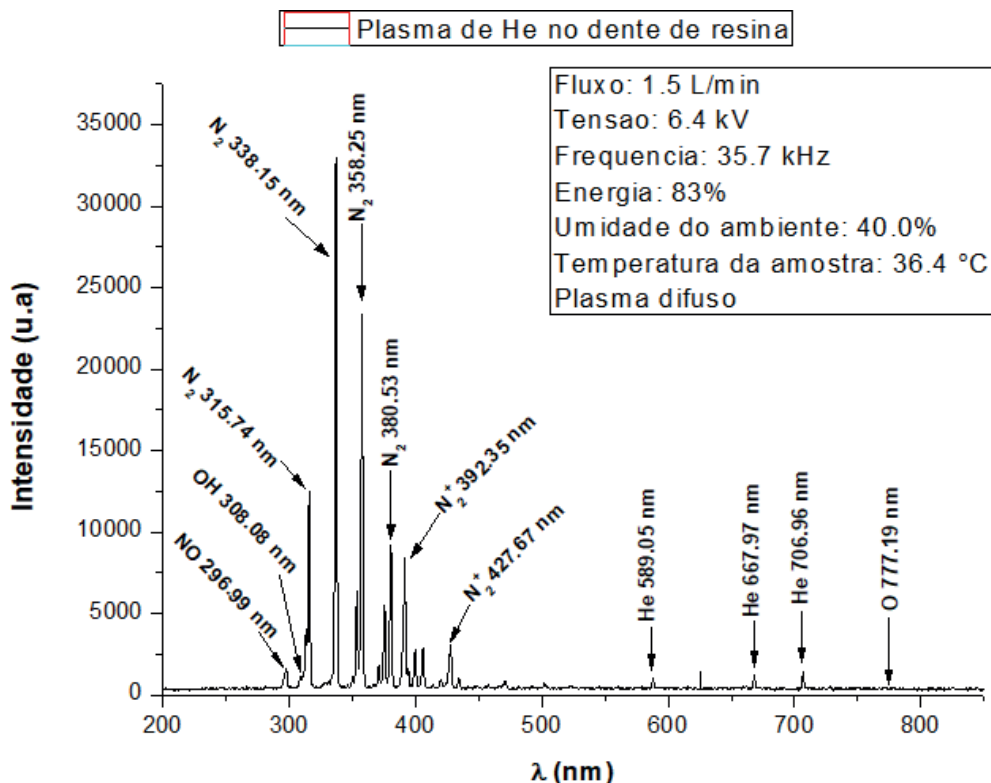


Gráfico 2 – EEO obtida de um jato de plasma de He com parâmetros controlados, aplicado em dente de resina.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Gráfico 2, apresenta os parâmetros em que foi obtida a maior temperatura no dente de resina, sendo estes parâmetros não recomendáveis para aplicação na gengiva. Pois o dente possui uma rigidez dielétrica maior que a esponja de poliuretano, o que ocasionaria uma possível queima da mesma.

