

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA – FCTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA

ELIMINAÇÃO DE CONTAMINANTES BIOLÓGICOS
EM MATERIAIS UTILIZANDO PLASMAS FRIOS ATMOSFÉRICOS

HELBERT DE OLIVEIRA COELHO JÚNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO A. MIRANDA CERDA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA – FCTE

**ELIMINAÇÃO DE CONTAMINANTES BIOLÓGICOS
EM MATERIAIS UTILIZANDO PLASMAS FRIOS ATMOSFÉRICOS**

HELBERT DE OLIVEIRA COELHO JÚNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO A. MIRANDA CERDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA
PUBLICAÇÃO: 113A/2024

BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO DE 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS
DA ENGENHARIA

**ELIMINAÇÃO DE CONTAMINANTES BIOLÓGICOS EM MATERIAIS UTILIZANDO
PLASMAS FRIOS ATMOSFÉRICOS**

HELBERT DE OLIVEIRA COELHO JÚNIOR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

PROF. DR. RODRIGO A. MIRANDA CERDA
ORIENTADOR

PROF. DR. JOSÉ LEONARDO FERREIRA
EXAMINADOR - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROF. DR. GESIL SAMPAIO AMARANTE SEGUNDO
EXAMINADOR - UNIVERSIDADE ESTADUAL SANTA CRUZ

Relatório (ata) de defesa de dissertação assinado eletronicamente pela banca avaliadora, via Sistema Eletrônico de Informações - SEI, documento 12155182, processo 23106.121869/2024-90

BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO DE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA COELHO JÚNIOR, HELBERT

Eliminação de Contaminantes Biológicos em Materiais Utilizando Plasmas Frios Atmosféricos [Distrito Federal], 2024.

92p., (FCTE/UnB, Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, 2024).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia

1. Plasmas Frios Atmosféricos

2. Eliminação de Contaminantes Biológicos

3. Fontes Chaveadas

4. Descargas Elétricas

I. ENC/FCTE/UnB.

II. Título (série)

REFERÊNCIA

DE OLIVEIRA COELHO JÚNIOR, HELBERT (2024). Eliminação de Contaminantes Biológicos em Materiais Utilizando Plasmas Frios Atmosféricos. Dissertação de mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação 113A/2024, Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Helbert de Oliveira Coelho Júnior

TÍTULO: Eliminação de Contaminantes Biológicos em Materiais Utilizando Plasmas Frios Atmosféricos

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

hoc.junior@gmail.com

Brasília, DF – Brasil

It is not our part to master all the tides of the world, but to do what is in us for the succour of those years wherein we are set, uprooting the evil in the fields that we know, so that those who live after may have clean earth to till.

Gandalf, The White.

Dedico este trabalho ao meu pai, que mesmo distante sempre esteve do meu lado, à minha mãe que me apoia e sempre me apoiou, e à minha companheira que lutou estas batalhas comigo e sempre acreditou em mim, mesmo quando eu não acreditava.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos àqueles que passaram pela minha vida e ajudaram a construir este sonho.

Agradeço a minha companheira de aventuras, namorada, noiva, parceira, Jéssica Lília, por estar do meu lado, me motivar, me cobrar, me deixar sonhar, mas também por colocar meus pés no chão para alcançar os meus objetivos.

Agradeço a minha mãe, Nilza Aparecida, por me apoiar, me guiar, acompanhar e possibilitar que eu perseguisse esse título.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Rodrigo Miranda Cerda, pela amizade, orientação, inspiração, paciência e apoio.

Agradeço à coordenadora do Laboratório de Microbiologia Celular, Professora Dra. Marlene Teixeira De-Souza, pelos ensinamentos e orientação. Agradeço aos seus alunos e colegas que foram fundamentais na realização dos experimentos com contaminantes biológicos.

Agradeço ao coordenador do Laboratório de Física dos Plasmas da Universidade de Brasília, Professor Dr. José Leonardo Ferreira, que me mostrou o que são plasmas e suas aplicações e foi meu amigo por todos estes anos de trabalho juntos.

Agradeço ao professor Dr. Marcus Vinicius Batistuta, por ter me orientado na graduação, por ter tirado as minhas dúvidas durante o desenvolvimento deste trabalho, além de ter fornecido a câmara térmica para as análises do circuito e das superfícies. Além disso, agradeço a amizade e parceria nos projetos de pesquisa.

Agradeço aos pesquisadores do Laboratório de Física dos Plasmas, onde cada um teve um papel na construção deste trabalho. Agradeço ao João Victor Bitencourt e ao Júlio César de Melo por contribuírem ativamente neste trabalho.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelos momentos de descontração, estudo, trabalho, que caminharam comigo e tornaram a jornada mais agradável, sempre estando comigo, mesmo que a distância dificulte nosso contato.

E agradeço a Universidade de Brasília, em especial ao Programa de Pós Graduação em Integridade de Materiais para Engenharia, que me possibilitaram aprofundar o meu conhecimento em plasmas e a perseguir os sonhos e devaneios tão importantes para a pesquisa. Agradeço aos professores e ao corpo técnico da UnB, onde cada um deixou sua marca nesta conquista. Agradeço às agências de fomento à pesquisa pela parceria indispensável, sem a qual este trabalho não seria possível.

RESUMO

O plasma é considerado o quarto estado da matéria, e possui propriedades físicas que permitem várias aplicações na indústria, principalmente, em tratamento de superfícies. Nesta dissertação são aplicadas as propriedades de plasmas frios a pressão atmosférica para a esterilização de superfícies, objetos e ambientes. Foi desenvolvida uma fonte de plasma atmosférico usando componentes comuns, de fácil acesso, e que permitem atingir altas frequências, na ordem de kilohertz, utilizando sinais pulsados de corrente direta. Foram realizadas simulações para avaliar o comportamento do circuito e a sua comparação com o protótipo experimental. Resultados preliminares da ação biocida usando *peribacillus simplex* demonstram que a fonte de plasma possui capacidade de ação biocida após 10 minutos de exposição.

Palavras-chave: Plasma frio a pressão atmosférica, Plasma, Esterilização à plasma, Circuito pulsado DC.

ABSTRACT

Plasmas are regarded as the fourth state of matter, and its physical properties allow several applications in the industry, mainly, in surface treatment. This work aims to apply the properties of cold atmospheric plasmas for the sterilization of surfaces, objects, and environments. An atmospheric plasma source has been developed using components-of-the-shelf (COTS), that work with high frequencies, on the order of KHz, utilizing DC-pulsed signals. Simulations were made to evaluate the circuit behavior and then compared with the prototyped circuit. Preliminary results of the biocide action using *Peribacillus simplex* demonstrate that the plasma source has a biocidal capability after 10 minutes of exposition.

Keywords: Cold atmospheric plasma, Plasma, Plasma sterilization, DC pulsed circuit.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos Específicos	4
2	Metodologia	6
3	Plasmas	7
3.1	Comportamento Coletivo em Plasmas	7
3.2	<i>Quasineutralidade</i> em Plasmas	8
3.2.1	Temperatura	8
3.2.2	Blindagem de Debaye	10
3.3	Crítérios para Plasmas	11
3.4	Ruptura do Ar Atmosférico	11
3.4.1	Descarga de Townsend	12
3.4.2	Carga Espacial	15
3.4.3	Emissão Secundária de Elétrons	16
3.4.4	Crítério de Townsend	17
3.4.5	Lei de Paschen	18
3.4.6	Ruptura para campos não-uniformes	19
3.4.7	Descarga Corona	20
4	Mecanismos de Inviabilização Biológica	23
5	Fontes de Plasmas	28
5.1	Tipos de descarga	28
5.2	Saída de Alta Tensão AC	29

5.2.1	Transformadores Neon	31
5.2.2	Topologia ZVS	33
5.3	Saída de Alta Tensão DC	34
5.3.1	Transformador <i>flyback</i>	34
5.3.2	Gerador do Sinal PWM	35
5.3.3	Etapa de Potência	37
6	Resultados e Discussões	38
6.1	Curva de Paschen	38
6.2	Simulações	39
6.2.1	Topologia AC no LTSPICE	40
6.2.2	Topologia DC no LTSPICE	40
6.2.3	Fonte de alimentação linear no PROTEUS 8	42
6.3	Protótipo	43
6.3.1	Evolução do Circuito DC	44
6.3.2	Lista de Componentes Utilizados no Protótipo	49
6.3.3	Estrutura da Caneta de Plasma	49
6.3.4	Medições em Bancada - Temperatura	58
6.3.5	Medições em Bancada – Parâmetros Elétricos	62
6.3.6	Estrutura da Estufa de Plasma	65
6.4	Testes biológicos	65
6.4.1	Primeiro Teste	67
6.4.2	Segunda Bateria de Testes	70
6.4.3	Terceira Bateria de Testes – Estufa com Cortina de Plasma	75
6.4.4	Quarta bateria de testes – Reator com fluxo de ar ativo	78
7	Considerações Finais	83
7.1	Trabalhos Futuros	86
	Lista de Referências	88

LISTA DE TABELAS

1.1	Comparação entre características típicas de tratamentos convencionais e tratamentos com tecnologias baseadas em plasmas atmosféricos. Fonte: (Stoffels <i>et al.</i> , 2008)	4
4.1	Composição média do ar atmosférico. Fonte: (Brasseur e Solomon, 2005)	26
6.1	Tabela com os valores de A , B , pd e k para o ar atmosférico e o gás nitrogênio. Fonte: (Husain e Nema, 1982).	39
6.2	Lista de componentes para a montagem do protótipo.	50
6.3	Impressoras utilizadas na construção do protótipo.	60
6.4	Tabela com os dados de temperatura da superfície do ágar, medidos com a câmera térmica, antes e depois da exposição ao plasma, para diferentes tempos de aplicação.	62
6.5	Tabela com os dados de temperatura medidos com um termômetro infravermelho em três pontos do circuito eletrônico, sendo eles: MOSFET, <i>stepdown</i> LM2596, amplificador classe A.	64
6.6	Comparativo de unidades formadoras de colônias (UFC) após exposição ao plasma por diferentes intervalos de tempo.	73

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquemático de sistemas comuns para a aplicação de plasmas em aplicações biomédicas. a) geometrias comuns incluindo jato de plasma, ruptura da barreira dielétrica (DBD), e descarga por fagulha ou arco elétrico. b) subprodutos do plasma frio atmosférico. c) estratégias para aplicação, sendo aplicação direta, produção de soluções ativadas por plasma, exposição assistida e terapias combinacionais (utilizando diferentes atores no tratamento).Fonte: (Chen <i>et al.</i> , 2022a)	3
3.1	Curva característica da Descarga de Townsend. Na imagem é possível observar a região de saturação, assim como a Descarga de Townsend que antecede a ruptura do gás, ao atingir o potencial de V_B . Fonte: (Howatson, 2013).	13
3.2	Coeficientes de primeira ionização para Argônio, Nitrogênio e Hidrogênio. Fonte: (Howatson, 2013).	15
3.3	Curva de Paschen para os gases Argônio (Ar), Hidrogênio (H_2), Neônio (Ne) e uma mistura de Argônio e Neônio. É possível observar a variação na tensão mínima de ruptura (V_{Bmin}) para diferentes gases, puros e em mistura, quando submetidos à campos elétricos uniformes. Fonte: (Howatson, 2013).	19
3.4	Esquema de formação de um <i>streamer</i> . Na ilustração é possível observar a geometria em forma de ponta das cargas espaciais, bem como as avalanches secundárias, entre o anodo e o cátodo. Fonte: (Howatson, 2013)	20
4.1	Concentração relativa das moléculas em um jato de plasma utilizando ar atmosférico como precursor, para diferentes potências de descarga. Fonte: (Stofels <i>et al.</i> , 2008)	26
4.2	Diagrama contendo algumas espécies reativas de nitrogênio e oxigênio (RONS) criadas a partir da ionização do ar atmosférico, e como estas se comportam quando dissolvidas em água, criando assim a água aprimorada por plasma. Fonte: (Chen e Wirz, 2020)	27

5.1	Tipos comuns de reatores de plasmas frios atmosféricos utilizados aplicações biomédicas. a) Jato de plasma, podendo ser criado com sinais alternados conectados à eletrodos coaxiais, ou utilizando radiação eletromagnética. b) Descarga da barreira dielétrica, utilizando sinais alternados, ou contínuos. c) Fagulha, ou arco elétrico, nestas aplicações geralmente ocorre a partir de descargas do tipo corona (quiescente), quando níveis mais elevados de corrente são utilizados. Fonte: (Chen <i>et al.</i> , 2022b)	30
5.2	Ilustração das espécies reativas encontradas no plasma de ar atmosférico, na interface entre plasma e meio aquoso, e diluídos na água ativada por plasma. Fonte: (Chen <i>et al.</i> , 2022b)	30
5.3	À direita temos um circuito de bobinas acopladas, com as variáveis correspondentes para análise no domínio do tempo. Já a esquerda temos o mesmo circuito de bobinas acopladas, mas com os valores para análise no domínio da frequência. Fonte: (Alexander e Sadiku, 2013).	31
5.4	Esquema de ligação do transformador variável, com o transformador Neon, nos experimentos realizados anteriormente no LFP/UnB. Fonte: (Souza, 2013). . . .	32
5.5	Pinout do transformador <i>flyback</i> , modelo FA061WJ-SA. Neste modelo específico, a referência da saída de alta tensão do transformador está no pino 10. Fonte: https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/ETC/FA061WJ-SA/pdf.php?id=1402480 , acessado no dia 10/12/2024.	35
5.6	Pinout do transformador <i>flyback</i> , modelo 154-138L. Ao contrário do transformador FA061WJ-SA, o pino de referência da saída de alta tensão deste modelo está conectado o pino 7. Fonte: https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/ETC/FA061WJ-SA/pdf.php?id=1402480 , acessado no dia 10/12/2024. . . .	35
5.7	Esquemático da operação estável para o timer NE555. A frequência e o Duty-Cycle são controlados alterando o tempo de carga e descarga do capacitor conectado ao trigger. RA e RB são responsáveis pelo tempo no nível alto, e baixo respectivamente, sendo que a soma de ambos, juntos com o capacitor, determinam a frequência de oscilação. Fonte: Datasheet da Texas Instruments para o timer NE555.	36
6.1	Curva de paschen com valores calculados, e medidos, para diferentes gases. Fonte: (Husain e Nema, 1982).	39
6.2	Circuito ZVS utilizado no LTSpice XVII para a simulação da saída de alta tensão. Os componentes utilizados estão sem perdas parasíticas, que afetariam a performance do circuito. O indutor L1 representa o primário do transformador de saída, e o indutor L4 seu secundário.	41

6.3	Saída do transformador na simulação do circuito ZVS. O objetivo era atingir valores superiores a 5 kV . Conforme descrito a saída desta topologia possui um sinal oscilante, entre positivo e negativo, cruzando o nível zero a cada ciclo.	41
6.4	Esquemático do primeiro circuito excitador construído. Este circuito utilizava um NE555 para criar o sinal PWM, o ampop LM741 elevava a tensão da onda quadrada para então chavear o MOSFET IRFZ44n, responsável por energizar o primário do transformador <i>flyback</i> . L1 e L2 são os enrolamentos do transformador. C4, U3 e R8 simulam o comportamento do plasma uma vez que o ar foi ionizado.	42
6.5	Simulação das curvas de tensão (azul) e corrente (vermelho) na saída de alta tensão do transformador <i>flyback</i> . Com a simulação foi possível observar tensões de saída acima de 5 kV , no formato de pulsos acima de 0 volts, com correntes de até 20 mA . Estes valores estão dentro do esperado com base na operação do circuito construído em placa perfurada universal. A frequência de operação neste caso é em torno de 5 kHz	43
6.6	Segunda iteração do circuito excitador do transformador <i>flyback</i> . O circuito conta com o NE555 para geração do sinal PWM, um amplificador transistorizado utilizando 2 transistores NPN e 1 PNP, o MOSFET de potência IRF530, além de filtros e medidas de proteção do circuito.	44
6.7	Simulação no LTSpiceXVII da segunda iteração do circuito excitador. O gráfico superior, com a curva na cor vermelha, traz os pulsos criados pelo gerador PWM, o gráfico central o comportamento da tensão no enrolamento primário do transformador <i>flyback</i> , demonstrando o <i>efeito ringing</i> causado pela rápida mudança do nível de tensão. O gráfico inferior traz o perfil da descarga utilizando um modelo adaptado de Mayr no bulbo de neon. Essa descarga se assemelha à curva de descarga de um capacitor.	44
6.8	Ponte retificadora para o transformador.	45
6.9	Circuito regulador de tensão com LM7812 para alimentação das ventoinhas. . .	45
6.10	Fonte linear DC utilizada no protótipo final.	45
6.11	Primeiro circuito excitador construído na placa perfurada universal. O circuito consistia em um NE555 e um LM74i como <i>driver</i> do MOSFET IRFZ44n. Este transistor era responsável por chavear o primário do transformador <i>flyback</i>	46
6.12	Segunda iteração do circuito excitador, construído na placa perfurada universal. Neste circuito, no lugar do ampop LM741, temos o amplificador <i>push-pull</i> utilizando transistores TIP41 e TIP42. O MOSFET nesta construção foi o IRF540. Um regulador de tensão LM2596 abaixava a tensão da fonte de 25 V para 12 V , tensão essa utilizada pelo NE555 e, em outra versão, pelas ventoinhas.	46
6.13	Terceira iteração do circuito excitador.	46

6.14 Fonte linear DC.	47
6.15 Vista lateral do reator final. O CAD foi feito no software livre Freecad 0.21. Na imagem é possível ver a disposição espacial dos elementos que compõe a parte eletrônica do reator CAPs. Em azul temos o transformador $220V/12v - 12v$, em lilás a placa da fonte linear, em vermelho a placa geradora de sinal e <i>driver</i> do transformador <i>flyback</i> , mostrado aqui em amarelo. Em azul claro o transistor de potência 2N3055 e em preto a ventoinha para refrigeração dos diferentes elementos de circuito.	47
6.16 Diagrama de blocos do sistema eletrônico do reator de plasma atmosférico. . . .	48
6.17 Esquema de ligação dos eletrodos para o jato de plasma, e para a descarga corona com arcos.	49
6.18 Demonstração do problema da atração eletrostática do Plasma ao eletrodo comum localizado na saída da seringa. É possível ver claramente a trajetória do plasma, sendo desviado abruptamente ao deixar a seringa.	51
6.19 Descarga corona entre o eletrodo de alta tensão, no interior da seringa, e o plano de cobre abaixo, conectado à referência do circuito.	51
6.20 Descarga corona repelida eletrostaticamente devido ao acúmulo de cargas na superfície do dielétrico.	52
6.21 Descarga corona entre o eletrodo interno e a superfície do substrato, contendo um meio LB, com 1.2% de ágar, que é conectado à referência do circuito através de um conector tipo jacaré, localizado à direita da imagem. O círculo no centro da imagem foi feito com um marcador permanente, e serviu como delimitação para verificar a influência da descarga sobre o meio, antes dos testes com contaminantes biológicos.	52
6.22 Na esquerda temos o detalhe do arco entre o eletrodo e a superfície do substrato. A direita, em detalhe, temos o dano causado ao substrato, com uma marca clara de carbonização.	53
6.23 Exemplo de descarga arco evoluindo a partir da descarga corona, com a adição do gás argônio.	54
6.24 O primeiro <i>setup</i> experimental utilizado para verificar a capacidade anticéptica do plasma atmosférico. À esquerda temos a fonte de tensão de bancada, fornecendo $12,30 V$ e $1,53 A$, totalizando $18,82 W$ de potência fornecida para o circuito. A seringa estava fixada por uma pinça plástica com braço articulado, e a placa de Petri com o material biológico estava logo abaixo. A descarga foi direcionada à pontos específicos da placa de Petri.	55

6.25 Estrutura atualizada da Caneta de Plasma, com base impressa em 3D, suportes metálicos isolados, espaços dedicados para as placas de Petri com conectores jacarés para aterramento do substrato. A utilização de barras roscadas possibilitam uma grande gama de distâncias possíveis.	55
6.26 Sistema com duas descargas simultâneas, em duas placas de Petri contendo os contaminantes biológicos.	56
6.27 Detalhe da descarga corona na região interna do reator a plasma atmosférico, apelidado de “secador”.	56
6.28 Reator com fluxo de ar ativo em teste na capela de segurança biológica. Na imagem, o brilho lilás se deve ao plasma atmosférico. A luz vermelha é um reflexo na estrutura metálica da capela, oriundo dos LEDs de indicação do circuito excitador. A placa de Petri está à uma distância de 70 mm da descarga. O eletrodo interno recria a cortina de plasma, em uma região confinada, com uma ventoinha gerando um fluxo ativo de ar atmosférico.	57
6.29 CAD do sistema proposto com duas seringas.	57
6.30 Detalhe do eletrodo projetado para a caneta de plasma. O formato circular visa uniformizar a descarga no interior da seringa, enquanto as pontas concentram as cargas elétricas, facilitando a ruptura do ar e sua ionização.	58
6.31 CAD do protótipo com fluxo de ar forçado, batizado de “secador”.	58
6.32 CAD do sistema proposto, com todos os componentes internos em um sistema único. A parte superior foi desenvolvida para suportar duas placas de Petri de 90 mm de diâmetro, com diferentes geometrias de reator podendo ser utilizado. As peças foram impressas em 3D. As cores representam os diferentes blocos do sistema, e podem ser vistos com detalhes na Fig. 6.16.	59
6.33 CAD do protótipo final com duas canetas de plasma.	59
6.34 Impressoras utilizadas no desenvolvimento dos protótipos. À esquerda, uma impressora de resina fotossensível, modelo <i>Creality Halot One</i> . À direita, uma impressora de filamento, modelo <i>Creality Ender 3 V2</i>	60
6.35 Modelo impresso em PLA, com os componentes dispostos em seu interior. Aberturas foram projetadas para a circulação de ar interna, com a ventoinha forçando o ar quente para fora.	60
6.36 Detalhe lateral do sistema impresso. Aqui é possível observar como as peças se encaixam, sendo parafusadas na estrutura superior e inferior. Isto permite que parte do sistema seja desmontando e trocado, ou que todo o protótipo seja desmontado, para facilitar limpeza, upgrades ou reparos.	61

6.37 Detalhe do sistema de fixação da estrutura do protótipo, à esquerda, utilizando a união de peças impressas, com espaços dedicados para porcas, e parafusos padrão M3. À direita, o detalhe do suporte do transformador <i>flyback</i> , separado dos outros componentes para evitar danos internos.	61
6.38 Protótipo final, construído com peças impressas em 3D.	62
6.39 Protótipo final, construído com peças impressas em 3D.	63
6.40 Medições de temperatura da superfície do ágar, antes e após a aplicação do plasma no eletrodo tipo “cortina” por 20 minutos. A temperatura da superfície do ágar não demonstrou elevações significativas, sendo que em certas medidas a temperatura medida após foi inferior aquela no início do teste.	63
6.41 Na esquerda temos a temperatura do circuito vista pela câmera térmica, com o maior valor de temperatura no MOSFET, em torno de $52^{\circ}C$. Já com o termômetro infravermelho diretamente acima do MOSFET, foi medido uma temperatura de $52^{\circ}C$, após 20 minutos de operação contínua.	64
6.42 Tomada de temperatura do circuito, durante o teste para verificar o aquecimento dos componentes.	64
6.43 Curva mensurada na saída do gerador de sinal PWM da segunda iteração do circuito.	65
6.44 Curva do sinal do primário do <i>flyback</i> , em amarelo, e do sinal de alta tensão, em verde. Foi possível verificar o fenômeno de <i>ringing</i> oriundo do chaveamento rápido do primário do transformador, assim como a curva da descarga corona, atingindo 5 kV	66
6.45 Aqui em detalhes o fenômeno <i>ringing</i> do primário do transformador <i>flyback</i>	66
6.46 Estufa de plasma, com volume de 50 L , na capela de segurança biológica, pronta para a bateria de testes. Três placas de Petri estão dispostas no interior da estufa. 67	
6.47 Detalhe da descarga do tipo cortina entre os eletrodos na parte interna da estufa. É possível observar também a placa Petri mais próxima dos eletrodos e a estrutura interna feita em PVC.	67
6.48 Reator tipo “secador” sendo descontaminado com luz UV antes da bateria de testes. Todos os reatores utilizados nos testes biológicos passarão por essa rotina de 30 minutos de exposição, antes e após os testes.	68
6.49 Resultado do primeiro teste com a caneta de plasma e o <i>Peribacillus Simplex SDF0016</i> . Na placa da esquerda, que foi o controle para este teste, podemos ver o crescimento de colônias, indicando a viabilidade dos espécimes. O teste foi realizado em duplicata, mostrando a ação bactericida do plasma atmosférico, nestas condições. É possível observar nenhum crescimento nas placas central e direita.	69

6.50	Resultado do primeiro teste, utilizando dois pontos de inoculação. Na placa de controle à esquerda é possível ver o crescimento das colônias, sendo que nas placas central e direita não há evidência de crescimento na região inoculada e exposta ao plasma. Os organismos indicados pela seta são contaminantes externos, de uma fonte desconhecida.	69
6.51	Resultado do primeiro teste, utilizando três pontos de inoculação. Na placa de controle, à esquerda, é possível ver o crescimento dos micro-organismos após 24 horas de incubação. Na placa central e à direita, nas zonas expostas ao plasma, não são observados crescimentos de colônias.	70
6.52	Resultado do primeiro teste, com a inoculação cobrindo todo o substrato, e não apenas pontos. À esquerda temos a placa controle, com toda a superfície recoberta por colônias, e à direita o resultado da exposição ao feixe de plasma. Aqui é importante observar o halo de difusão das partículas reativas, onde no centro da exposição não temos crescimento evidente, e a medida em que afastamos do centro da exposição, colônias isoladas aparecem de forma gradativa, até a total cobertura do substrato na região não tratada, indicando a possibilidade de aplicação pontual do CAP.	70
6.53	Conjunto de duplicatas, após a exposição ao plasma e o período de incubação. Da esquerda para direita temos os tempos de 1, 3, 6, 10 minutos de exposição, e o controle. A fileira de baixo corresponde às duplicatas da fileira de cima. Nesta disposição é possível perceber a influência do tempo de exposição ao efeito biocida, além do alcance do novo sistema de caneta de plasma, sendo possível atingir a totalidade da placa de Petri nos tempos superiores.	72
6.54	Detalhe comparativo entre as placas de controle, à esquerda, e aquelas submetidas a 10 minutos de exposição ao plasma, à direita. Apesar de existirem algumas unidades formadoras de colônias, é possível verificar a ação biocida do plasma atmosférico.	72
6.55	Resultado do segundo teste com o segundo protótipo. Da esquerda para a direita temos os tempos de exposição de 1, 3, 6, 10 minutos e o controle. A fileira de cima traz um conjunto de amostras, e a fileira de baixo a sua duplicata. É possível ver a influência do plasma atmosférico mesmo com apenas 1 minuto de exposição.	73
6.56	Detalhe do resultado do segundo teste com o segundo protótipo desenvolvido neste trabalho. À esquerda, temos o resultado após 10 minutos de exposição, e à direita o controle.	73
6.57	Disposição as placas de Petri no primeiro teste com a cortina de plasma. Na imagem inferior é possível observar a descarga corona entre os eletrodos. Esta descarga tinha 30 <i>cm</i> de comprimento, com uma distância entre os eletrodos de 50 <i>mm</i>	75

- 6.58 Resultado do teste com o eletrodo tipo “cortina”. Para este teste as placas estavam perfiladas, à uma distância de 50 *mm* dos eletrodos. O teste foi realizado em duplicatas, com a primeira coluna à esquerda com as placas expostas por 10 minutos, sendo a coluna subsequente a sua duplicata. A terceira coluna contém as placas expostas por 20 minutos, com a quarta coluna sendo sua duplicata. As duas placas mais a direita da imagem são as placas de controle. Apesar de um efeito biocida menor, em comparação com a caneta de plasma, ainda podemos observar um efeito de eliminação de contaminantes, além da influência entre a aplicação do plasma e o tempo de exposição. 76
- 6.59 Detalhe do resultado deste primeiro teste com o eletrodo tipo “cortina”. É possível observar uma “uniformidade” ao longo do eletrodo, sem uma placa demonstrando um nítido efeito preferencial. A linha superior trás as placas expostas por 10 minutos, e a linha de baixo sua duplicata. As placas mais a direita trazem as placas de controle. 76
- 6.60 Aplicação da cortina de plasma em um recipiente fechado, de volume igual a 50 litros. A cortina de plasma consiste em dois eletrodos ativos, utilizando lâminas de arco de serra, e dois tubos de cobre como referência para o circuito de alta tensão. Uma estrutura em PVC foi construída para testar o alcance das espécies reativas em um ambiente fechado, com diferente distâncias entre a placa e a descarga. O circuito excitador é o mesmo utilizado na caneta de plasma. 77
- 6.61 Durante a prova de conceito da estufa à plasma foi utilizado uma placa de Petri, com 150 *mm* de diâmetro e preenchida com o meio de cultura Mueller Hinton. Como contaminante biológico foi utilizado o material colhido em um shopping local. À esquerda temos o resultado do teste, com exposição à estufa por 30 minutos, e à direita a placa controle. Ambas placas foram incubadas por 24 horas a temperatura ambiente de 27°C. Com este teste foi possível verificar que, em um ambiente fechado, as espécies reativas conseguem atingir todos os espaços da câmara, através da difusão. 78
- 6.62 Resultado do teste com a estufa à plasma. À esquerda, temos as placas de controle, e em seguida as placas tratadas por 20 minutos. A segunda coluna traz as placas que estavam a uma distância de 170 *mm* da cortina de plasma, a terceira coluna tem as placas à distância de 50 *mm*, e a coluna mais a direita as placas à distância de 170 *mm* e ocultadas. É possível ver que, salvo colônias pontuais, 20 minutos de tratamento na estufa a plasma teve uma ação biocida significativa. 79

6.63	Resultado após 30 minutos de exposição à estufa de plasma e 48 horas de incubação. À esquerda, temos as placas de controle, e em seguida as placas tratadas por 30 minutos. A segunda coluna traz as placas que estavam a uma distância de 170 <i>mm</i> da cortina de plasma, a terceira coluna tem as placas à distância de 50 <i>mm</i> , e a coluna mais a direita as placas à distância de 170 <i>mm</i> e ocultas. Com exceção de algumas colônias pontuais, o efeito biocida da descarga tipo cortina, dentro de uma câmara fechada, é considerável.	79
6.64	Detalhe do resultado do tratamento na estufa, após 30 minutos de exposição e 48 horas de incubação. A linha de crescimento dos contaminantes se deve à uma laceração na superfície do ágar, que permitiu a infusão dos contaminantes e a proteção destes contra as espécies reativas. Este resultado demonstra a ação superficial da descarga, não possuindo uma capacidade de penetração da ação biocida.	80
6.65	Resultado do tratamento com estufa de plasma, após 120 horas de incubação. As duas primeiras colunas, da esquerda para direita, trazem as placas expostas por 20 minutos, as duas colunas subsequentes as placas expostas por 30 minutos e a última coluna as placas de controle.	80
6.66	Resultados do teste com o fluxo de ar ativo. As placas mais a esquerda representam o controle, e cada coluna subsequente foi exposto por um tempo diferente, sendo 1, 3, 6 e 9 minutos respectivamente. A fileira de baixo é a duplicata da fileira de cima. Diferente dos outros experimentos, este não teve o efeito biocida esperado, com uma maior quantidade de colônias sobrevivendo ao tratamento. Uma possibilidade para tal efeito é que o fluxo da ventoinha diminuiu a quantidade de espécies reativas geradas, além de reduzir a concentração dos oxidantes na superfície do ágar.	82
6.67	Resultado do segundo teste com fluxo de ar ativo, porém com 70% da intensidade do teste anterior. As placas mais a esquerda representam o controle, e cada coluna subsequente foi exposto por um tempo diferente, sendo 1, 3, 6 e 9 minutos respectivamente. A fileira de baixo é a duplicata da fileira de cima. Assim como o primeiro teste, retratado na Fig. 6.66, o fluxo de ar da ventoinha diminuiu o efeito biocida para esta configuração. Porém, com a redução no fluxo de ar, obtivemos mais regiões sem colônias, indicando uma possível relação inversamente proporcional entre intensidade do efeito biocida em relação ao fluxo de ar na superfície a ser tratada.	82
7.1	Sistema de filtro de ar utilizando plasmas atmosféricos. O ar do recinto seria forçado através das estruturas cilíndricas metálicas, onde seria ionizado, por fim saindo pelo bocal, à esquerda do filtro. Ao passar pela descarga, contaminantes em suspensão seriam submetidos às espécies reativas.	86
7.2	Aplicação pontual da caneta de plasma, onde o operador pode manusear o dispositivo.	87

- 7.3 A caneta de plasma com um fluxo misto de Argônio e ar atmosférico, criando o jato de plasma. Nesta configuração é possível tratar a superfície de tecidos vivos, como a palma das mãos. 87
- 7.4 Possível geometria para ser utilizada em projeto de filtros ou como elemento interno da estufa a plasma. 87

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

1 INTRODUÇÃO

A recente pandemia causada pelo vírus SARS-CoV-2 trouxe a necessidade de investigar novas formas de evitar o colapso dos sistemas de saúde, ao mesmo passo que novos tratamentos, e métodos preventivos, eram desenvolvidos. Dentro desse panorama, diversas tecnologias foram aplicadas de formas inovadoras, como a utilização de plasmas atmosféricos para o tratamento de superfícies, com o intuito de corrigir vulnerabilidades nas cadeias de suprimento de equipamentos de proteção individual (EPI) e materiais desinfetantes (Chen *et al.*, 2022a).

A indústria já utiliza plasmas em diversas áreas e processos de fabricação e tratamento de superfícies. Dentre seus usos, podemos citar a deposição de filmes finos, a remoção de material por *sputtering* (erosão), soldagem de metais, dopagem de semicondutores, propulsores elétricos, fabricação de nanomateriais e, entre outros diversos usos, plasmas podem ser utilizados para a eliminação de contaminantes biológicos (Domonkos *et al.*, 2021; Zille *et al.*, 2015).

Dentro desta esfera, o Laboratório de Física de Plasmas (LFP), do Instituto de Física da Universidade de Brasília (UnB), está inserido como desenvolvedor de tecnologias e aplicações de plasmas em diversas áreas, como propulsão elétrica, produção de filmes finos, estudos de fenômenos em plasmas espaciais, descontaminação, e no estudo e simulação de diversas interações envolvendo plasmas, como fenômenos caóticos em reatores de fusão.

Para a aplicação biomédica, existem diferentes formas de esterilizar equipamentos, como fornos elétricos (que utilizam altas temperaturas), produtos químicos como antissépticos, desinfetantes, autoclaves (que funcionam com vapor d'água quente pressurizado), dentre outros (Souza, 2013; Kaushik *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022b). Cada processo possui suas características que o tornam eficientes em determinadas aplicações, e proíbem seu uso em outras, como é o caso de equipamentos com circuitos eletrônicos embarcados que, geralmente, não podem ser submetidos a processos térmicos como estufas, ou ambientes ricos em umidade, como o caso de autoclaves. Muitos equipamentos de laboratório feitos de diferentes polímeros possuem a restrição de irem para a autoclave, trazendo outros desafios na limpeza e no descarte destes.

Pensando na aplicação de plasmas para a eliminação de contaminantes biológicos, podemos dividi-la em duas categorias: Plasmas de Baixa Pressão (vácuo) e Plasmas Atmosféricos. Dentre essas duas categorias ainda podemos organizar os plasmas em duas subclasses, sendo Plasmas Termiais, tradicionalmente “quentes”, e Não-Termiais, em que a energia dos

elétrons é muito superior à energia dos íons (Chen *et al.*, 2022b; Misra *et al.*, 2016).

Os plasmas de baixa pressão necessitam de uma câmara fechada hermeticamente, capaz de sustentar um ambiente de baixa pressão para ionizar um determinado gás de trabalho, como o Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2). O plasma, então, preenche a totalidade do ambiente interno da câmara através do processo de difusão, e os íons resultantes do processo de ionização reagem com os contaminantes biológicos, inviabilizando-os.

Os plasmas atmosféricos podem ser utilizados em ambientes abertos ou câmaras fechadas, em pressão atmosférica, ionizando o próprio ar atmosférico ou uma mistura com um gás de trabalho, podendo agir também como catalisador. Esses plasmas que utilizam ar atmosférico, em pressões próximas a 1 atmosfera (atm) e não-termais, são conhecidos como Plasmas Frios Atmosféricos (Cold Atmospheric Plasmas – CAPs). O plasma gerado pelo ar atmosférico possui íons reativos que são capazes de eliminar bactérias, fungos e inviabilizar vírus. A eficiência deste processo depende do tempo de exposição ao gás ionizado e quais foram as espécies precursoras deste plasma (Izadjoo *et al.*, 2018).

Esses plasmas frios atmosféricos são formados por átomos neutros, moléculas, elétrons, radicais livres, campos elétricos, estados excitados, fótons de radiação ultravioleta (UV) e íons. Podem ser obtidos de diversas formas através de descargas elétricas, como uma descarga quiescente (jato de plasma, agulha de plasma, lápis de plasma e descarga da barreira dielétrica – DBD), descarga corona (Chen *et al.*, 2022a).

A ionização do gás entre dois eletrodos não ocorre de forma natural, sendo que a intensidade do campo elétrico e fatores como o livre caminho médio dos elétrons influenciam diretamente a transição para o estado de plasma. Dessa forma, como geralmente a geometria dos eletrodos se mantém constante, devemos ajustar a descarga através do campo elétrico.

Podemos aplicar campos elétricos de diferentes formas, constantes e alternados, a fim de obtermos a ionização do ar atmosférico e um plasma que possua as características interessantes para essa aplicação. Aqui, é importante realizar uma distinção de plasmas gerados por arcos elétricos de elevada corrente ou energia térmica (plasma quentes), pois estes alterariam as condições dos objetos a serem descontaminados, e, em certas condições, os destruiriam no processo. Como exemplos desses plasmas termais atmosféricos, podemos citar cortadores de acetileno, tochas de plasma e *sparkgaps* (centelhadores).

