

Fernando Cezar Cardoso

Câmara Desinfetadora de Máscaras Faciais a
Base de Ozônio

Toledo

2021

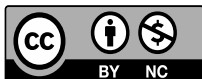
Fernando Cezar Cardoso

**Câmara Desinfetadora de Máscaras Faciais a Base de
Ozônio**
Facial Mask Disinfection Chamber Ozone Based

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer

Toledo
2021



4.0 Internacional

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, com crédito atribuído ao autor. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.

Fernando Cezar Cardoso

Câmara Desinfetadora de Máscaras Faciais a Base de Ozônio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Toledo, 24 novembro 2021:

Prof. Dr. Felipe Walter Dafico

Pfrimer

Nome do Orientador

Prof. Dr. Alberto Yoshihiro Nakano

Nome do Convidado 1

Prof. Dr. Cleverson Busso

Nome do Convidado 2

Toledo
2021

AGRADECIMENTOS

Após o árduo e longo trajeto percorrido para chegar ao final da graduação, muitas são as pessoas que deveriam receber os mais sinceros agradecimentos, entretanto, este pequeno texto não é o suficiente para menciona-las em sua totalidade, desta forma expresse minha gratidão a todos que de alguma forma contribuíram com esta conquista.

Agradeço de forma especial a meus pais, Adão e Clarice, eles são os principais responsáveis por este momento, todo apoio que deles recebi jamais será esquecido, À minha amada esposa Susannah que foi extremamente compreensiva e motivadora durante o período que me acompanhou nesta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Dafico Pfrimer por aceitar o desafio de orientar este trabalho e por não medir esforços no desenvolvimento do mesmo.

Ao Prof. Dr. Cleverson Busso por auxiliar e disponibilizar recursos do laboratório de química, não apenas materiais e insumos, mas também pessoal, em particular a acadêmica Letícia Scussel que realizou as análises químicas e microbiológicas apresentadas neste trabalho. Está contribuição foi primordial para o sucesso deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer aos amigos, em especial ao Luis Galante e ao Alisson Perin que foram grandes parceiros nos melhores e piores momentos, obrigado meus amigos.

Por fim, a todos os envolvidos, obrigado.

RESUMO

A COVID 19, doença pandêmica causada por um coronavírus que rapidamente se espalhou pelo mundo, se tornou o ponto focal para o qual convergiram incomensuráveis esforços da comunidade científica, na tentativa de controle e erradicação desta doença que se tornou a responsável por mais de seiscentos mil mortes somente no território brasileiro. Resultados importantes sobre a disseminação do vírus a partir do contato com objetos contaminados motivaram a pesquisa e o desenvolvimento de novos métodos de desinfecção, dentre os quais os processos a base de Ozônio se destacaram. Este trabalho teve como objetivo implementar uma câmara de desinfecção a base de ozônio, gerado por efeito corona, para desinfetar máscaras faciais e *face shields*, dispositivos de proteção individual que estão entre as principais ferramentas de combate a pandemia e que passaram por um período de escassez durante o *lockdown* das principais indústrias do mundo.

Palavras-chave: Ozônio. Desinfecção. Câmara. COVID 19.

ABSTRACT

COVID 19, a pandemic disease caused by a coronavirus that rapidly spread out to the world, became the focal point to which immeasurable scientific efforts converged, in an attempt to control and eradicate the disease that made more than six hundred thousand people fatal victims only in the Brazilian territory. Important results about the virus dissemination by contact with contaminated objects were the motivation for the development of new disinfection methodologies, among which ozone-based processes stood out. This work aimed to implement an ozone-based disinfection chamber, to disinfect facial masks and face-shields, personal protective devices that are among the main tools to fight the pandemic and that went through a period of shortage during the lockdown of the main industries in the world.

Keywords: Ozone. Disinfection. Chamber. COVID 19.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – História do ozônio	15
Figura 2 – Simulação computacional da degradação de membrana bacteriana	18
Figura 3 – Relação de concentração/tempo de exposição ao ozônio e a resposta humana	19
Figura 4 – Taxa de decomposição do ozônio em amostras de água de diferentes fontes a 20 °C	20
Figura 5 – Descarga corona	22
Figura 6 – Desenvolvimento de avalanches em descarga corona negativa	24
Figura 7 – Característica corona e ruptura em arranjo ponta-plano negativo no ar atmosférico	24
Figura 8 – Desenvolvimento das avalanches nas descargas corona positiva	25
Figura 9 – Curvas limiares da descarga corona positiva e da ruptura de centelhas na configuração ponta-plano	26
Figura 10 – Intensidade de geração de ozônio sob tensão alternada	27
Figura 11 – Arquitetura Padrão de Ozonizadores	28
Figura 12 – Fonte Chaveada	29
Figura 13 – Topologia <i>Flayback</i>	31
Figura 14 – Reator Coaxial	31
Figura 15 – Câmara de ozonização	34
Figura 16 – Compartimento Ozonizador	34
Figura 17 – Ponto de instalação do difusor de ozônio	35
Figura 18 – Arquitetura do sistema implementado	36
Figura 19 – Fonte colmeia	37
Figura 20 – Diagrama do circuito de controle	37
Figura 21 – Fluxograma de funcionamento	38
Figura 22 – Fonte de Alta Tensão	39
Figura 23 – Reator de Ozônio	39
Figura 24 – Detalhamento do reator de ozônio	40
Figura 25 – Bomba de Ar/Oxigênio	40
Figura 26 – <i>Display</i> alfanumérico 20x4	41
Figura 27 – Botoeira	42
Figura 28 – Detalhe IHM	42
Figura 29 – Desinfetadora montada	44
Figura 30 – Desinfetadora montada tampo aberto	44
Figura 31 – Compartimento do gerador montado	45
Figura 32 – Interface homem-máquina operando	46