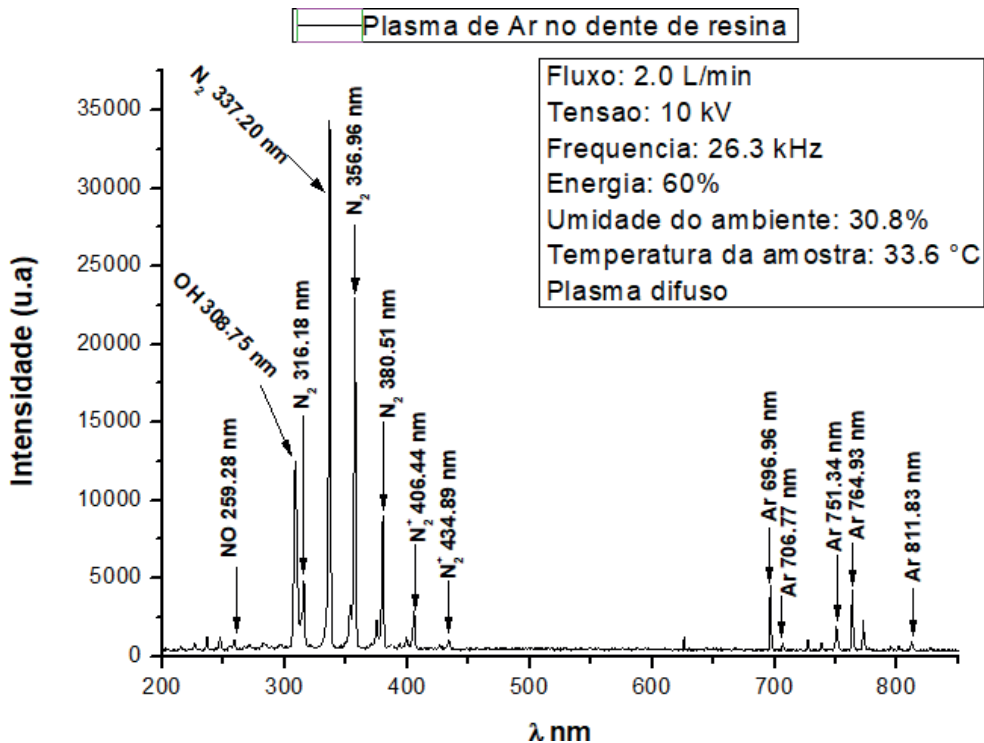


Gráfico 3 – EEO obtida de um jato de plasma de Ar com parâmetros controlados, aplicado em dente de resina.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os gases de He e Ar exibem um comportamento de descarga bastante diferente. É mais fácil para os átomos de He nos estados metaestáveis de alta energia ionizar moléculas de N₂ para gerar íons N₂⁺ na interface He/ar (BRUNO, F. et al., 2024). Esse comportamento é comprovado nos gráficos apresentados, onde os íons de N₂⁺ na EEO do He mostram-se em uma faixa de comprimento de onda (392.35 nm à 470 nm), maior que na EEO do Ar (400 nm à 434.89 nm).

Em ambas espectroscopias, foram observadas o aparecimento de apenas um radical OH, que é altamente reativo e pode danificar praticamente muitos tipos de macromoléculas, como lipídios e aminoácidos nas proteínas (LEE et al., 2011). Isso se dá devido ao fluxo de gás que afeta a concentração de OH devido à umidade do ar ambiente, que afeta a distribuição de H₂O e, portanto, a distribuição de OH do dispositivo de jato de plasma (LU et al., 2016).

Para a odontologia, o surgimento de radicais OH é importante, pois com o aumento da intensidade dos mesmos, juntamente com radicais O (presente apenas no plasma de He), aumentam a taxa de inativação da bactéria *Streptococcus mutans* que é uma das principais causas da cárie. Também, a intensidade de OH pode ser um indicador do efeito de clareamento dental (ŠANTAK et al., 2015 e KOSTOV, K.G., 2022).

Apesar de, apresentar-se em uma fraca faixa espectral de UV, nota-se também, em ambas as EEO, o aparecimento de óxido nítrico (NO), que juntamente com radicais OH à pressão atmosférica, contribuem significativamente para a descontaminação biológica e modificações na superfície de biomateriais (BUDA et al., 2015). Essa espécie reativa pode causar apoptose, necrose ou, alternativamente, proteger as células da morte, dependendo do tipo de célula, concentração de radicais, assim como a duração e áreas específicas da exposição (LU et al., 2016).

Moléculas de nitrogênio em estados metaestáveis (N₂) desempenham um papel importante na cinética de descarga de gás. Essas espécies têm vida útil radiativa longa (aproximadamente 2 s) e alta energia de excitação (6,2 eV) e podem induzir várias reações no pós-brilho da descarga (LU et al., 2016). Atualmente, não há relatos sobre a medição da densidade absoluta de N₂ em jatos de plasma DBD à pressão atmosférica na literatura. Apesar dos mesmos agirem como agentes esterilizadores, eliminando microorganismos, melhorando as propriedades superficiais.

Apesar de, os gráficos não apresentarem a presença de ozônio (O₃), o mesmo está presente, sendo em uma faixa espectral de UV baixa, não sendo detectado pelo espectrômetro.