Além da aplicação direta dos subprodutos de uma descarga atmosférica, podemos utilizar plasmas para produzir soluções aprimoradas por plasmas na diluição de compostos em meio aquoso, na produção de nanoestruturas, dentre outros (Chen *et al.*, 2022a).

Com o avanço das pesquisas na utilização de plasmas frios atmosféricos (Alves, 2020; Gan *et al.*, 2021; Terefinko *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022b), diversas aplicações para essa tecnologia estão atualmente em desenvolvimento, variando a mistura de gases com o ar atmosférico, geometrias e formas de ionização (Zhu *et al.*, 2021; Chen e Wirz, 2020), e diversas aplicações como, por exemplo, na esterilização (Izadjoo *et al.*, 2018), tratamento de feridas (SILVA *et al.*, 2022; Stoffels *et al.*, 2008), coagulação sanguínea (Kalghatgi *et al.*, 2007), tratamentos odontológicos (Naujokat *et al.*, 2019), terapias contra o câncer (Semmler *et al.*,

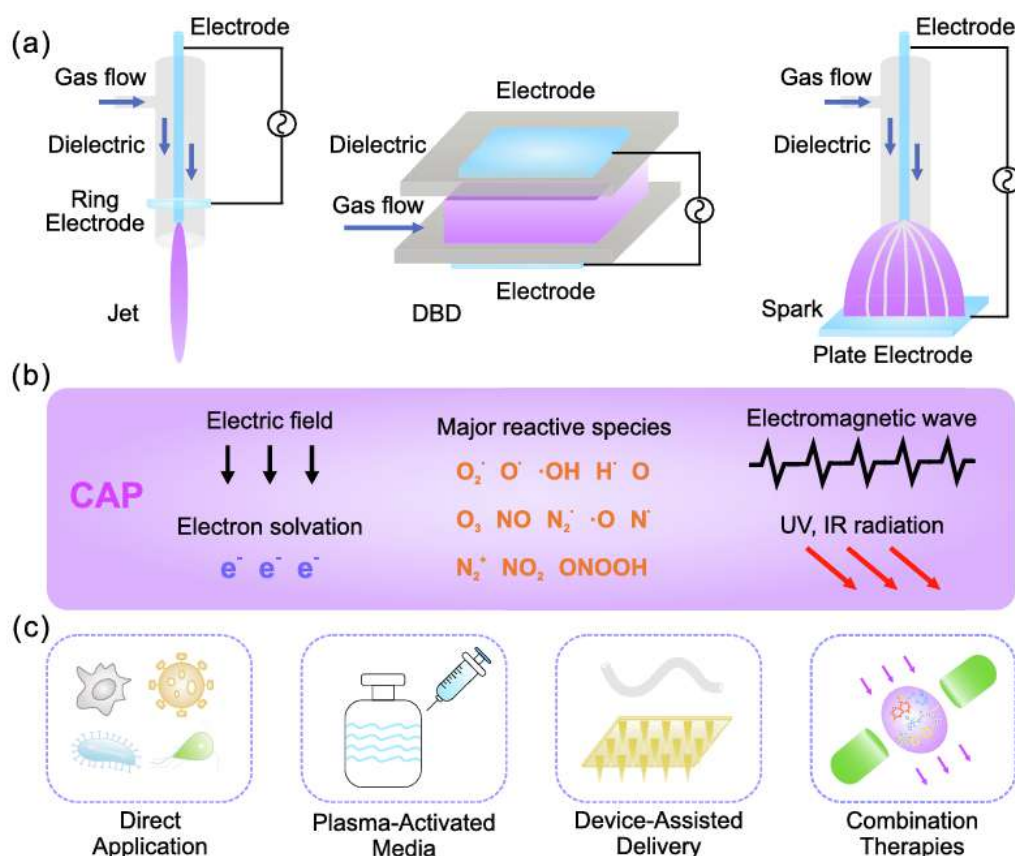


Figura 1.1. Esquemático de sistemas comuns para a aplicação de plasmas em aplicações biomédicas. a) geometrias comuns incluindo jato de plasma, ruptura da barreira dielétrica (DBD), e descarga por faísca ou arco elétrico. b) subprodutos do plasma frio atmosférico. c) estratégias para aplicação, sendo aplicação direta, produção de soluções ativadas por plasma, exposição assistida e terapias combinacionais (utilizando diferentes atores no tratamento). Fonte: (Chen *et al.*, 2022a)

2020; Stoffels *et al.*, 2008), dentre outras aplicações médicas (Udakhe *et al.*, 2012). Podemos ver na tabela 1.1 uma comparação entre os tratamentos médicos tradicionais, e como tecnologias a plasma podem auxiliar, aprimorar ou substituir tais tratamentos.

Assim, a motivação deste trabalho nasce com a necessidade de novas tecnologias no tratamento de EPIs (equipamento de proteção individual) e materiais médicos, bem como alternativa na higienização de superfícies e ambientes. Todavia, as aplicações para tal tecnologia são inúmeras, englobando diversas áreas de conhecimento como biologia, medicina, engenharia, química, física (Lu *et al.*, 2016).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento, e testes em laboratório, de um sistema com plasmas frios atmosféricos que possibilite a inviabilização de contaminantes biológicos.

Tabela 1.1. Comparação entre características típicas de tratamentos convencionais e tratamentos com tecnologias baseadas em plasmas atmosféricos. Fonte: (Stoffels *et al.*, 2008)

Cirurgia Convencional	Tratamento com Tecnologias a Plasma
excisão mecânica contato risco de contaminação causa feridas afeta o tecido conjuntivo necrose inflamação e cicatrizes grandes porções de tecido removido precisão limitada	estímulos químicos sem contato desinfecção auxilia na cicatrização afeta principalmente células sem necrose sem inflamação e cicatrizes remoção de tecido superficial excelente precisão
Cirurgia Laser	Tratamento com Tecnologias a Plasma
ablação térmica necrose e inflamação efeitos de profundidade difíceis de controlar irregularidades difíceis de tratamento boa precisão custo elevado	estímulos químicos sem necrose ou inflamação efeitos superficiais capaz de tratar irregularidades precisão excelente baixo custo
Remédios Convencionais	Tratamento com Tecnologias a Plasma
age no sistema e não localmente uso tópico, contato espécies com tempo de vida elevado química específica para a aplicação	tratamento localizado sem contato espécies com baixo tempo de vida química fisiológica básica

Para tal, a fonte de plasmas atmosféricos, desenvolvida neste trabalho, deverá atingir níveis de desempenho dentro dos parâmetros levantados e das simulações realizadas para este trabalho. O sistema deverá ser de baixo custo, com soluções simples e robustas, de fácil manutenção e operação.

Após as realizações dos diferentes elementos de circuito necessários, e da validação dos protótipos de prova de conceito, um sistema único e contido será proposto e construído, utilizando métodos de fabricação aditivos e elementos de fácil acesso, conhecidos também como “*Components Of The Shelf*” (COTS).

1.1.2 Objetivos Específicos

Partindo dos objetivos gerais, foram propostos os seguintes objetivos específicos para este trabalho:

- Revisão da base teórica sobre a física dos plasmas;
- Revisão sobre os métodos de inviabilização de espécies biológicas expostas ao plasma;
- Levantamento dos estudos realizados com fontes de plasmas atmosféricos;
- Estabelecer uma topologia de circuito que permita a aplicação da descarga corona por

longos períodos;

- Utilizar ferramentas de simulação computacional para projetar e validar as topologias de circuito escolhidas;
- Construção e validação em bancada dos circuitos eletrônicos de potência;
- Construção do reator de plasmas atmosféricos, envolvendo câmara de ionização e eletrodos;
- Testes em laboratório do sistema de modo a comprovar o efeito inviabilizante do plasma gerado;
- Análise dos dados obtidos;
- Propostas para outras áreas de aplicação e de geometria dos eletrodos, bem como pontos novos de estudo e desenvolvimento.

Neste trabalho foi realizado um estudo com diferentes topologias de circuitos para a geração de plasmas atmosféricos, incluindo simulações computacionais e uma metodologia iterativa de refinamento do protótipo. Tais simulações podem ser vistas na seção 6.2. Já a explicação de cada topologia, bem como o formalismo que rege cada topologia utilizada no estudo pode ser vista nas seções 5.2 e 5.3.

2 METODOLOGIA

A metodologia foi baseada em um método iterativo onde cada etapa serviu como base para a etapa seguinte, sendo possível ainda o retrabalho em uma etapa já concluída, caso mudanças fossem necessárias. Assim, cada bloco individual contribui para a construção do trabalho como um todo.

O desenvolvimento do sistema de inviabilização de contaminantes biológicos começou em duas frentes distintas, com o levantamento do referencial teórico paralelamente com o desenvolvimento de protótipos de fontes de alta tensão, da ordem de 5 *KV*. A medida que os requisitos do projeto foram amadurecendo, a fonte de alta tensão sofreu alterações para fornecer a confiabilidade necessária que os testes exigiam.

Como no início do projeto o foco era construir uma solução de baixo custo, com componentes “*Off-the-Shelf*” (de fácil disponibilidade em lojas locais), optou-se por utilizar fontes de alta tensão excitadas por sinais DC pulsados. Essa escolha foi baseada na disponibilidade de transformadores *flyback* de monitores de tubos de raios catódicos (CRT – *Cathode Ray Tube*), que fornecem uma alta tensão, mas possuem diodos em sua confecção, retificando o sinal de saída.

A escolha destes transformadores influenciou diretamente na topologia do circuito adotada, que por sua vez teve um papel importante nas escolhas dos componentes, assim como a filosofia “*Off-the-Shelf*”, aliada com requisito de baixo-custo.

Cada etapa do circuito foi projetada, simulada e construída de forma individual, sendo incrementada a medida que o protótipo evoluía. Estes blocos da solução final podem ser vistos no diagrama da Fig. 6.16

De posse de um protótipo funcional, a eficácia da inviabilização de contaminantes biológicos foi testada em um ambiente apropriado, com espécimes da bactéria *esporogênica Peribacillus Simplex*.

A cada iteração e modificação do sistema, a sua eficácia era verificada com testes biológicos, sempre realizados em duplicatas.

3 PLASMAS

Um dos pilares dos dispositivos desenvolvidos neste trabalho são os gases ionizados, logo devemos ter um conhecimento básico sobre a física de plasmas. Dentre esses conceitos, devemos saber os parâmetros necessários para a ionização do gás e quais os requisitos para que as fontes de plasma consigam descargas estáveis e duradouras.

Plasmas compõem 99% de toda a matéria bariônica do universo conhecido (Chen, 2012). Isso implica que vivemos no 1% do universo em que plasmas não ocorrem. Mesmo sendo uma aproximação, essa afirmação possui um peso ao indicar que tudo no universo é plasma. O interior de estrelas, nebulosas, matéria interplanetária, dentre outros, encontram-se no estado de plasma. Esse estado consiste em um gás ionizado com seus átomos separados em íons e elétrons.

Ao nosso redor, podemos encontrar plasmas em fenômenos naturais e em aplicações tecnológicas. Como exemplos de fenômenos naturais, podemos citar as auroras boreais e austrais, os raios, algumas chamas de elementos específicos. Já em aplicações tecnológicas, podemos encontrar plasmas em fornos de fundição de metais, usos biomédicos, soldadores, tubos de raios catódicos (CRT), fabricação de chips e componentes eletrônicos, indústria alimentícia e têxtil, dentre outros (Chen, 2012; ?; Orem *et al.*, 2019; Zille *et al.*, 2015).

Saindo da superfície do planeta Terra, podemos encontrar plasmas na Ionosfera, nos cinturões de Van Allen e no Vento Solar. Mas nem todo gás ionizado pode ser considerado plasma, com alguns critérios a serem cumpridos para que a matéria seja classificada como plasma.

“A plasma is a *quasineutral* gas of charged and neutral particles, wich exhibits collective behavior.” (Chen, 2012)

Em tradução livre, “*um plasma é um gás quasineutro composto por partículas neutras e carregadas, e exibe um comportamento coletivo*”. Com base nessa definição, devemos elucidar os conceitos de *quasineutralidade* e comportamento coletivo.

3.1 COMPORTAMENTO COLETIVO EM PLASMAS

Comportamento coletivo pode ser definido como a interação de partes distintas de um determinado volume de plasma (Chen, 2012). Primeiro vamos tomar uma molécula neutra do ar atmosférico. Ela não sofre influência de campos elétricos externos, por ser neutra, e

a força da gravidade será desconsiderada nesse exemplo. Essa molécula neutra se move de forma livre até que colida com outra molécula, e são essas colisões que controlam o seu movimento. Quando aquecemos e ionizamos esse gás, ou seja, temos um plasma, as forças que controlam o movimento das partículas mudam. Por possuir partículas carregadas, elas estão suscetíveis a campos eletromagnéticos. Podem existir concentrações de cargas de uma mesma polaridade em diferentes regiões do volume total do plasma, criando, assim, campos elétricos locais, ou campos magnéticos locais, oriundos do movimento de portadores de carga. Todos esses efeitos se somam às colisões para influenciar o movimento das moléculas.

Assim, um campo eletromagnético em uma determinada região do plasma pode influenciar as partículas carregadas de outra região deste gás ionizado, através da interação dos campos criados. É essa força de Coulomb que atua em grandes distâncias, dentro de determinado volume de plasma, que permite uma vasta gama de interações e movimentos das partículas.

“Because of collective behavior, a plasma does not tend to conform to external influences, rather, it often behaves as if it had a mind of its own.” (Chen, 2012)

Em tradução livre, “*por causa do comportamento coletivo, um plasma geralmente não cede à influências externas, pelo contrário, se comporta como tivesse vontade própria*”.

3.2 Quasineutralidade EM PLASMAS

Seguindo para o conceito de *quasineutralidade*, precisamos primeiro compreender dois conceitos: temperatura em gases e o conceito de blindagem de Debye.

3.2.1 Temperatura

Partindo de um gás em equilíbrio térmico, esperamos encontrar partículas em todas as velocidades possíveis, e, provavelmente, a distribuição estatística dessas velocidades obedece à distribuição Maxwelliana (Chen, 2012). Assim, podemos seguir a seguinte linha de raciocínio: primeiro vamos considerar um gás qualquer, onde as partículas podem se mover apenas em uma dimensão. Dessa forma, temos:

$$f(u) = A \exp \left(-\frac{\frac{1}{2}mu^2}{KT} \right), \quad (3.1)$$

onde $f du$ é o número de partículas por m^3 de velocidades entre u e $u + du$, A é um termo constante, $(1/2) mu^2$ é a energia cinética, K é a constante de Boltzmann – i.e., $K = 1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$ – e T é a temperatura em Kelvin. A densidade n , em m^3 , pode ser descrita como:

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) du. \quad (3.2)$$

E a constante A é relacionada com a densidade n por meio da seguinte fórmula:

$$A = n \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{\frac{1}{2}} . \quad (3.3)$$

A largura dessa distribuição é caracterizada pela constante T . Assim, podemos calcular a energia cinética média das partículas em uma distribuição maxwelliana:

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m u^2 f(u) du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du} . \quad (3.4)$$

Após algumas substituições e reorganizando os termos, temos:

$$E_{av} = \frac{\frac{1}{2} m A v_{th}^3 \frac{1}{2}}{A v_{th}} = \frac{1}{4} m v_{th}^2 = \frac{1}{2} K T , \quad (3.5)$$

onde $v_{th} = (2KT/m)^{1/2}$

Podemos ver pela Eq. (3.5) que a energia cinética média é $(1/2) KT$.

Esse mesmo pensamento pode ser expandido para três dimensões, sendo que, para o sistema tridimensional, a energia cinética média das partículas é igual a $(3/2) KT$.

Como a temperatura e a energia cinética média possuem correlação próxima, é comum encontrar temperaturas como unidade de energia em plasmas. Dessa forma, para evitar confusão, não utilizamos E_{av} , mas sim a energia que corresponde a KT para nos referirmos à temperatura.

Para $KT = 1eV = 1.6x10^{-19} J$:

$$T = \frac{1.6x10^{-19}}{1.38x10^{-23}} = 11600 K . \quad (3.6)$$

Dessa forma, temos que $1eV = 11600 K$.

É interessante observar que um plasma pode ter diversas temperaturas em um mesmo instante de tempo. É comum encontrar íons e elétrons com diferentes temperaturas e diferentes distribuições maxwellianas. Isso ocorre porque a taxa de colisão entre íons ou entre elétrons é maior que entre íons e elétrons. Dessa forma, cada espécie pode ter seu próprio equilíbrio térmico, e o plasma pode não existir por tempo suficiente para que as duas temperaturas se igualem. Na presença de um campo magnético, é possível que uma única espécie de cargas, por exemplo íons, possa ter duas ou mais temperaturas distintas. Isso ocorre porque as forças paralelas ao campo B são diferentes das forças perpendiculares ao mesmo campo, devido a Força de Lorentz (Chen, 2012).

Devemos também mudar um pouco a nossa concepção de alta temperatura e calor quando estudamos plasmas, pois nestes gases ionizados encontramos partículas com temperaturas acima de dezenas de milhares de Kelvin, porém, devido a baixa densidade de elementos, a transferência de calor para outros objetos pode ser reduzida, dando a sensação de frio, como

é o caso dos CAPs.

3.2.2 Blindagem de Debaye

Os plasmas possuem diversas características distintas, sendo uma delas a habilidade de blindar potenciais elétricos externos. Pegamos, por exemplo, dois eletrodos esféricos, e inserimos em um determinado volume de plasma. Um eletrodo está conectado ao polo positivo de uma fonte de energia, e o outro eletrodo está conectado ao polo negativo dessa mesma fonte. Os eletrodos irão atrair cargas de polaridade oposta a sua, com o eletrodo negativo atraindo íons positivos, e o eletrodo positivo atraindo elétrons, cargas negativas. Toda essa movimentação de cargas cria uma nuvem de cargas em torno dos eletrodos. Assumindo que o plasma esteja frio e não exista movimentos térmicos dos portadores de carga, a nuvem em torno do eletrodo seria perfeita, não permitindo que o campo elétrico dos eletrodos penetrasse no plasma (Chen, 2012).

Utilizando esse mesmo experimento, porém agora com um plasma quente, as partículas na borda externa da nuvem podem ter velocidade térmica suficiente para escapar da atração eletrostática do eletrodo. Dessa forma, a borda da nuvem vai ocorrer na região em que a energia térmica das partículas for aproximadamente igual ao potencial eletrostático do eletrodo. Esse escape de partículas pode permitir que potenciais elétricos do eletrodo vazem para o plasma, criando campos elétricos no corpo do plasma.

A distância entre a superfície do eletrodo e a borda externa da nuvem circundante é conhecida como **comprimento de Debye**, ou **esfera de Debye**, e pode ser calculada por:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.7)$$

onde n é a densidade, ϵ_0 é o potencial eletrostático e T_e é a temperatura dos elétrons.

Com isso, poderemos definir o que é *quasineutralidade*, onde, em um sistema com dimensões L muito maiores que o comprimento de Debye (λ_D), concentrações locais de cargas, ou a inserção de um eletrodo externo, serão blindadas por uma nuvem de cargas, deixando o restante do volume do plasma livre de campos, ou potenciais, elétricos. Assim, *aquasineutralidade* diz que o plasma é neutro o suficiente para assumirmos que a densidade de elétrons é igual a densidade de íons, sendo igual também à densidade do plasma. Entretanto, *aquasineutralidade* também diz que o plasma não é tão neutro de modo a impedir a interação e o surgimento de forças eletromagnéticas interessantes (Chen, 2012).

Essa blindagem de Debye só ocorre se tivermos um número suficiente de partículas na nuvem, sendo possível calcular com:

$$N_D = n \frac{3}{4} \pi \lambda_D^3 = \frac{1.38 \times 10^6 T^{\frac{3}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}}. \quad (3.8)$$

Além disso, a condição de comportamento coletivo necessita que $\lambda_D \ll L$ e $N_D \gg 1$. Ou

seja, o volume do plasma tem que ser consideravelmente maior que o comprimento de Debye, e o número de partículas na blindagem tem que ser muito maior que 1.

3.3 CRITÉRIOS PARA PLASMAS

Por fim podemos reunir os conceitos para estabelecer um critério para classificar se gases ionizados estão, ou não, no estado de plasma. A primeira condição vem do conceito do comprimento de Debye, onde este tem que ser muito menor que o espaço ocupado pelo plasma. A segunda condição vem do número de partículas na esfera de Debye, que tem que ser muito maior que 1. Por fim, a terceira condição se foca em colisões. Se as partículas carregadas colidirem bastante com os átomos neutros, temos que o movimento destas partículas será governado por forças hidrodinâmicas, e não por forças eletromagnéticas. Assim, a frequência típica de oscilações do plasma (ω) e o tempo médio entre as colisões com átomos neutros (τ) deve ser maior que 1, para que tenhamos plasma e não um gás neutro levemente ionizado.

- $\lambda_D \ll L$;
- $N_D \gg 1$;
- $\omega\tau > 1$.

Estas condições têm que ser levadas em consideração no desenvolvimento de tecnologias que utilizam plasmas, pois a falha em uma destas condições pode retirar um gás do estado de plasma para um estado levemente ionizado, onde não teremos as condições e subprodutos desejados.

Além disso, plasmas pode ser produzidos por diversos processos, dentre eles aumento de temperatura, fotoionização e descargas elétricas. Aumento de temperatura envolve energizar os átomos neutros a partir do aumento do grau de agitação das moléculas e do subsequente aumento das colisões, de tal forma que, após um certo limiar energético, as colisões são suficientes para ionizar os átomos neutros. Fotoionização utiliza a absorção dos fótons pelos átomos neutros, com energia igual ou maior que a energia de ionização desses átomos. A energia excedente é, então, convertida em energia cinética para o par elétron e íon (Souza, 2013). Por fim, descargas elétricas utilizam campos elétricos para acelerar elétrons livres, de forma que a colisão destes com os átomos neutros gerem os pares íons e elétrons.

3.4 RUPTURA DO AR ATMOSFÉRICO

Este trabalho foca na aplicação de campos elétricos para acelerar os elétrons livres, que, por sua vez, ionizarão os átomos neutros através de colisões. Para compreender a dinâmica desta ionização, iremos estudar e definir alguns parâmetros como a Avalanche de Townsend e a Curva de Paschen.

3.4.1 Descarga de Townsend

Um gás sob condições normais sempre terá um número de íons e elétrons, além das espécies neutras, sendo que, a nível do mar, a densidade de cargas oscila em torno de 1000 íons por cm^3 . Isso se deve ao fato de termos radioatividade no solo, e sermos constantemente bombardeados por radiação cósmica e raios ultravioleta (Howatson, 2013).

Na ausência de um campo elétrico existe um equilíbrio em que a taxa de produção de partículas carregadas é balanceada pela taxa de recombinação. Se um nível baixo de tensão for aplicado, terá um fluxo de corrente pelo gás, devido ao movimento das partículas carregadas na direção dos eletrodos. Porém, essa perturbação é baixa, não sendo o suficiente para romper o equilíbrio. Mas, ao elevarmos o valor de tensão e de corrente o equilíbrio é perturbado pelo movimento das partículas, que atingem os eletrodos e se neutralizam, aumentando a taxa de recombinação, o que reduz o número absoluto de portadores de cargas. Assim, a proporção de aumento de corrente em relação ao aumento de tensão estabiliza, atingindo uma região de saturação (Howatson, 2013). O total de cargas que chegam aos eletrodos é, então, igual ao número de cargas sendo criadas, e pode ser descrita por:

$$j = eD \frac{dn}{dt}, \quad (3.9)$$

onde D é a distância entre os eletrodos, e é a carga do elétron e dn/dt é a taxa de produção de partículas carregadas por unidade de volume, assumindo que todas estão com cargas unitárias. Esta densidade independe do valor do campo elétrico ou da mobilidade, e é conhecida como corrente de saturação (Howatson, 2013).

Em plasmas de baixa pressão, de apenas algumas dezenas à centenas de *Torr*, e em condições normais, com campos da ordem de algumas dezenas de volts, a descarga possui pouquíssima cintilação, sendo que a indução de partículas carregadas pode ser comparada com a geração de pares íon-elétrons gerados pela influência de radiação UV, vento solar, entre outros. Uma vez que a saturação é alcançada, a tensão entre os eletrodos é aumentada, até que a corrente passe a aumentar novamente. Essa relação é dependente da pressão do gás em questão, pois é necessário um caminho livre médio mínimo para a movimentação das partículas carregadas antes da recombinação. Após um certo limiar, para um mesmo valor de tensão, a corrente pode assumir uma vasta gama de valores, como pode ser observado na Fig. 3.1, que traz a descarga característica de Townsend (Howatson, 2013). O valor de tensão de V_B é conhecido com tensão de ruptura, e seu valor está na ordem de centenas de volts, dependendo da geometria e distância dos eletrodos, temperatura, pressão, composição do gás, entre outros.

A medida que o campo elétrico E aumenta entre os eletrodos, os elétrons que saem do cátodo são acelerados com mais energia, aumentando as colisões até que essa energia da colisão fica frequentemente acima da energia de ionização dos átomos neutros, ionizando-os e criando assim mais elétrons. Estas cargas adicionais podem também ionizar outras espécies, resultando no aumento de corrente a partir do valor de saturação, onde existem mais elétrons atingindo o anodo por segundo, do que estão deixando o cátodo.

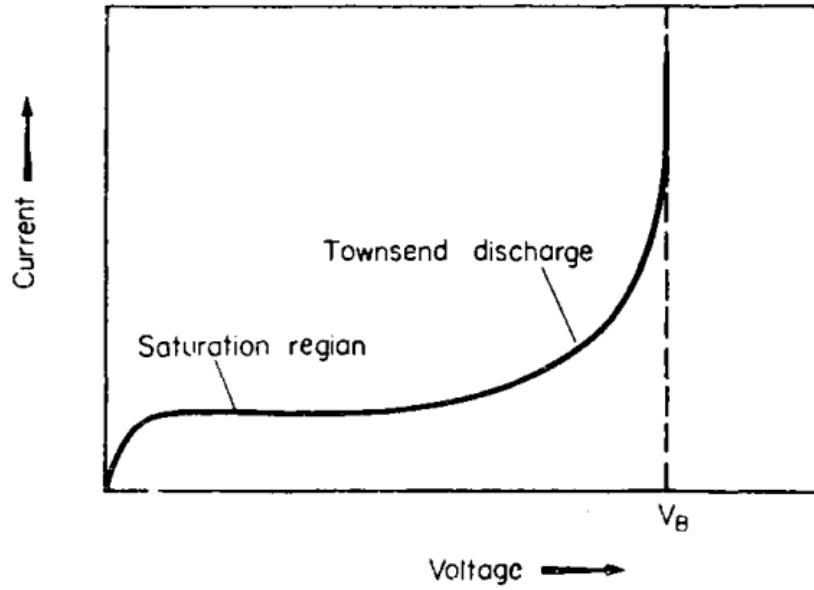


Figura 3.1. Curva característica da Descarga de Townsend. Na imagem é possível observar a região de saturação, assim como a Descarga de Townsend que antecede a ruptura do gás, ao atingir o potencial de V_B . Fonte: (Howatson, 2013).

Townsend, então, introduz uma quantidade α , conhecida como o *coeficiente de primeira ionização de Townsend*, e é definida como o número de colisões ionizantes médias feitas por um elétron enquanto viaja 1 cm na direção do campo elétrico. Este coeficiente está relacionando com a seção de choque, ou probabilidade de ionização por colisões eletrônicas. (Howatson, 2013)

Se considerarmos que existe um aumento na quantidade de cargas dn , sobre uma distância dx , cruzando um plano à uma distância x do cátodo, teremos:

$$dn = \alpha n dx . \quad (3.10)$$

Se nós integrarmos todo o caminho entre o cátodo e este plano, teremos:

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha dx , \quad (3.11)$$

ou então se α for independente de x , teremos:

$$n = n_0 e^{\alpha x} , \quad (3.12)$$

onde n_0 é o número de elétrons por segundo deixando o cátodo.

Agora, se o espaçamento dos eletrodos é d , então a corrente no gás, assumindo que nenhum elétron seja perdido através da difusão, será calculada por:

$$i = n_0 e a^{\alpha d} = i_0 e \alpha d , \quad (3.13)$$

onde i_0 é a corrente eletrônica no cátodo e é dependente unicamente do efeito fotoelétrico (Howatson, 2013).

A diferença $i - i_0$ é a corrente de íons positiva no cátodo e é o resultado de todos os choques ionizantes realizados por elétrons no gás, e pode ser ordens de grandeza superior a i_0 . Chamamos de corrente primária este valor de i_0 , e os elétrons que constituem esta corrente são chamados de elétrons primários.¹

Este equacionamento da corrente total i indicam como esta depende do coeficiente α e da distância entre eletrodos d . A Fig. 3.1 está relacionada a distâncias fixas e condições constantes do gás, assim sua forma depende do intensidade de campo E e sua influência no valor de α .

As condições de um gás dependem da pressão e da temperatura independentemente, a densidade por si só não é suficiente por que a temperatura, em teoria, pode afetar a possibilidade de ionização em uma colisão assim como determina as energias médias aleatórias. Entretanto na ionização por elétrons, apenas a energia destes portadores de carga é relevante, e pode ser determinada pela intensidade do campo elétrico. A transferência de energia cinética para o gás é tão diminuta que a temperatura do gás não é afetada pelas energias eletrônicas. Dessa forma, apenas a densidade do gás pode afetar o valor de α para um determinado campo E , e como o aquecimento neste caso é negligenciável, podemos assumir que a temperatura T é constante, e a pressão pode ser utilizada no lugar da densidade (Howatson, 2013).

Apesar de que α possa ser calculado em termos da pressão e do campo elétrico, como não é possível saber o comportamento exato dos elétrons e de todas variações da seção de choque, aproximações devem ser utilizadas de forma a obter resultados próximos aos experimentais. Porém, dando uma certa tolerância nas grandezas envolvidas, podemos chegar em um resultado importante para α (Howatson, 2013).

Se o caminho livre médio de um elétron na direção de um campo elétrico entre todas as colisões com átomos é λ , então a energia média adquirida por um elétron entre as colisões sucessivas é $E e \lambda$. Além disso, α depende da energia das colisões e da seção de choque eletrônica (número de colisões por cm), sendo assim proporcional à pressão do gás em uma determinada temperatura constante (Howatson, 2013). Assim podemos escrever que:

$$\alpha = pf(Ee\lambda) , \quad (3.14)$$

onde p é a pressão do gás, E é o campo elétrico, e é a carga de um elétron, λ é livre caminho médio entre todas as colisões, e f é uma função arbitrária qualquer.

Em uma temperatura do gás constante, podemos fazer uma aproximação onde $\lambda \propto (1/p)$, portanto:

$$\alpha = p F \frac{Ee}{p} , \quad (3.15)$$

¹É possível realizar esta análise também para efeitos onde a radiação externa não está relacionada ao cátodo, mas sim a uma fonte fora do volume de gás, realizando a fotoionização através do volume gasoso. Como este não é o caso do estudo deste trabalho específico com fontes de plasmas frios atmosféricos, não será descrito aqui.

onde F é uma função arbitrária de forma similar a f . Podemos também escrever como:

$$\frac{\alpha}{p} = \phi \left(\frac{E}{p} \right), \quad (3.16)$$

onde ϕ possui uma forma similar a f , visto que e é constante. A forma de ϕ foi primeiro calculada de forma aproximada por Townsend, que obteve o seguinte resultado:

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bp}{E}}, \quad (3.17)$$

onde A e B são constantes que dependem do gás utilizado. Apesar de trazer resultados próximos aos experimentais, isto ocorre apenas sob uma região restrita de E/p (Howatson, 2013).

Podemos medir α , para condições específicas de E e p , em um experimento que varia a distância d e mensura o valor de i , enquanto i_0 , E e p são mantidos constantes. Curvas típicas de α e p em alguns gases são ilustrados na Fig. 3.2.

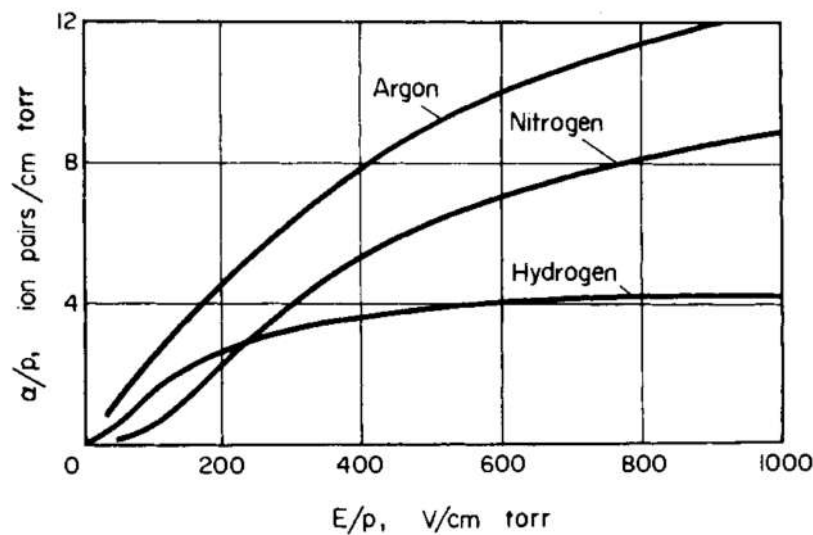


Figura 3.2. Coeficientes de primeira ionização para Argônio, Nitrogênio e Hidrogênio.
Fonte: (Howatson, 2013).

A proporção i/i_0 é comumente chamada de fator de multiplicação eletrônica. Um ponto a ser levado em consideração é que a densidade de corrente j não é utilizada pois a difusão reduz a densidade de corrente a medida que aproximamos do anodo.

3.4.2 Carga Espacial

Ao medirmos o coeficiente de ionização primária α , o campo elétrico deve ser uniforme. Porém, ao passarmos um valor alto de corrente pelo gás, a uniformidade será fortemente prejudicada pela presença de uma carga espacial. Esta grandeza surge devido a diferença de mobilidade entre os elétrons leves e os íons de maior massa, rompendo a condição estável onde temos o mesmo número de íons positivos atingindo o cátodo, e de elétrons correspon-

dentes atingindo o anodo. Próximo ao cátodo, os íons, que são mais lentos que os elétrons, se acumulam até que sua concentração supera aquela de elétrons. Já no anodo, a concentração de elétrons atinge um valor máximo. O resultado destas interações junto com a separação de cargas espacialmente é que, a concentração de íons predomina na maior parte do espaço entre os eletrodos, com os elétrons superando o número de íons em uma distância curta do anodo (Howatson, 2013).

Este rearranjo local de cargas distorce o campo elétrico E entre os eletrodos de acordo com a equação de Poisson:

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial x} = \rho, \quad (3.18)$$

onde ρ é a densidade de carga resultante e x a distância a partir do cátodo.

A distorção do campo E depende do valor de ρ em relação à distância x . Além disso, o valor de α está intrinsecamente conectado ao valor de E , e portanto é maior perto do cátodo, e menor em qualquer outra região, se compararmos ao caso em que temos apenas o campo elétrico uniforme. Porém, os efeitos da carga espacial são diminutos em grande parte dos valores possíveis para a corrente de Townsend, mas deve ser frisado que estas cargas espaciais estão presentes em todas as descargas (Howatson, 2013).

3.4.3 Emissão Secundária de Elétrons

De acordo com a equação Eq. (3.13), um gráfico em escala logarítmica da corrente i em relação à distância d deveria nos dar uma reta, cuja inclinação seria o valor de α . Entretanto, em situações onde o campo elétrico E não é uniforme e constante, essa reta diverge da linearidade, com a corrente i assumindo valores cada vez maiores do que o esperado. A produção extra de partículas carregadas, que causam o aumento da corrente, pode ser explicada por efeitos secundários, entre eles devidos aos íons positivos. As colisões de íons positivos são improváveis de atingir a energia de ionização quando expostas às pequenas tensões, tendo uma possibilidade maior de ionização no bombardeio de íons positivos no cátodo. Para isso Townsend introduziu o conceito de coeficiente de segunda ionização (γ), sendo capaz de ser aplicado tanto para colisões de íons positivos, como para outros efeitos secundários. Este coeficiente γ pode ser definido como o fornecimento de elétrons por íon incidente (Howatson, 2013).

Assim, como antes, podemos definir as seguintes grandezas:

n_0 = elétrons por segundo saindo do cátodo devido à radiação externa;

n_a = elétrons por segundo de todas as fontes que chegam ao anodo;

n_+ = elétrons por segundo saindo do cátodo devido às emissões secundárias;

$n_0 + n_+$ = valor total de elétrons por segundo que saem do cátodo.

Se considerarmos um regime estável, a diferença entre a quantidade de elétrons que chega ao anodo e que sai do cátodo deve ser igual ao número de íons que chega ao cátodo. Além disso, como a multiplicação de elétrons no gás entre os eletrodos deve respeitar a

Eq. (3.13), temos o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
 n_a &= (n_0 + n_+)e^{\alpha d} \\
 n_a - (n_0 + n_+) &= \frac{n_+}{\gamma} \\
 n_a &= n_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \\
 i &= i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} .
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

A corrente, então, aumenta com base no termo $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$, que se por sua vez aumenta proporcionalmente com o aumento da distância d (Howatson, 2013).

Podemos então fazer um gráfico com valores de corrente (i) em escala logarítmica em relação a distância dos eletrodos (d), para uma pressão (p) constante. Com esta curva podemos estimar os valores de emissões primárias (α), e secundárias (γ), onde α equivale à inclinação da curva para valores pequenos de d (onde tal curva se aproxima à uma reta). O valor de γ depende da natureza do gás entre os eletrodos, assim como o material que estes são confeccionados, e normalmente assume valores do ordem de 10^{-2} (Howatson, 2013).