Figura 33 – Teste de geração de ozônio	46
Figura 34 – Borbulhamento de ozônio	47
Figura 35 – Resultado da ozonização	47
Figura 36 – Metodologia do teste de desinfecção	49
Figura 37 – Teste de desinfecção <i>E. coli</i>	49
Figura 38 – Letalidade do ozônio sobre bactérias vegetativas	50
Figura 39 – Letalidade do ozônio sobre bactérias esporulantes	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
FDA	<i>United Foods and Drugs Administration</i>
GRAS	<i>Generally Recognized as Safe</i>
IHM	Interface Homem Máquina
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
ppm	Parte por milhão
PVC	Cloreto de Polivinila
PWM	Pulse Width Modulation
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
atm	Atmosfera
cm	Centímetros
Hz	Hertz
kHz	Quilo-Hertz
kV	Quilo-Volts
L	Litro
mg	Miligramma
mg.L ⁻¹	Miligramma por Litro
mg.min ⁻¹	Miligramma por minuto
mL	Mililitro
UFC/mL	Unidades Formadoras de Colônias por mililitros
V	Volts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Geral	13
2.2	Específicos	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REFERÊNCIAL TEÓRICO	15
4.1	Ozônio	15
4.1.1	Propriedades do Ozônio	15
4.1.2	Mecanismo de Ação do Ozônio	16
4.1.3	Toxicidade do Ozônio	18
4.1.4	Estabilidade do Ozônio	20
4.1.5	Geração de Ozônio	20
4.1.5.1	Efeito Corona	21
4.1.5.2	Corona CC Negativo	22
4.1.5.3	Corona CC Positivo	25
4.1.5.4	Corona CA	27
4.1.5.5	Descarga Corona em Alta Frequência	28
4.1.5.6	Descarga Corona Pulsada	28
4.2	Ozonizadores	28
4.2.1	Fonte De alimentação Elétrica	29
4.2.2	Sistemas Microcontrolados	29
4.2.3	Fonte de Alta Tensão	30
4.2.4	Reator de Ozônio	30
4.3	Métodos de determinação de ozônio no ar e na água	32
4.3.1	Medição de Ozônio no Ar	32
4.3.2	Medição de Ozônio na Água	32
5	MATERIAIS E MÉTODOS	33
5.1	Projeto e Desenvolvimento Estrutural	33
5.2	Projeto e Desenvolvimento Elétrico e Eletrônico	35
5.2.1	Escolha da Fonte de Alimentação Elétrica	35
5.2.1.1	Controladora	36
5.2.1.2	Gerador de Alta Tensão	38
5.2.1.3	Reator De Ozônio	39

5.2.1.4	Compressor de Ar	40
5.2.1.5	Interface Homem-Máquina	41
5.2.1.6	Sensor de Temperatura e Concentração de Ozônio	41
5.3	Validação do Gerador de Ozônio	42
5.4	Validação do Processo de Desinfecção	43
6	RESULTADOS	44
6.1	Montagem Mecânica e Eletrônica	44
6.2	Teste de Geração de Ozônio	45
6.3	Teste de Desinfecção	48
7	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DA CONTRO- LADORA	55
	ANEXO B – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO CONTRO- LADORA	56
	ANEXO C – MEDIDAS DA CÂMERA DESINFECTADORA	57

1 INTRODUÇÃO

O ozônio, forma triatômica do elemento oxigênio, apresenta-se como um gás incolor, de odor pungente e altamente instável. As características reativas do gás e seu elevado potencial oxidativo o tornam capaz de reagir com inúmeros compostos orgânicos e inorgânicos¹, colocando-o em posição privilegiada na classificação de reagentes desinfetantes e esterilizantes. Entretanto, este gás não pode ser armazenado devido sua alta instabilidade, sendo necessário sua geração “*in loco*”.

O ozônio pode ser gerado de três diferentes formas: eletrólise, radiação ultravioleta e efeito corona, sendo a última a mais empregada em gerações de larga escala². Os ozonizadores que empregam o efeito corona em sua maioria possuem eletrodos cilíndricos dispostos em uma geometria coaxial e que podem ser facilmente arranjados para equipar equipamentos de ozonização.

A ozonização é uma técnica empregada há décadas na desinfecção de águas para o consumo humano³. Desde os anos 1920, pesquisadores buscam explorar em sua totalidade as características oxidantes do ozônio, assim como a desaceleração de sua decomposição, visando ampliar as possibilidades de aplicações para este gás⁴.

Soluções alternativas ao ozônio e economicamente mais atraentes o mantiveram em segundo plano no decorrer das últimas décadas, porém, no atual cenário de pandemia onde todos os esforços convergem para o controle da COVID 19, o ozônio volta como protagonista em uma série de pesquisas que objetivam empregá-lo como sanitizante capaz de inativar o coronavírus.