Na odontologia, a cicatrização dos tecidos moles gengivais desempenha um papel importante nos resultados estéticos e de saúde após a cirurgia gengival. A cirurgia gengival tem sido amplamente utilizada para melhorar a forma e a cor, bem como para prevenir a inflamação dos dentes e implantes dentários (LEE et al., 2016 e MEYER, P. F. et al., 2024).

Assim como nas amostras de dentes de resina, os resultados dos espectros na esponja de poliuretano, simulando uma gengiva, são bastante semelhantes. O Gráfico 4 apresenta a EEO do jato de plasma de He na amostra.

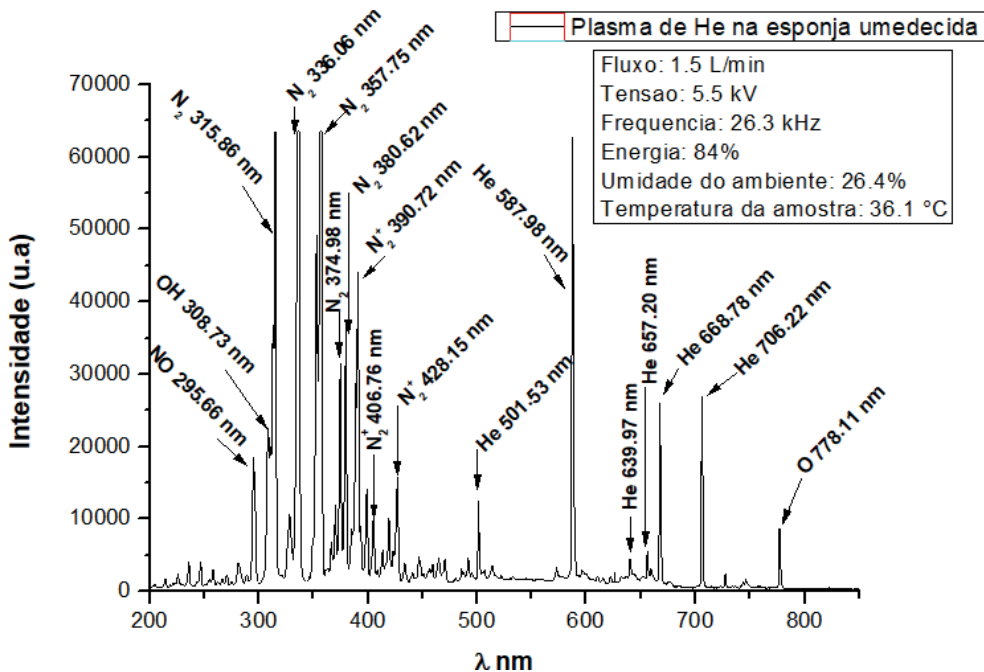


Gráfico 4 – EEO obtida de um jato de plasma filamental de He com parâmetros controlados, aplicado em amostra simulando gengiva humana.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O EEO indica que o jato de plasma filamentososo contém muitas espécies reativas típicas (NO, N₂, N₂⁺, OH) e linhas atômicas (He, O) observadas em jatos de plasma DBD's alimentados com hélio. Nos comprimentos de onda, de aproximadamente, 315 nm à 500 nm, o espectro é dominado pela emissão de espécies de nitrogênio excitadas: N₂ e N₂⁺.

Por dissociação de moléculas de H₂O que estão presentes no ar circundante fornece evidências para a produção de radical OH altamente reativo no jato. Entre 501 nm e 750 nm, várias linhas de hélio são observadas, mas sua intensidade, se comparada com espécies radioativas de nitrogênio molecular, é relativamente fraca.

Alguns dos picos aparecem na região de UV de 200 nm a 295.66 nm. Esses picos indicam a existência de espécies reativas de nitrogênio (reactive nitrogen species – RNS). Outra espécie altamente reativa, o oxigênio atômico, cuja linha a 778.11 nm é observada, é produzida após a dissociação de O₂ no plasma (KOSTOV, K.G., 2022 e GUERRA NETO et al., 2024).

Ao compararmos o Gráfico 2 com o Gráfico 4, observa-se que a descarga DBD em regime filamental (Gráfico 4) possui uma gama de variedades de radicais livres, moléculas, átomos, elétrons com grande energia e radiação ultravioleta maior, se comparado com o regime difuso (Gráfico 2).