3.4.4 Critério de Townsend

Como visto na Fig. 3.1, a curva característica da descarga de Townsend demonstra um aumento expressivo na corrente ao atingir o limiar da tensão de ruptura (*breakdown*) V_B , podendo atingir várias ordens de grandeza acima, caso o circuito permita. Teoricamente, pela Eq. (3.19), a corrente de Townsend pode ser infinita se $1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0$. Assim, podemos interpretar este comportamento relacionando o aumento de tensão, e por consequência do campo elétrico, de modo a afetar γ e α , de tal forma que esta condição instável é alcançada e a corrente aumenta de forma incontrollável, até que outro fator limitante se faça presente (Howatson, 2013). Essa condição pode ser escrita como:

$$\gamma e^{\alpha d} = \gamma + 1 , \tag{3.20}$$

ou, como $\gamma \ll 1$,

$$\gamma e^{\alpha d} = 1 , \tag{3.21}$$

que é conhecido também como **Critério de Townsend**, ou critério de faísca. Aqui, temos que $\gamma e^{\alpha d}$ representa a quantidade de elétrons secundários emitidos por $e^{\alpha d}$ íons positivos. Este critério então define a reação em cadeia onde cada elétron primário produz um elétron secundário, que então continua o processo produzindo mais elétrons secundários. Neste ponto a produção de elétrons se torna independente de fatores externos, antes essencial para esta ionização, e a descarga se torna autossustentável (Howatson, 2013).

3.4.5 Lei de Paschen

Partindo das Eqs. (3.16) e (3.21), e utilizando $\gamma = \psi\left(\frac{E}{p}\right)$, podemos escrever que:

$$\psi\left(\frac{E}{p}\right) e^{p\psi\frac{E}{p}d} = 1, \quad (3.22)$$

ou, como $V = Ed$ para um campo elétrico uniforme,

$$\psi\left(\frac{V_B}{pd}\right) e^{p d \phi\left(\frac{V_B}{pd}\right)} = 1. \quad (3.23)$$

Este desenvolvimento só é válido se, ao mantivermos constantes a pressão e a distância entre eletrodos pd , a tensão de ruptura V_B também se mantém constante. Dessa forma, V_B depende apenas do produto entre a pressão do gás e o espaçamento dos eletrodos e, para campos uniformes, podemos escrever:

$$V_B = f(pd), \quad (3.24)$$

onde f é uma função que depende de características intrínsecas aos gases e aos eletrodos. Essa equação exprime a relação experimental conhecido como *Lei de Paschen*, sendo válida para a maioria das situações, com algumas exceções (Howatson, 2013).

A relação que independe da temperatura do gás pode ser descrita como:

$$V_B = f'(nd), \quad (3.25)$$

onde n neste caso é a concentração do gás e determina o livre caminho médio, independentemente da temperatura do gás.

Entretanto, a obtenção teórica das funções f e f' , utilizando equações que utilizam o coeficiente α , possuem um alcance limitado onde condizem com resultados experimentais. Porém, a curva característica de V_{LB} em relação ao produto pd possui um ponto em comum, independentemente da combinação de gases e eletrodos, sendo este o valor mínimo de V_B , conhecido como Potencial Mínimo de Ruptura.

A Fig. 3.3 ilustra algumas curvas experimentais para os gases Hidrogênio (H_2), Argônio (Ar), Neônio (Ne) e uma mistura de Neônio com 0.1% de Argônio. É possível observar que, apesar de os gases puros de Argônio e Neônio, separadamente, possuírem valores mínimos distintos, a mistura destes reduz drasticamente a tensão de ruptura, devido à interação (colisões) entre os átomos diferentes. Nesta situação a mistura fica conhecida como Mistura Penning. Além disso, eletrodos que possuem uma função trabalho menor, como é o caso dos metais alcalinos, possuem a tendência de atingir valores maiores de γ , obtendo assim tensões de ruptura menores (Howatson, 2013).

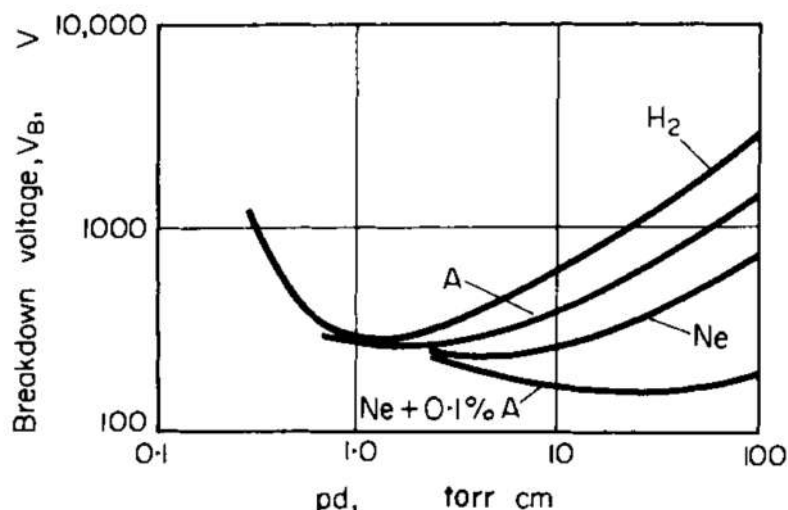


Figura 3.3. Curva de Paschen para os gases Argônio (Ar), Hidrogênio (H_2), Neônio (Ne) e uma mistura de Argônio e Neônio. É possível observar a variação na tensão mínima de ruptura (V_{Bmin}) para diferentes gases, puros e em mistura, quando submetidos à campos elétricos uniformes. Fonte: (Howatson, 2013).

3.4.6 Ruptura para campos não-uniformes

Ao aplicarmos a teoria da Descarga de Townsend para um campo não-uniforme, o produto αd deve então ser substituído por: $\int_0^d \alpha dx$. A variação de γ , causada pela variação do campo elétrico na região do cátodo, implica que a tensão de ruptura V_B depende da polaridade. Todavia, as curvas da tensão de ruptura para campos não-uniformes, para uma determinada geometria, ainda possuem uma correspondência com a tensão mínima de ruptura V_{Bmin} vista nas curvas de Paschen para campos uniformes (Howatson, 2013). Estas descargas de campos não-uniformes são conhecidas também como descargas do tipo Corona.

Em pressões atmosféricas, o comportamento da curva de Paschen ocorre de forma similar aos gases em pressões baixas, onde a tensão de ruptura é, aproximadamente, linearmente proporcional ao produto da pressão pela distância. Experimentalmente, para condições de pressão e umidade do ar atmosférico, o valor de ruptura de 33 kV/cm é bem estabelecido. Essa relação não se mantém verdadeira para valores maiores de pressão do gás.

Estudos em arcos mostraram que avalanches de elétrons ocorrem não apenas na região do cátodo, mas descargas luminosas e concentradas, conhecidas como *streamer*, originam e propagam a partir do anodo. Este comportamento vai contra o Critério de Townsend para descargas em pressões elevadas.

Uma possível explicação para este fenômeno envolve o conceito da carga espacial produzida pela avalanche eletrônica. Os elétrons se movem tão mais rapidamente em comparação aos íons positivos que, no momento em que a avalanche alcança o anodo, os íons ainda estão praticamente na mesma posição, formando uma concentração positiva de cargas na região do anodo que se afina em direção ao cátodo. Esta disposição geométrica de cargas aumenta o campo elétrico e, se for intenso o suficiente, é capaz de gerar avalanches eletrônicas

auxiliares. Estas ocorrem primeiro perto do anodo, onde a carga espacial atinge seu valor máximo, e se movem na direção do cátodo. Toda essa dinâmica ocorre muito rápido, entre nano e microssegundos, e este rápido movimento da carga espacial positiva é chamado de *streamer*, e a ruptura ocorre quando este alcança o cátodo, gerando um excesso de elétrons secundários (Howatson, 2013).

A Fig. 3.4 ilustra a formação de um *streamer*. De fato é possível que esta dinâmica ocorra também em um ponto arbitrário do gás, não sendo restrita ao anodo. Na figura podemos observar a disposição geométrica dos íons positivos, que forma este gradiente de campo elétrico, e que pode gerar avalanches secundárias, produzindo assim cargas espaciais auxiliares.

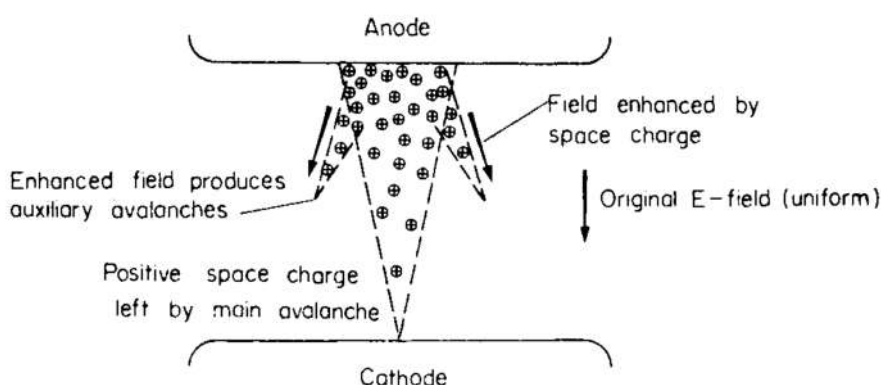


Figura 3.4. Esquema de formação de um *streamer*. Na ilustração é possível observar a geometria em forma de ponta das cargas espaciais, bem como as avalanches secundárias, entre o anodo e o cátodo. Fonte: (Howatson, 2013)

3.4.7 Descarga Corona

A ruptura em pressão atmosférica e submetida à campos não-uniformes é, assim como em baixas pressões, dependente da geometria dos eletrodos e de sua polaridade. Entretanto possui uma diferença bem distinta das descargas em baixas pressões, o surgimento de uma descarga corona, que é muito similar a uma descarga quiescente (*glow discharge*). No desenvolvimento de aplicações que utilizam altas tensões, o estudo de descargas corona se torna imprescindível devido à perdas de potência nestas descargas. Entretanto, o foco de desenvolvimento deste trabalho utiliza justamente este tipo de descarga para a produção dos subprodutos desejados no processo de eliminação de contaminantes biológicos.

Apesar de que a descarga corona não é uma ruptura propriamente dita, ela pode carregar consigo correntes expressivas, de alguns mA, e pode ser auto-sustentável. Se dois fios paralelos, por exemplo, estão submetidos à uma tensão DC elevada o bastante, uma zona luminosa aparece ao redor dos condutores, sendo que o fio positivo possui um brilho aparente mais uniforme (Howatson, 2013).

Para um ponto qualquer no ar atmosférico, que possua uma carga espacial positiva e esteja entre dois eletrodos, um fluxo de corrente elétrica surge, capaz de atingir alguns mA,

sendo proporcional à tensão do campo elétrico externo. Esta corrente se mantém limitada até que a ruptura ocorra, criando um caminho de baixa impedância capaz de suportar correntes sete ordens de grandeza superiores. Antes de ruptura, para um campo oscilante de alguns KHz , a corrente aumenta até um determinado limite, atingindo um ponto que permite uma descarga do tipo corona e autossustentável. Os pulsos de cargas excitados pela frequência do campo oscilante conectam os eletrodos através de *streamers*, até que a ruptura ocorra.

Esta descarga corona pulsada depende da distância em que o campo elétrico E , e por consequência o coeficiente de primeira ionização α , tenham um valor significativo capaz de permitir a ocorrência de avalanches eletrônicas. É então possível adaptar a formulação em descargas DC com gases em baixas pressões para descargas coronas pulsadas, de alguns KHz . Podemos utilizar o conceito do critério de Townsend sob a perspectiva que cada avalanche deve, em média, produzir um elétron novo através da fotoionização. Assim, para um ponto com carga espacial positiva, podemos usar a interação com os elétrons secundários oriundos do cátodo. Já para um ponto com carga espacial negativa, a corrente da descarga corona flui também em pulsos, cuja frequência natural depende da corrente da descarga, da ordem de $5\text{ kHz}/\mu A$ em pressão atmosférica. Dessa forma, o critério para a existência da descarga corona pode ser formulado em termos de γ e α (Howatson, 2013).

Como a descarga corona ocorre antes da ruptura dielétrica do ar atmosférico, podemos analisar o critério para a sua formação levando em consideração o limiar entre as regiões da curva de Paschen, no limite anterior à ruptura.

Partindo da Eq. (3.17), e dado as devidas aproximações, podemos escrever o coeficiente primário de ionização α como:

$$\alpha = A p e^{-\frac{B p}{E}}, \quad (3.26)$$

onde A e B são valores constantes do gás em estudo, p é a pressão, e é a carga de um elétron e E é o campo elétrico entre os eletrodos. Este campo elétrico é influenciado pela carga espacial, que é descrita pela Eq. (3.18).

Já para o coeficiente de ionização secundária γ , podemos partir da Eq. (3.19) que trata da corrente na região de ruptura. Assumindo que a corrente na descarga corona é equivalente à corrente de saturação na descarga de Townsend, iremos assumir que, para este caso específico, $i \approx i_0$. Assim, podemos fazer o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} i_0 &= i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \\ 1 &= \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \\ e^{\alpha d} &= 1 - \gamma e^{\alpha d} - \gamma. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Como na ruptura, pela Eq. (3.21), temos que $\gamma e^{\alpha d} = 1$ pode ser reescrito como:

$$e^{\alpha d} = 1 - 1 - \gamma$$

$$\gamma = -e^{\alpha d}, \quad (3.28)$$

onde γ é o coeficiente de ionização secundária, e é a carga de um elétron, α é o coeficiente de ionização primária e d é a distância dos eletrodos. Esta forma de representar *gamma* depende de algumas aproximações, como a relação $i = i_0$ no instante anterior à ruptura, sendo então um valor aproximado.

Este trabalho foca na ionização através de campos DC, com pulsos na ordem de 10^4 Hz , produzindo descargas do tipo corona. Porém, ainda podemos estudar os mecanismos de ionização de gases através de sinais alternados com frequências superiores à 100 kHz , ou verificando a descarga através de uma barreira dielétrica (*Dielectric Barrier Discharge - DBD*), que, entretanto, não são o objeto deste estudo.

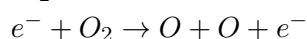
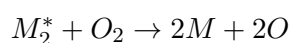
4 MECANISMOS DE INVIABILIZAÇÃO BIOLÓGICA

Plasmas podem inativar contaminantes biológicos através de diferentes mecanismos, podendo ser pela produção de radicais livres, espécies reativas de nitrogênio e oxigênio, campos elétricos, partículas carregadas, radiação ultra-violeta, entre outros (Chen *et al.*, 2022a; Kaushik *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022b). Estes mecanismos podem agir de forma direta, ou indiretamente, na esterilização de uma superfície. Por exemplo, a produção de radicais livres pode agir oxidando diretamente os contaminantes, através da difusão do plasma ao redor do objeto a ser descontaminado, ou diluindo em um meio líquido os produtos da descarga corona, para ser utilizado posteriormente como antisséptico (Chen *et al.*, 2022a; Kaushik *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022b).

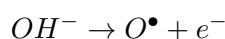
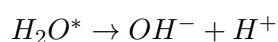
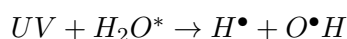
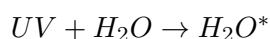
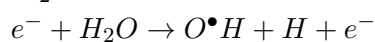
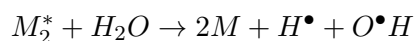
As espécies reativas nos plasmas frios atmosféricos podem ser: oxigênio atômico, radicais de hidroxila, peróxido de hidrogênio, superóxidos e ozônio. Essas espécies podem interagir com o meio líquido e criar diferentes compostos no plasma, na interface entre o plasma e a superfície, e no interior do meio líquido (Kaushik *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022b).

De acordo com (Kaushik *et al.*, 2023), dentre as reações químicas em CAPs que geram espécies reativas, podemos citar:

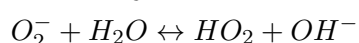
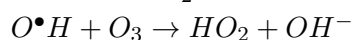
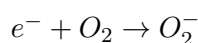
- Oxigênio Atômico:

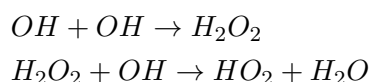


- Radical Hidroxila:

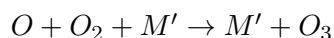


- Peróxido de Hidrogênio:





- Ozônio:



Estes subprodutos podem eliminar fungos e bactérias e inviabilizar vírus através da peroxidação da membrana lipídica, danificando o DNA plasmídeo, quebrando as cadeias de DNA/RNA cromossômico, induzindo estresse oxidativo, desnaturação de proteínas e oxidação de aminoácidos.

Dentre os diversos subprodutos na geração de plasmas, que podem efetivamente afetar material biológico, não iremos estudar os efeitos térmicos ou a emissão de radiação gama e raios x. Por ser um Plasma Frio Atmosférico a temperatura não se torna um fator, sendo que a superfície do objeto tratado não sofre variações significativas em temperatura. Além disso, nos níveis de potência utilizados na ionização do gás de trabalho, nos dispositivos criados nesta pesquisa, não temos a geração de radiação ionizante de forma significativa. Assim, a produção dos subprodutos do plasma depende da interação energética que cria o plasma em si, das reações em sua pluma e na interação entre a superfície e o plasma.

Quando temos a mistura de gases, entre o ar atmosférico no estado de plasma e outros gases, que podem ser introduzidos na descarga, centenas de reações podem ocorrer, sendo estudadas em diversos trabalhos, através da espectroscopia ou outros métodos. Muitos destes processos levam a criação de espécies reativas de hidrogênio e oxigênio (Chen *et al.*, 2022b).

Um dos principais subprodutos de plasmas atmosféricos é o radical hidroxila ($^{\cdot}OH$), responsável por diversos efeitos nos tratamentos utilizando CAPs. Dentre estes efeitos este radical tem propriedades bactericidas, podendo destruir a membrana celular, ou interagindo com o DNA e outras estruturas intracelulares. Sua produção ocorre no interior da descarga, utilizando a umidade do ar, e tem sua eficácia máxima quando age rapidamente sobre o contaminante biológico, visto que rapidamente reage com outros elementos, possuindo uma meia-vida bastante reduzida (Gorbanev *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2012; Zhou, 2018). Além disso a formação do radical hidroxila é importante para a formação do peróxido de hidrogênio.

Outro precursor do peróxido de hidrogênio e um forte oxidante é o superóxido ($O_2^{\cdot-}$), que é neutralizado no interior das células através da enzima *superóxido dismutase*. Este oxidante possui uma curta vida útil, sobrevivendo curtos período dissolvido em soluções aquosas. Como possui uma habilidade limitada em atravessar as membranas celulares, geralmente seu papel oxidante ocorre na superfície das células (Bowler *et al.*, 1992; Vaze *et al.*, 2017).

O processo de produção do oxigênio atômico é, em grande parte, guiado por interações eletrônicas, que possuem uma forte influência em células. O acúmulo de cargas nos contaminantes biológicos pode gerar um estresse oxidativo na célula e também, assim como na coluna de plasma, interagir na superfície celular para produzir o oxigênio atômico. Outra reação importante nessa interação é a produção do oxigênio singleto ($O_2(^1\delta g)$), um metaestável do oxigênio molecular, altamente reativo e oxidativo, possui a capacidade de começar o processo

de oxidação lipídica (Wu *et al.*, 2012). Este oxidante pode ser neutralizado também pela enzima SOD, forçando um comportamento antioxidante por parte de algumas células (Sies *et al.*, 2017; Hirano *et al.*, 2019).

Os efeitos do ozônio (O_3) foram bastante estudados e possuem uma literatura extensa, abordando diversas aplicações e tratamentos, desde esterilização, limpeza, tratamentos estéticos e preventivos. Este composto é uma alotropia do oxigênio, com um odor característico e uma alta capacidade oxidativa. Apesar de ser instável em condições ambientes, decaindo rapidamente em oxigênio molecular, possui uma meia-vida maior que alguns dos outros subprodutos, conseguindo agir em distâncias maiores da fonte geradora do plasma, podendo perdurar desde alguns minutos até algumas horas. Em certas quantidades e tempo de exposição é considerado tóxico para o ser humano, interagindo com a estrutura interna pulmonar.

O radical hidroperoxila (HO_2^*) é um composto produzido em descargas atmosféricas pela interação entre um hidrogênio livre e o oxigênio molecular. apesar de ser formado também pela reação entre hidróxido com o peróxido de hidrogênio. Possui uma capacidade oxidativa e é um conhecido radical livre (Gianella *et al.*, 2018).

Óxido nítrico (NO) e outros compostos baseados em NO_x são produzidos nas descargas atmosféricas quando existe a presença de nitrogênio e oxigênio, como é o caso de ar atmosférico. A principal cadeia de produção parte da formação do óxido nitroso e da dissociação em óxido nítrico na presença de oxigênio livre ou ozônio (Malik, 2016). A presença deste composto na água ativada por plasma mostrou aumentar a ativação macrofagia celular e eficácia, assim como induzir a apoptose celular em células cancerígenas (Li *et al.*, 2017). Além disso pode influenciar o crescimento de leveduras, agindo como fertilizante em baixas concentrações, e matando as células em concentrações elevadas (Tian *et al.*, 2017).

A concentração destas espécies reativas, tanto de oxigênio (ROS) e de nitrogênio (RNS), podem ter benefícios em certas concentrações, mas podem até promover a morte celular. O óxido nítrico pode formar peroxinitrito, promovendo o stress oxidativo, ou mediando a toxicidade celular (Di Meo *et al.*, 2016; Pacher *et al.*, 2007).

Outras reações podem ocorrer nas descargas CAPs nestes reatores à plasma, dependendo dos gases utilizados no processo de ionização e da composição do meio exposto ao plasma. Para este desenvolvimento, o gás de trabalho é o próprio gás atmosférico, possuindo em sua mistura de gases as proporções vistas na tabela 4.1. A figura 4.1 traz a concentração relativa de íons positivos de um jato de plasma, medidos utilizando um espectrômetro de massa.

Estes produtos da ionização do ar atmosférico podem contribuir de quatro formas para a eliminação de contaminantes biológicos, sendo: erosão da parede celular, danos a membrana celular, destruição do material genético e desnaturação de proteínas e enzimas. A disfunção da parede celular bacteriana e possível rompimento são resultado da sinergia entre as espécies reativas produzidas pela descarga de plasma e o próprio micro-organismo (Chen *et al.*, 2022b; Bartis *et al.*, 2013; Ehlbeck *et al.*, 2010). Estas espécies reativas podem atravessar a parede celular, desregulando sua função através da oxidação, e o acúmulo de cargas

Tabela 4.1. Composição média do ar atmosférico. Fonte: (Brasseur e Solomon, 2005)

Composto	Fração Molar
Nitrogênio (N_2)	78.084×10^{-2}
Oxigênio (O_2)	20.946×10^{-2}
Dióxido de Carbono (CO_2)	370×10^{-6}
Argônio (Ar)	9340×10^{-6}
Neônio (Ne)	18.18×10^{-6}
Hélio (He)	5.239×10^{-6}
Criptônio (Kr)	1.14×10^{-6}
Xenônio (Xe)	0.086×10^{-6}
Ar atmosférico	1

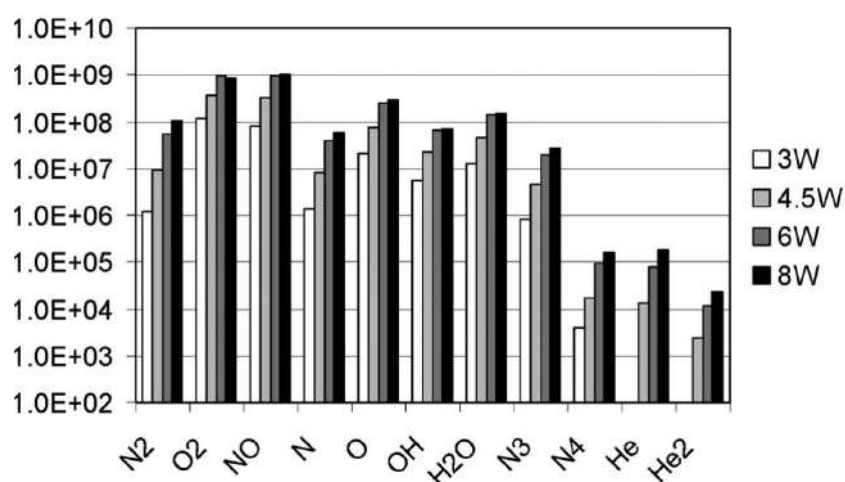


Figura 4.1. Concentração relativa das moléculas em um jato de plasma utilizando ar atmosférico como precursor, para diferentes potências de descarga. Fonte: (Stoffels *et al.*, 2008)

pode romper a membrana através da repulsão eletrostática (Chen *et al.*, 2022b; Padan e Schuldiner, 1987).

As espécies reativas de oxigênio (ROS) podem também promover a oxidação de ácidos-graxos, ácidos nucleicos, e aminoácidos através de interações com a membrana lipídica, causando modificações em sua funcionalidade. Como resultado, estas espécies reagem com proteínas e com o DNA, causando mudanças oxidativas (Chen *et al.*, 2022b). A peroxidação dos lipídios presentes na célula promovem a produção de outras espécies reativas, através da decomposição catalítica na presença de íons metálicos ou degradação química, produzindo radicais hidroxila, oxila e aldeídos, que interagem com o DNA, promovendo a morte celular. Além disso, o dano oxidativo do DNA pode impedir a divisão celular formando dímeros de tiamina e quebra de cadeia. Na desnaturação de proteínas e enzimas, as espécies reativas de oxigênio promovem mudanças secundárias, levando a perdas de reconhecimento e da função catalítica (Chen *et al.*, 2022b).

Estas espécies reativas podem ainda ser solúveis em água, produzindo um solução rica em oxidantes, conhecida como água aprimorada por plasma (Plasma Water - PW). Esta solução possui diversas propriedades, que podem ser controladas a partir do tempo de exposição

e composição dos gases precursores, podem ser utilizada como fertilizante (Chen *et al.*, 2022b), antisséptico e agente de limpeza, podendo ser utilizada no lugar do álcool para desinfecção de mão e superfícies, demonstrando efeitos significativos na inativização do vírus SARS-COV-2, mesmo após ser armazenada por 30 dias (Chen e Wirz, 2020). A Fig. 4.2 ilustra as reações químicas que ocorrem quando uma solução aquosa é submetida ao plasma atmosférico, para a produção da água aprimorada por plasma.

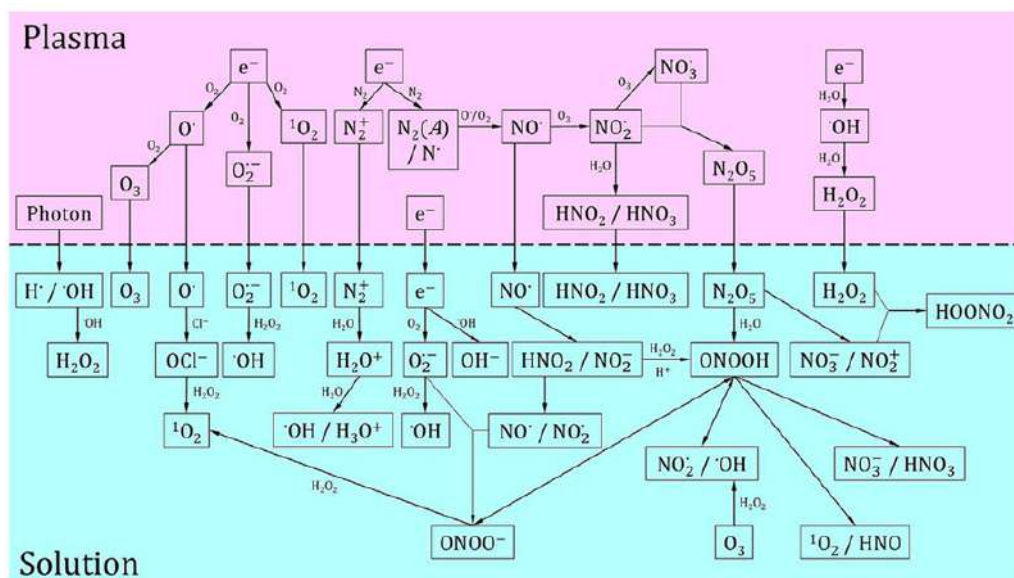


Figura 4.2. Diagrama contendo algumas espécies reativas de nitrogênio e oxigênio (RONS) criadas a partir da ionização do ar atmosférico, e como estas se comportam quando dissolvidas em água, criando assim a água aprimorada por plasma.

Fonte: (Chen e Wirz, 2020)

5 FONTES DE PLASMAS

Dentre as diversas formas que podemos energizar um gás para que este atinja o estado de plasma, neste trabalho iremos focar em métodos que utilizam campos elétricos, podendo estes ser contínuos (DC) ou alternados (AC). Além disso, a orientação e geometria dos eletrodos influenciará diretamente na descarga e como os subprodutos alcançarão os contaminantes biológicos. Portanto, primeiro veremos os tipos de descargas em reatores CAP, e em seguida, será estudado a forma como estes campos serão gerados, com os requisitos de baixo custo, disponibilidade, e baixo consumo energético em mente.

5.1 TIPOS DE DESCARGA

Dentre as diversas categorias para classificar os reatores dessa tecnologia (Chen *et al.*, 2022b; Schmidt *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021), iremos dividi-los primeiramente em quatro categorias, sendo elas:

- Jato de plasma;
- Descarga da barreira dielétrica (DBD);
- Descarga Corona (ou quiescente);
- Arco elétrico.

Jatos de plasma são uma extensão da região primária de ionização, se comportando como uma coluna, ou pluma, de gás ionizado a partir do centro da criação do plasma. Os reatores que utilizam esta tecnologia, tipicamente, possuem um arranjo concêntrico, com uma estrutura anelar de eletrodos e com o fluxo de gás fluindo pelo canal central. Como método de ionização primária utilizam a descarga corona, mas podem ser construídos reatores com descargas DBD, RF e com arcos elétricos (Chen *et al.*, 2022b; Lu *et al.*, 2016; ?). Por utilizar a extensão da pluma para o tratamento, neste tipo de sistema não é preciso que o contaminante, ou objeto a ser tratado, passe por entre os eletrodos, dependendo do fluxo de espécies reativas na saída do reator (Zhou *et al.*, 2020). Devido a sua característica singular, possui uma pequena área efetiva de tratamento, sendo que, para obter o efeito biocida em uma superfície maior, se faz necessário o uso de vários reatores deste tipo, com agrupamentos sendo utilizados para tratar superfícies maiores. Porém, devido à menor área de influência, este tipo de fonte de CAP pode ser utilizado para tratamentos pontuais, como por exemplo em tratamentos

estéticos, odontológicos e terapias oncológicas (Robert *et al.*, 2015; Maho *et al.*, 2021; Omran *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2012; Cao *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2022b).

Já os dispositivos que utilizam a ruptura da barreira dielétrica (DBD) podem ser construídos de forma plana ou com cilindros concêntricos. Eletrodos planos possibilitam uma área de atuação maior, assim como a uniformidade da descarga. Já a geometria com eletrodos coaxiais é comumente utilizada em tratamentos localizados, ou quando o próprio gás fluindo pelo reator é o alvo a ser descontaminado, podendo ser utilizado como filtros (Chen *et al.*, 2022b; Chen *et al.*, 2022a; Domonkos *et al.*, 2021).

Descargas do tipo corona, conhecidas também como quiescentes (*glow discharges*), podem ser utilizadas quando arcos e fagulhas podem danificar o alvo de tratamento, ou o equipamento em si. A falta de arcos de corrente elevada torna este tipo de reator seguro para ser utilizado com tecidos vivos (Chen *et al.*, 2022b; Abd Allah e Whitehead, 2015). Um modo de operação pulsado, com campos oscilantes na faixa de kHz, contribuem para a supressão de arcos com maior energia, além do uso de gases nobres, visto que gases moleculares tendem a favorecer a formação de mais *streamers*.

Arcos elétricos na ionização de gases são caracterizados por terem tensões mais baixas, porém correntes elevadas. Podem evoluir a partir de uma descarga do tipo corona, sendo que a descarga precursora depende da emissão termoiônica de elétrons a partir dos eletrodos, que por sua vez está interligada com fenômenos térmicos, químicos e elétricos na região formadora de plasma. Além disso, arcos podem ser utilizados na síntese de particulados micrométricos, dispersão a plasma, bisturis elétricos, produção de gás natural, tratamento de lixo eletrônico, solda de metais, entre outros (Abd Allah e Whitehead, 2015; Chen *et al.*, 2022b).

A Fig. 5.1 ilustra três tipos de descargas atmosféricas comumente utilizadas em aplicações biomédicas, com exemplos de jato de plasma, ruptura da barreira dielétrica (DBD) e fagulhas (arcos elétricos).

É possível também utilizar descargas atmosféricas na dispersão de medicamentos. Através da descarga elétrica, e a subsequente ionização do gás de trabalho, pequenas gotículas são formadas, aumentando consideravelmente a proporção entre área superficial e o volume ocupado, melhorando significativamente a interação das substâncias ativas e o meio aquoso. Água aprimorada por plasma (*Plasma Water*), produzida utilizando este método, possui diversas propriedades antimicrobianas (Chen *et al.*, 2022b). A Fig. 5.2 traz uma ilustração com as espécies geradas no plasma atmosférico, suas interações na interface entre ar e meio aquoso, e as espécies reativas diluídas no meio aquoso.

5.2 SAÍDA DE ALTA TENSÃO AC

Iremos tratar circuitos AC aqueles que produzem sinais de alta-tensão que possuem uma inversão de polaridade, ou seja, que em um determinado instante de tempo t possuem um valor de tensão acima de zero, e em um determinado $t + (T/2)$ possuem um valor de tensão

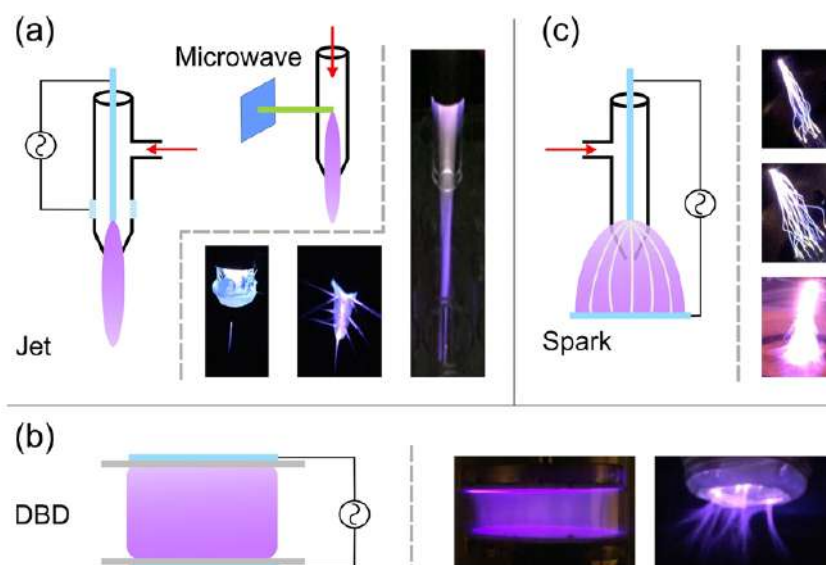


Figura 5.1. Tipos comuns de reatores de plasmas frios atmosféricos utilizados aplicações biomédicas. a) Jato de plasma, podendo ser criado com sinais alternados conectados à eletrodos coaxiais, ou utilizando radiação eletromagnética. b) Descarga da barreira dielétrica, utilizando sinais alternados, ou contínuos. c) Fagulha, ou arco elétrico, nestas aplicações geralmente ocorre a partir de descargas do tipo corona (quiescente), quando níveis mais elevados de corrente são utilizados. Fonte: (Chen *et al.*, 2022b)

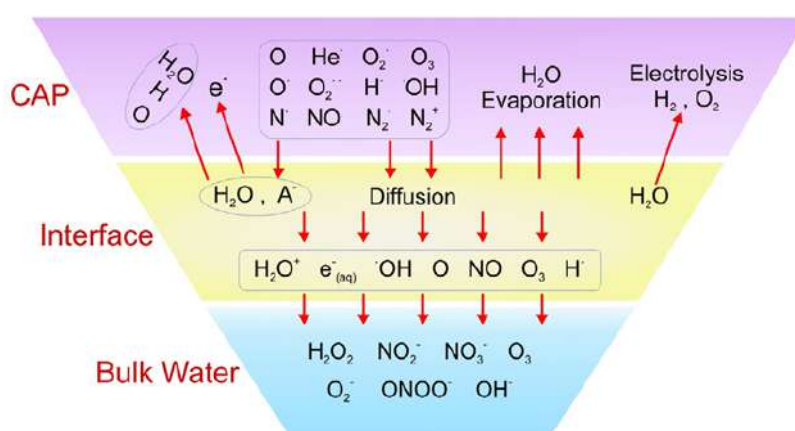


Figura 5.2. Ilustração das espécies reativas encontradas no plasma de ar atmosférico, na interface entre plasma e meio aquoso, e diluídos na água ativada por plasma. Fonte: (Chen *et al.*, 2022b)

de saída abaixo de zero. Assim sendo, terão circuitos com lógica digital, mas que produzem um sinal de alternado de alta-tensão em sua saída.

O Laboratório de Física dos Plasmas desenvolve aplicações tecnológicas com plasmas desde 2002, sendo que em meados de 2012 estudos com um reator para esterilização em baixa pressão foi construído, utilizando um transformador de Neon capaz de gerar tensões de $16,3\text{ kV}$ a uma frequência de 60 Hz (Souza, 2013). Além do circuito com transformadores de lâmpadas NEON, veremos também a topologia *Zero Volt Switching* (ZVS).