Mediante aos resultados positivos do ozônio em relação ao coronavírus, como demonstrado por Tizaoui⁵, foi desenvolvido neste trabalho uma câmara de sanitização de máscaras e protetores faciais baseada em ozonização, na expectativa de contribuir com a segurança das pessoas e com o combate a pandemia.

2 OBJETIVOS

Nesta sessão estão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1 GERAL

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma câmara de desinfecção de máscaras e protetores faciais, empregando a ozonização como princípio ativo na redução de vírus e bactérias.

2.2 ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral fosse atingido, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- Obtenção de uma câmara para comportar os objetos a serem sanitizados;
- Implementação de um gerador de ozônio por efeito corona funcional e capaz de preencher a câmara com o gás;
- Projeto e implementação de uma interface de controle para o gerador de ozônio com interface homem-máquina (IHM) disponível.
- Validação do sistema de geração de ozônio e eficácia da desinfecção.

3 JUSTIFICATIVA

Desde o início do atual surto de coronavírus (SARS-CoV-2), causador da COVID-19, houve uma grande preocupação frente a uma doença que rapidamente se espalhou pelo mundo⁶. A assustadora velocidade de disseminação do coronavírus se deu em partes pelo alto grau de transmissibilidade, estimando-se que uma pessoa com infecção poderia contaminar de 2 a 4 novos indivíduos⁷.

No decorrer da pandemia a comunidade científica global tem trabalhado extensivamente para definir novas metodologias de sanitização para o SARS-COV-2, na tentativa de reduzir a sua disseminação. Muito embora o vírus apresente uma certa fragilidade inerente ao seu tipo, o processo de desinfecção necessita ser eficaz, versátil e de baixo custo, visando atender a demanda em massa nas mais diversas realidades⁸.

Pesquisas recentes apontaram que o vírus possui a habilidade de se manter viável em uma vasta gama de superfícies, tais como *face shields* e máscaras utilizadas por equipes médicas e laboratoriais, podendo tornar estes objetos vetores de contaminação⁸. Anteriormente as máscaras e *face shields* eram de utilização única e descartável, entretanto, no cenário de pandemia houve a necessidade da reutilização e automaticamente desinfecção destes artefatos.

Neste contexto o ozônio destacou-se como agente sanitizante, principalmente dos materiais termo-sensíveis, que não podem ser desinfetados nos métodos mais convencionais, de forma que surgiu uma grande demanda por dispositivos capazes de performar a desinfecção utilizando o ozônio gasoso, a seco e em temperatura ambiente.

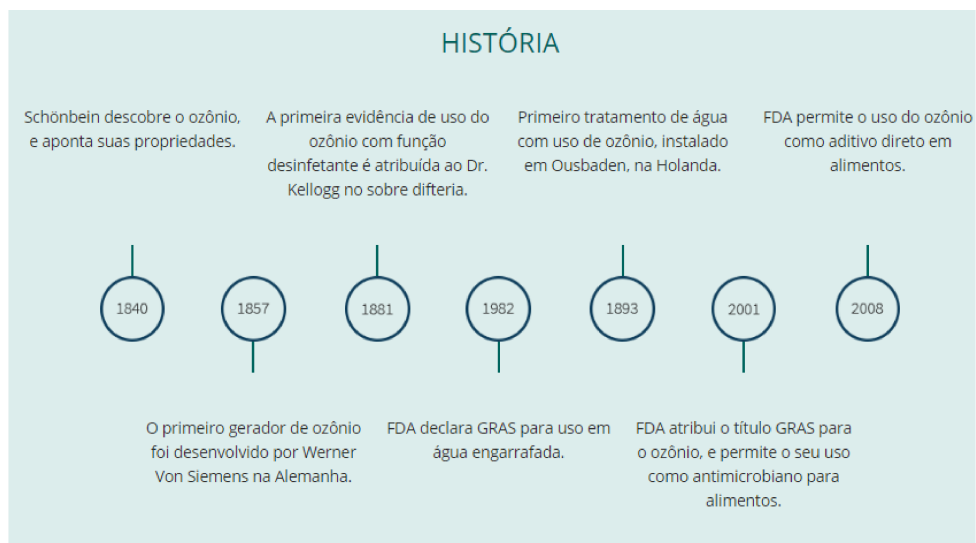
4 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são apresentados os conceitos necessários para compreensão do desenvolvimento deste trabalho, dando ênfase nos aspectos mais relevantes da teoria utilizada para a implementação da câmara de ozonização proposta.

4.1 OZÔNIO

No ano de 1785, Van Marum notou um odor desagradável quando estava próximo a descargas elétricas geradas por sua máquina eletrostática de alta tensão⁹. Em 1840 o mesmo odor característico foi percebido durante um experimento de eletrólise de uma água acidulada, ocasião em que foi nomeado como ozônio e identificado como sendo um composto indeterminado pelo cientista alemão Christian Friedrich Schoenbein¹⁰. O nome ozônio teve sua motivação sugestiva, visto que, segundo a etimologia da palavra, ozônio vem do grego *ozein*, que significa mau cheiro. A Figura 1 apresenta em ordem cronológica os momentos históricos do ozônio.