Nesse estudo, as espécies observadas através da técnica de EEO condizem com resultados de estudos de plasma DBD de He e Ar (ABDEL-FATTAH et al., 2017; LI et al., 2019; LIN et al., 2019; NERETTI et al., 2018; WANG et al., 2016), o que corrobora com a confiabilidade dos resultados.

Observa-se que a aplicação de plasma sobre uma amostra provoca na mesma seu aquecimento por duas fontes simultâneas: o aquecimento pelo contato com gases aquecidos (calor conduzido do gás à amostra) e o aquecimento provocado pela passagem de corrente elétrica através da amostra (efeito Joule). O aquecimento por efeito Joule, também conhecido como aquecimento ôhmico e aquecimento resistivo, é o processo pelo qual a passagem de uma corrente elétrica, através de um condutor imperfeito produz calor. A primeira lei de Joule, também conhecida como lei de Joule-Lenz, afirma que a potência de aquecimento gerada por um condutor elétrico é proporcional ao produto de sua resistência e ao quadrado da corrente elétrica circulante. Ambas as fontes de calor podem ser manipuladas e controladas: o gás ionizado pode sofrer esta ionização pela aplicação de pequenas quantidades de energia e o efeito joule pode ser reduzido pela aplicação e pequenas quantidades de corrente elétrica, ou seja, pela passagem de um reduzido número de cargas elétricas através da amostra.

Não se pode, todavia, reduzir a tensão aplicada (e por conseguinte o campo elétrico aplicado) ao gás a ser ionizado abaixo de um determinado valor, o mínimo de Paschen, que define qual é a tensão mínima necessária para que uma descarga elétrica possa ocorrer em uma dada pressão de um gás estático. Isto impede que a elevação de temperatura causada por efeito joule e por condução de calor possa ser reduzida abaixo de um determinado valor.

A solução encontrada para permitir valores de campo elétrico acima do mínimo necessário para a formação de plasma e ao mesmo tempo controlando a elevação de temperatura foi “picotar” de forma variável esta tensão de saída da fonte de tensão.

Em outras palavras, desliga-se a fonte durante um breve intervalo de tempo (bem maior que o período do sinal alternado gerado), e liga-se a mesma depois disso. Este período desligado/ligado é variável, o que faz com que a quantidade de energia gerada seja controlada em forma de “pacotes” de energia, que ocorrem em taxas elevadas de frequência de comutação. Veja a Figura 10.