5.2.1 Transformadores Neon

Estes transformadores são comumente utilizados em letreiros luminosos que utilizam o gás Neônio. Seu princípio de funcionamento é bastante simples, onde uma relação de espiras entre o primário e o secundário do transformador é responsável por elevar a tensão até dezenas de quilo volts. Em 2012, foi realizado um estudo para verificar as condições de esterilização utilizando uma descarga corona em um ambiente de baixa pressão (em torno de $10^{-4} Torr$), com dióxido de nitrogênio (NO_2) como gás de trabalho (Souza, 2013).

Partindo do equacionamento para transformadores ideais, poderemos analisar o funcionamento do transformador de neon e do VARIAC. Um transformador ideal considera que não existem perdas, as indutâncias são infinitas, e o coeficiente de acoplamento (k) é igual a 1. Assim, a indutância mútua entre as duas bobinas pode ser definida como:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \quad (5.1)$$

onde $0 < k < 1$ (Alexander e Sadiku, 2013).

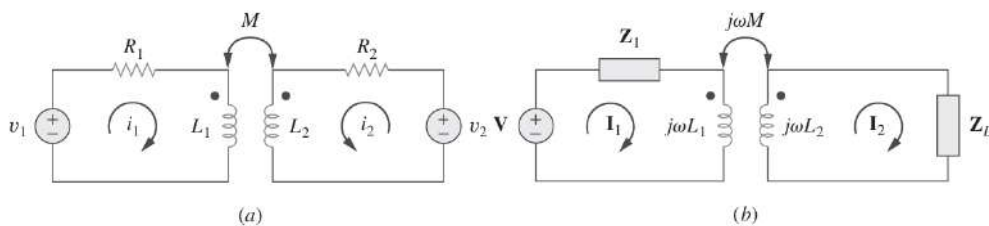


Figura 5.3. À direita temos um circuito de bobinas acopladas, com as variáveis correspondentes para análise no domínio do tempo. Já a direita temos o mesmo circuito de bobinas acopladas, mas com os valores para análise no domínio da frequência.

Fonte: (Alexander e Sadiku, 2013).

Partindo do esquemático da Fig. 5.3, podemos escrever as seguintes equações para a tensão no primário, e secundário, no domínio da frequência:

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2$$

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1$$

usando $I_1 = (V_1 - j\omega M I_2) / j\omega L_1$, podemos chegar na seguinte equação para a tensão do secundário:

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 + \frac{M V_1}{L_1} - \frac{j\omega M^2 I_2}{L_1}$$

Como, para $k = 1$, $M = \sqrt{L_1 L_2}$, podemos escrever:

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 + \frac{\sqrt{L_1 L_2} V_1}{L_1} - \frac{j\omega L_1 L_2 I_2}{L_1}$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} V_1 = n V_1, \quad (5.2)$$

onde n é a relação de espiras para transformadores ideais (Alexander e Sadiku, 2013).

Transformadores reais possuem perdas associadas ao processo de fabricação, e operação dos mesmos, como, por exemplo, a relação da resistividade do enrolamento de cobre com a temperatura, ou a vibração induzida devido aos campos oscilantes, e até mesmo a permeabilidade magnética do núcleo. Além disso, dentre outras fontes de perdas, o fator de acoplamento magnético não é perfeito, com valores abaixo de 1.

O sistema em questão utilizava a união de dois transformadores, sendo um do tipo *VARIAC*, capaz de regular em sua saída uma tensão alternada entre 0 e 220 V. Em seguida, esta tensão excitava o primário de um transformador Neon, gerando em sua saída tensões indo de 0 a 16 kV, com uma corrente de saída em torno de 10 mA (Souza, 2013). Na Fig. 5.4, temos o esquema dessa ligação.

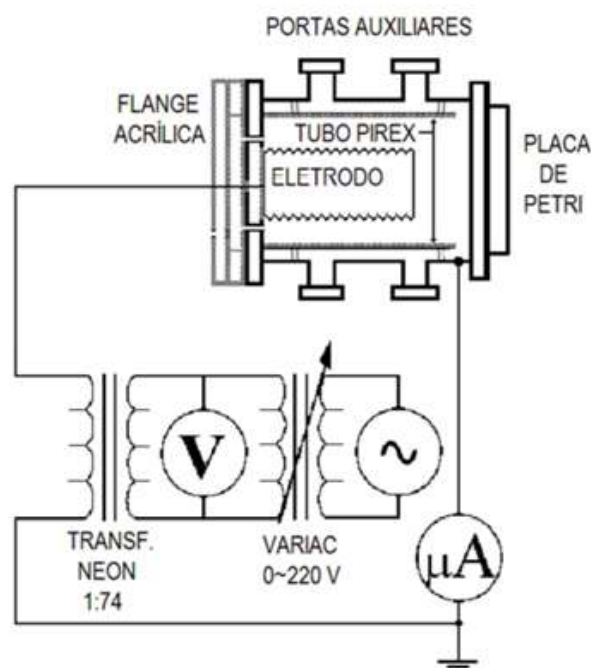


Figura 5.4. Esquema de ligação do transformador variável, com o transformador Neon, nos experimentos realizados anteriormente no LFP/UnB. Fonte: (Souza, 2013).

Com este sistema é possível ionizar o ar atmosférico em condições ambientes, com distâncias de alguns centímetros entre os eletrodos. É possível utiliza-lo para gerar descargas do tipo DBD, corona e arco. Porém, os pontos negativos são o seu tamanho e peso dos transformadores, a potência consumida e a baixa frequência de operação. Sistemas com frequências maiores de excitação do plasma conseguem, para as mesmas condições de eletrodos, produzir uma maior densidade de espécies reativas, pelo fato de ter mais repetições, por segundo, da dinâmica de ionização do gás.

5.2.2 Topologia ZVS

O termo ZVS significa *Zero Volt Swicthing* (Cruzamento de Zero de Tensão), que se traduz em circuitos cujo sinal de tensão cruza o nível zero de forma cíclica, assumindo um caráter positivo em um instante de tempo, e negativo em outro, repetindo esta excursão entre os dois níveis de tensão de operação. Em essência, um transformador AC pode possuir em sua saída um valor de tensão entre duas polaridades opostas, porém esta nomenclatura ZVS é reservada para circuitos ativos que, através do uso de chaves e sinais de controle, promovem essa passagem entre tensões positivas e negativas.

Neste tipo de circuito encontramos dois transistores, atuando como chaves, funcionando de forma alternada. Com isso, uma polarização alternada alimenta um circuito tanque LC, que por sua vez excita o primário de um transformador. No secundário deste transformador teremos uma saída alternada podendo ter um ganho de tensão ou de corrente, dependendo dos parâmetros de projeto do transformador. Este tipo de circuito também pode ser caracterizado como um multivibrador estável, sendo que ele fica oscilando indefinidamente entre os estados possíveis.

No instante que o circuito inicia, devido a diferenças sutis nos componentes, oriundas do processo de fabricação dos mesmos, um transistor conduz antes do outro. Assim, um transistor estará como uma chave fechada, enquanto o outro estará como uma chave aberta. A medida em que o capacitor carrega, o nível de tensão no dreno do MOSFET eleva, fazendo com que a tensão na base do segundo MOSFET suba também, até o momento em que este passe a conduzir. Neste momento ocorre uma queda de tensão no gate do primeiro transistor, fazendo com que ele pare de conduzir. A medida que o capacitor carrega no outro sentido, a tensão no dreno do segundo MOSFET aumenta, fazendo com que o primeiro transistor passe a conduzir, repetindo assim o ciclo de carga e descarga no circuito tanque. A frequência com que os transistores oscilam pode ser calculada por:

$$f_{ressonante} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (5.3)$$

onde L é a indutância e C a capacitância dos componentes do circuito tanque. É comum que esta indutância seja o primário do transformador do circuito.

Como este circuito trabalha na ressonância de seus componentes, ocorrem ganhos de tensão e corrente significativos, que devem ser levados em consideração na escolha dos componentes, pois falhas catastróficas podem ocorrer com picos reversos de tensão e corrente. Porém esta característica, para o objetivo deste trabalho, trás pontos negativos consigo, com um consumo energético elevado na entrada do circuito, aumentando o custo de construção e operação do dispositivo. Além disso, com uma maior potência de entrada, a descarga de alta tensão pode fornecer potências maiores para o plasma que, para esta aplicação, ocasiona desgastes aos eletrodos e danos ao substrato.

5.3 SAÍDA DE ALTA TENSÃO DC

Dentre as possíveis formas de atingir altas tensões, como geradores *Cockcroft–Walton*, multiplicadores de tensão, conversores DC–DC do tipo *boost*, o objetivo em comum é atingir altos níveis de tensão DC, de forma contínua ou pulsada.

Neste trabalho foram estudadas formas de atingir altas tensões utilizando transformadores do tipo *flyBack*, específicos para televisores de Tubos de Raios Catódicos (CRT), que internamente possuem diodos retificadores. Assim teremos na saída do transformador pulsos DC de alta tensão. É importante ressaltar que também existem transformadores *flyback* com saída puramente alternada, com características distintas.

Para este trabalho, apesar o transformador em questão ser do tipo *flyback*, o enrolamento primário de fábrica dele é ignorado, sendo utilizado um enrolamento primário externo ao transformador, obtendo o modo de operação comum para estes transformadores. As conexões referentes ao *flyback* e as sucessivas subdivisões de tensão nos secundários do transformador em questão foram ignoradas, sendo utilizado apenas a saída de alta tensão do mesmo.

Para excitar o primário do transformador foi utilizado um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), onde ao controlarmos do ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) e a frequência da onda quadrada podemos modificar a saída do transformador e o consumo de energia do circuito. Durante o desenvolvimento foi possível perceber a relação entre o número de espiras no primário, e a frequência de ressonância do transformador, e como estes parâmetros afetavam a ionização do ar atmosférico, o surgimento de arcos elétricos, a potência consumida pelo sistema e o aquecimento dos componentes.

5.3.1 Transformador *flyback*

Este tipo de transformador possui um conjunto de espiras envoltos no mesmo núcleo, sendo capaz de fornecer diversas saídas com níveis de tensão e corrente distintos. É um elemento bastante utilizado em fontes de tensão chaveadas e monitores de tubos de raios catódicos (CRTs). Para o desenvolvimento do protótipo deste trabalho, e seguindo o requisito COTS, foi escolhido transformadores de televisores de tubo, cujo componentes de reposição ainda estão amplamente disponíveis no mercado. Diversos modelos foram adquiridos, cada um demonstrando características únicas, em termos de frequência ressonante e tensão em sua saída. Este foi um ponto importante também, ao demonstrar que um mesmo circuito de excitação consegue trabalhar com uma ampla gama de transformadores.

As Figs. 5.5 e 5.6 ilustram as conexões de um transformador deste tipo, com o esquemático associado indicando os diversos secundários existentes, bem como a saída de alta tensão. É possível observar que, apesar de características similares, cada modelo de transformador utilizado tem características únicas, como pinos diferentes para enrolamentos diferentes, a existência de capacitores em sua saída, potência de operação, entre outros. Porém, ao longo do desenvolvimento, todos os modelos de transformadores utilizados foram capazes de funcionar como fontes CAPs, dado os devidos ajustes no circuito excitador.

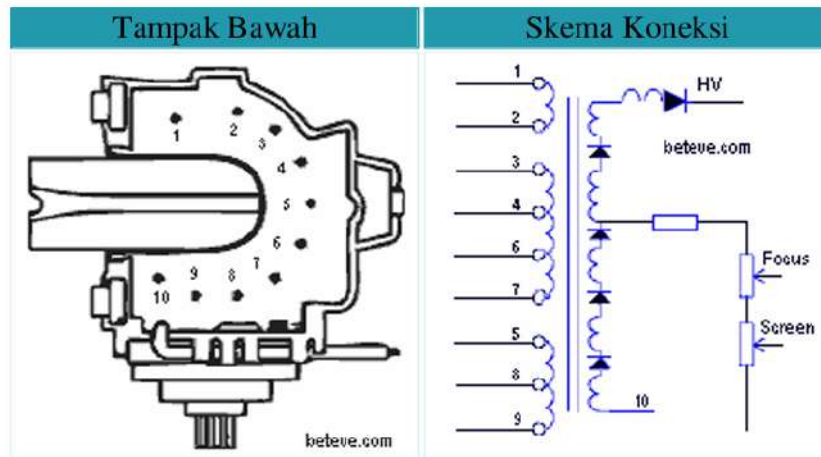


Figura 5.5. Pinout do transformador *flyback*, modelo FA061WJ-SA. Neste modelo específico, a referência da saída de alta tensão do transformador está no pino 10. Fonte: <https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/ETC/FA061WJ-SA/pdf.php?id=1402480>, acessado no dia 10/12/2024.

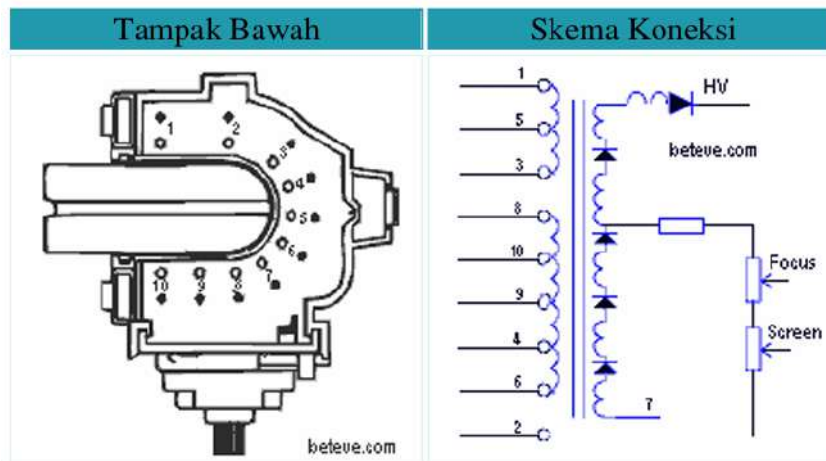


Figura 5.6. Pinout do transformador *flyback*, modelo 154-138L. Ao contrário do transformador FA061WJ-SA, o pino de referência da saída de alta tensão deste modelo está conectado o pino 7. Fonte: <https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/ETC/FA061WJ-SA/pdf.php?id=1402480>, acessado no dia 10/12/2024.

Dessa forma, cada modelo de transformador utilizado, era antes caracterizado em bancada de forma a identificar os pinos de referência, bem como os parâmetros de frequência e *duty-cycle*, de forma a obter uma descarga constante e sem a ocorrência de arcos elétricos.

Além disso, o primário destes transformadores era substituído por um enrolamento de maior calibre, composto de 4 a 8 espiras, a depender do modelo de transformador utilizado.

5.3.2 Gerador do Sinal PWM

O controle do circuito excitador do transformador *flyback* foi realizado com o circuito integrado (CI) NE555, um multivibrador versátil e bem conhecido. No modo de operação estável,

sua saída oscila indefinidamente entre dois níveis de tensão, sendo um deles zero e o outro uma tensão próxima a de sua alimentação (V_{CC}). Os componentes conectados ao seu redor controlam o tempo em que o sinal fica no nível 0 e 1, além do período de oscilação do sinal.

Como visto na Fig. 5.7, a topologia básica para o modo de operação astável utiliza um arranjo de resistores e capacitores para controlar a frequência e o *duty-cycle*. Variando o tempo de carga e descarga do capacitor podemos controlar a frequência do sinal, e um segundo capacitor é responsável pela largura do pulso (*duty-cycle*). Esta variação é realizada com o uso de potenciômetros.

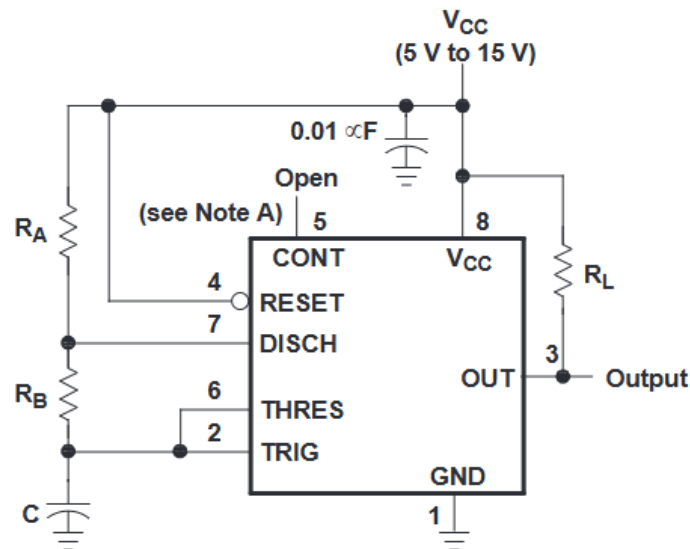


Figura 5.7. Esquemático da operação astável para o timer NE555. A frequência e o Duty-Cycle são controlados alterando o tempo de carga e descarga do capacitor conectado ao trigger. R_A e R_B são responsáveis pelo tempo no nível alto, e baixo respectivamente, sendo que a soma de ambos, juntos com o capacitor, determinam a frequência de oscilação. Fonte: Datasheet da Texas Instruments para o timer NE555.

Apesar de conseguir gerar a onda quadrada, o NE555 não possui capacidade de chavear corretamente os MOSFETs utilizados na etapa de potência. Seja por níveis de tensão menores ou pela falta de corrente capaz de polarizar o gate do transistor, uma etapa de amplificação se faz necessária entre o NE555 e o MOSFET. Para tal, na primeira iteração do circuito excitador, foi utilizado um amplificador operacional, especificamente o LM741. Nesta etapa, o ampop foi utilizado como seguidor de tensão, recriando em sua saída o sinal de entrada, porém com uma disponibilidade de corrente maior que a saída do 555.

Após uma revisão, um potenciômetro foi adicionado na entrada não inversora do amplificador operacional, permitindo o controle da largura dos pulsos da onda quadrada. Além disso, um conjunto com diodo, resistor e capacitor foi conectado no *drain* do MOSFET para proteger o transistor contra transientes rápidos de tensões elevadas.

Seguindo o ciclo evolutivo do circuito, o ampop foi trocado por um amplificador transistorizado do tipo *push-pull* (classe A), além da troca do MOSFET pelo IRF540, sendo mais robusto que seu antecessor, o IRFZ44n. O amplificador é composto por três transistores, e resistores necessários para a correta polarização do mesmo, sendo capaz de fornecer até

300 mA enquanto permite um ganho de tensão até 50 V. O conjunto de transistores, dois NPN e um PNP, são do modelo BC327 e BC337 respectivamente. Nesta nova topologia, o controle do *duty-cycle* foi realizado com um potenciômetro na entrada CV (*Control Voltage*) do NE555.

Nos estágios finais de evolução do circuito, os transistores do amplificador foram modificados por TIP41, no caso do NPN, e TIP42, no caso do PNP. Essa alteração foi necessária para que o sistema operasse com tensões maiores, frequências mais elevadas e longos tempos de utilização. Na busca pela combinação ótima entre transformador, geometria dos eletrodos, potência da descarga, um circuito mais robusto se mostrou necessário.

A etapa geradora do sinal PWM, que antes utilizava apenas um NE555, foi substituída por um arranjo com dois NE555. Um primeiro multivibrador opera no modo estável, criando pulsos constantemente. Estes pulsos são introduzidos no segundo multivibrador, operando no modo estável, que cria um pulso em sua saída quando percebe o sinal na sua entrada de controle. Porém, com as etapas dedicadas, é possível obter um maior controle do sinal PWM, permitindo uma maior estabilidade na operação.

5.3.3 Etapa de Potência

Os geradores de sinal não possuem a potência necessária para excitar o primário do transformador *flyback*. Para tal é necessário uma etapa de potência, capaz de receber um sinal de controle de baixa potência, e fornecer a energia necessária para excitar o primário do transformador.

Para este desenvolvimento foi escolhido a utilização de um transistor do tipo MOSFET, devido à sua baixa resistência quando na região de saturação, isolamento da base em relação ao dreno e *source*, capacidade de trabalhar com tensões elevadas e com grande densidade de corrente.

Seguindo o requisito COTS, o primeiro MOSFET utilizado nesta aplicação foi o IRFZ44n. Este componente de uso geral pode ser encontrado em fontes chaveadas, amplificadores de áudio, entre outras aplicações. À medida que os requisitos de tensão e corrente do sistema foram evoluindo, o IRFZ44n foi substituído pelo IRF540, e nos testes com potências maiores, pelo IRF840n ou o IRF260. Todos estes MOSFETS são de canal N, e estavam atuando como amplificadores com o *source* comum.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CURVA DE PASCHEN

Conforme visto anteriormente, a tensão de ruptura para o ar atmosférico e seco, em 1 atm, é de aproximadamente 33 kV/cm , para eletrodos planos (Howatson, 2013). Diferentes fatores podem alterar este limiar para descarga, sendo eles: umidade relativa do ar, partículas em suspensão, função trabalho dos eletrodos, composição do gás, contaminantes, geometria dos eletrodos, características do campo elétrico, presença de fontes ionizantes externas, entre outros.

Com base nas equações da descarga de Townsend, especificamente as Eqs. (3.15), (3.20) e (3.24), podemos escrever a seguinte relação:

$$V_B = \frac{B p d}{\ln \left[\frac{A p d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]}, \quad (6.1)$$

e, a partir do coeficiente de Townsend para a primeira ionização, podemos calcular os valores das constantes A e B :

$$\alpha = A p \exp \left(\frac{-B p}{E} \right), \quad (6.2)$$

onde A será a saturação da ionização no gás para um valor constante de E/p , e B está relacionado a energia de excitação e ionização do gás (Husain e Nema, 1982).

Podemos então escrever V_B como:

$$V_B = \frac{B p d}{\ln(p d) + k}, \quad (6.3)$$

onde

$$k = \ln \left[\frac{A}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]. \quad (6.4)$$

Como A e B são conhecidos, k pode ser facilmente calculado (Husain e Nema, 1982).

Utilizando o ar atmosférico como gás de trabalho, podemos chegar aos valores vistos na Tab. 6.1, para A , B , $p d$ e k .

De posse desses valores, podemos plotar a curva de Paschen para o ar atmosférico visto na Fig. 6.1.

Tabela 6.1. Tabela com os valores de A , B , pd e k para o ar atmosférico e o gás nitrogênio. Fonte: (Husain e Nema, 1982).

Gás	A (ionização/ $kpa \cdot cm$)	B (V/ $kpa \cdot cm$)	pd ($kpa \cdot cm$)	k
Ar	112.50	2737.50	0.0133 - 0.2	$2.0583(pd)^{-0.1724}$
			0.2 - 100	$3.5134(pd)^{0.0599}$
			100 - 1400	4.6295
N_2	90.00	2565.00	0.0313 - 3	$2.5819(pd)^{-0.0514}$
			3 - 100	$2.4043(pd)^{0.1030}$
			100 - 1400	3.8636

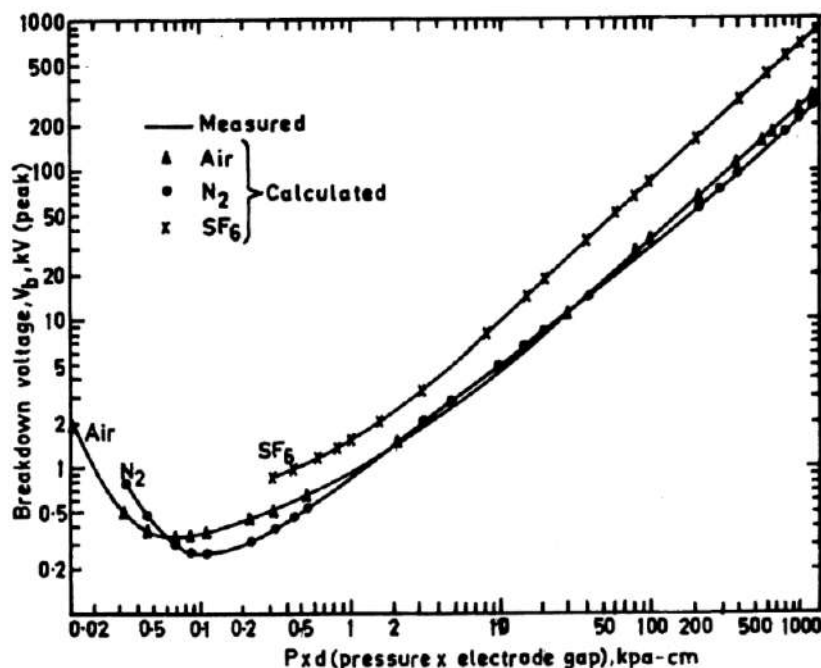


Figura 6.1. Curva de paschen com valores calculados, e medidos, para diferentes gases. Fonte: (Husain e Nema, 1982).

Com isso, podemos verificar que, para eletrodos planos e paralelos, feitos de alumínio, a tensão de ruptura do ar atmosférico, para uma distância de eletrodos em torno de 5 cm , está entre 50 kV e 100 kV .

6.2 SIMULAÇÕES

Os circuitos foram simulados nos programas LTSPICE XVII e Proteus 8, e seguiram a seguinte ordem de iteração:

1. Esquemático com componentes ideais;
2. Introdução de elementos parasitas, como resistência equivalente em série dos capacitores;
3. Testes em protoboard;
4. Utilização dos modelos na simulação iguais aos disponíveis no comércio local;

5. Teste em placa perfurada universal;
6. Correção dos resultados da simulação com base nos resultados em bancada;
7. Confecção de placa de circuito impresso (Printed Circuit Board - PCB);
8. Validação do circuito impresso.

Para os primeiros protótipos dos circuitos as iterações foram até o teste em placa perfurada universal. Apenas a versão final do circuito, apresentada aqui neste trabalho, teve a sua confecção em PCB.

6.2.1 Topologia AC no LTSPICE

Para verificar o funcionamento da topologia ZVS, foi simulado um circuito com os principais componentes para esta aplicação. Nesta simulação, sem perdas parasíticas dos diferentes componentes do circuito, foi avaliado os níveis de tensão e corrente nos pontos críticos do sistema, sendo os transistores e o banco LC, além da verificação da tensão de saída do circuito, utilizando um transformador, capaz de atingir valores acima de 5 kV.

A topologia mostrada na Fig. 6.2 consiste de dois transistores iguais, com o *SOURCE* conectado ao nó referência. Resistores de *pull-up* mantém o gate polarizado, até que o potencial visto pelo diodo seja tal que despolarize o gate do transistor. De forma alternada, cada transistor é chaveado, fazendo com que o capacitor C1 carregue e descarregue em sentidos contrários. A troca de energia entre o capacitor C1 e o indutor L1 é responsável por, através da relação do transformador, fornecer o ganho de tensão da ordem de kilo volts. A relação entre a capacitância e a indutância de C1 e L1 dita a frequência de oscilação do circuito. L2 e L3 atuam como filtros, impedindo sinais de frequência elevada voltarem para a fonte de alimentação do sistema.

6.2.2 Topologia DC no LTSPICE

Ao longo do desenvolvimento e evolução do circuito, diversas mudanças foram realizadas para sanar eventuais falhas catastróficas, com a queima de componentes, trazendo segurança e robustez ao sistema. Dois estágios distintos de desenvolvimento do circuito serão mostrados nesta seção, ilustrando as mudanças mais drásticas na topologia do circuito excitador.

Com a escolha de transformadores *flyback* que possuem diodos em sua saída, a polaridade dos pulsos no primário influenciariam a saída do secundário, assim como a vida útil do transformador. Ao utilizarmos uma onda quadrada, com largura de pulso variável, podemos controlar como o primário do transformador é energizado, resultando no maior ganho de tensão possível. De fato, nos testes em bancada foi possível perceber que a relação entre frequência e *duty-cycle* são cruciais para obter níveis de tensão satisfatórios dentro do consumo energético estabelecido. A operação fora dessa zona ótima ainda é possível, porém

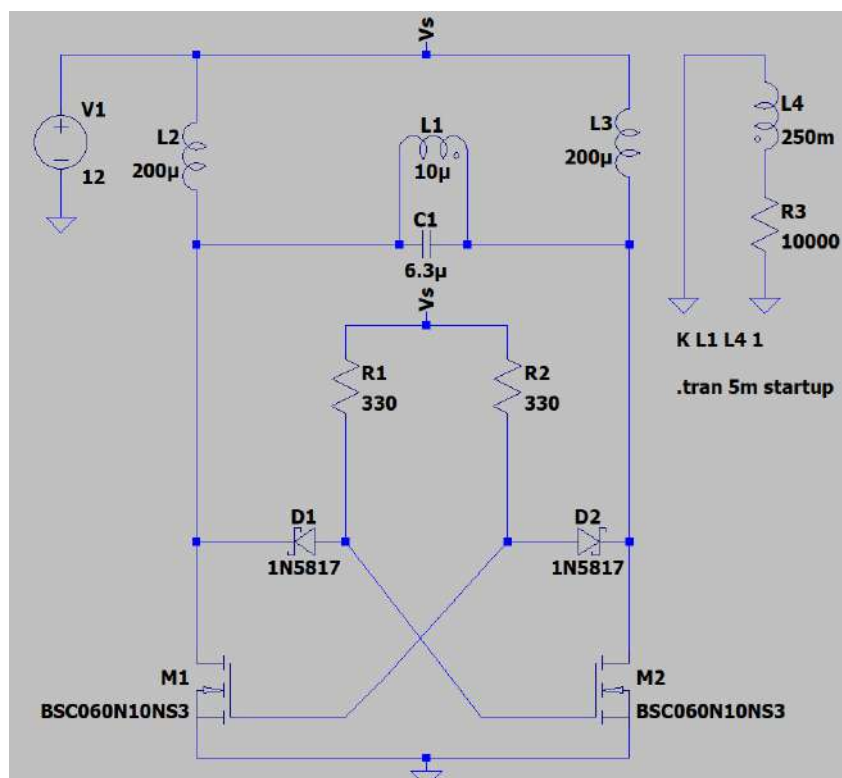


Figura 6.2. Circuito ZVS utilizado no LTSpice XVII para a simulação da saída de alta tensão. Os componentes utilizados estão sem perdas parasíticas, que afetariam a performance do circuito. O indutor L1 representa o primário do transformador de saída, e o indutor L4 seu secundário.

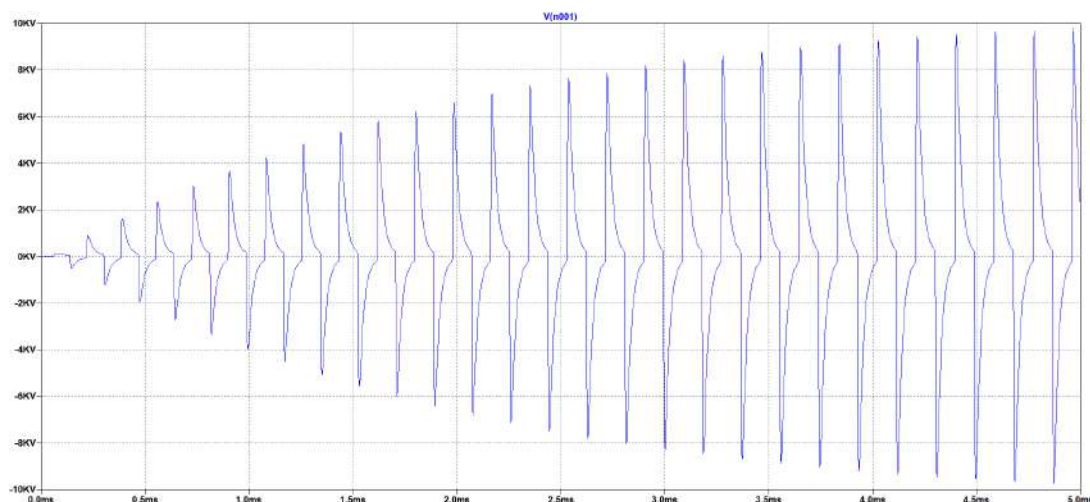


Figura 6.3. Saída do transformador na simulação do circuito ZVS. O objetivo era atingir valores superiores a 5 kV . Conforme descrito a saída desta topologia possui um sinal oscilante, entre positivo e negativo, cruzando o nível zero a cada ciclo.

adiciona diversas perdas ôhmicas no sistema, com uma parcela significativa da potência consumida sendo transformada em calor.

O primeiro circuito oscilador era composto por um multivibrador aestável (NE555), um amplificador operacional (LM41), um MOSFET de canal N (IRFZ44n) e alguns componentes passivos para adequação do circuito. A Fig. 6.4 traz o esquemático utilizado nesta topologia.

Aqui L1 e L2 são o primário e o secundário do transformador *flyback*, e D2 atua como os diodos internos dos transformadores utilizados. C4 e R8 representam a capacitância devido aos eletrodos, e a resistência limitadora da corrente durante a descarga. A lâmpada neon U3 recria a dinâmica da ionização do ar atmosférico, com base em comparações com o modelo de Mayr (Parizad *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2022; Habedank, 1993). Como tal modelo depende de características intrínsecas ao material do eletrodo e condições da descarga, as grandezas Constante de tempo de Mayr e Potência de Relaxamento não possuem solução analítica. Dessa forma, com base em medições em bancada da saída do circuito, os componentes da simulação foram ajustados para melhor se aproximar da descarga real.

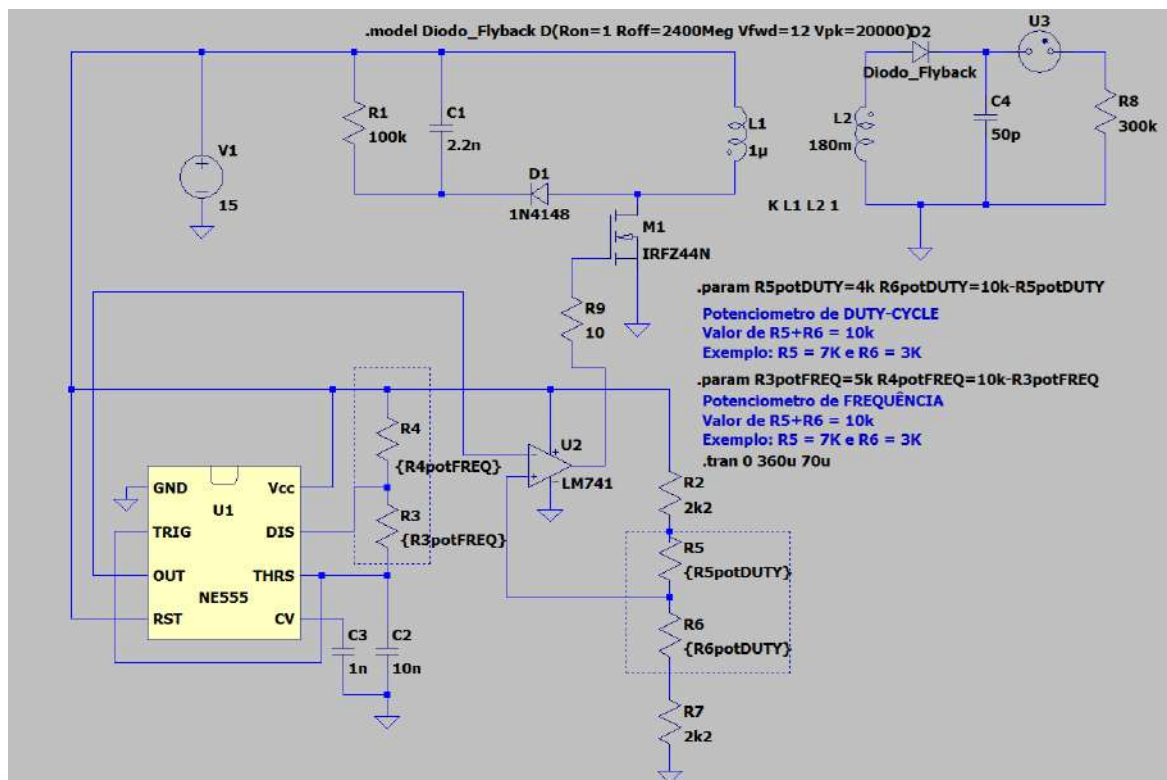


Figura 6.4. Esquemático do primeiro circuito excitador construído. Este circuito utilizava um NE555 para criar o sinal PWM, o amop LM741 elevava a tensão da onda quadrada para então chavear o MOSFET IRFZ44n, responsável por energizar o primário do transformador *flyback*. L1 e L2 são os enrolamentos do transformador. C4, U3 e R8 simulam o comportamento do plasma uma vez que o ar foi ionizado.

A simulação transiente no LTSpiceXVII trás o comportamento do circuito em recortes de tempo na sua operação. Na Fig. 6.5 podemos observar dois gráficos, representando o comportamento da tensão, na cor azul, e da corrente, na cor vermelha, da saída de alta tensão do transformador *flyback*.