Figura 1 – História do ozônio



Fonte – PHILOZON¹¹

4.1.1 PROPRIEDADES DO OZÔNIO

A propriedade exclusiva de rápida e autodecomposição torna o ozônio uma excelente alternativa ao cloro na sanitização de alimentos e ambientes. Instantes após sua aplicação, o gás se decompõe de maneira acelerada em oxigênio molecular e água, não gerando resíduos tóxicos¹².

O ozônio (O_3) se apresenta na forma de um gás incolor e de odor pungente, cujo peso molecular é 48 gmol^{-1} , o ponto de ebulição é $-111,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e o ponto de fusão é $-192,7 \text{ }^\circ\text{C}$ a 1 atm. Além da geração forçada nos ozonizadores, o ozônio pode ser gerado na estratosfera em pequenas concentrações ($0,05 \text{ mgL}^{-1}$) pela ação das radiações ultravioletas do sol sobre o oxigênio. Esta molécula é criada através da carga elétrica que divide o oxigênio molecular (O_2), resultando em dois átomos de oxigênio livre (O) que se ligam rapidamente a outras duas moléculas de O_2 e formam o O_3 ¹².

Uma pequena quantidade do Ozônio pode ser observada na troposfera, na forma de subproduto de reações fotoquímicas entre hidrocarbonetos, oxigênio e nitrogênio liberados dos automóveis, indústrias, florestas e ação vulcânica¹³. Naturalmente, o ozônio também é gerado durante tempestades, quando ocorrem descargas atmosféricas nas proximidade da crosta terrestre.

Quando comparado com o cloro, o ozônio tem poder oxidante 1,5 vezes maior, fato que o classifica como o mais poderoso oxidante viável em alimentos e águas para consumo humano; é eficiente contra um amplo espectro de microrganismos; destrói uma gama de patógenos mais rapidamente; é extremamente lábil, sua meia vida em fase aquosa é de aproximadamente 20 minutos (a 1 atm com temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$) se decompondo em oxigênio diatômico, portanto livre de resíduos químicos que possam apresentar riscos a saúde¹². Na Tabela 1 estão listados os principais oxidantes e seus potenciais de oxidação relativos ao do cloro, visto que o cloro é atualmente o mais utilizado.

Tabela 1 – Comparação de Agentes Oxidantes

Agente Oxidante	Potencial de Oxidação (V)	Potencial Oxidativo Relativo ao Cloro
Flúor	3,06	2,25
Ozônio	2,07	1,52
Peróxido de Hidrogênio	1,77	1,30
Ácido Hipocloroso	1,49	1,10
Cloro	1,36	1,00

Fonte – SNATURAL¹⁴

Comparar o ozônio com o cloro é relevante, pois a popularidade do cloro em processos oxidativos é um referencial importante. Os Quadros 1 e 2 apresentam comparações em termos de propriedade dos elementos e diferencias no que diz respeito a ação de cada um em dada aplicação.

4.1.2 MECANISMO DE AÇÃO DO OZÔNIO

O grande diferencial do ozônio em relação a outros sanitizantes é o seu mecanismo de atuação. Enquanto outros sanitizantes, como o cloro, atravessam a membrana celular para agir diretamente nos elementos vitais (enzimas, proteínas, ácidos nucleicos) no interior

Quadro 1 – Comparação Entre Ozônio e Cloro

Ozônio	Cloro
Em contato com outros compostos, se dissocia a oxigênio	Em contato com proteínas, gera compostos orgânicos clorados (cloraminas), substâncias que contaminam o meio ambiente e são cancerígenos aos seres humanos
Não causa alergia ou irritações e não descolore roupas e piscinas de vinil	No tratamento de piscinas causa problemas como irritação nos olhos, pele e descoloração de roupas
O ozônio é um excelente desodorizador, despolarizador e clarificador	Deixa odor, gosto e coloração branca na água
Não deixa resíduos	Gera compostos tóxicos
Não necessita de transportes ou consome insumos, é produzido no local	Necessidade de adquirir e transportar produtos químicos perigosos
Processo natural	Processo químico

Fonte – PHILOZON¹¹

Quadro 2 – Comparação de Ações Entre Ozônio e Cloro

Ação	Cloro	Ozônio
Odor	Desagradável	Típico (Desaparece com o tempo)
Sabor	Desagradável	Nenhum
Cor	Tende ao Amarelo	Cristalino
Atividade Antiviral	Nenhuma	Elevada
Atividade Antibacteriana	Variável	Amplo Espectro
Atividade Destrutiva Sobre Algas e Protozoários	Leve	Elevada
Atividade Destrutiva Sobre Fungos	Leve	Elevada
Atividade Destrutiva Sobre Esporos e Cistos	Leve	Elevada
Atividade Destrutiva Sobre Moléculas Orgânicas	Nenhuma	Elevada
Efeito do pH	Variável	Diminui
Cancerígeno	Provável	Improvável
Remoção de Cor	Baixa	Excelente
Meia Vida Na Água	2-3 Horas	20 Minutos
Complexidade	Baixa	Alta
Custo Mensal	Moderado-Alto	Baixo
Custo Capital	Baixo	Alto
Toxicidade de Inalação	Alta	Alta