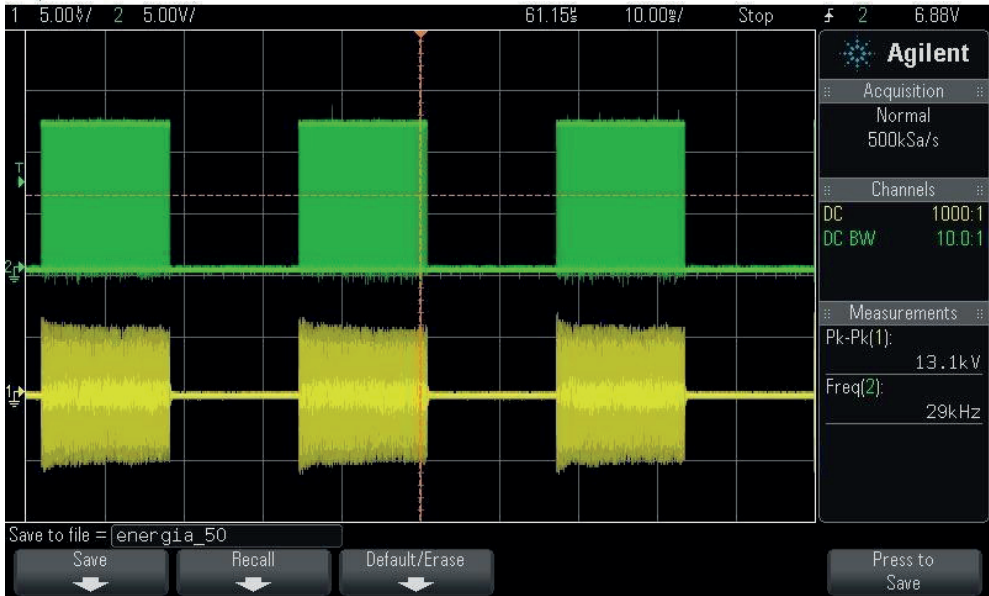


Figura 10– O sinal alternado da Figura 6 é agora ligado durante um período (definido pelo controle “Energia”) e depois desligado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Variando-se a relação de tempo ligado/desligado estaremos alterando a quantidade de energia transferida ao gás e à amostra, e conseqüentemente estaremos controlando o aquecimento da amostra. As figuras 11 e 12, apresentam imagens térmicas capturadas com uma câmera termográfica FLIR C3.

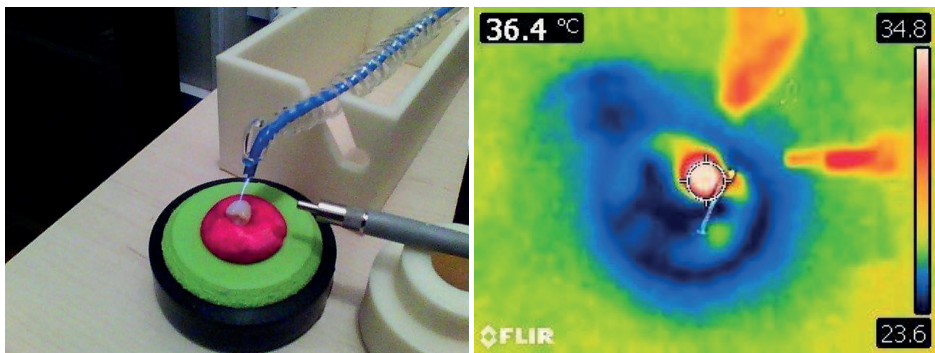


Figura 11 – Imagem térmica do plasma DBD difuso, aplicado na amostra de dente de resina com os seguintes parâmetros: fluxo de 1.5 L/min; tensão de 6.4 kV; frequência de 35.7 kHz; energia de 83% e umidade relativa do ambiente de 40.0%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

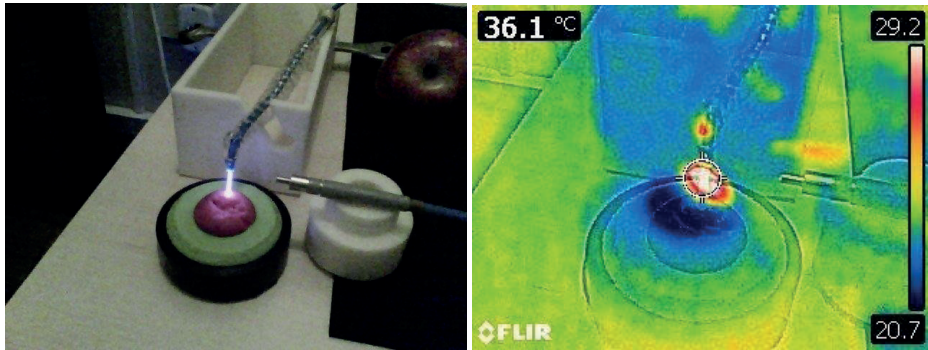


Figura 12 – Imagem térmica do plasma DBD filamental, aplicado na amostra que simula a gengiva humana com os seguintes parâmetros: fluxo de 1.5 L/min; tensão de 5.5 kV; frequência de 26.3 kHz; energia de 84% e umidade relativa do ambiente de 26.4%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que o tecido gengival é mais sensível, alerta-se para o fato que na prática, constatou-se que mesmo com valores próximos a este valor limite, a transferência de calor por condução e por efeito joule ainda aqueciam as amostras (dente de resina e esponja de poliuretano) acima de valores permitidos pela odontologia, de aproximadamente, 42 °C, para não necrosar os tecidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado no que foi exposto, é pertinente afirmar que a ANÁLISE DOS PARÂMETROS E IDENTIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES QUÍMICAS PRESENTES NOS JATOS DE PLASMA DBD mostrou-se eficaz quanto a identificação química de todas as espécies do processo.