6.2.3 Fonte de alimentação linear no PROTEUS 8

O circuito da fonte linear de tensão, com limitador de corrente, foi simulado no programa Proteus 8. As imagens 6.8, 6.9 e 6.10 trazem os diferentes blocos que compõe o sistema da fonte. Esta fonte, que opera com 220V em sua entrada, possui uma saída indo de 0 a 24V,

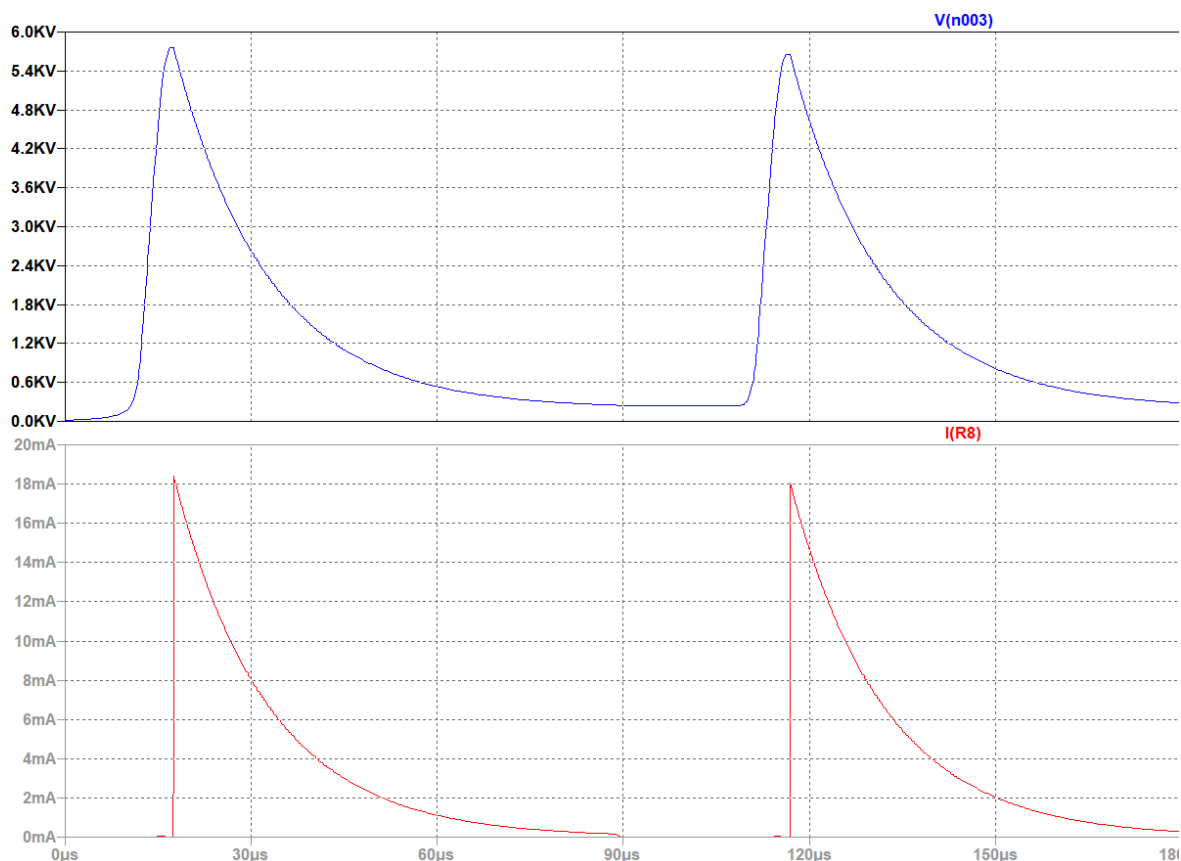


Figura 6.5. Simulação das curvas de tensão (azul) e corrente (vermelho) na saída de alta tensão do transformador *flyback*. Com a simulação foi possível observar tensões de saída acima de 5 kV , no formato de pulsos acima de 0 volts, com correntes de até 20 mA . Estes valores estão dentro do esperado com base na operação do circuito construído em placa perfurada universal. A frequência de operação neste caso é em torno de 5 kHz .

com uma corrente máxima de 2A, além de uma saída fixa de 5V e uma saída fixa de 12V, ambas com 1A máximo de corrente de saída.

6.3 PROTÓTIPO

Seguindo o fluxo do desenvolvimento iterativo, diversas modificações foram realizadas ao longo do desenvolvimento, visando otimizar o efeito biocida e o consumo de energia. Com isso foi produzido diferentes topologias de circuito, geometrias de eletrodos, e aplicações do plasma ao contaminante biológico, procurando o ponto ótimo de operação. As subseções a seguir trazem alguns recortes deste desenvolvimento, como a evolução dos elementos de circuito, geometria da caneta de plasma, aplicação da cortina de plasma, caracterização do circuito e correção de erros. Por fim, uma versão atualizada é proposta ao final desta seção, como resultado final do processo iterativo.

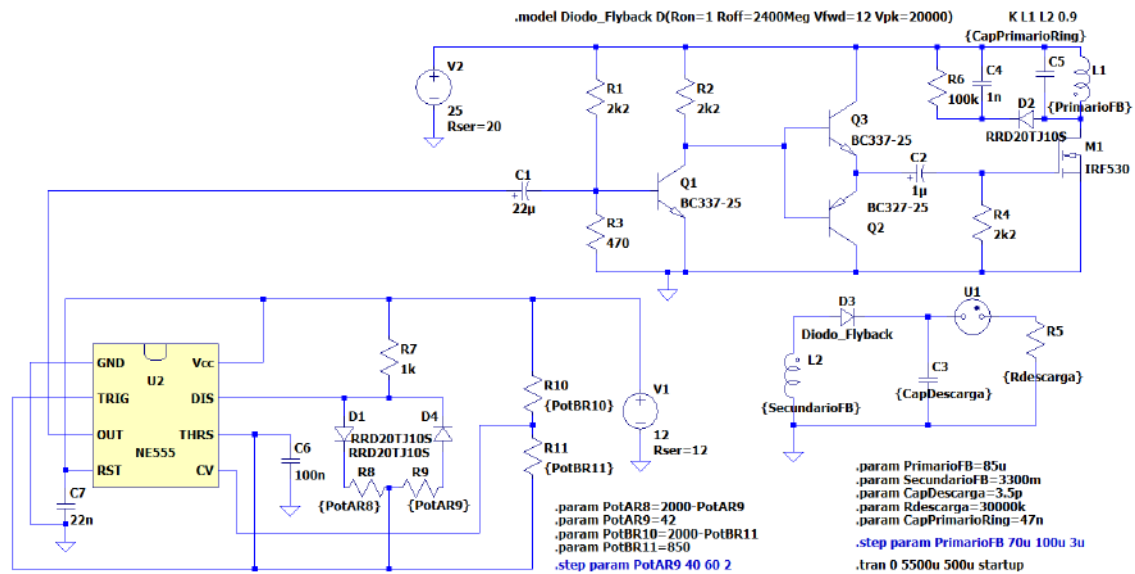


Figura 6.6. Segunda iteração do circuito excitador do transformador *flyback*. O circuito conta com o NE555 para geração do sinal PWM, um amplificador transistorizado utilizando 2 transistores NPN e 1 PNP, o MOSFET de potência IRF530, além de filtros e medidas de proteção do circuito.

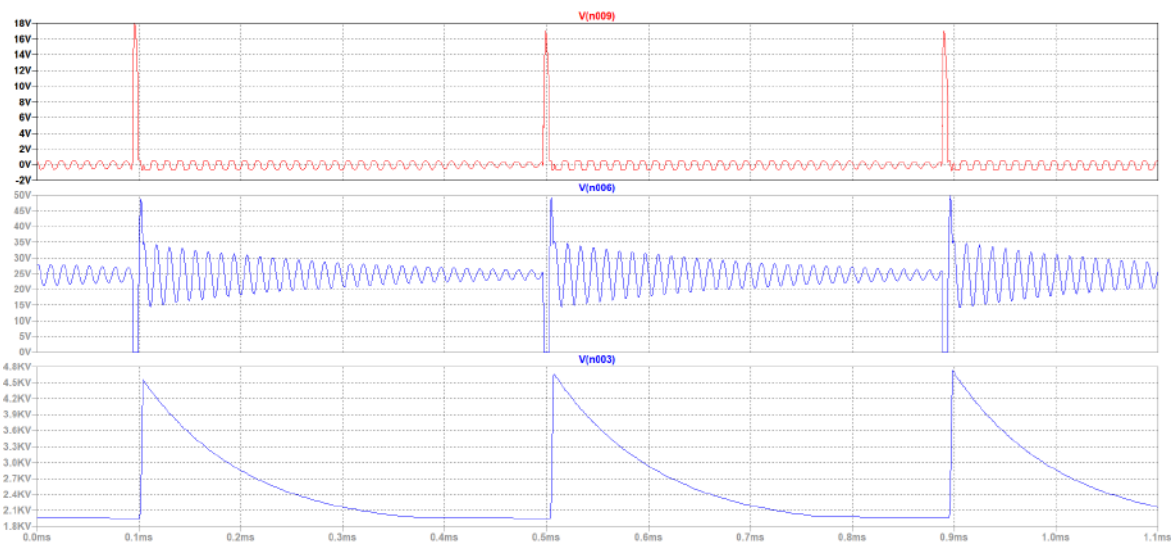


Figura 6.7. Simulação no LTSpiceXVII da segunda iteração do circuito excitador. O gráfico superior, com a curva na cor vermelha, traz os pulsos criados pelo gerador PWM, o gráfico central o comportamento da tensão no enrolamento primário do transformador *flyback*, demonstrando o *efeito ringing* causado pela rápida mudança do nível de tensão. O gráfico inferior traz o perfil da descarga utilizando um modelo adaptado de Mayr no bulbo de neon. Essa descarga se assemelha à curva de descarga de um capacitor.

6.3.1 Evolução do Circuito DC

Após as diversas iterações feitas nos circuitos individuais, foi possível alcançar uma topologia confiável, capaz de operar por longos períodos, conforme visto na última bateria de testes, sendo um sistema único e contido, sem a necessidade de fontes externas ao reator. A Fig. 6.16 traz o diagrama de montagem final, com diferentes elementos do circuito sepa-

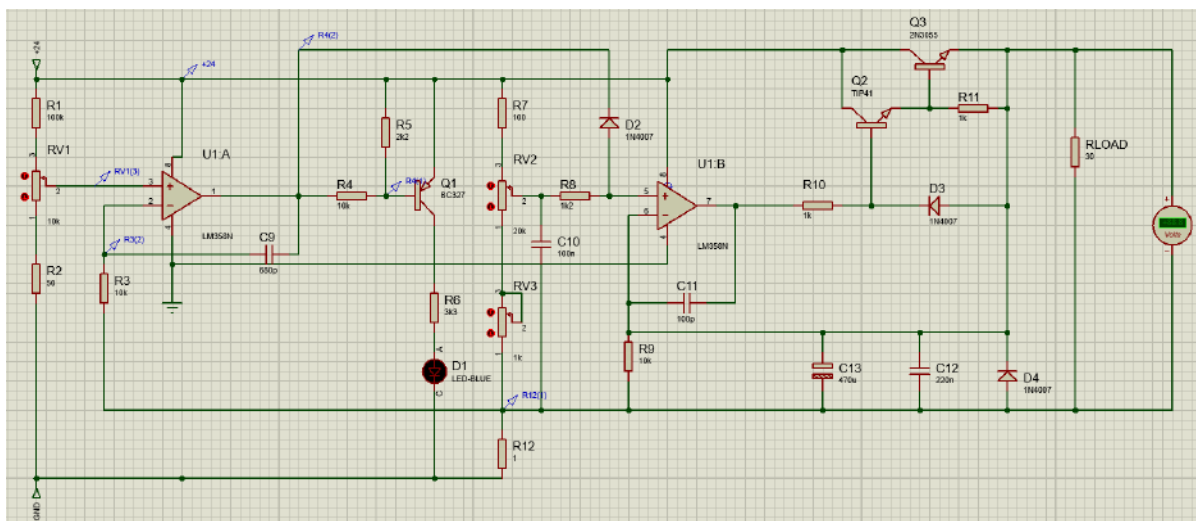
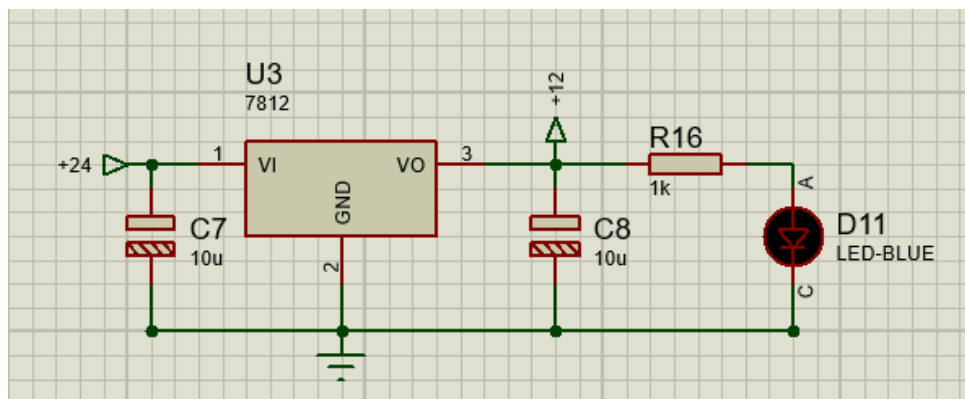
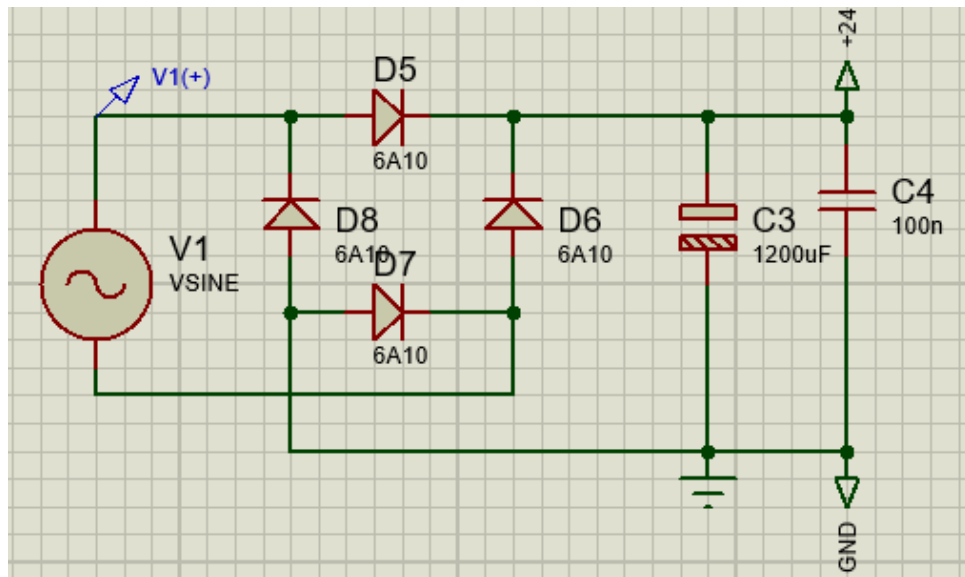


Figura 6.10. Fonte linear DC utilizada no protótipo final.

rados em blocos, e coordenados por cor com sua posição interna ao reator proposto. Já na Fig. 6.15 temos a disposição de cada elemento dentro do reator projetado. A cor azul re-



Figura 6.11. Primeiro circuito excitador construído na placa perfurada universal. O circuito consistia em um NE555 e um LM741 como *driver* do MOSFET IRFZ44n. Este transistor era responsável por chavear o primário do transformador *flyback*.

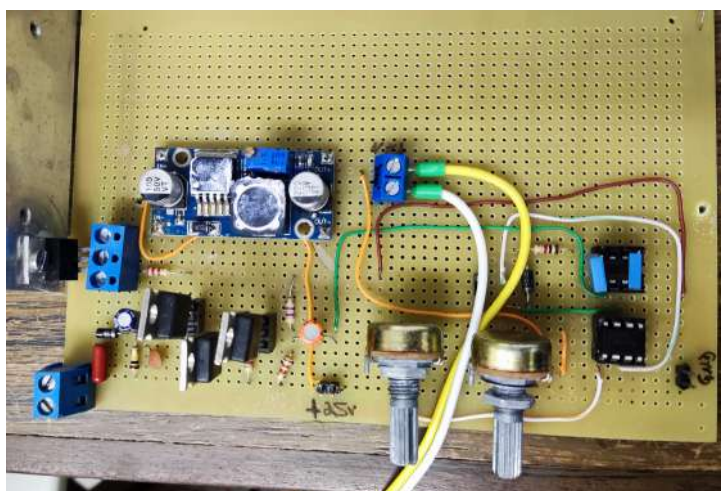


Figura 6.12. Segunda iteração do circuito excitador, construído na placa perfurada universal. Neste circuito, no lugar do ampop LM741, temos o amplificador *push-pull* utilizando transistores TIP41 e TIP42. O MOSFET nesta construção foi o IRF540. Um regulador de tensão LM2596 abaixava a tensão da fonte de 25 V para 12 V, tensão essa utilizada pelo NE555 e, em outra versão, pelas ventoinhas.

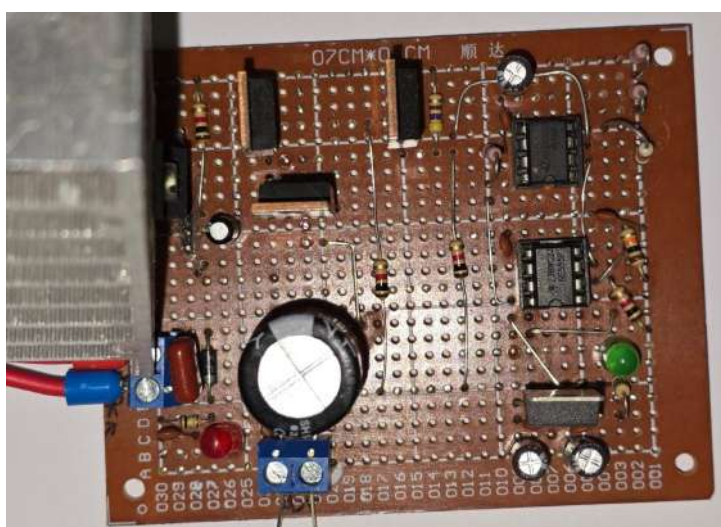


Figura 6.13. Terceira iteração do circuito excitador.

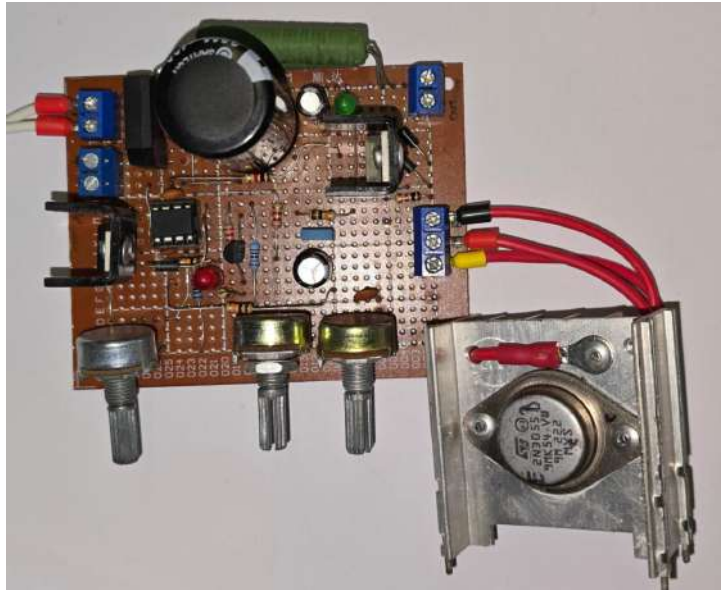


Figura 6.14. Fonte linear DC.

apresenta o transformador $220V/12V - 12V$, lilás atrás os elementos na placa da fonte linear, vermelho na placa geradora do sinal e *driver* do transformador *flyback*, representado pela cor amarela. Em laranja temos o reator que pode ter diferentes geometrias.

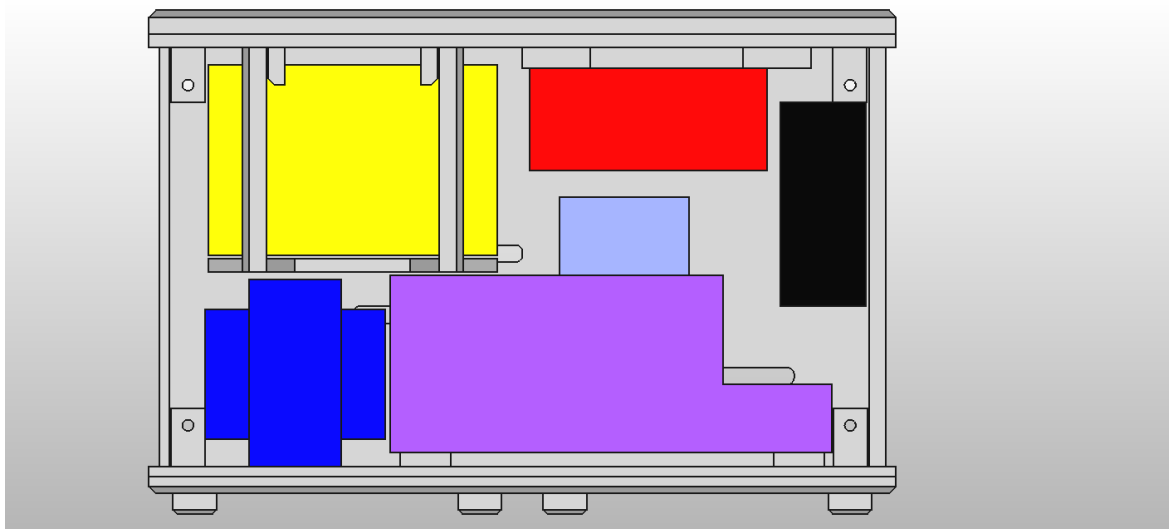
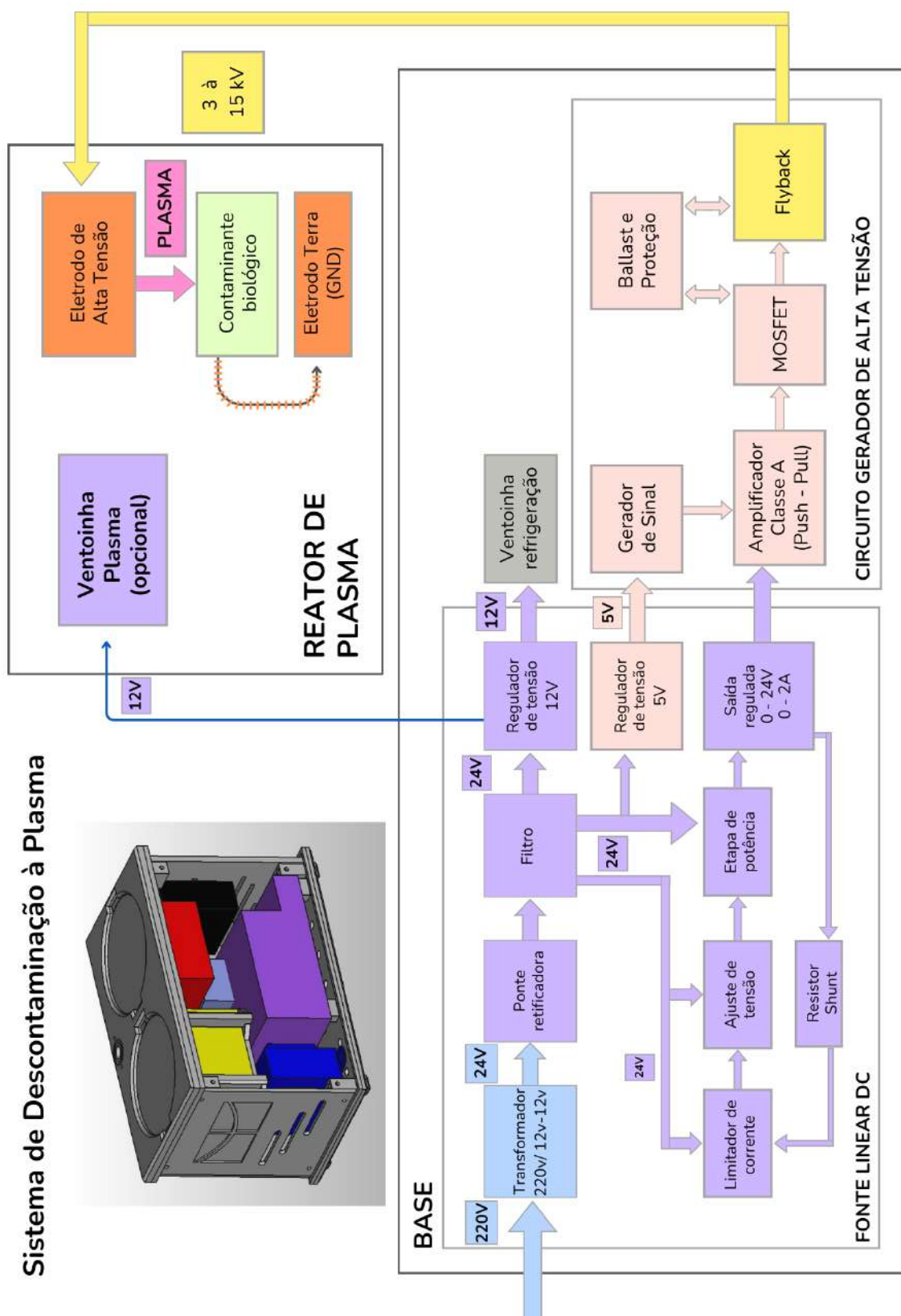


Figura 6.15. Vista lateral do reator final. O CAD foi feito no software livre Freecad 0.21.

Na imagem é possível ver a disposição espacial dos elementos que compõe a parte eletrônica do reator CAPs. Em azul temos o transformador $220V/12v - 12v$, em lilás a placa da fonte linear, em vermelho a placa geradora de sinal e *driver* do transformador *flyback*, mostrado aqui em amarelo. Em azul claro o transistor de potência 2N3055 e em preto a ventoinha para refrigeração dos diferentes elementos de circuito.

Figura 6.16. Diagrama de blocos do sistema eletrônico do reator de plasma atmosférico.



6.3.2 Lista de Componentes Utilizados no Protótipo

Na tabela 6.2 é possível ver os componentes que foram utilizados na construção do circuito e do protótipo, bem como o seu custo estimado (valores referentes à lojas locais em dezembro de 2024).

6.3.3 Estrutura da Caneta de Plasma

Um dos objetivos deste trabalho é a construção de um reator a plasma de tamanho reduzido, capaz de gerar descargas corona em uma região restrita. Para tal, e seguindo a filosofia de design em ter um equipamento de baixo custo, foram utilizados seringas descartáveis de 3 mL , retirando-se a agulha.

No interior da seringa foi inserido um eletrodo com pontas, sendo conectado à saída de alta-tensão do transformador *flyback*. Na parte externa da seringa, próximo a saída, foi colocado um eletrodo anelar, conectado ao nó referência do circuito, conforme desenho esquemático retratado na Fig. 6.17.

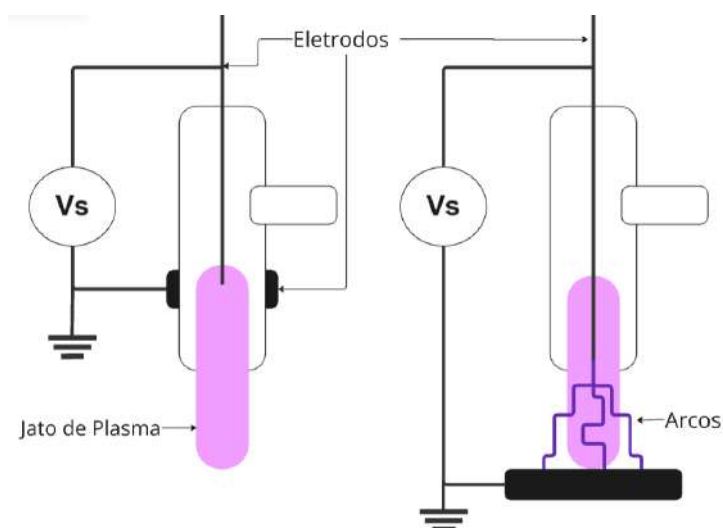


Figura 6.17. Esquema de ligação dos eletrodos para o jato de plasma, e para a descarga corona com arcos.

Testes iniciais demonstram que a descarga era atraída para o eletrodo externo, como mostra a Fig. 6.18. Como o fluxo de gás era composto apenas pelo vento iônico gerado pela própria dinâmica da descarga corona, o momento das espécies reativas não era suficiente para que a maior parte destas não seguissem em direção ao eletrodo negativo. Ao colocarmos um plano terra de material condutivo, como o cobre, e conectarmos este à referência do transformador *flyback*, a descarga corona era direcionada diretamente à ele, como visto na Fig. 6.19.

Porém, ao introduzirmos a placa de Petri, que é feita de material dielétrico (plástico ou vidro), ocorre o fenômeno do acúmulo de cargas na superfície da placa, repelindo eletrostati-

Componente	Qtd.	Preço Unitário (R\$)
10x15 Placa perfurada	1	24,45
Transformador Flyback de CRT	1	29,90
Fonte DC 25V 2A	1	85,72
Potênciometro Linear 10k	2	2,90
Soquete 8 pin dip	2	0,25
NE555 timer	1	1,25
Transistor TIP29 NPN	2	1,99
Transistor TIP30 PNP	1	0,89
IRF540N MOSFET	1	6,25
Dissipador de Calor	1	10,00
Regulador DC Stepdown LM2596	1	12,56
12V fan (opcional)	1	14,80
2.54mm header fêmea	1 barra	1,00
2.54mm header macho	1 barra	1,10
Conector KRE 2 portas	3	0,89
Conector KRE 3 portas	1	1,11
Diodo 1N4007	3	0,11
Resistor 470 Ω 1/4W	1	0,05
Resistor 1k Ω 1/4W	1	0,05
Resistor 2k2 Ω 1/2W	3	0,10
Resistor 100k Ω 1/4W	1	0,05
Capacitor 1nF 50V capacitor	1	0,07
Capacitor 22nF 50V capacitor	1	0,09
Capacitor 100nF 50V capacitor	1	0,11
Capacitor 1 μ F 50V capacitor	1	0,12
Capacitor 22 μ F 50V capacitor	1	0,19
Seringa descartável de 5 mL	2	0,38
Barra roscada M5	1	4,70
Porcas e arruelas M5	10	0,20
Arruela de pressão M5	4	0,19
Pés de borracha	4	0,8
Partes impressas em 3D (Versão Beta)	-	50,00
Partes impressas em 3D (Versão Final)	-	90,00
Custo total	-	entre 214,74 e 254,74

Tabela 6.2. Lista de componentes para a montagem do protótipo.



Figura 6.18. Demonstração do problema da atração eletrostática do Plasma ao eletrodo comum localizado na saída da seringa. É possível ver claramente a trajetória do plasma, sendo desviado abruptamente ao deixar a seringa.



Figura 6.19. Descarga corona entre o eletrodo de alta tensão, no interior da seringa, e o plano de cobre abaixo, conectado à referência do circuito.

camente a coluna de plasma que saia da seringa, como pode ser visto na Fig. 6.20.

Por fim, para solucionarmos este problema de carregamento e repulsão do plasma, aproveitamos as propriedades do meio de cultura LB, com 1.2% de ágar, e ao conectarmos eletricamente o substrato ao nó de referência do circuito, conseguimos que a descarga atinga diretamente a superfície do substrato, conforme visto na Fig. 6.21. O círculo na parte central da imagem foi feito na placa de Petri, utilizando um marcador permanente. Este serviu para

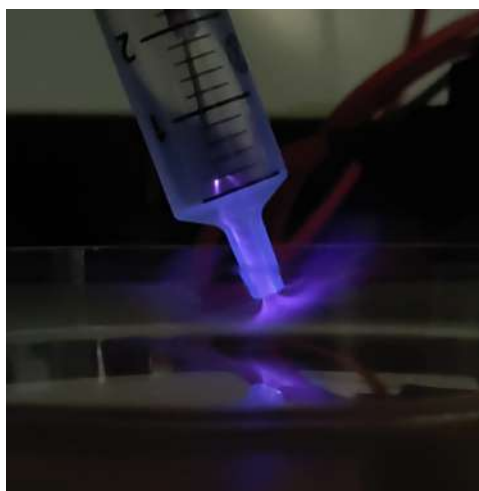


Figura 6.20. Descarga corona repelida eletrostaticamente devido ao acúmulo de cargas na superfície do dielétrico.

delimitar o espaço a ser testado, de modo a verificar as condições do substrato exposto à descarga corona, antes dos testes com os contaminantes biológicos. Com isso, foi possível confirmar que a descarga não alterou as propriedades macroscópicas do ágar, ponto importante para garantir que a inviabilização das culturas se deve à ação esterilizante do plasma, e não à degradação do substrato.

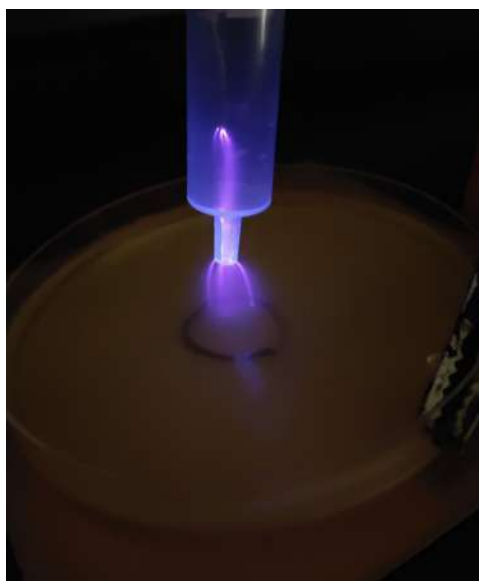


Figura 6.21. Descarga corona entre o eletrodo interno e a superfície do substrato, contendo um meio LB, com 1.2% de ágar, que é conectado à referência do circuito através de um conector tipo jacaré, localizado à direita da imagem. O círculo no centro da imagem foi feito com um marcador permanente, e serviu como delimitação para verificar a influência da descarga sobre o meio, antes dos testes com contaminantes biológicos.

Ainda nessas verificações iniciais, foi testado a influência de um arco elétrico na superfície do substrato. O arco foi obtido aproximando o eletrodo de alta-tensão à superfície do substrato, de tal forma que a distância menor permitiu a evolução da descarga corona para um arco elétrico. Neste regime de operação, a superfície do substrato sofreu com a ação da descarga

em forma de arco, sendo consumida e carbonizada, conforme é possível ver na Fig. 6.22.

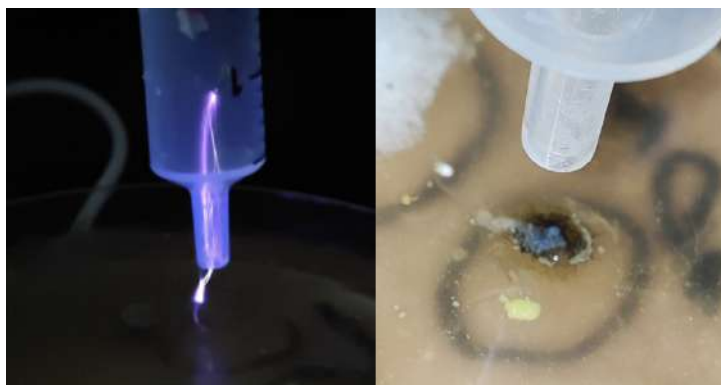


Figura 6.22. Na esquerda temos o detalhe do arco entre o eletrodo e a superfície do substrato. A direita, em detalhe, temos o dano causado ao substrato, com uma marca clara de carbonização.

Portanto, verificou-se experimentalmente que a descarga corona, para a nossa aplicação, não danificou a superfície do substrato de forma aparente, ao contrário da descarga do tipo arco que, em poucos segundos, causou danos irreparáveis ao substrato de ágar.

Ao passo que a topologia do circuito iria amadurecendo, tornando-se mais confiável e robusta, mudanças também foram feitas na estrutura da varinha de plasma. Essa evolução permitiu testar diversos parâmetros, procurando a melhor relação entre complexidade, custo e capacidade de esterilização.

Na Fig. 6.24 temos o primeiro arranjo experimental utilizado. Na imagem é possível ver a fonte de bancada, responsável por alimentar o circuito, com 12,3V e 1.53A. O circuito foi montado em uma placa universal perfurada, e era responsável por excitar o transformador *flyback*. Este foi adquirido novo, como peça de reposição de um monitor CRT da marca Philips. A seringa estava posicionada dentro de uma Capela Biológica, sendo fixada por uma pinça plástica com braço articulado. A placa de Petri foi posicionada logo abaixo da seringa, e sobre o plano terra condutivo. Um cabo jacaré-jacaré conectava eletricamente o substrato ao plano terra, sendo que este era então conectado ao nó referência do transformador.

Após algumas melhorias, tanto no circuito, quanto na estrutura da caneta de plasma, uma nova versão foi desenvolvida. Como os testes biológicos são realizados em duplicata, foi desenvolvido uma estrutura que suportasse duas placas de Petri, e duas descargas corona, de forma simultânea. O técnico em automação, e pesquisador do LFP/UnB, Júlio César de Melo Almeida, fez o projeto CAD da nova base, para ser impressa 3D, com marcações na base para manter sempre a mesma orientação dos substratos. A montagem dos suportes à base foi realizada com peças usinadas em poliacetal, barras roscadas, tubos de alumina e as seringas descartáveis. A Fig. 6.25 traz a estrutura montada, com as duas seringas e placas posicionadas para uma bateria de testes. Já na Fig. 6.26 podemos ver o sistema em operação, com duas descargas corona simultâneas.