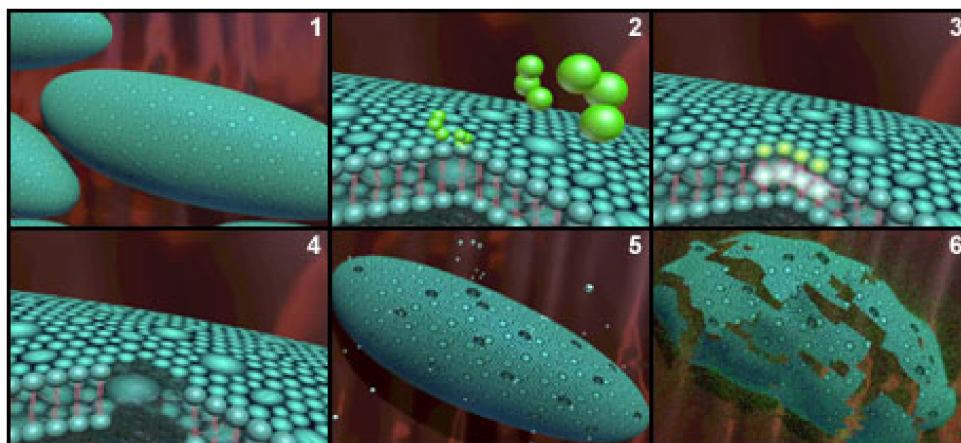
Fonte – Schiavon⁹

das células, o ozônio atinge primeiramente a membrana celular, conforme ilustrado na Figura 2, inativando os microrganismos e inviabilizando sua recuperação em um menor

tempo de exposição, até 3125 vezes mais rápido que o cloro¹⁴.

É possível observar na Figura 2 da foto 1 até a foto 6 a bactéria sadia sendo atacada pelo ozônio, rapidamente ocorre a oxidação e destruição do microrganismo sem a possibilidade de recuperação.

Figura 2 – Simulação computacional da degradação de membrana bacteriana



Fonte – SNATURAL¹⁴

A ação antimicrobiana do ozônio ocorre por meio da oxidação dos glicolipídios, glicoproteínas e aminoácidos da membrana celular, alterando a permeabilidade celular e causando inibição da atividade respiratória e reprodutiva⁹.

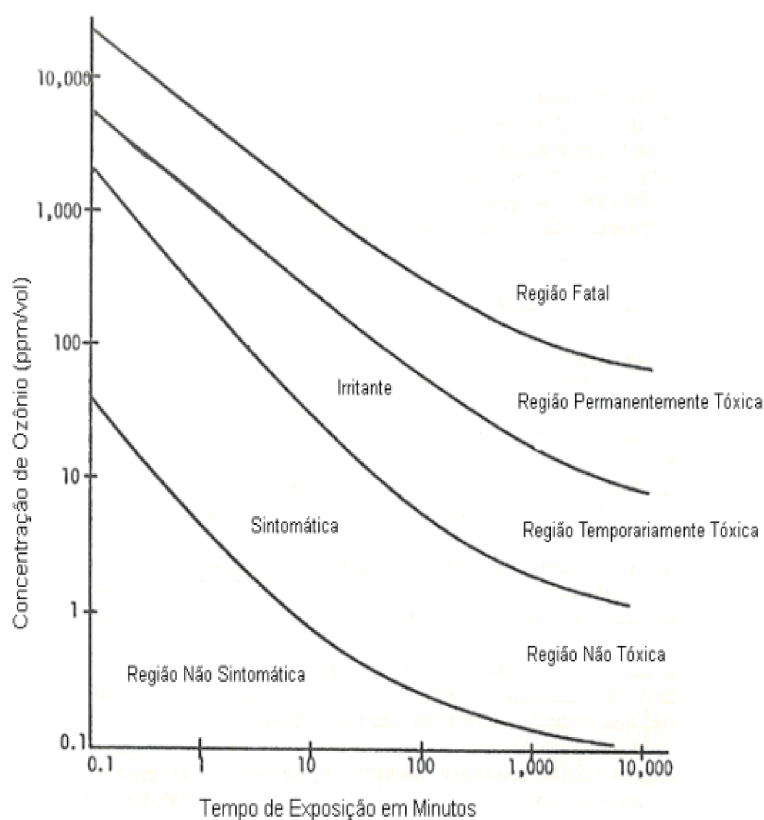
Grupos de sulfidril de enzimas são atacados ocasionando o colapso da atividade enzimática celular, alteração das cadeias polipeptídicas da cápsula proteica de alguns vírus e também das bases púricas e pirimidínicas do seu RNA.

4.1.3 TOXIDADE DO OZÔNIO

O risco de exposição em locais de ozonização é preocupante devido as propriedades oxidativas do ozônio apresentarem riscos aos seres humanos. A exposição pode ocorrer por instalações mal realizadas ou uso de materiais que possam ser degradados pelo gás, como a borracha por exemplo⁹.

Os danos causados pela ação do ozônio no ser humano estão diretamente relacionados com a concentração do ozônio no ambiente e do tempo de exposição, normalmente a concentração é medida em partes por milhão (ppm). A níveis abaixo de 1 ppm de concentração, durante 10 minutos de exposição, a ação não é sintomática. A exposição a níveis de 100 ppm para 10.000 minutos ou a 10.000 ppm por 30 segundos, os danos podem ser letais⁹. A Figura 3 apresenta o gráfico que relaciona a concentração com o tempo de exposição humana e a respostas ao ozônio. Geralmente, o ser humano é capaz de detectar ozônio no ambiente a concentrações a partir de 0,1 ppm, e nestes casos deve tomar uma ação para eliminar o risco, como por exemplo, desligar o gerador de ozônio e ventilar o local.