- O emprego da tecnologia de plasma vem demonstrando resultados promissores na Odontologia. Seus efeitos benéficos podem ser relacionados aos parâmetros do plasma, em especial ao tempo de aplicação e o tipo de gás utilizado.
- O estudo das espécies reativas é muito importante para diversas áreas, em especial para odontologia, pois as espécies realizam modificações superficiais, aumentando a energia superficial, inativam bactérias, células indesejadas, com efeito esterilizante e finalmente podem facilitar a remoção de cáries pela quebra de pontes de hidrogênio.
- A espectroscopia de emissão óptica é um dos métodos fundamentais de investigação da composição e da cinética dos processos plasmáticos.
- Existem espécies químicas que surgem nos jatos de plasma a pressão atmosférica, independente do gás de trabalho, por exemplo, NO, N⁺, OH, O₃, dentre outros. Devido a voltagem, frequência, percentual de energia, distância do jato de plasma para o alvo, umidade relativa do ar ambiente, regime de plasma e interação de radicais com o ar atmosférico.

- A determinação de parâmetros do plasma, como temperatura do plasma e densidade relativa de espécies excitadas são chaves para melhorar a qualidade da técnica de processamento do plasma.
- Os parâmetros estudados nas amostras nesta pesquisa, servem como base para tratamentos em amostras na odontologia. O foco deste trabalho limitou-se a simulações para determinação de parâmetros do tecido gengival e dentes artificiais. Serão necessárias novas pesquisas, contemplando autorização do comitê de ética, para determinar os parâmetros reais aplicados à dentes humanos.
- Apesar dos resultados não terem sido obtidos da análise em dentes humanos, os fatores são significativos, pois o tecido gengival é o mais crítico em termos de sensibilidade, enquanto que os dentes artificiais em acrílico são os que representam menos sensibilidade às descargas filamentosas e variações de temperatura.
- O plasma odontológico não tem nenhum efeito danoso a dentes artificiais de resina acrílica.
- Uma conclusão importantíssima é que jamais os valores máximos dos parâmetros determinados nessa pesquisa para o tecido gengival devem ser ultrapassados sob pena de causar efeito eletrocautério e danos térmicos à gengiva antes mesmo de se conseguir remover a cárie.
- Para ultrapassar os valores de parâmetros supracitados sem queimar a gengiva do paciente, será necessário projetar um dispositivo para isolar o dente tratado.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-FATTAH, E. et al. Optical emission and surface characterization of stainless steel treated by pulsed microwave-atmospheric helium plasma jet. **European Physical Journal D**, v. 71, n. 7, 2017.
- BRUGGEMAN, P.; BRANDENBURG, R. Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: Physics, chemistry and diagnostics. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 46, n. 46, 2013.
- BUDA, I. G. et al. Pulsed atmospheric-pressure DBD plasma produced in small-diameter tubes. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 43, n. 2, p. 572–579, 2015.
- C., H.; C., B.; J., Z. Cold Atmospheric Plasma: Methods of production and application in dentistry and oncology. **Medical Gas Research**, v. 3, n. 1, p. 1–15, 2013.
- DILECCE, G. Optical spectroscopy diagnostics of discharges at atmospheric pressure. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 23, n. 1, 2014.
- FALAHAT, A. et al. Optical characteristics of a RF DBD plasma jet in various Ar / O₂ mixtures. **Pramana - Journal of Physics**, v. 90, n. 2, p. 1–11, 2018.
- FRIDMAN, G. et al. Applied plasma medicine. **Plasma Processes and Polymers**, v. 5, n. 6, p. 503–533, 2008.

GHERARDI, M.; TONINI, R.; COLOMBO, V. Plasma in Dentistry: Brief History and Current Status. **Trends in Biotechnology**, v. 36, n. 6, p. 583–585, 2018.

GRABOWSKI, L. **Pulsed corona in air for water treatment**. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006.

GUERRA, A. R. O. et al. CHARACTERIZATION OF PLASMA JET EQUIPMENT USED IN THE TREATMENT OF AESTHETIC AFFECTIONS. **International Journal of Advanced Research**, v. 6, n. 12, p. 595–604, 30 nov. 2018.