Como penúltima iteração da caneta de plasma, foi desenvolvido uma estrutura, impressa em 3D, que permitisse a inserção de um fluxo forçado de ar pela descarga de plasma. O

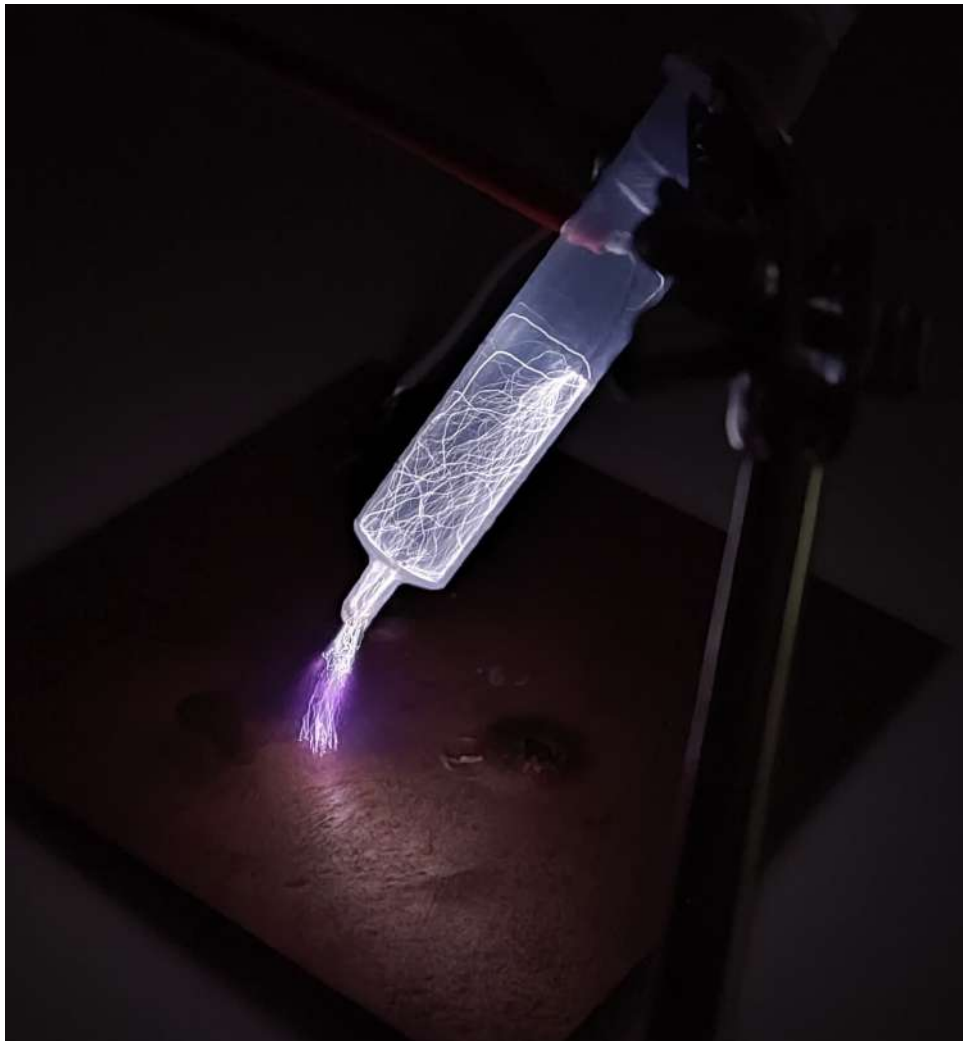


Figura 6.23. Exemplo de descarga arco evoluindo a partir da descarga corona, com a adição do gás argônio.

intuito dessa alteração na geometria era de verificar a influência da passagem de um maior fluxo de ar na capacidade biocida do plasma atmosférico. Esse protótipo pode ser visto na figura 6.28.

Por fim, o último protótipo desenvolvido, porém não testado com contaminantes biológicos, pode ser visto na imagem 6.33. Aqui, baseando no sistema testado e com eficácia comprovada, o reator foi construído de uma forma monolítica, com todos os sistemas necessários embarcados em uma única unidade concisa. Os eletrodos seguem o padrão utilizado no protótipo com seringas descartáveis. As imagens 6.38 e 6.39 trazem este protótipo construído.

6.3.3.1 Desenho 3D

Utilizando o software livre FreeCAD 0.21.2, o sistema com suportes para duas canetas de plasma foi desenvolvido. Sua base foi impressa em 3D, utilizando o filamento PLA. Para manter o custo reduzido, seringas descartáveis continuaram como os reatores de plasma, com

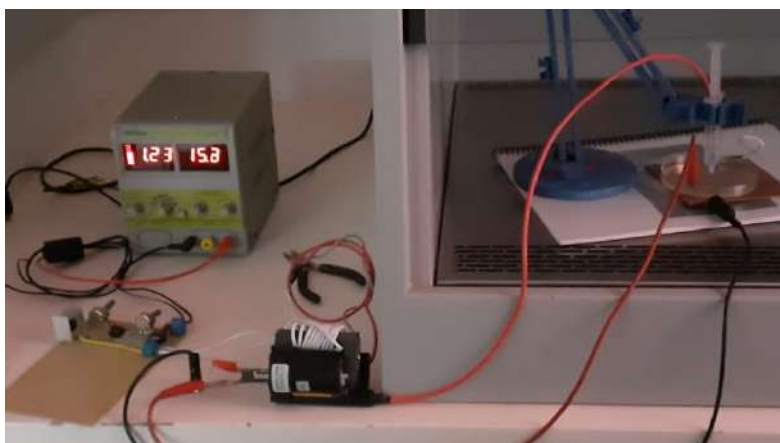


Figura 6.24. O primeiro *setup* experimental utilizado para verificar a capacidade anticéptica do plasma atmosférico. À esquerda temos a fonte de tensão de bancada, fornecendo 12,30 V e 1,53 A, totalizando 18,82 W de potência fornecida para o circuito. A seringa estava fixada por uma pinça plástica com braço articulado, e a placa de Petri com o material biológico estava logo abaixo. A descarga foi direcionada à pontos específicos da placa de Petri.



Figura 6.25. Estrutura atualizada da Caneta de Plasma, com base impressa em 3D, suportes metálicos isolados, espaços dedicados para as placas de Petri com conectores jacarês para aterramento do substrato. A utilização de barras roscadas possibilitam uma grande gama de distâncias possíveis.

o eletrodo de alta tensão de cobre em seu interior. Barras roscadas dão o suporte estrutural, ao passo que permitem ajustes finos na altura da caneta de plasma em relação à superfície do substrato. Marcações enumeradas na base impressa permitem que as placas sempre tenham a mesma orientação. Dielétricos como tubos de alumina e peças usinadas em poliacetal foram utilizados para isolar eletricamente a caneta de plasma do resto da estrutura. Por fim, pés emborrachados mantêm a estrutura isolada da capela onde os testes eram realizados.

A Fig. 6.29 traz o CAD do sistema com duas canetas de plasma e o suporte para duas placas de Petri, e a Fig. 6.30 mostra em detalhes o eletrodo interno com geometria cilíndrica e pontas em uma extremidade. A geometria do eletrodo visa a uniformização da descarga

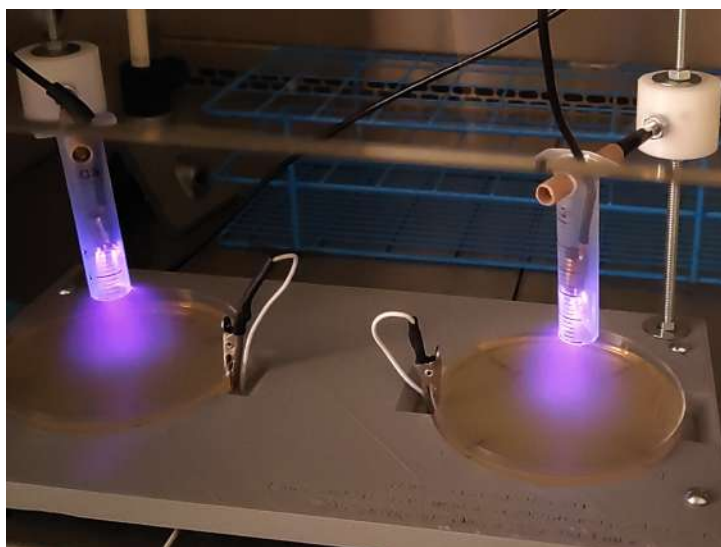


Figura 6.26. Sistema com duas descargas simultâneas, em duas placas de Petri contendo os contaminantes biológicos.

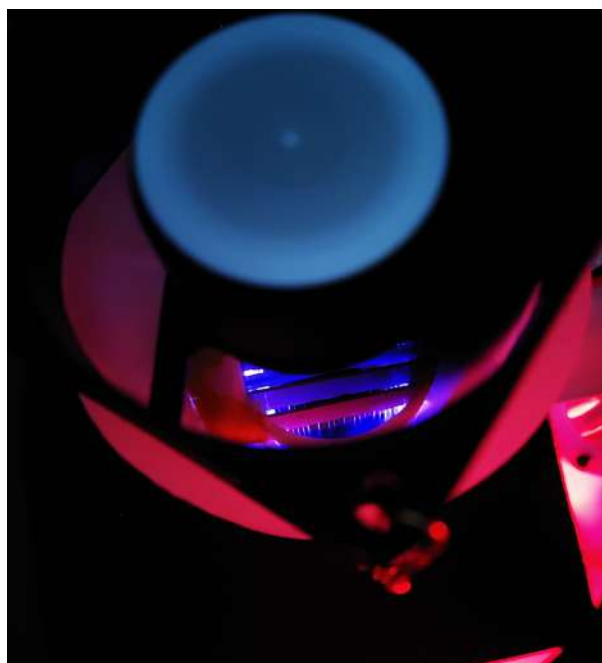


Figura 6.27. Detalhe da descarga corona na região interna do reator a plasma atmosférico, apelidado de "secador".

no interior da caneta de plasma, com o uso das pontas, que atuam como concentradoras de cargas elétricas, para facilitar a ionização do gás de trabalho, no caso, a ionização do ar atmosférico.

Seguindo os testes, a próxima iteração a ser projetada e impressa foi o protótipo conhecido como "secador", que introduzia um fluxo de ar forçado na descarga, a fim de medirmos a eficiência da descontaminação na presença de um fluxo maior sobre a descarga e a amostra. A figura 6.31 traz o CAD desse protótipo.

Por fim, o protótipo final proposto por este trabalho pode ser visto nas figuras 6.32 e 6.33.

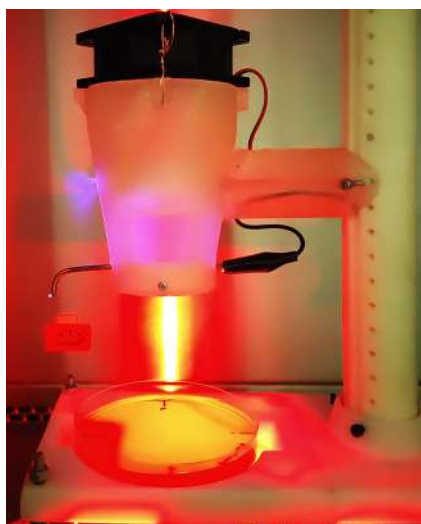


Figura 6.28. Reator com fluxo de ar ativo em teste na capela de segurança biológica. Na imagem, o brilho lilás se deve ao plasma atmosférico. A luz vermelha é um reflexo na estrutura metálica da capela, oriundo dos LEDs de indicação do circuito excitador. A placa de Petri está à uma distância de 70 mm da descarga. O eletrodo interno recria a cortina de plasma, em uma região confinada, com uma ventoinha gerando um fluxo ativo de ar atmosférico.

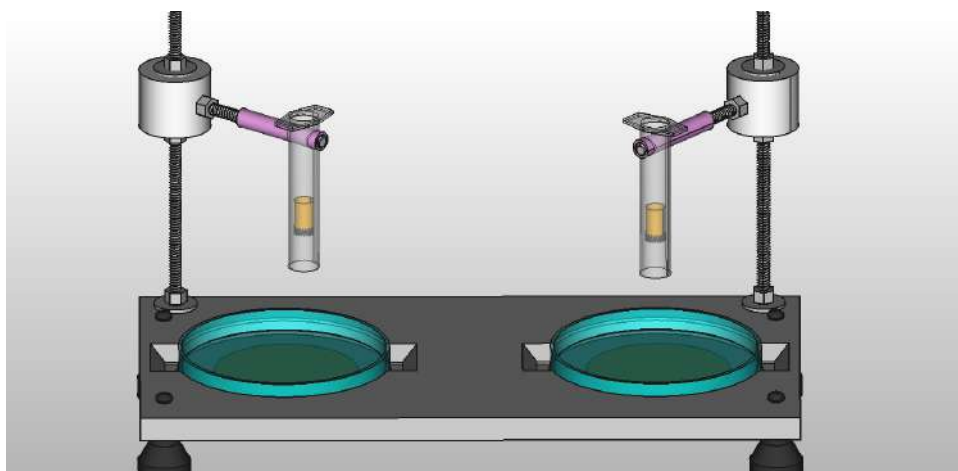


Figura 6.29. CAD do sistema proposto com duas seringas.

6.3.3.2 Peças Impressas

Foram utilizados, além de ferragens, peças projetadas e impressas 3D, utilizando impressoras de resina e de filamento. Diversas resinas foram testadas sob o efeito da descarga de plasma, e como material isolante das conexões de alta tensão. As impressoras, e suas características, utilizadas na confecção de peças e do protótipo final podem ser vistas na Fig. 6.34 e na Tab. 6.3.

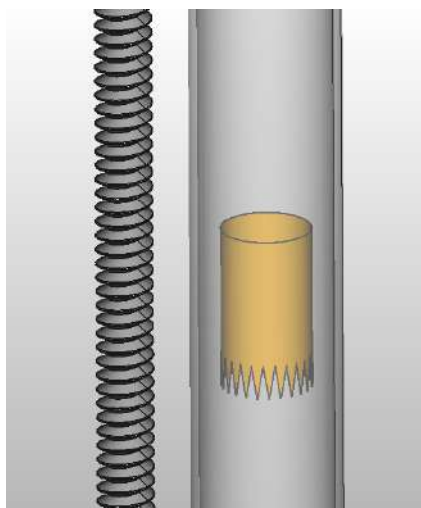


Figura 6.30. Detalhe do eletrodo projetado para a caneta de plasma. O formato circular visa uniformizar a descarga no interior da seringa, enquanto as pontas concentram as cargas elétricas, facilitando a ruptura do ar e sua ionização.

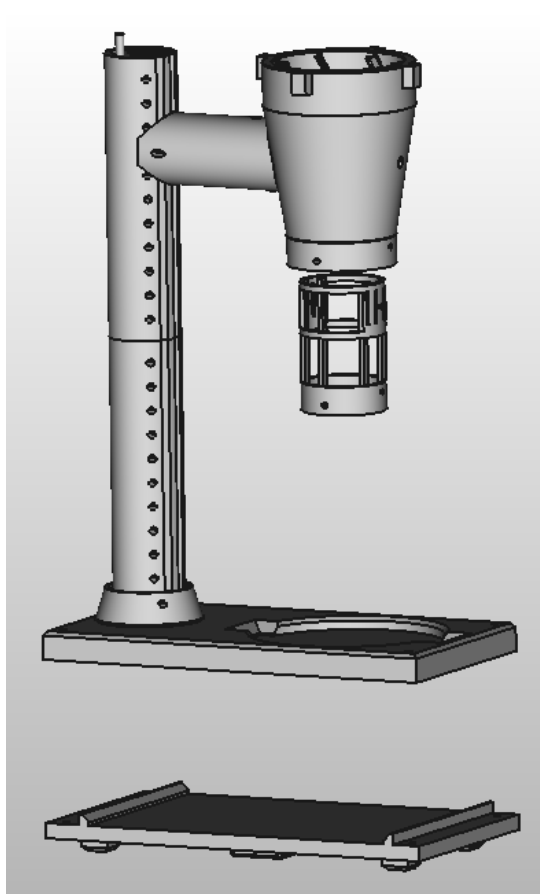


Figura 6.31. CAD do protótipo com fluxo de ar forçado, batizado de "secador".

6.3.4 Medições em Bancada - Temperatura

Uma verificação realizada, tanto na bancada do LFP/UnB quanto nos testes no Laboratório de Microbiologia Celular-UnB, foi a medição da temperatura do substrato e dos elementos de circuito antes, durante e após a exposição ao plasma. A temperatura do substrato

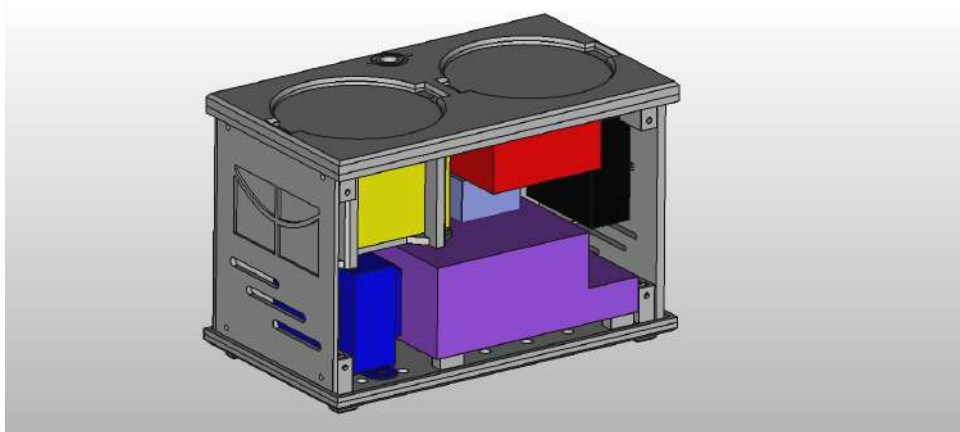


Figura 6.32. CAD do sistema proposto, com todos os componentes internos em um sistema único. A parte superior foi desenvolvida para suportar duas placas de Petri de 90 mm de diâmetro, com diferentes geometrias de reator podendo ser utilizado. As peças foram impressas em 3D. As cores representam os diferentes blocos do sistema, e podem ser vistos com detalhes na Fig. 6.16.

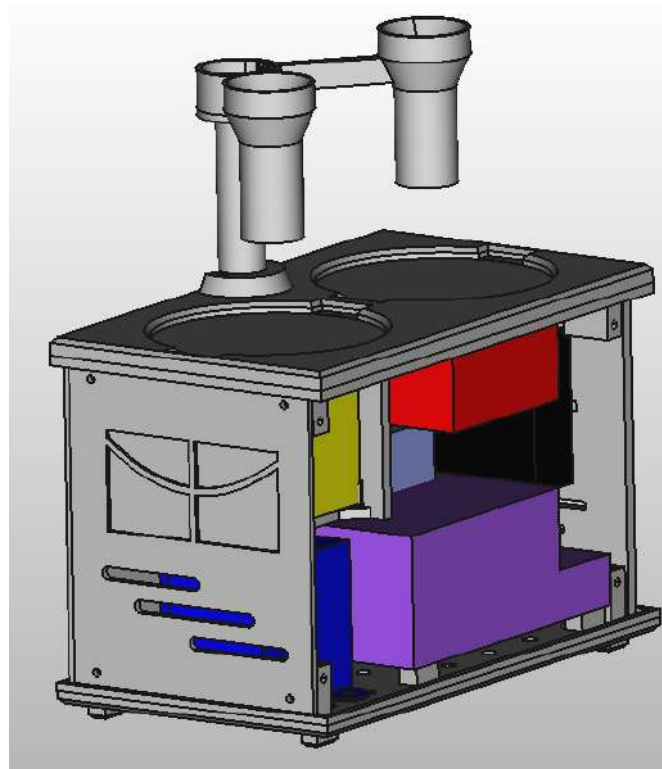


Figura 6.33. CAD do protótipo final com duas canetas de plasma.

estava em torno de $24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes do experimento e, após 20 minutos de exposição à descarga corona, a temperatura do substrato estava em torno de $19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme pode ser visto na Fig. 6.40. A Tab. 6.4 traz a variação de temperatura para diferentes tempos de exposição à descarga corona. O experimento foi realizado em uma sala fechada, sem janelas, dentro de uma capela com fluxo laminar. Apesar de pequenas variações nas diversas medição, podemos verificar que a descarga corona não influencia significativamente a temperatura do substrato. Essa informação é importante para comprovar que o efeito esterilizante se deve

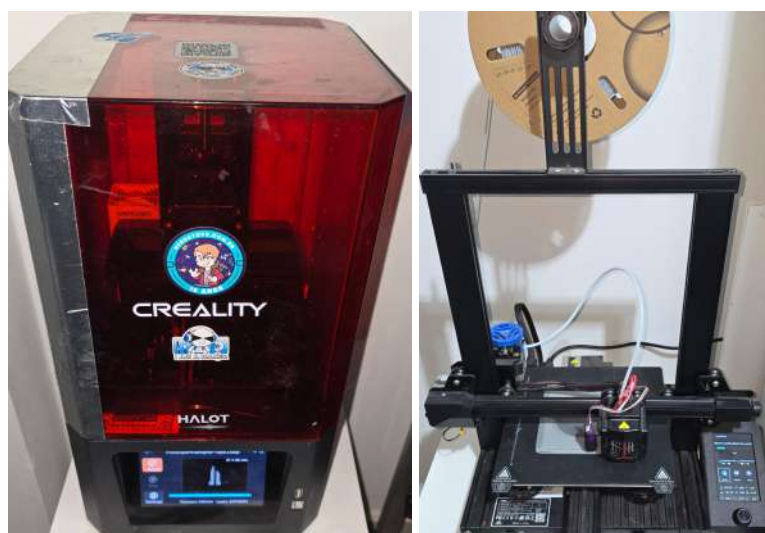


Figura 6.34. Impressoras utilizadas no desenvolvimento dos protótipos. À esquerda, uma impressora de resina fotossensível, modelo *Creality Halot One*. À direita, uma impressora de filamento, modelo *Creality Ender 3 V2*.

Tabela 6.3. Impressoras utilizadas na construção do protótipo.

Modelo	Área de Impressão	Material Utilizado
Creality Ender 3 V2	22 x 22 x 25 cm	PLA
Creality Halot One	12,7 x 8 x 16 cm	Resina ABS-like

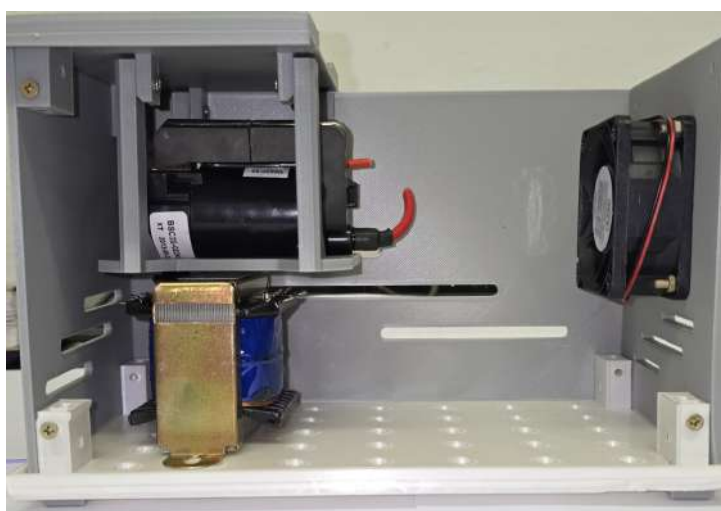


Figura 6.35. Modelo impresso em PLA, com os componentes dispostos em seu interior. Aberturas foram projetadas para a circulação de ar interna, com a ventoinha forçando o ar quente para fora.

aos subprodutos da descarga corona, e não ao aumento da temperatura na superfície.

Já os elementos do circuito atingiram a temperatura máxima de 61°C após 1 hora de operação. Durante os testes biológicos, com o tempo máximo de tratamento em 20 minutos, o MOSFET se manteve em torno de 52°C , conforme visto pela câmera térmica e pelo termômetro infravermelho, mostrado aqui na Fig. 6.41. A Tab. 6.5 traz a curva de temperatura para diferentes tempos de operação, medidos na bancada do LFP. Para este teste, o circuito



Figura 6.36. Detalhe lateral do sistema impresso. Aqui é possível observar como as peças se encaixam, sendo parafusadas na estrutura superior e inferior. Isto permite que parte do sistema seja desmontando e trocado, ou que todo o protótipo seja desmontado, para facilitar limpeza, upgrades ou reparos.



Figura 6.37. Detalhe do sistema de fixação da estrutura do protótipo, à esquerda, utilizando a união de peças impressas, com espaços dedicados para porcas, e parafusos padrão M3. À direita, o detalhe do suporte do transformador *flyback*, separado dos outros componentes para evitar danos internos.

foi ligado e operou por 90 minutos. Medidas de temperatura foram tomadas em diferente intervalos. A potência elétrica consumida pelo circuito foi de 25 W aproximadamente, com uma tensão em 20 V e a corrente oscilando em torno de $1,268\text{ A}$. A Fig. 6.42 ilustra o teste de temperatura do circuito.



Figura 6.38. Protótipo final, construído com peças impressas em 3D.

Tabela 6.4. Tabela com os dados de temperatura da superfície do ágar, medidos com a câmera térmica, antes e depois da exposição ao plasma, para diferentes tempos de aplicação.

Temp. Antes (°C)	Temp. Após (°C)	ΔT (°C)	Tempo de Exposição (minutos)
24.3	24.5	0.2	5
27.7	24.6	-3.1	10
24.8	25.2	0.4	10
25.1	23.9	-1.2	15
23.1	19.9	-3.2	15
24.8	19.3	-5.5	20
23.2	25.6	2.4	20

6.3.5 Medições em Bancada – Parâmetros Elétricos

Antes dos testes biológicos, cada modificação do circuito excitador era verificada em bancada. Parâmetros como o correto funcionamento, temperatura máxima de operação, consumo energético, entre outros, eram testados antes que o protótipo pudesse ir para os testes biológicos. A bancada era constituída pelos seguintes itens:

- Placas perfuradas universais;
- Fonte de bancada DC, modelo HIKARI HF 3203S, com saída regulável até 32 V com



Figura 6.39. Protótipo final, construído com peças impressas em 3D.

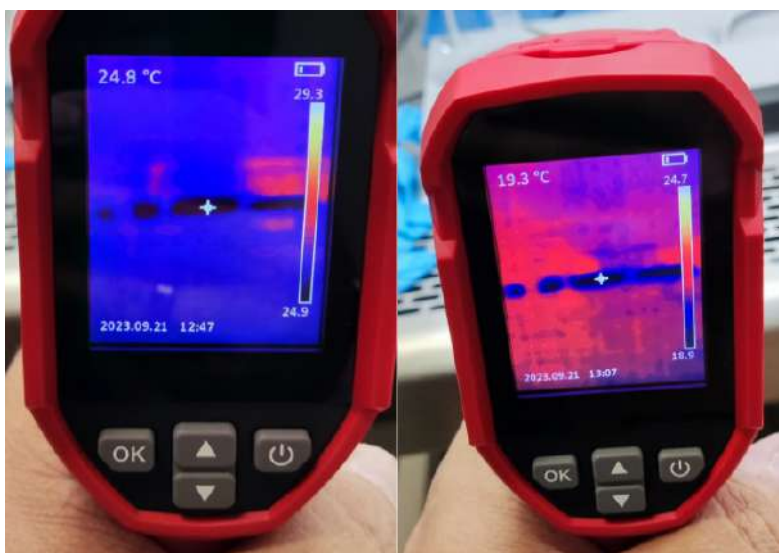


Figura 6.40. Medições de temperatura da superfície do ágar, antes e após a aplicação do plasma no eletrodo tipo “cortina” por 20 minutos. A temperatura da superfície do ágar não demonstrou elevações significativas, sendo que em certas medidas a temperatura medida após foi inferior aquela no início do teste.

3 A;

- Osciloscópio digital, modelo HANTEK DSO2D15, com 1 GSa/s e 150 MHz de largura



Figura 6.41. Na esquerda temos a temperatura do circuito vista pela câmera térmica, com o maior valor de temperatura no MOSFET, em torno de 52°C . Já com o termômetro infravermelho diretamente acima do MOSFET, foi medido uma temperatura de 52°C , após 20 minutos de operação contínua.



Figura 6.42. Tomada de temperatura do circuito, durante o teste para verificar o aquecimento dos componentes.

Tabela 6.5. Tabela com os dados de temperatura medidos com um termômetro infravermelho em três pontos do circuito eletrônico, sendo eles: MOSFET, *stepdown* LM2596, amplificador classe A.

Tempo (minutos)	Temp. MOSFET ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. LM2596 ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. classe A
0	24.5	24.3	24.5
10	44.2	35.0	27.1
20	52.6	43.2	27.8
30	56.9	48.9	27.7
60	61.4	52.5	28.3
90	60.9	50.7	27.9

de banda máxima;

- Pontas de prova para osciloscópio, modelo HANTEK P6100 x1/x10 100 MHz CAT II;

- Ponta de prova de alta tensão para osciloscópio, modelo TEKTRONIX P6015A x1000 20 kV DC ou 40 kV pulsado;
- Termômetro infravermelho, modelo KLX GM320, -50°C até 400°C ;
- Câmera infravermelha digital, modelo UNI-T UTi120S;
- Multímetro digital de bancada, modelo HP 34401A;
- Estação de solda, modelo Hikari HK-930;
- Medidor de qualidade do ar, model 2CO9, com medidas da temperatura ambiente e umidade do ar;
- Conjunto de chaves de precisão e alicates.

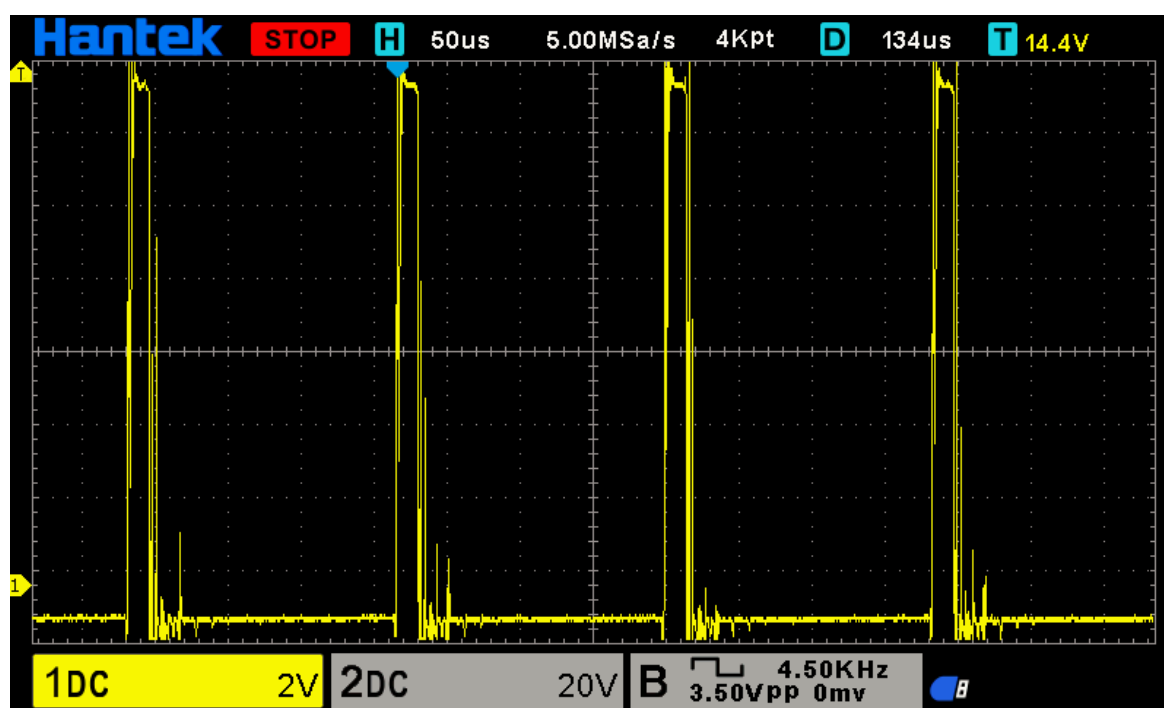


Figura 6.43. Curva mensurada na saída do gerador de sinal PWM da segunda iteração do circuito.

6.3.6 Estrutura da Estufa de Plasma

6.4 TESTES BIOLÓGICOS

A validação da capacidade biocida dos reatores utilizando CAPs foi realizada no Departamento de Biologia Celular, localizado no Instituto de Ciências Biológicas (IB/UnB). Esta parceria foi fundamental para a comprovação da eficácia dos protótipos criados, ajudando a guiar as ideias para o sistema com o melhor desempenho.

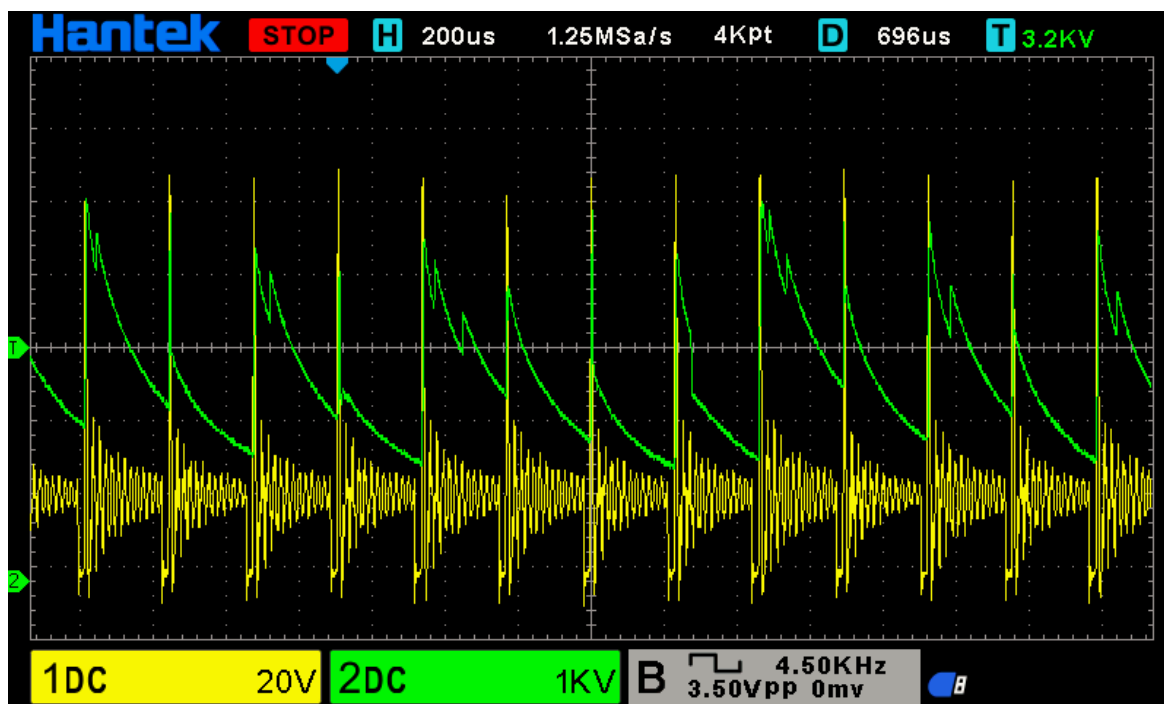


Figura 6.44. Curva do sinal do primário do *flyback*, em amarelo, e do sinal de alta tensão, em verde. Foi possível verificar o fenômeno de *ringing* oriundo do chaveamento rápido do primário do transformador, assim como a curva da descarga corona, atingindo 5 *kV*.

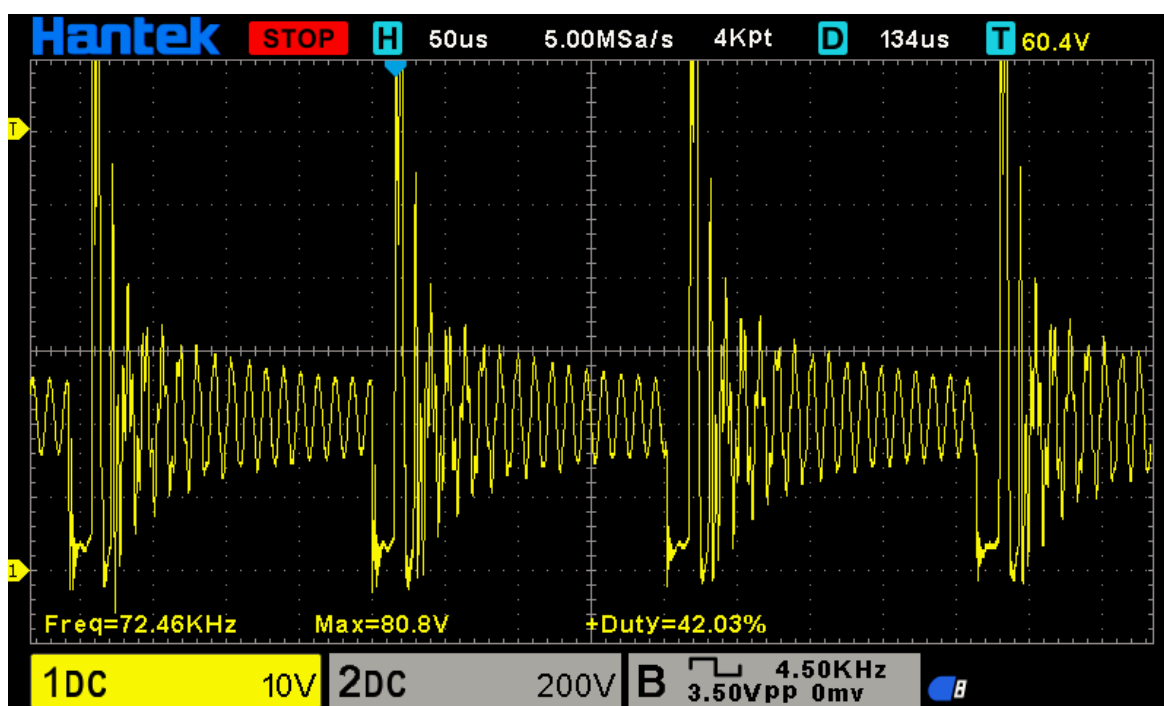


Figura 6.45. Aqui em detalhes o fenômeno *ringing* do primário do transformador *flyback*.

Os testes com contaminantes biológicos utilizaram placas de Petri descartáveis, esterilizadas de fábrica com radiação ionizante. Estas placas foram preenchidas com um meio LB com 1.2% de ágar, com um volume de 40 *mL* por placa.