Figura 3 – Relação de concentração/tempo de exposição ao ozônio e a resposta humana



Fonte – Rice³

Nos piores casos de exposição, altas concentrações por longos períodos, os sintomas se manifestam na forma de lacrimejamento, dificuldade de respiração, respiração superficial, congestão pulmonar, irritação das vias aéreas superiores, cefaleia e pré-síncope. A OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), órgão estadunidense que trata de saúde e segurança ocupacional, estabelece os limites de exposição curta e longa ao ozônio no ambiente de trabalho, que variam de $0,01 \text{ mgL}^{-1}$ de ar para uma jornada de 8 horas diárias e $0,3 \text{ mgL}^{-1}$ de ar por 15 minutos, para a utilização segura gás. Dentro dos limites internacionalmente estabelecidos, o ozônio pode ser utilizado seguramente¹².

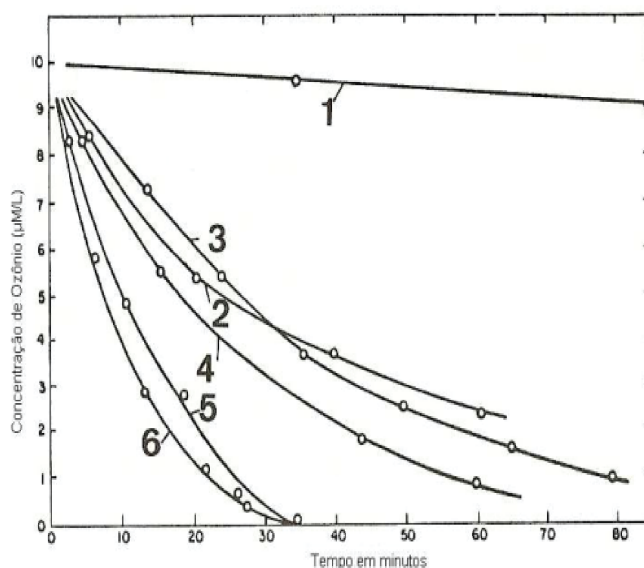
Em 1982, o FDA (*United Foods and Drugs Administration*) declarou a ozonização de água engarrafada como segura, integrando a lista dos produtos *Generally Recognized as Safe* (GRAS). Em 1997, o ozônio foi reconhecido como GRAS para aplicação em sanitização de alimentos por um painel independente numa reunião de especialistas no assunto. Posteriormente, em 2001, foi declarado seguro como aditivo secundário para uso direto em alimentos¹⁵.

4.1.4 ESTABILIDADE DO OZÔNIO

O ozônio possui um tempo de meia-vida relativamente longo no estado gasoso, cerca de 12 horas em atmosfera ambiente, mas, quando em solução aquosa a meia vida é considerada curta. Há indicações na literatura que o ozônio tem 20 minutos de meia-vida na água destilada².

Como na maioria dos casos a aplicação é realizada em fase aquosa, vale a pena observar o comportamento da meia vida em diferentes tipos de água. A Figura 4 compara a meia vida do ozônio em água bidestilada (1), destilada (2), de torneira (3), subterrânea (4) e duas águas de lagos filtradas (5)(6), todos medidos em 20 °C.

Figura 4 – Taxa de decomposição do ozônio em vários tipos de água a 20 °C: bidestilada (1), destilada (2), de torneira (3), subterrânea (4) e duas águas de lagos filtradas (5)(6)



Fonte – Rice, Bollyky e Lacy¹⁶

É possível observar que a meia-vida do ozônio na água pode variar de 10 minutos nas águas dos lagos, para mais de uma hora em água bidestilada. Devido a essa instabilidade inerente do ozônio, este não pode ser comprado e armazenado para posterior utilização, como outros oxidantes/desinfetantes empregados atualmente. É necessário que seja gerado em local junto a planta de ozonização no momento da aplicação⁹.

4.1.5 GERAÇÃO DE OZÔNIO

A geração de ozônio pode ser obtida por meio de eletrólise, radiação ultravioleta (UV) e descargas elétricas. O método mais eficiente e utilizado para produzir ozônio em escala industrial é a descarga elétrica denominada Corona¹⁰. A descarga corona é aplicada para ionizar uma região entre dois eletrodos metálicos, onde o espaço intereletrodo é separado por uma barreira dielétrica.

De acordo com Amaroli¹⁰ diferentes formas de descarga corona podem ser obtidas dependendo da frequência e da polaridade do campo elétrico (Corrente Alternada - CA ou Corrente Contínua - CC) e também da geometria dos eletrodos. Quando aplicado um campo elétrico CC, a descarga corona poderá ainda ser classificada como positiva ou negativa. Nas seções seguintes estão apresentados o efeito corona e seus mecanismos.