Gueíia Neto, C. L. de B., Gueíia, A. R. de O., Queíioz, A. L. O. de, Cachina, M. L. de M., Nunes, N. G., & Contíeias, R. C. Tratamento de superfície em titânio por oxidação por plasma eletrolítico para aplicação em implantes dentários. *Brazilian Journal of Health Review*, 7(2), 1-17. (2024). DOI: 10.34119/bjhiv7n2-387. ISSN: 2595-6825.

JARRIGE, J.; LAROUCSI, M.; KARAKAS, E. Formation and dynamics of plasma bullets in a non-thermal plasma jet: Influence of the high-voltage parameters on the plume characteristics. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 19, n. 6, 2010.

Jl, S. H. et al. Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 605, p. 117–128, 2016.

KIM, J. H. et al. Plasma in dentistry: A review of basic concepts and applications in dentistry. **Acta Odontologica Scandinavica**, v. 72, n. 1, p. 1–12, 2014.

Lata, S., Chakiavoity, S., Mitia, I., Píadhan, P. K., Mohanty, S., Patel, P., Jha, E., Panda, P. K., Veíma, S. K., & Suaí, M. Apóio Boícealis in Dentistry: The Applications of Cold Plasma in Biomedicine. *Mateíais Today Bio*, 13, 100200. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100200>

LEE, H. W. et al. Modelling of atmospheric pressure plasmas for biomedical applications. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 44, n. 5, 2011.

LEE, J. H. et al. Effect of non-thermal air atmospheric pressure plasma jet treatment on gingival wound healing. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 49, n. 24, 2016.

LI, J. et al. A Filamentary Plasma Jet Generated by Argon Dielectric-Barrier Discharge in Ambient Air. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 47, n. 7, p. 3134–3140, 2019.

LIN, L. et al. Cold atmospheric helium plasma jet in humid air environment. **Journal of Applied Physics**, v. 125, n. 15, 2019.

Lira/Pluritec. Tratamento de superfície através de plasma atmosférico [citado 2020 Jul 21]. Disponível em <http://pluritecbr.com.br/plasma-atmosferico.html>.

LIU, C. T. et al. Atomic oxygen and hydroxyl radical generation in round helium-based atmospheric-pressure plasma jets by various electrode arrangements and its application in sterilizing *Streptococcus mutans*. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 42, n. 12, p. 3830–3836, 2014.

LU, X. et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. **Physics Reports**, v. 630, n. April, p. 1–84, 2016.

LU, X.; LAROUSI, M.; PUECH, V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 21, n. 3, 2012.

Meyer, P. F., Borges, F. S., Soares, C. D., Guerra, A. R. O., Valentim da Silva, R. M., Carreiro, E. M., Brito Guerra, C. L., Andrade, A. L. M., & Oliveira, G. M. (2024). Plasma Jet versus Electrocarbonization in the Treatment of Wrinkles of the Upper Palpebral Region. *JCAD Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology*, v. 17, n. 1, p. 33-40, 2024.

NASCIMENTO NETO, A. B. DO. Desenho e construção de um protótipo gerador de jato de plasma frio à pressão atmosférica para aplicações biomédicas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

NASCIMENTO NETO, A. B. DO et al. USO DE JATO DE PLASMA A PRESSÃO ATMOSFÉRICA PARA REALIZAR MODIFICAÇÕES DE SUPERFÍCIE DO TITÂNIO. **Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde - ISSN:2236-1103**, v. 5, p. 74–84, 2 jun. 2015.

NERETTI, G. et al. Characterization of a plasma source for biomedical applications by electrical, optical, and chemical measurements. **Plasma Processes and Polymers**, v. 15, n. 11, p. 1–12, 2018.

NISHIME, T. M. C. et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet applied to inactivation of different microorganisms. **Surface and Coatings Technology**, v. 312, p. 19–24, 2017.

NUNES, M. M. R.; GUERRA, R. F. **ESTUDO SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DE CANETAS COMERCIAIS QUE UTILIZAM PLASMA NA FISIOTERAPIA E NA ESTÉTICA**. Universidade Potiguar, 2018.

OLENICI-CRACIUNESCU, S. B. et al. Spatially resolved spectroscopic measurements of a dielectric barrier discharge plasma jet applicable for soft ionization. **Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy**, v. 66, n. 3–4, p. 268–273, 2011.