Todos os testes foram realizados utilizando o espécime *Peribacillus simplex* SDF0016 (Orem

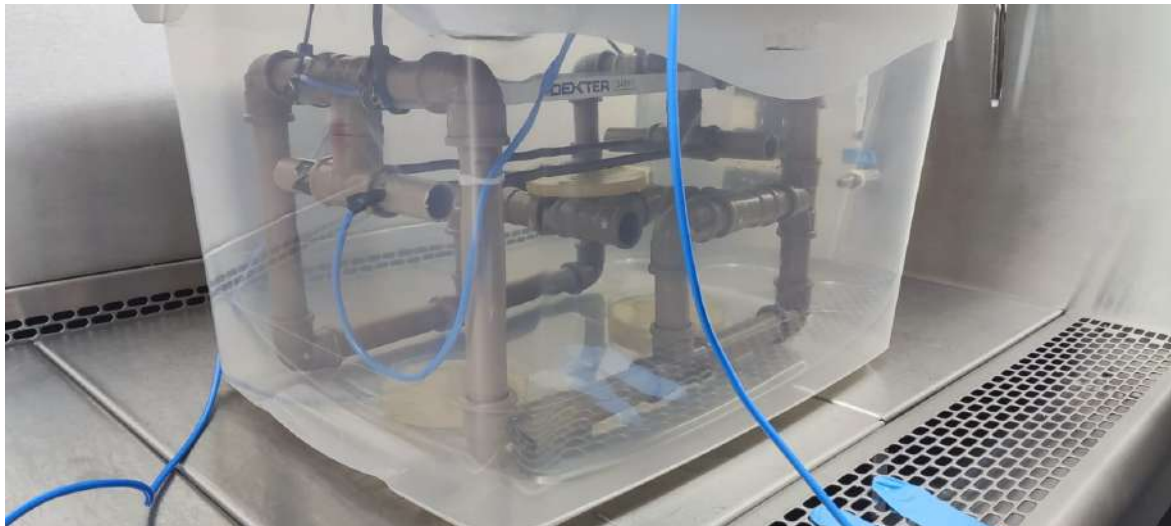


Figura 6.46. Estufa de plasma, com volume de 50 L, na capela de segurança biológica, pronta para a bateria de testes. Três placas de Petri estão dispostas no interior da estufa.



Figura 6.47. Detalhe da descarga do tipo cortina entre os eletrodos na parte interna da estufa. É possível observar também a placa Petri mais próxima dos eletrodos e a estrutura interna feita em PVC.

et al., 2019), em fase logarítmica. Após a exposição ao plasma, as placas, e os controles, foram incubados por 24 horas, em uma temperatura de 30 °C. Antes, e após, cada bateria de teste, a sala, capela de segurança biológica, circuito e reator eram submetidos a 30 minutos de exposição à luz ultra violeta, conforme exemplificado pela Fig. 6.48.

6.4.1 Primeiro Teste

O primeiro teste do efeito biocida da descarga corona foi realizado utilizando o *setup* visto na Fig. 6.24, onde o eletrodo ativo com alta tensão está localizado dentro da seringa, e o segundo eletrodo do transformador *flyback* está abaixo e conectado eletricamente ao substrato de ágar, conforme exemplificado na Fig. 6.21.

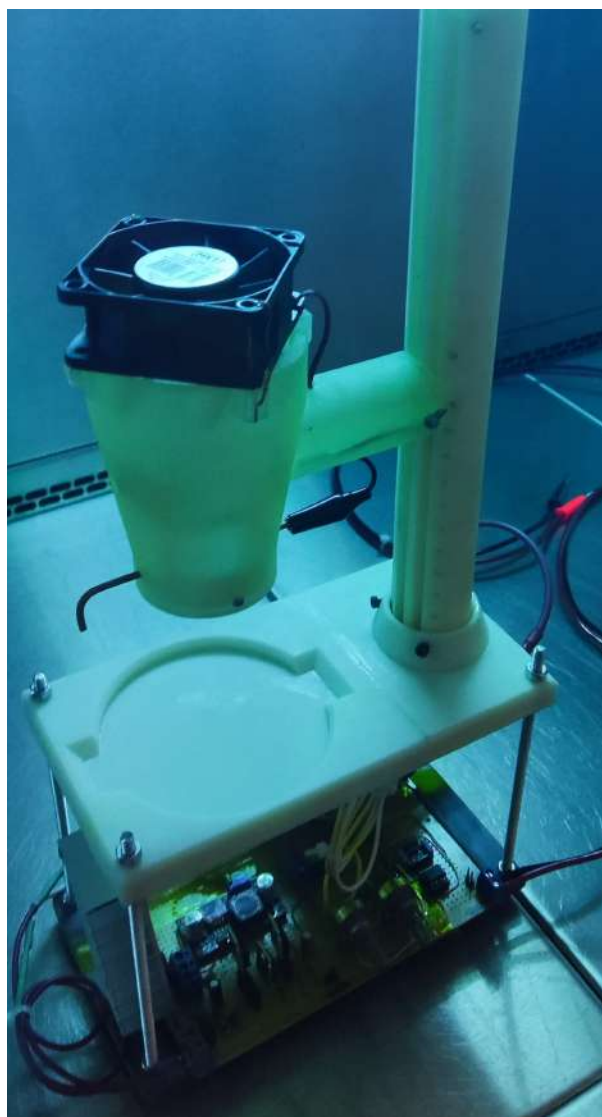


Figura 6.48. Reator tipo "secador" sendo descontaminado com luz UV antes da bateria de testes. Todos os reatores utilizados nos testes biológicos passarão por essa rotina de 30 minutos de exposição, antes e após os testes.

Nesta etapa a seringa não tinha sido modificada, possuindo ainda uma abertura pequena em sua extremidade, com um diâmetro interno de 2 mm . Essa abertura diminuta influencia a difusão dos produtos da descarga corona, possibilitando uma aplicação em uma área controlada.

O experimento seguiu os seguintes passos:

1. 11 placas foram preparadas com o meio LB, com 1.2% de ágar, utilizando 40 mL por placa;
2. 9 placas foram inoculadas em um, dois ou três pontos (3 placas para cada configuração), com $10\mu\text{L}$ de 10^6 células/mL em fase log;
3. 2 placas foram inoculadas em sua totalidade, espalhando $100\mu\text{L}$ de 10^8 células/mL em toda a área do substrato;

4. 4 placas foram separadas, uma para cada configuração de pontos, e uma com a carga microbiana maior, para serem as amostras de controle;
5. As 7 placas restantes foram submetidas à ação do plasma, por 10 minutos, com a saída da seringa a uma altura de 40 mm em relação à superfície do meio;
6. Após todas as exposições, as placas tratadas e de controle foram incubadas por 24 horas, a uma temperatura constante de 30 °C.

Após o período de incubação de 24 horas, as placas foram analisadas e fotografadas. As Figs. 6.49, 6.50, 6.51 e 6.52 trazem os resultados obtidos, que superaram o esperado para esta primeira iteração do sistema. Foi possível inviabilizar inteiramente os contaminantes inoculados nos pontos de aplicação, e verificar o padrão de difusão das espécies reagentes, uma vez que o plasma sai da seringa.

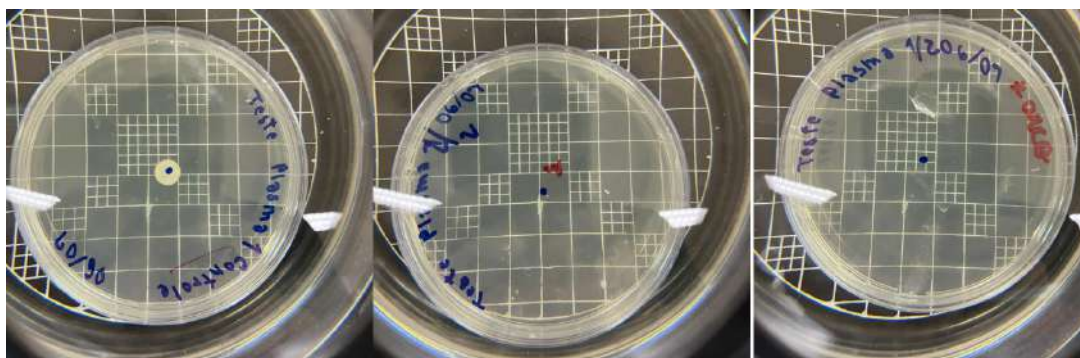


Figura 6.49. Resultado do primeiro teste com a caneta de plasma e o *Peribacillus Simplex SDF0016*. Na placa da esquerda, que foi o controle para este teste, podemos ver o crescimento de colônias, indicando a viabilidade dos espécimes. O teste foi realizado em duplicata, mostrando a ação bactericida do plasma atmosférico, nestas condições. É possível observar nenhum crescimento nas placas central e direita.

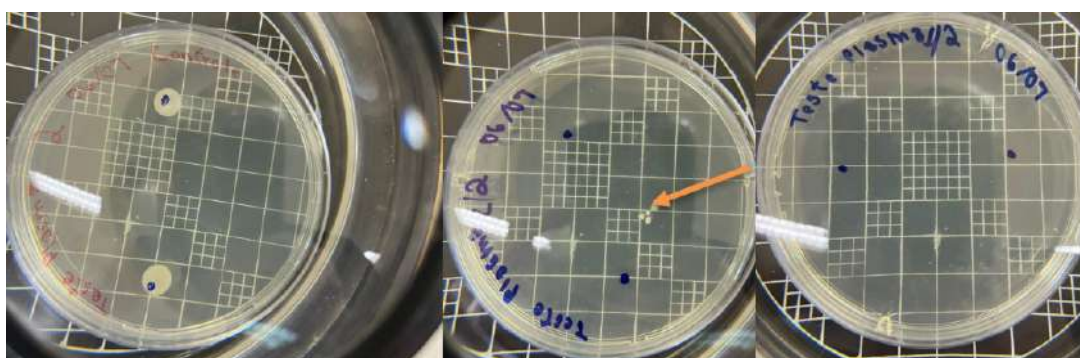


Figura 6.50. Resultado do primeiro teste, utilizando dois pontos de inoculação. Na placa de controle à esquerda é possível ver o crescimento das colônias, sendo que nas placas central e direita não há evidência de crescimento na região inoculada e exposta ao plasma. Os organismos indicados pela seta são contaminantes externos, de uma fonte desconhecida.

Estes resultados foram bastante promissores, obtendo uma ação biocida acima do esperado, para esta primeira bateria de testagem. Podemos observar nas Figs. 6.49, 6.50 e 6.51 que todos os pontos de inoculação tiveram uma total inviabilização do contaminante biológico

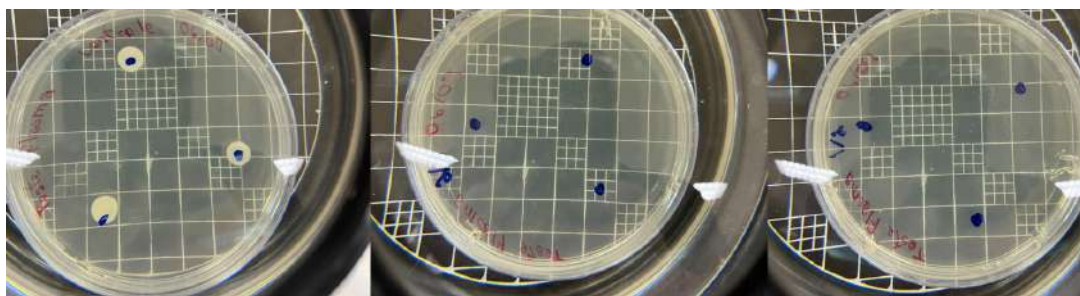


Figura 6.51. Resultado do primeiro teste, utilizando três pontos de inoculação. Na placa de controle, à esquerda, é possível ver o crescimento dos micro-organismos após 24 horas de incubação. Na placa central e à direita, nas zonas expostas ao plasma, não são observados crescimentos de colônias.

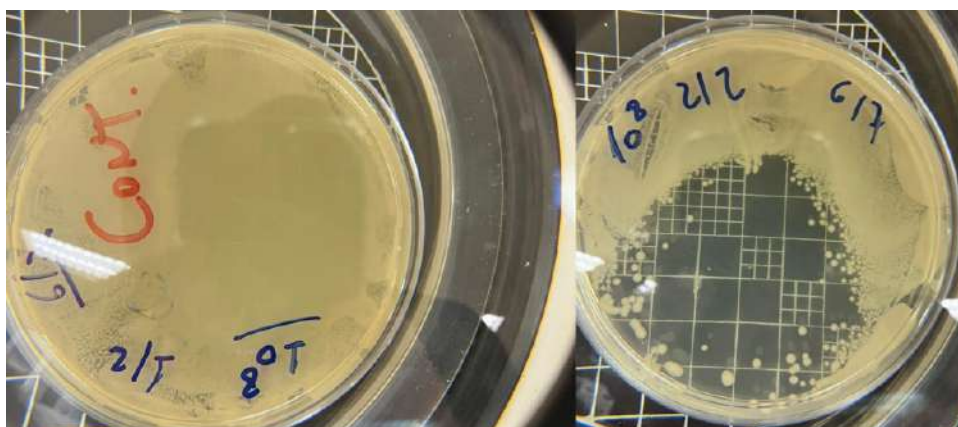


Figura 6.52. Resultado do primeiro teste, com a inoculação cobrindo todo o substrato, e não apenas pontos. À esquerda temos a placa controle, com toda a superfície recoberta por colônias, e à direita o resultado da exposição ao feixe de plasma. Aqui é importante observar o halo de difusão das partículas reativas, onde no centro da exposição não temos crescimento evidente, e a medida em que afastamos do centro da exposição, colônias isoladas aparecem de forma gradativa, até a total cobertura do substrato na região não tratada, indicando a possibilidade de aplicação pontual do CAP.

ali inoculado. Em uma das placas com dois pontos tivemos um crescimento numa região não inoculada, sendo considerada um contaminante externo. Além disso, na Fig. 6.52 podemos observar o mesmo efeito biocida no centro da aplicação do plasma, e o halo de difusão dessa descarga, demonstrando a sua capacidade de tratamento pontual, mas também o alcance que a difusão do plasma permite. Como pode ser observado na Fig. 6.19 o plasma se expande ao sair do espaço confinado da seringa, se comportando como uma pluma de exaustão. Ainda assim, é possível verificar que o centro da exaustão possui um comprimento maior em relação à região expandida, o que ajuda a explicar o efeito visto na Fig. 6.52.

6.4.2 Segunda Bateria de Testes

Partindo dos resultados promissores do primeiro teste, e evoluindo o sistema eletrônico, bem como a geometria do eletrodo, uma nova bateria de ensaios foi realizada.

Neste novo sistema, que pode ser visto nas Figs. 6.25 e 6.26, foi modificado o circuito

gerador do plasma, bem como a geometria e disposição dos eletrodos e seringas. Uma base foi impressa em 3D, utilizando o filamento PLA, com espaços dedicados para duas placas de Petri, e com duas seringas para aplicações simultâneas nas duplicatas. Além das mudanças nos suportes do sistema, o eletrodo interno foi modificado, com o intuito de uniformizar a descarga na parte interna da seringa. Além disso, o orifício de saída da seringa foi aumentado, para 12 mm, ocupando todo o diâmetro interno disponível.

Os experimentos com este novo sistema seguiram os seguintes passos:

1. 10 placas foram preparadas com o meio LB, com 1.2% de ágar, utilizando 40 mL por placa;
2. as 10 placas foram inoculadas em toda a área superficial, com 200 µL de 10⁸ células/mL em fase log, do contaminante *Peribacillus simplex* SDF0016 (Orem *et al.*, 2019);
3. 2 placas foram separadas para serem as amostras de controle;
4. o reator a plasma, assim como a capela de risco biológico, foram submetidos a luz UV por 30 minutos;
5. as 8 placas restantes foram então submetidas à ação do plasma, durante 1, 3, 6 e 10 minutos, com a saída das seringas a uma altura de 40 mm em relação à superfície do ágar;
6. durante a exposição foi mensurado a temperatura da superfície do ágar e dos componentes do circuito excitador, em especial o MOSFET;
7. após todas as exposições, as placas tratadas e de controle foram incubadas por 24 horas, a uma temperatura constante de 30 °C.
8. por fim as placas foram fotografadas após o período de incubação;

Os primeiros testes biológicos deste novo sistema foram promissores, conforme pode ser verificado nas Fig. 6.53 e 6.54. As mudanças feitas ao circuito e ao reator CAPs aprimoraram qualitativamente o efeito biocida sobre os contaminantes biológicos. Neste teste, com uma carga bacteriológica maior, foi possível observar uma maior zona de ação do plasma, nas placas de 10 minutos de exposição, em comparação com o sistema anterior, cujo resultado pode ser visto na Fig. 6.52. Além disso, foi possível observar claramente a influência do tempo de exposição, para estas características do reator. A Tab. 6.6 trás a relação das unidades formadoras de colônias (UFC) em relação ao tempo de exposição.

Seguindo com os testes deste segundo protótipo, uma nova rodada de duplicatas foram expostas ao plasma, seguindo os mesmos critérios do teste anterior. Conforme esperado, os resultados se repetiram, demonstrando a relação entre tempo de exposição e efeito biocida, conforme demonstrado na Fig. 6.55, e no comparativo entre a exposição por 10 minutos e a placa controle, visto na Fig. 6.56.

Durante esta bateria de testes foi possível verificar claramente a influência do tempo de exposição no efeito biocida do plasma atmosférico. Além disso, a potência elétrica aplicada

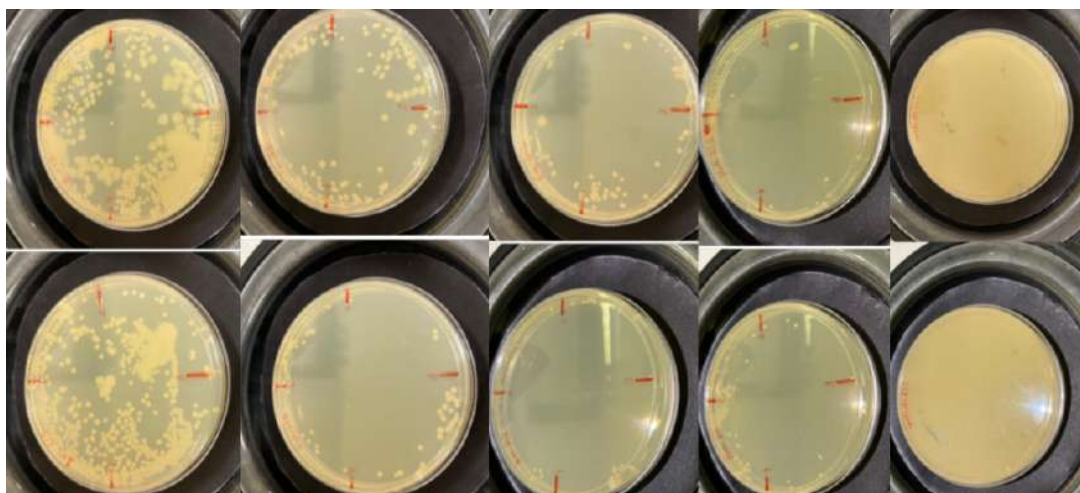


Figura 6.53. Conjunto de duplicatas, após a exposição ao plasma e o período de incubação. Da esquerda para direita temos os tempos de 1, 3, 6, 10 minutos de exposição, e o controle. A fileira de baixo corresponde às duplicatas da fileira de cima. Nesta disposição é possível perceber a influência do tempo de exposição ao efeito biocida, além do alcance do novo sistema de caneta de plasma, sendo possível atingir a totalidade da placa de Petri nos tempos superiores.

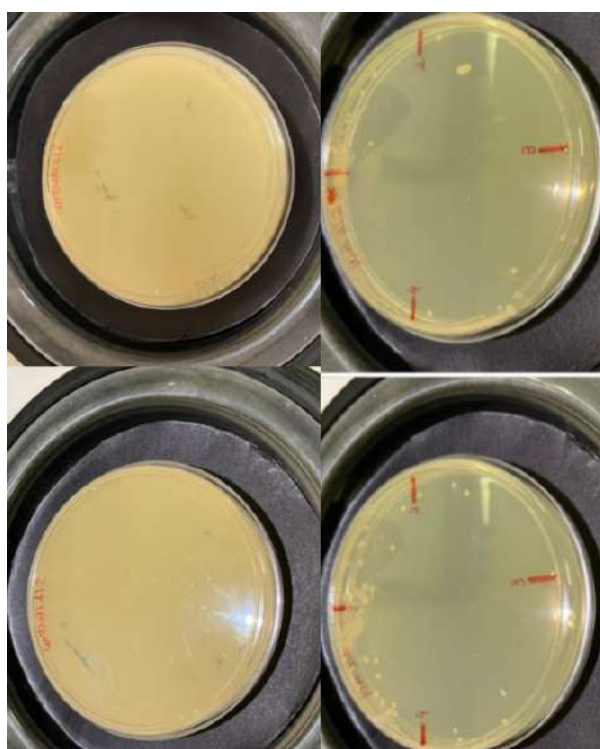


Figura 6.54. Detalhe comparativo entre as placas de controle, à esquerda, e aquelas submetidas a 10 minutos de exposição ao plasma, à direita. Apesar de existirem algumas unidades formadoras de colônias, é possível verificar a ação biocida do plasma atmosférico.

na descarga também afeta a produção dos agentes antissépticos. Outro fator importante a ser levado em consideração é a distância entre a descarga e a superfície do substrato, sendo também um fator importante. Como nesses testes utilizamos um único transformador para alimentar as duas canetas de plasmas, pequenas variações na distância entre seus eletro-

Tabela 6.6. Comparativo de unidades formadoras de colônias (UFC) após exposição ao plasma por diferentes intervalos de tempo.

Tempo de Exposição	Placa 1 (UFC)	Placa 2 (UFC)
Controle	Cobertura total da superfície Incontáveis ($< \textit{Controle}$)	Cobertura total da superfície Incontáveis ($< \textit{Controle}$)
1 minuto		
3 minutos	50	107
6 minutos	40	53
10 minutos	41	37

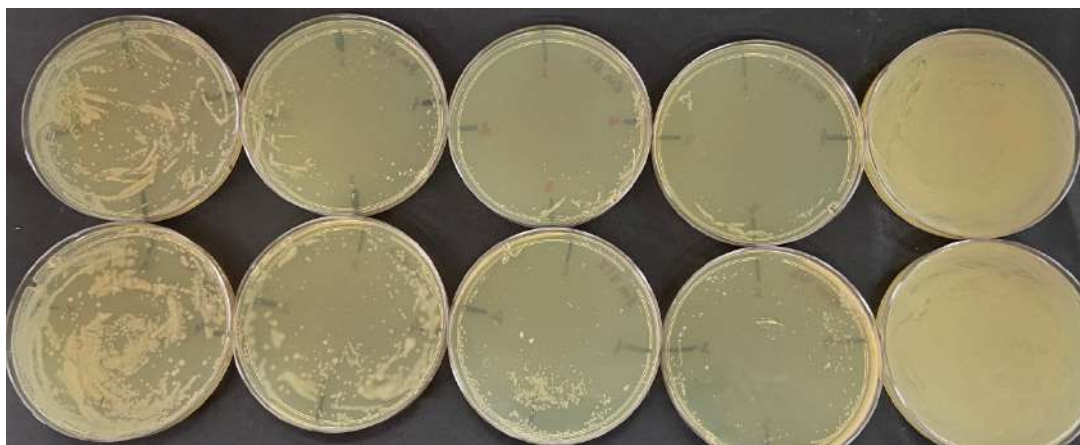


Figura 6.55. Resultado do segundo teste com o segundo protótipo. Da esquerda para a direita temos os tempos de exposição de 1, 3, 6, 10 minutos e o controle. A fileira de cima traz um conjunto de amostras, e a fileira de baixo a sua duplicata. É possível ver a influência do plasma atmosférico mesmo com apenas 1 minuto de exposição.



Figura 6.56. Detalhe do resultado do segundo teste com o segundo protótipo desenvolvido neste trabalho. À esquerda, temos o resultado após 10 minutos de exposição, e à direita o controle.

dos favoreceria uma maior densidade de plasma na caneta com a menor distância. Este efeito pode guiar uma explicação da diferença entre as duplicatas, conforme visto na Tab. 6.6,

onde um conjunto de placas demonstrou uma quantidade menor de colônias em relação à outra. Porém, mesmo com estas nuances, o sistema é capaz de tratar ambas placas simultaneamente, com a extensão do tempo de exposição como uma alternativa para mitigar as variações nas descargas.

Durante esta campanha de testes foi introduzido um novo arranjo de eletrodos, mantendo-se o circuito excitador. Apelidado de tratamento “cortina”, a descarga corona ocorreria a uma distância superior, acima das placas, entre dois eletrodos posicionados a uma distância de 30 mm entre si, conforme visto na Fig. 6.58. O teste foi realizado na capela de segurança biológica, e seguiu os seguintes passos:

1. 14 placas foram preparadas com o meio LB, com 1.2% de ágar, utilizando 40 mL por placa;
2. as 14 placas foram inoculadas em toda a área superficial, com 200 μ L de 10^8 células/mL em fase log, do contaminante *Peribacillus simplex* SDF0016 (Orem *et al.*, 2019);
3. 2 placas foram separadas para serem as amostras de controle;
4. o reator a plasma, assim como a capela de risco biológico, foram submetidos a luz UV por 30 minutos;
5. as 12 placas restantes foram então submetidas à ação do plasma, durante 10 e 20 minutos, em grupos de 3 placas dispostas ao longo da cortina de plasma. O eletrodo ativo da cortina estava a uma distância de 30 mm do eletrodo referência, sendo que este estava à uma distância de 50 mm da superfície do ágar;
6. durante a exposição foi mensurado a temperatura da superfície do ágar e dos eletrodos;
7. após todas as exposições, as placas tratadas e de controle foram incubadas por 24 horas, a uma temperatura constante de 30 °C.
8. por fim as placas foram fotografadas após o período de incubação;

O teste com a descarga tipo “cortina” demonstrou a ação biocida do plasma atmosférico, porém com este novo arranjo o efeito foi reduzido. Como a descarga não estava sendo direta, mas indireta (entre os eletrodos e não mais entre eletrodo e ágar), e com uma distância superior, algumas espécies reativas não conseguiam chegar ao contaminante com a mesma energia, ou composição, neutralizando ao longo do caminho. Entretanto, foi possível verificar o efeito biocida e a resiliência de alguns subprodutos do plasma atmosférico, assim como a influência do tempo de exposição em relação ao efeito biocida. Existe uma diferença entre os tempos de 10 e 20 minutos de exposição, levando a crer que um tempo de exposição maior obteria um resultado similar a exposição por 10 minutos à caneta de plasma. As Figs. 6.58 e 6.59 trazem o resultado do teste com a descarga tipo “cortina”.

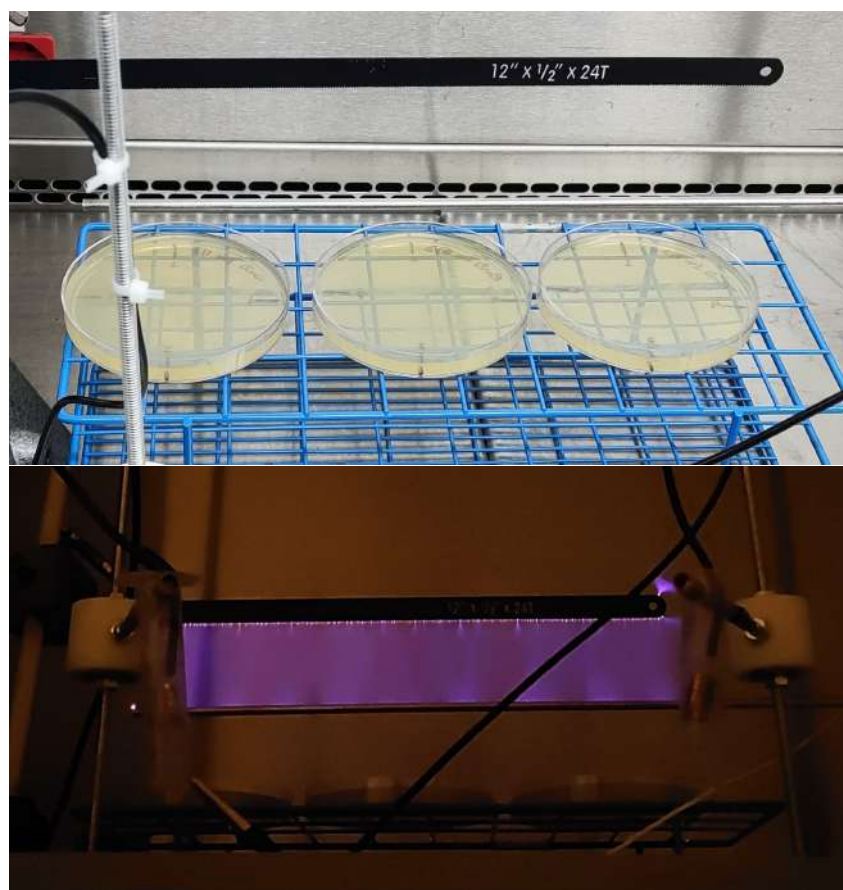


Figura 6.57. Disposição as placas de Petri no primeiro teste com a cortina de plasma. Na imagem inferior é possível observar a descarga corona entre os eletrodos. Esta descarga tinha 30 *cm* de comprimento, com uma distância entre os eletrodos de 50 *mm*.

6.4.3 Terceira Bateria de Testes – Estufa com Cortina de Plasma

Uma vez que a caneta de plasma obteve resultados promissores, outro aspecto do estudo com descontaminação a plasma foi investigado. O objetivo da cortina de plasma, dentro de um ambiente fechado, consiste em obter o efeito biocida no volume total da câmara, além de validar a capacidade de esterilização em superfícies ocultas, sem linha de visão direta à descarga. Ao utilizarmos radiação ultra-violeta para descontaminação, regiões na sombra (ocultas) não sofrem o efeito biocida da radiação, sendo uma limitação para este tipo de limpeza. Dado a natureza do plasma e seu comportamento na difusão dos subprodutos reativos, era esperado que o efeito biocida ocorreria também em regiões ocultas e de difícil acesso.

Após a construção do *setup* experimental, utilizando conexões de PVC, o conceito foi testado com placas de Petri de 150 *mm* de diâmetro, com o meio Mueller Hinton. O contaminante biológico utilizado nesta prova de conceito foi colhido em um estabelecimento comercial local, utilizando *swabs* para coleta em corrimãos, escada rolante e botões do elevador. Utilizando uma solução salina para facilitar a distribuição do contaminante, as placas foram inoculadas em sua totalidade. Uma placa foi separada como controle, e a outra foi submetida à cortina de plasma por 30 minutos. Após a exposição, ambas placas foram armazenadas e incubadas

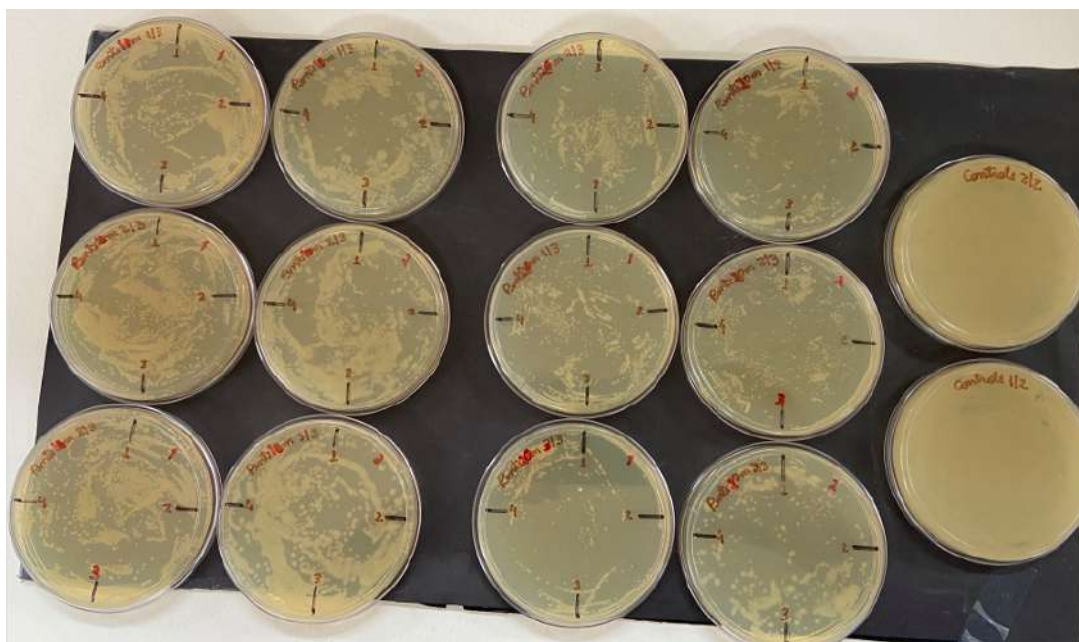


Figura 6.58. Resultado do teste com o eletrodo tipo “cortina”. Para este teste as placas estavam perfiladas, à uma distância de 50 mm dos eletrodos. O teste foi realizado em duplicatas, com a primeira coluna à esquerda com as placas expostas por 10 minutos, sendo a coluna subsequente a sua duplicata. A terceira coluna contém as placas expostas por 20 minutos, com a quarta coluna sendo sua duplicata. As duas placas mais a direita da imagem são as placas de controle. Apesar de um efeito biocida menor, em comparação com a caneta de plasma, ainda podemos observar um efeito de eliminação de contaminantes, além da influência entre a aplicação do plasma e o tempo de exposição.



Figura 6.59. Detalhe do resultado deste primeiro teste com o eletrodo tipo “cortina”. É possível observar uma “uniformidade” ao longo do eletrodo, sem uma placa demonstrando um nítido efeito preferencial. A linha superior trás as placas expostas por 10 minutos, e a linha de baixo sua duplicata. As placas mais a direita trazem as placas de controle.

por 24 horas, na temperatura ambiente em torno de 27°C . A Fig. 6.60 ilustra a exposição, com a estrutura dentro da câmara de descontaminação.

Na Fig. 6.61 podemos ver a comparação entre a placa tratada na estufa, por 30 minutos, e a placa de controle, após 24 horas de incubação. O resultado foi bastante promissor, demonstrando o efeito biocida deste reator, mesmo com algumas unidades formadas de colônia existindo na placa após o tratamento.



Figura 6.60. Aplicação da cortina de plasma em um recipiente fechado, de volume igual a 50 litros. A cortina de plasma consiste em dois eletrodos ativos, utilizando lâminas de arco de serra, e dois tubos de cobre como referência para o circuito de alta tensão. Uma estrutura em PVC foi construída para testar o alcance das espécies reativas em um ambiente fechado, com diferentes distâncias entre a placa e a descarga. O circuito excitador é o mesmo utilizado na caneta de plasma.

Esta estufa foi então levada para o Laboratório de Microbiologia da UnB, onde foi testado com os contaminantes utilizados nos testes anteriores. Além disso, as placas foram dispostas na estufa de tal forma a comparar o efeito biocida com diferentes distâncias e orientações em relação à cortina de plasma. O teste foi realizado na capela de segurança biológica, seguindo estes passos:

1. 14 placas foram preparadas com o meio LB, com 1.2% de ágar, utilizando 40 mL por placa;
2. as 14 placas foram inoculadas em toda a área superficial, com 200 μL de 10^8 células/mL em fase log, do contaminante *Peribacillus simplex* SDF0016 (Orem *et al.*, 2019);
3. 2 placas foram separadas para serem as amostras de controle;
4. o reator a plasma, assim como a capela de risco biológico, foram submetidos a luz UV

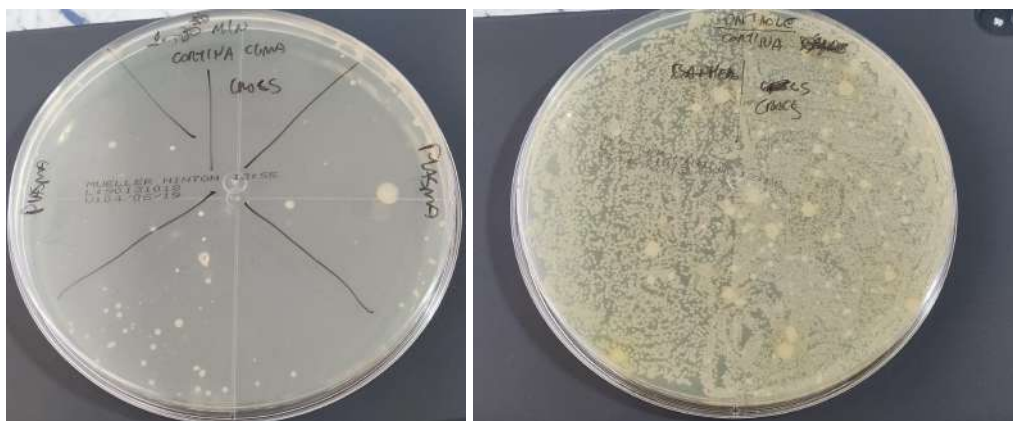


Figura 6.61. Durante a prova de conceito da estufa à plasma foi utilizado uma placa de Petri, com 150 mm de diâmetro e preenchida com o meio de cultura Mueller Hinton. Como contaminante biológico foi utilizado o material colhido em um shopping local. À esquerda temos o resultado do teste, com exposição à estufa por 30 minutos, e à direita a placa controle. Ambas placas foram incubadas por 24 horas a temperatura ambiente de 27 °C. Com este teste foi possível verificar que, em um ambiente fechado, as espécies reativas conseguem atingir todos os espaços da câmara, através da difusão.

por 30 minutos;

5. as 12 placas restantes foram então submetidas à ação do plasma, durante 20 e 30 minutos, com testes em duplicatas. O eletrodo ativo da cortina estava a uma distância de 40 mm do eletrodo referência, sendo que as placas estavam em distâncias e posições distintas dentro da estufa. A menor distância entre a descarga e a superfície do ágar foi de 50 mm, e a maior distância, para a placa que também estava ocultada, foi de 170 mm;
6. após todas as exposições, as placas tratadas e de controle foram incubadas por 48 horas, a uma temperatura constante de 30 °C;
7. fotografias foram tiradas, e as placas foram deixadas à temperatura ambiente por mais 72 horas;
8. por fim as placas foram fotografadas novamente após o segundo período de incubação.