4.1.5.1 EFEITO CORONA

Segundo a NBR 05456 (1987,p.68) o termo corona se refere a um “eflúvio que se manifesta em um campo elétrico não uniforme e de intensidade muito elevada, tendo uma parte visível perto do condutor”.

Van Brunt¹⁷ define corona como uma descarga parcial entre eletrodos que ocorre nos casos onde dielétricos sólidos estão ausentes ou muito afastados da região de ionização ou descarga.

De acordo com o esquema apresentado na Figura 5, o ozônio é gerado pela descarga corona em um reator, caracterizado por um par de eletrodos separados por uma barreira dielétrica (Condutor e plano aterrado), a geração do ozônio ocorre neste arranjo através da aplicação de tensões na ordem de kV entre os eletrodos, fazendo com que parte do oxigênio (O_2) exposto ao intenso campo elétrico do sistema seja convertido em ozônio (O_3). A eficiência do sistema aumenta proporcionalmente ao aumento da concentração de O_2 exposto ao campo ¹⁸.

Os eletrodos são usualmente separados por um meio dielétrico rígido para evitar a descarga completa, ou seja, a formação de arcos voltaicos.

A reação de produção do ozônio no reator é dada, de forma simplificada, por:



Schiavon⁹ aponta que se a corrente elétrica na descarga corona apresentar valores relativamente altos, o efeito pode se apresentar na forma de uma descarga luminescente. Por outro lado, se a corrente elétrica for relativamente baixa, a descarga se apresenta de uma forma inaudível, característica que lhe confere o nome de descarga silenciosa.

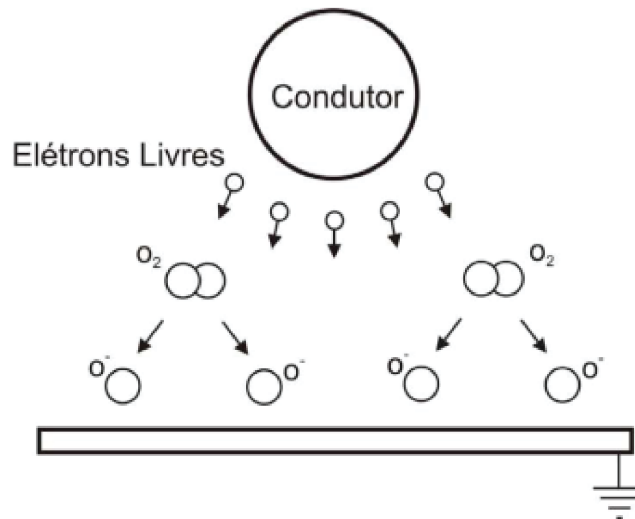
Na Figura 5 também é apresentado o mecanismo do efeito corona. Ao receber um valor de tensão que excede o potencial de ionização do material dielétrico, representado na Figura 5 pelo ar, os elétrons livres são impulsionados a alta velocidade, rompendo através de colisões as duplas ligações das moléculas de O_2 presentes no ar.

A geração do ozônio inicia quando os elétrons livres provenientes da descarga corona causam a dissociação das moléculas de oxigênio:



e, posteriormente, átomos de oxigênio se reagrupam e formam o ozônio:

Figura 5 – Descarga corona

Fonte – Schiavon et al.²

Durante o processo de geração, uma quantidade considerável de calor é liberada, tornando fundamental a aplicação de alguma estratégia de refrigeração para manter o reator adequadamente refrigerado, a fim de maximizar a produção¹⁰.

4.1.5.2 CORONA CC NEGATIVO

Para o entendimento do processo corona negativo, alguns mecanismos de ionização serão analisados. Considere dois eletrodos tipo fio e cilindro dispostos de uma forma coaxial (Figura 5), onde uma alta tensão CC negativa é aplicada no catodo (fio de diâmetro menor) enquanto que o anodo (cilindro de diâmetro maior) é aterrado. Na região inter-eletrodo faz-se passar um gás de característica eletronegativa (gás que possui afinidade na troca de elétrons)¹⁰.

Em condições normais de pressão e temperatura, partículas carregadas (elétrons livres) presentes nos gases eletronegativos, são aceleradas pelo elevado campo elétrico aplicado, ganhando energia e em seguida transferindo, por meio de colisões inelásticas, para moléculas neutras do gás¹⁹.

Neste processo, se a energia do elétron for suficientemente alta, pode ocorrer a ionização (formação de pares de íons negativo e positivo) de moléculas do gás devido às colisões. Se o campo elétrico for aumentado, mais elétrons ganharão energia e novas colisões ocorrerão, iniciando a multiplicação de elétrons na região de ionização, fenômeno conhecido como avalanche de elétrons⁹.

Devido a polaridade da alimentação, o desenvolvimento da avalanche se dá em direção ao anodo, o catodo por sua vez é responsável por fornecer elétrons para o processo.

Em um primeiro momento o catodo sofre um bombardeamento de íons devido ao deslocamento da avalanche. Ao mesmo tempo fótons são emitidos da avalanche em todas as direções. Fótons e íons positivos produzidos podem iniciar novas avalanches. Para o que o processo ocorra é necessário que a energia envolvida seja grande o suficiente para arrancar um elétron da superfície do catodo²⁰. O deslocamento das cargas torna-se auto sustentado, correspondendo a pulsos repetitivos e regulares de corrente corona fluindo por meio de um circuito de alta tensão.