ONO, R. Optical diagnostics of reactive species in atmospheric-pressure nonthermal plasma. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 49, n. 8, 2016.

PAIVA, A. K. DE O. et al. TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES DE TITÂNIO POR OXIDAÇÃO À PLASMA ELETROLÍTICO PARA USO BIOMÉDICO. **Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde - ISSN:2236-1103**, v. 8, n. 2009, p. 14, 17 abr. 2019.

PÉREZ, T. G. **Estudo da influência do plasma de baixa pressão no comportamento mecânico das uniões adesivas metal-borracha**. Universidade Estadual de Campinas, 2010.

RASTEIRO, B. R. R. **Estudo dos parâmetros que afetam a tensão de descarga num detetor gasoso**. Universidade de Coimbra, 2016.

ROY, N. C.; TALUKDER, M. R.; CHOWDHURY, A. N. OH and O radicals production in atmospheric pressure air/Ar/H₂O gliding arc discharge plasma jet. **Plasma Science and Technology**, v. 19, n. 12, 2017.

Sakudo A, Yagyu Y, Onodera T. Disinfection and sterilization using plasma technology: fundamentals and future perspectives for biological applications. *Int J Mol Sci*. 2019;20(5216):1-17. DOI: 10.3390/ijms20205216.

ŠANTAK, V. et al. Optical Emission Spectroscopy of an Atmospheric Pressure Plasma Jet during Tooth Bleaching Gel Treatment. **Applied Spectroscopy**, v. 69, n. 11, p. 1327–1333, 2015.

ŠANTAK, V. et al. Surface Treatment of Human Hard Dental Tissues with Atmospheric Pressure Plasma Jet. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 37, n. 2, p. 401–413, 2017.

SHAO, X. J. et al. Comparative study on the atmospheric pressure plasma jets of helium and argon. **Applied Physics Letters**, v. 101, n. 25, 2012.

SILVA, G. C. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES**. Universidade Estadual de Campinas, 2000.

SIVA, B. F. C.; SANTOS, E. J. C.; ALMEIDA, E. O.; GUERRA, P. V. A.; HÉKIS, H. R.; COUTINHO, K. D.; GUERRA NETO, C. L. B. **Estudo de deposição de filmes finos em plasmas de AR/AR-H2 em regiões de pós-descarga de cátodo oco**. Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 37-42, 2015.

SOUZA, I. A. DE. **Técnicas de diagnóstico de plasma aplicadas à descarga em barreira dielétrica gerada em placas paralelas**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

SOUZA, I. A. Descarga Em Barreira Dielétrica: Construção De Um Reator Dbd E Caracterização Mediante Análises Ópticas E Elétricas Do Plasma Produzido. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

TANAKA, H. et al. State of the art in medical applications using non-thermal atmospheric pressure plasma. **Reviews of Modern Plasma Physics**, v. 1, n. 1, 2017.

VEZYRIS, C. K. et al. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. **11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014, 5th European Conference on Computational Mechanics, ECCM 2014 and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECFD 2014**, v. 23, n. 1, p. 5082–5093, 2014.

WANG, C.; HE, X. Effect of atmospheric pressure dielectric barrier discharge air plasma on electrode surface. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 2, p. 926–929, 2006.

WANG, C.; ZHANG, G.; WANG, X. Comparisons of discharge characteristics of a dielectric barrier discharge with different electrode structures. **Vacuum**, v. 86, n. 7, p. 960–964, 2012.

WANG, R. et al. Comparison between helium and argon plasma jets on improving the hydrophilic property of PMMA surface. **Applied Surface Science**, v. 367, p. 401–406, 2016.

XIONG, Q. et al. Characterization of an atmospheric helium plasma jet by relative and absolute optical emission spectroscopy. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 22, n. 1, 2013.

ZHANG, B. et al. Optical emission spectroscopy diagnostics of DBD plasma with particles in a two-dimensional spouted bed. **Chemical Engineering Science**, v. 206, p. 31–40, 2019.

ZHANG, Y. et al. Optical characteristics of the filamentary and diffuse modes in surface dielectric barrier discharge. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 168, p. 230–234, 2016.