6.4.4 Quarta bateria de testes – Reator com fluxo de ar ativo

A última bateria de testes realizados em parceria com o Laboratório de Microbiologia da UnB verificou o efeito de um fluxo de ar ativo pela região de ionização com um eletrodo tipo cortina. Utilizando 4 eletrodos para a alta tensão, e um tubo de cobre para a referência, a descarga ocorria dentro de uma câmara impressa 3D em resina translúcida, no formato de tronco de pirâmide cônico. Uma ventoinha era responsável por forçar o fluxo de ar atmosférico através da descarga de plasma, atingindo o substrato na saída do reator. Aletas na parte interna foram introduzidas para incentivar a criação de um vórtice no interior do reator, com o intuito de incentivar a passagem do fluido. A Fig. 6.28 trás esta configuração em operação na capela de segurança biológica. Estes testes utilizaram o seguinte procedimento:



Figura 6.62. Resultado do teste com a estufa à plasma. À esquerda, temos as placas de controle, e em seguida as placas tratadas por 20 minutos. A segunda coluna traz as placas que estavam a uma distância de 170 mm da cortina de plasma, a terceira coluna tem as placas à distância de 50 mm, e a coluna mais a direita as placas à distância de 170 mm e ocultadas. É possível ver que, salvo colônias pontuais, 20 minutos de tratamento na estufa a plasma teve uma ação biocida significativa.

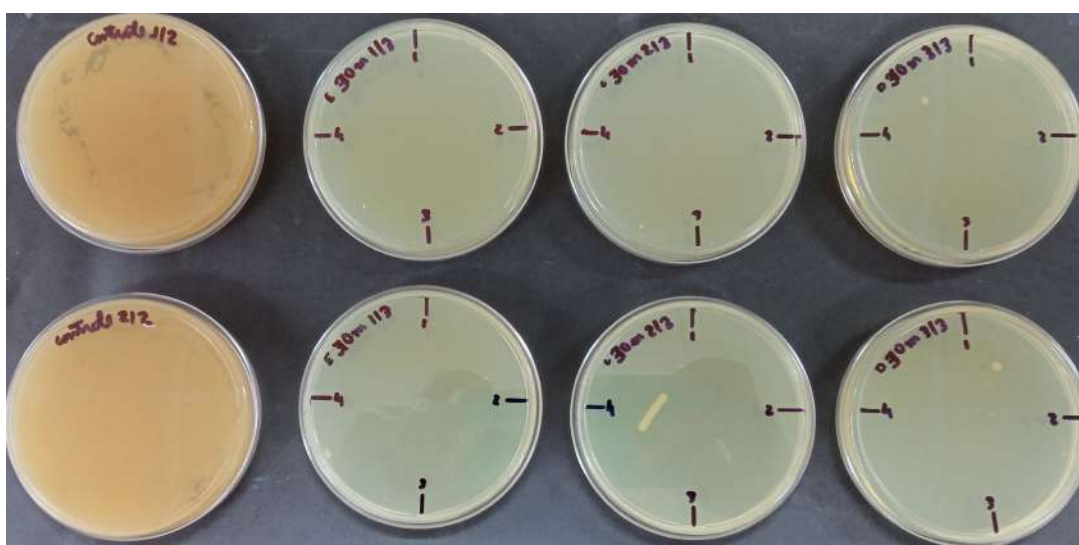


Figura 6.63. Resultado após 30 minutos de exposição à estufa de plasma e 48 horas de incubação. À esquerda, temos as placas de controle, e em seguida as placas tratadas por 30 minutos. A segunda coluna traz as placas que estavam a uma distância de 170 mm da cortina de plasma, a terceira coluna tem as placas à distância de 50 mm, e a coluna mais a direita as placas à distância de 170 mm e ocultadas. Com exceção de algumas colônias pontuais, o efeito biocida da descarga tipo cortina, dentro de uma câmara fechada, é considerável.

1. 10 placas foram preparadas com o meio LB, com 1.2% de ágar, utilizando 40 mL por placa;
2. as 10 placas foram inoculadas em toda a área superficial, com 200 μ L de 10^8 células/mL em fase log, do contaminante *Peribacillus simplex* SDF0016 (Orem et al., 2019);



Figura 6.64. Detalhe do resultado do tratamento na estufa, após 30 minutos de exposição e 48 horas de incubação. A linha de crescimento dos contaminantes se deve à uma laceração na superfície do ágar, que permitiu a infusão dos contaminantes e a proteção destes contra as espécies reativas. Este resultado demonstra a ação superficial da descarga, não possuindo uma capacidade de penetração da ação biocida.



Figura 6.65. Resultado do tratamento com estufa de plasma, após 120 horas de incubação. As duas primeiras colunas, da esquerda para direita, trazem as placas expostas por 20 minutos, as duas colunas subsequentes as placas expostas por 30 minutos e a última coluna as placas de controle.

3. 2 placas foram separadas para serem as amostras de controle;
4. o reator a plasma, assim como a capela de risco biológico, foram submetidos a luz UV por 30 minutos;
5. as 8 placas restantes foram então submetidas à ação do plasma, por tempos de 1, 3, 6 e 9 minutos, com testes em duplicatas. O eletrodo ativo da cortina estava a uma distância de 30 mm do eletrodo referência, e a distância entre este eletrodo e a superfície do ágar foi de 70 mm;
6. após todas as exposições, as placas tratadas e de controle foram incubadas por 48

horas, a uma temperatura constante de 30 °C;

7. as placas foram fotografadas após o período de incubação.

Conforme pode ser observado na Fig. 6.66, o resultado deste teste obteve uma ação biocida aquém dos testes anteriores. É possível ainda perceber a diferença do tratamento em relação ao tempo de exposição, porém uma grande parcela de contaminantes biológicos sobreviveram ao tratamento.

A hipótese levantada para este resultado contrário envolve o fluxo de ar forçado, gerado pela ventoinha. Como o sistema estava aberto, ou seja, o ar tinha espaço para sair da zona de ação do reator, é possível que este fluxo tenha impedido o acúmulo de espécies reativas na superfície do ágar, além de reduzido o tempo que o gás precursor permanecia entre os eletrodos, diminuindo consideravelmente a produção de espécies reativas, além de poder aumentar a frequência de colisão das moléculas, o que resultaria na neutralização das parcelas mais reativas.

Um novo teste foi então realizado, seguindo as mesmas condições do teste anterior, com exceção da intensidade do fluxo de ar gerado pela ventoinha, que teve sua intensidade reduzida em 30%. Após o período de incubação, conforme pode ser visto na Fig. 6.67, obtivemos indícios de que estava ocorrendo o efeito mencionado na hipótese levantada, onde o fluxo de ar forçado estava diminuindo a produção de espécies reativas, além de impedir o aumento da concentração destas espécies na superfície a ser tratada, seja pela neutralização precoce das espécies reativas, seja pela ação mecânica do fluxo que reduz a concentração de oxidantes na superfície do ágar.

Apesar de uma diferença sutil entre os resultados mostrados nas Figs. 6.66 e 6.67, esta diferença poder ser interpretada como a influência negativa do fluxo forçado de ar, para as condições deste teste específico. Outras intensidades de fluxos precisam ser testadas antes de atribuir este efeito à este fenômeno. Além disso, um teste com este reator em uma câmara fechada, como uma estufa, poderia ajudar a identificar qual a possível causa para a redução do efeito biocida.

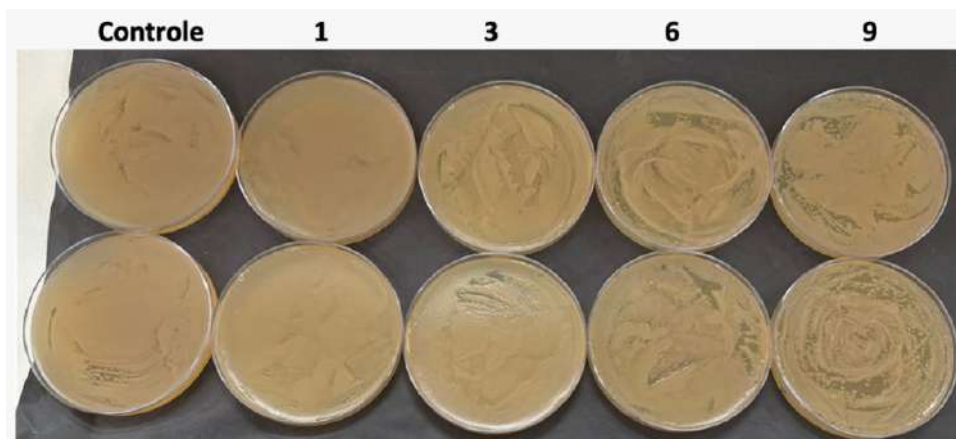


Figura 6.66. Resultados do teste com o fluxo de ar ativo. As placas mais a esquerda representam o controle, e cada coluna subsequente foi exposto por um tempo diferente, sendo 1, 3, 6 e 9 minutos respectivamente. A fileira de baixo é a duplicata da fileira de cima. Diferente dos outros experimentos, este não teve o efeito biocida esperado, com uma maior quantidade de colônias sobrevivendo ao tratamento. Uma possibilidade para tal efeito é que o fluxo da ventoinha diminuiu a quantidade de espécies reativas geradas, além de reduzir a concentração dos oxidantes na superfície do ágar.

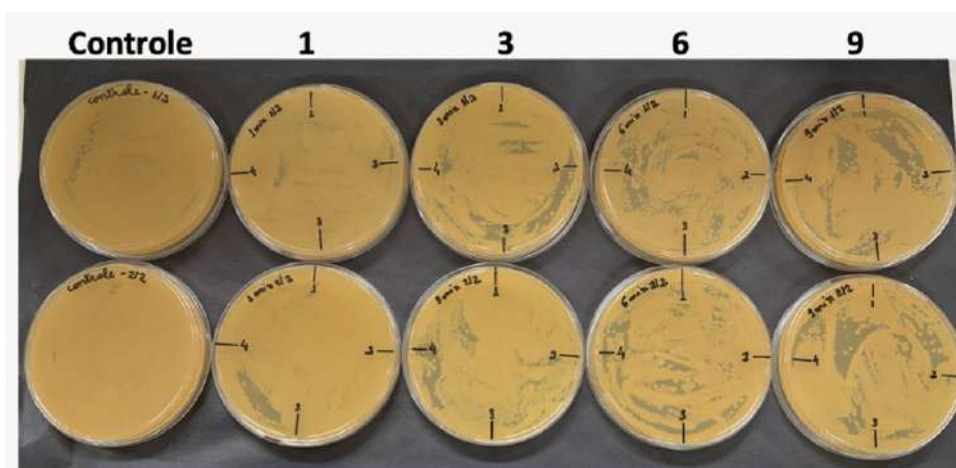


Figura 6.67. Resultado do segundo teste com fluxo de ar ativo, porém com 70% da intensidade do teste anterior. As placas mais a esquerda representam o controle, e cada coluna subsequente foi exposto por um tempo diferente, sendo 1, 3, 6 e 9 minutos respectivamente. A fileira de baixo é a duplicata da fileira de cima. Assim como o primeiro teste, retratado na Fig. 6.66, o fluxo de ar da ventoinha diminuiu o efeito biocida para esta configuração. Porém, com a redução no fluxo de ar, obtivemos mais regiões sem colônias, indicando uma possível relação inversamente proporcional entre intensidade do efeito biocida em relação ao fluxo de ar na superfície a ser tratada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi dividido em duas partes principais, sendo a primeira a revisão bibliográfica e em seguida o desenvolvimento iterativo da parte experimental, culminando na construção do protótipo.

O primeiro passo da revisão bibliográfica foi o de verificar as possíveis aplicações de plasmas atmosféricos, principalmente para a eliminação de contaminantes biológicos, levantando os requisitos necessários para a construção do protótipo. Estes requisitos foram necessários para guiar os passos seguintes da pesquisa teórica, de modo a compreender a dinâmica deste tipo de aplicação de plasmas.

A partir do conhecimento básico sobre essa nova tecnologia, o trabalho experimental pode começar de forma iterativa. Este tipo de desenvolvimento, com ciclos de desenvolvimento e teste, foi escolhido para possibilitar o ajuste das condições do protótipo, com base nos resultados obtidos.

Na parte dos eletrodos, para a descarga escolhida, foi importante garantir a interação plasma-superfície do ágar, com um arranjo que permitisse a ionização do ar, mas evitasse a evolução da descarga para arco. Verificou-se a importância do efeito das pontas, onde o acúmulo de carga elétrica em uma menor área intensifica o efeito do campo elétrico ali, permitindo a ionização do ar atmosférico com níveis de tensão menores. Com base na curva de Paschen para pressões atmosféricas (Husain e Nema, 1982), com eletrodos paralelos à uma distância de 50 mm , seria necessário uma diferença de potencial da ordem de 50 kV . Com o efeito das pontas associado à operação pulsada da descarga, da ordem de kHz, foi possível obter a descarga corona com valores de tensão bem menores, da ordem de 5 kV .

A tensão de trabalho do reator CAP foi verificada de duas maneiras, primeiro de forma estimada ao medir a distância entre os eletrodos em que o arco ocorre, onde a tensão de ruptura média do ar é da ordem de 3 kV/mm , e depois com a ponta de prova de alta tensão conectada ao osciloscópio, que permitiu não só comprovar os níveis de tensão na saída do transformador, como também a forma de onda da tensão na descarga ao longo do tempo.

Como foi utilizado transformadores *flyback* projetados para monitores com tubos de raios catódicos (CRTs), a presença de um diodo interno na saída de alta tensão guiou o desenvolvimento para uma descarga pulsada DC. Uma das vantagens dessa forma de descarga é a utilização do vento iônico. Como um eletrodo está polarizado positivamente, mesmo que de forma pulsada, e o outro eletrodo está polarizado negativamente, o efeito eletrostático sobre os íons “empurra” as partículas reativas produzidas para a superfície em tratamento. De fato,

este efeito é fundamental para o efeito biocida, e pode ser sentido ao colocar a mão à frente da descarga, ou colocando pequenos pedaços de papel na saída da seringa e observando eles sendo soprados pelo plasma.

Ao longo da evolução do circuito, verificou-se as dificuldades, e riscos, de se trabalhar com altas tensões. Descargas secundárias nas conexões ou terminais do transformador causavam perdas de potência na descarga principal, com a energia sendo desviada nestes pontos de fuga. Pequenos danos ao revestimento do cabo de alta tensão já era suficiente para que ali se formasse uma descarga corona, reduzindo a eficiência do reator, e podendo evoluir para um arco elétrico, que então danificaria catastroficamente o cabo. Estes arcos parasitas poderiam ocorrer no núcleo de ferrite do transformador e, caso alcançasse o circuito, danificando certos componentes. Os MOSFETS se mostraram bem sensíveis à estes transientes, assim como o LM741 e o NE555. Ao realizar a troca entre um amplificador operacional e o amplificador transistorizado projetado, o NE555 teve suas falhas drasticamente reduzidas. Filtros foram adicionados ao circuito, assim como diodos “*free-wheeling*” junto com transistores mais robustos, cessando as falhas do circuito em operação normal. O projeto de uma fonte dedicada para este circuito, com reguladores próprios para os diferentes níveis de tensão necessários, possibilitou o desenvolvimento de um sistema contido e sem intercorrências durante operação normal.

O circuito excitador se provou extremamente versátil, sendo capaz de ionizar o ar atmosférico em diferentes configurações de eletrodo, indo de descargas pontuais até linhas extensas de plasma, como é o caso do eletrodo tipo cortina utilizado nos experimentos com a estufa.

Apesar do resultado obtido no desenvolvimento do circuito excitador, alguns pontos ainda podem ser refinados, de modo a aumentar a segurança e facilitar o uso da plataforma. Um microcontrolador, como um Arduino por exemplo, pode ser adicionado para se obter um controle ativo dos parâmetros da descarga, tornando o protótipo mais seguro e simples de usar.

Ao utilizar a impressão 3D, foi possível testar diversas geometrias para a caneta de plasma, além de produzir suportes específicos para os nossos testes. Durante o desenvolvimento do sistema, foi verificado que tanto as resinas fotossensíveis quanto o filamento PLA resistem à descarga corona, sem danos macroscópicos visíveis em sua superfície. Porém, todos os hidrocarbonetos poliméricos utilizados não sobrevivem quando submetidos à dinâmica do arco elétrico. São capazes de resistir a campos intensos, dada uma certa espessura, porém na fatalidade de ocorrer um arco elétrico através do dielétrico, este é evaporado rapidamente. Nos testes realizados com diferentes espessuras de peças impressas com resina, verificou-se que para uma tensão de operação de até 7 kV , uma espessura de $2,5\text{ mm}$ é suficiente para isolar os componentes de alta tensão. Espessuras menores ou bolhas na impressão reduzem esta capacidade isolante, permitindo que arcos possam se formar atravessando a parede impressa. Um estudo dedicado a este fenômeno pode ser realizado, com um *setup* experimental mais robusto, e mais corpos de provas na validação deste efeito.

Os testes biológicos foram bem produtivos, demonstrando o efeito biocida contra o conta-

minante utilizado. Foi possível verificar a relação entre o efeito biocida e o tempo de exposição, assim como a área de ação da descarga a partir da difusão do plasma e das espécies reativas. Ao utilizar uma câmara fechada, junto com uma maior área de ionização, foi possível verificar o efeito biocida nas placas com diferentes distâncias, e orientações, inclusive em placas ocultas (sem visão direta à descarga). Nestes testes também foi possível comprovar que o efeito biocida não se deve ao aumento de temperatura da superfície tratada, com medições demonstrando até uma redução na temperatura após a exposição. De fato, nas distâncias utilizadas, o plasma possuía uma sensação térmica de um vento frio, quando o dorso da mão era exposto diretamente à saída da caneta de plasma. Este efeito era potencializado ao utilizarmos o gás Argônio, armazenado de forma comprimida em cilindros. A diferença de pressão reduz a temperatura do gás, e este confere uma sensação tátil ainda mais fria, quando o dorso da mão era exposto ao jato de plasma.

Os testes também demonstram a superficialidade do tratamento, sendo que na ocasião em que o ágar estava danificado, contaminantes nesta fenda não eram afetados pelo tratamento com o plasma atmosférico. Isso de fato está em concordância com a literatura, onde é citado que o plasma é capaz de cobrir geometrias complexas, porém apenas de forma superficial.

O último teste biológico demonstrou outra característica importante. Ao utilizar um fluxo forçado de ar, com o intuito de aumentar a eficiência e velocidade do tratamento, foi obtido exatamente o efeito oposto. Este fluxo maior reduziu drasticamente o efeito biocida do reator utilizado. A hipótese sugerida para este fenômeno envolve o aumento de colisões das moléculas, o que aumenta a taxa de recombinação e a neutralização de espécies reativas, a redução na produção destas espécies uma vez que o ar fica na região de plasma por menos tempo, e a redução na concentração de oxidantes na superfície do ágar, devido a ação mecânica do escoamento maior do ar soprado.

Por fim, ao longo deste trabalho foi possível verificar os mecanismos de ionização do ar atmosférico, e como os subprodutos do plasma agem nos contaminantes biológicos. Essa área de pesquisa ainda tem muitas possibilidades de inovação, esmiuçando as reações com os contaminantes biológicos, mas também com tecidos vivos, como em aplicações estéticas e tratamento de câncer. As tecnologias de plasmas atmosféricos são bem versáteis, com muitas aplicações ainda a serem descobertas. O desenvolvimento do circuito foi recheado de falhas e componentes queimados, onde cada falha era estudada e corrigida, tornando o circuito mais robusto e seguro. Os objetivos foram alcançados, levantando a base teórica para compreensão da dinâmica dos plasmas atmosféricos, norteando o desenvolvimento dos reatores a plasma e como estas descargas podem inviabilizar contaminantes biológicos sem danificar a superfície de tratamento, simulando as condições do circuito e verificando-as com testes em bancada, além de propor outras áreas de aplicação de possibilidades de uso direto do protótipo aqui produzido.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta tecnologia não termina com o desenvolvimento do protótipo aqui apresentado. A mesma filosofia de circuito pode ser utilizada em outras geometrias de eletrodos, com aplicações distintas, como a limpeza do ar de uma sala utilizando um filtro ativo, como mostrado na figura 7.1, ou o desenvolvimento de uma caneta de plasma que possa ser manuseada pelo operador, como visto na figura 7.2, e até mesmo na aplicação do jato de plasma para a limpeza das mãos, como pode ser visto na figura 7.3. Por fim, na figura 7.4 podemos observar uma geometria possível para ser inserida em estufas ou para a higienização do interior da cabine de veículos, junto com seu sistema de ar-condicionado.

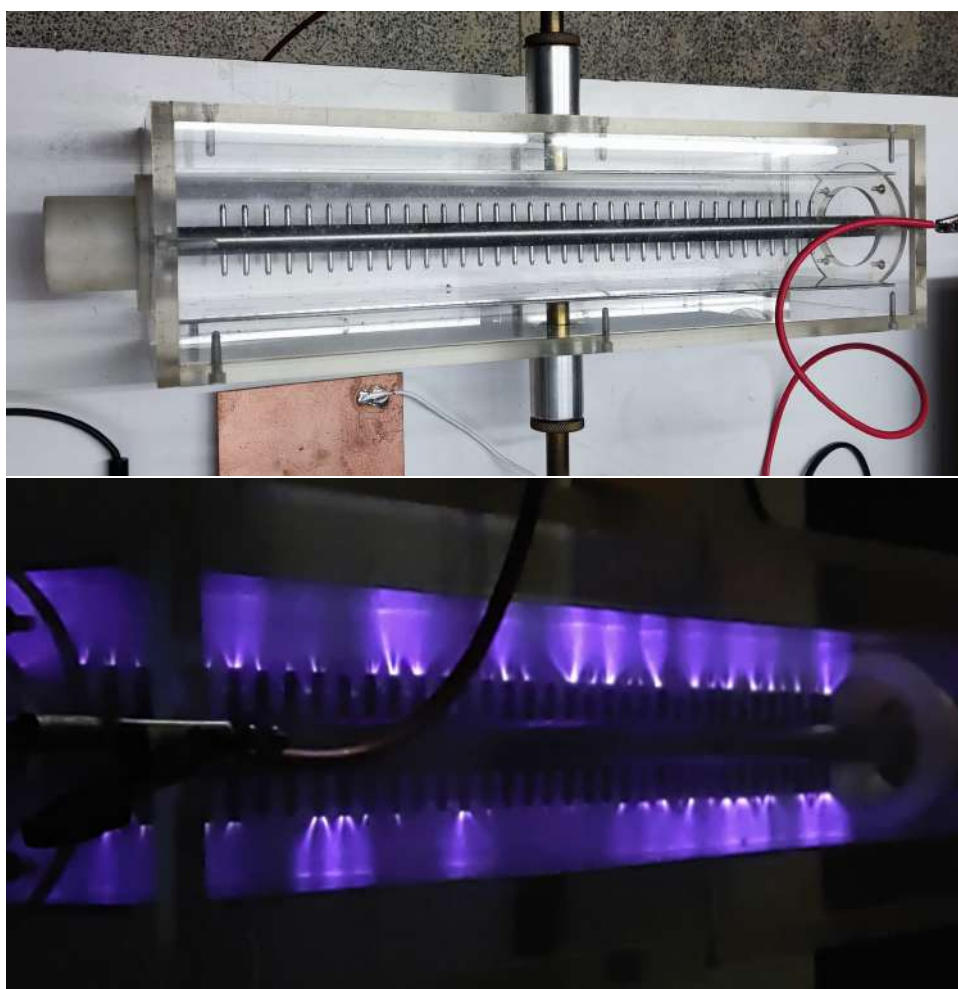


Figura 7.1. Sistema de filtro de ar utilizando plasmas atmosféricos. O ar do recinto seria forçado através das estruturas cilíndricas metálicas, onde seria ionizado, por fim saindo pelo bocal, à esquerda do filtro. Ao passar pela descarga, contaminantes em suspensão seriam submetidos às espécies reativas.

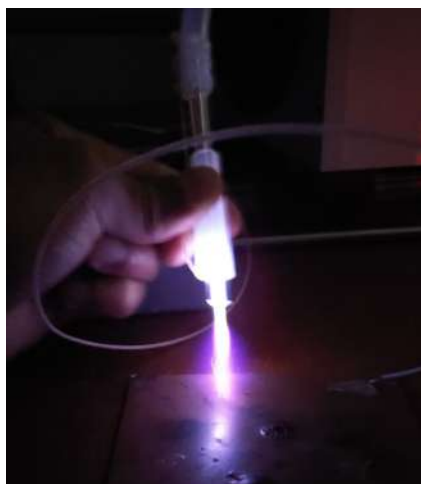


Figura 7.2. Aplicação pontual da caneta de plasma, onde o operador pode manusear o dispositivo.

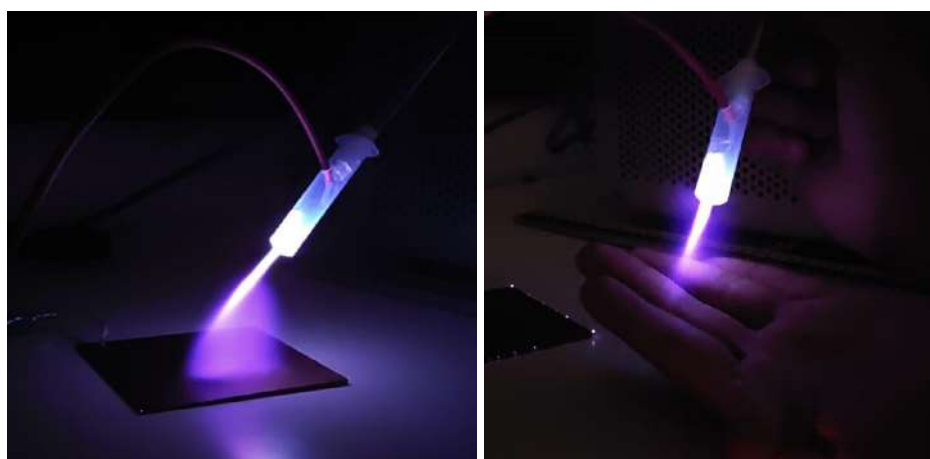


Figura 7.3. A caneta de plasma com um fluxo misto de Argônio e ar atmosférico, criando o jato de plasma. Nesta configuração é possível tratar a superfície de tecidos vivos, como a palma das mãos.



Figura 7.4. Possível geometria para ser utilizada em projeto de filtros ou como elemento interno da estufa a plasma.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- Abd Allah, Z. e Whitehead, J. C. (2015). Plasma-catalytic dry reforming of methane in an atmospheric pressure ac gliding arc discharge. *Catalysis Today*, 256:76–79.
- Alexander, C. K. e Sadiku, M. N. (2013). *Fundamentos de circuitos elétricos*. AMGH Editora.
- Alves, C. (2020). Plasma frio atmosférico—novas oportunidades de pesquisa numa plataforma versátil e portadora de futuro.
- Bartis, E., Graves, D., Seog, J., e Ohrlein, G. (2013). Atmospheric pressure plasma treatment of lipopolysaccharide in a controlled environment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(31):312002.
- Bowler, C., Montagu, M. v., e Inze, D. (1992). Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 43(1):83–116.
- Brasseur, G. P. e Solomon, S. (2005). *Aeronomy of the middle atmosphere: Chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere*, volume 32. Springer Science & Business Media.
- Cao, Z., Walsh, J. L., e Kong, M. G. (2009). Atmospheric plasma jet array in parallel electric and gas flow fields for three-dimensional surface treatment. *Applied Physics Letters*, 94(2).
- Chen, F. F. (2012). *Introduction to plasma physics*. Springer Science & Business Media.
- Chen, Z., Bai, F., Jonas, S. J., e Wirz, R. E. (2022a). Cold atmospheric plasma for addressing the covid-19 pandemic. *Plasma Processes and Polymers*, 19(9):2200012.
- Chen, Z., Chen, G., Obenchain, R., Zhang, R., Bai, F., Fang, T., Wang, H., Lu, Y., Wirz, R. E., e Gu, Z. (2022b). Cold atmospheric plasma delivery for biomedical applications. *materials today*, 54:153–188.
- Chen, Z. e Wirz, R. (2020). Cold atmospheric plasma for covid-19.
- Di Meo, S., Reed, T. T., Venditti, P., e Victor, V. M. (2016). Harmful and beneficial role of ros. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2016.
- Domonkos, M., Tichá, P., Trejbal, J., e Demo, P. (2021). Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry. *Applied Sciences*, 11(11):4809.

- Ehlbeck, J., Schnabel, U., Polak, M., Winter, J., Von Woedtke, T., Brandenburg, R., Von dem Hagen, T., e Weltmann, K. (2010). Low temperature atmospheric pressure plasma sources for microbial decontamination. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(1):013002.
- Gan, L., Jiang, J., Duan, J. W., Wu, X. J. Z., Zhang, S., Duan, X. R., Song, J. Q., e Chen, H. X. (2021). Cold atmospheric plasma applications in dermatology: A systematic review. *Journal of Biophotonics*, 14(3):e202000415.
- Gianella, M., Reuter, S., Press, S., Schmidt-Bleker, A., Van Helden, J., e Ritchie, G. (2018). Ho₂ reaction kinetics in an atmospheric pressure plasma jet determined by cavity ring-down spectroscopy. *Plasma Sources Science and Technology*, 27(9):095013.
- Gorbanev, Y., O'Connell, D., e Chechik, V. (2016). Non-thermal plasma in contact with water: The origin of species. *Chemistry—A European Journal*, 22(10):3496–3505.
- Habedank, U. (1993). Application of a new arc model for the evaluation of short-circuit breaking tests. *IEEE transactions on power delivery*, 8(4):1921–1925.
- Hirano, Y., Hayashi, M., Tamura, M., Yoshino, F., Yoshida, A., Masubuchi, M., Imai, K., e Ogiso, B. (2019). Singlet oxygen generated by a new nonthermal atmospheric pressure air plasma device exerts a bactericidal effect on oral pathogens. *Journal of oral science*, 61(4):521–525.
- Howatson, A. M. (2013). *An introduction to gas discharges: Pergamon international library of science, technology, engineering and social studies*. Elsevier.
- Husain, E. e Nema, R. (1982). Analysis of paschen curves for air, n₂ and sf₆ using the townsend breakdown equation. *IEEE transactions on electrical insulation*, (4):350–353.
- Izadjoo, M., Zack, S., Kim, H., e Skiba, J. (2018). Medical applications of cold atmospheric plasma: State of the science. *Journal of Wound Care*, 27(Sup9):S4–S10.
- Kalghatgi, S. U., Fridman, G., Cooper, M., Nagaraj, G., Peddinghaus, M., Balasubramanian, M., Vasilets, V. N., Gutsol, A. F., Fridman, A., e Friedman, G. (2007). Mechanism of blood coagulation by nonthermal atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *IEEE Transactions on plasma science*, 35(5):1559–1566.
- Kaushik, N., Mitra, S., Baek, E. J., Nguyen, L. N., Bhartiya, P., Kim, J. H., Choi, E. H., e Kaushik, N. K. (2023). The inactivation and destruction of viruses by reactive oxygen species generated through physical and cold atmospheric plasma techniques: Current status and perspectives. *Journal of Advanced Research*, 43:59–71.
- Kim, J. Y., Ballato, J., e Kim, S.-O. (2012). Intense and energetic atmospheric pressure plasma jet arrays. *Plasma Processes and Polymers*, 9(3):253–260.
- Li, Y., Kang, M., Uhm, H., Lee, G., Choi, E., e Han, I. (2017). Effects of atmospheric-pressure plasma and plasma activated nitric oxide water on cervical cancer cells sci.

- Lu, X., Naidis, G. V., Laroussi, M., Reuter, S., Graves, D. B., e Ostrikov, K. (2016). Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Physics Reports*, 630:1–84.
- Maho, T., Binois, R., Brulé-Morabito, F., Demasure, M., Douat, C., Dozias, S., Escot Bocanegra, P., Goard, I., Hocqueloux, L., Le Helloco, C., *et al.* (2021). Anti-bacterial action of plasma multi-jets in the context of chronic wound healing. *Applied Sciences*, 11(20):9598.
- Malik, M. A. (2016). Nitric oxide production by high voltage electrical discharges for medical uses: a review. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36:737–766.
- Misra, N., Schlüter, O., e Cullen, P. J. (2016). *Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications*. Academic Press.
- Naujokat, H., Harder, S., Schulz, L. Y., Wiltfang, J., Flörke, C., e Açil, Y. (2019). Surface conditioning with cold argon plasma and its effect on the osseointegration of dental implants in miniature pigs. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 47(3):484–490.
- Omran, A. V., Busco, G., Ridou, L., Dozias, S., Grillon, C., Pouvesle, J.-M., e Robert, E. (2020). Cold atmospheric single plasma jet for rons delivery on large biological surfaces. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(10):105002.
- Orem, J., Silva, W., Raiol, T., Magalhães, M., Martins, P., Cavalcante, D., Kruger, R., Brigido, M., e De-Souza, M. (2019). Phylogenetic diversity of aerobic spore-forming bacillalles isolated from brazilian soils. *International Microbiology*, 22:511–520.
- Pacher, P., Beckman, J. S., e Liaudet, L. (2007). Nitric oxide and peroxynitrite in health and disease. *Physiological reviews*, 87(1):315–424.
- Padan, E. e Schuldiner, S. (1987). Intracellular ph and membrane potential as regulators in the prokaryotic cell. *The Journal of membrane biology*, 95:189–198.
- Parizad, A., Baghaee, H., Tavakoli, A., e Jamali, S. (2009). Optimization of arc models parameter using genetic algorithm. In *2009 International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems,(EPECS)*, páginas 1–7. IEEE.
- Robert, E., Darny, T., Dozias, S., Iseni, S., e Pouvesle, J.-M. (2015). New insights on the propagation of pulsed atmospheric plasma streams: From single jet to multi jet arrays. *Physics of plasmas*, 22(12).
- Schmidt, A., Tschang, C.-Y. T., Sann, J., e Thoma, M. H. (2021). Cold atmospheric plasma decontamination of ffp3 face masks and long-term material effects. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 6(4):493–502.
- Semmler, M. L., Bekeschus, S., Schäfer, M., Bernhardt, T., Fischer, T., Witzke, K., Seebauer, C., Rebl, H., Grambow, E., Vollmar, B., *et al.* (2020). Molecular mechanisms of the efficacy of cold atmospheric pressure plasma (cap) in cancer treatment. *Cancers*, 12(2):269.

- Sies, H., Berndt, C., e Jones, D. P. (2017). Oxidative stress. *Annual review of biochemistry*, 86(1):715–748.
- SILVA, J. G. d., OLIVEIRA, M. F. d., BARBOSA, C. A. G., ALVES JÚNIOR, C., e MOURA, C. E. B. d. (2022). Perspectivas da aplicação do plasma atmosférico a frio an cicatrização de feridas cutâneas. *Ciência Animal*, 32(4):106–120.
- Souza, J. H. C. d. (2013). Estudos de esterilização por plasma a pressão atmosférica.
- Stoffels, E., Sakiyama, Y., e Graves, D. B. (2008). Cold atmospheric plasma: charged species and their interactions with cells and tissues. *IEEE Transactions on plasma science*, 36(4):1441–1457.
- Terefinko, D., Dzimitrowicz, A., Bielawska-Pohl, A., Klimczak, A., Pohl, P., e Jamroz, P. (2021). The influence of cold atmospheric pressure plasma-treated media on the cell viability, motility, and induction of apoptosis in human non-metastatic (mcf7) and metastatic (mda-mb-231) breast cancer cell lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(8):3855.
- Tian, Y., Guo, J., Wu, D., Wang, K., Zhang, J., e Fang, J. (2017). The potential regulatory effect of nitric oxide in plasma activated water on cell growth of *saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Applied Physics*, 122(12).
- Udakhe, J., Tyagi, S., Srivastava, N., Honade, S., e Bhute, A. (2012). Effect of yarn hairiness, dbd plasma and enzyme treatment on itching propensity of woollen knitwear. *Colourage*, 59(5):46–51.
- Vaze, N. D., Park, S., Brooks, A. D., Fridman, A., e Joshi, S. G. (2017). Involvement of multiple stressors induced by non-thermal plasma-charged aerosols during inactivation of airborne bacteria. *PLoS One*, 12(2):e0171434.
- Wu, H., Sun, P., Feng, H., Zhou, H., Wang, R., Liang, Y., Lu, J., Zhu, W., Zhang, J., e Fang, J. (2012). Reactive oxygen species in a non-thermal plasma microjet and water system: generation, conversion, and contributions to bacteria inactivation—an analysis by electron spin resonance spectroscopy. *Plasma Processes and Polymers*, 9(4):417–424.
- Yang, F., Tang, Z., Shen, Y., Su, L., e Yang, Z. (2022). Parameter determination method of cassie-mayr hybrid arc model based on magnetohydrodynamics plasma theory. *Frontiers in Energy Research*, 10:808289.
- Zhou, L. (2018). Non-thermal plasma technology for nitric oxide removal.
- Zhou, X., Cai, D., Xiao, S., Ning, M., Zhou, R., Zhang, S., Chen, X., Ostrikov, K., e Dai, X. (2020). Invivopen: A novel plasma source for in vivo cancer treatment. *Journal of Cancer*, 11(8):2273.
- Zhu, H., Guo, L., Li, M., Jiang, Y., e Li, H. (2021). Comparison of spatial distribution of active substances and sterilization range generated by array of printed-circuit-board plasma jets. *Vacuum*, 184:109982.

Zille, A., Oliveira, F. R., e Souto, A. P. (2015). Plasma treatment in textile industry. *Plasma processes and Polymers*, 12(2):98–131.