O pulso de corrente recebe o nome de pulso Trichel, em homenagem a G. W. Trichel, pesquisador com contribuições significativas nesta área². De acordo com Schiavon⁹ o pulso Trichel pode ser compreendido como um pulso de corrente associado a uma descarga de brilho transiente ou ainda como uma descarga de brilho que tenta desenvolver-se, mas é extinta pela carga espacial acumulada nesta região.

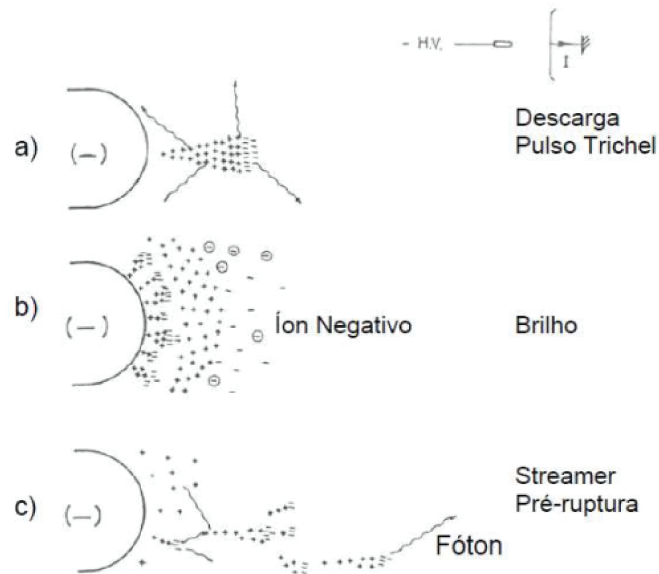
A Figura 6 demonstra o mecanismo da descarga corona CC negativa, ilustrando em três etapas o fenômeno. Na Figura 6-a, uma tensão com nível próximo ao limiar de ionização é aplicada ao catodo, indicado pelo simbolo (-), fazendo com o que os elétrons sejam afastados para regiões de baixo campo. Os íons positivos deixados para trás possuem baixa mobilidade, ocasionando um aumento no campo de ionização nesta região que por sua vez prova a retirada de elétrons da superfície do catodo.

No caso dos gases eletronegativos, os elétrons arrancados são absorvidos pelas moléculas do gás, impedindo a formação da avalanche até o momento que o campo elétrico afasta essa nuvem de íons para regiões mais distantes da região de ionização, momento em que este recupera o seu valor crítico de ruptura reiniciando a avalanche.

Na etapa apresentada na Figura 6-b, o nível de tensão é aumentado. Logo, mais elétrons são arrancados do catodo. Devido a baixa mobilidade da nuvem de íons, começa a ocorrer um acúmulo de carga espacial positiva que permanece no espaço entre a nuvem e o catodo. O pulso de corrente (Trichel) sofre um aumento na taxa de repetição até o nível crítico, onde a descarga corona adquire um modo de brilho estável sem pulsos. Já na Figura 6-c, o campo aplicado afasta do catodo a carga espacial, momento em que ocorre uma intensa excitação das moléculas do gás, gerando-se fótons em direção ao anodo. Os fótons, por um mecanismo chamado fotoionização, formam avalanches secundárias criando canais de ionização chamados *streamers*. Este processo permanece até que um aumento na tensão provoque o crescimento dos *streamers* resultando na ruptura completa do espaço entre os eletrodos.

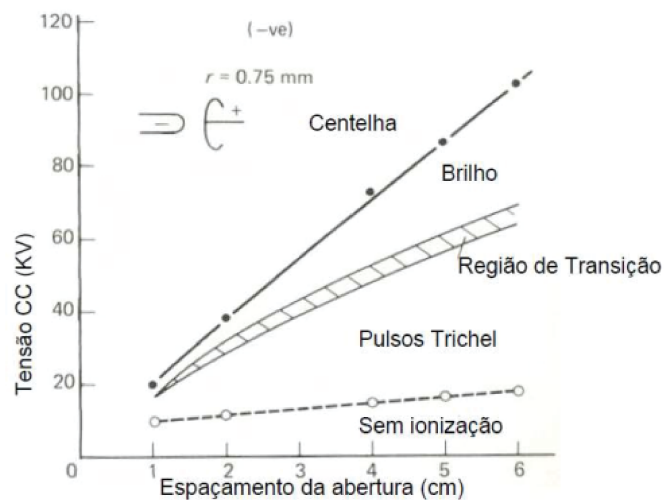
A representação gráfica dos fenômenos físicos envolvidos no arranjo ponta-plano, onde a ponta é o catodo e o plano o anodo, pode ser verificada na Figura 7. As curvas apresentadas são respostas característica da descarga corona e da ruptura em função da tensão aplicada e do espaçamento intereletrodo.

Figura 6 – Desenvolvimento de avalanches em descarga corona negativa



Fonte – Abdel-Salam²¹

Figura 7 – Característica corona e ruptura em arranjo ponta-plano negativo no ar atmosférico



Fonte – Kuffel et al.²⁰

A curva tracejada fornece a tensão inicial para os pulsos Trichel. Abaixo desta, os fenômenos de ionização não são significativos, considerando o espaçamento de 1cm. A característica dos pulsos se mantém para uma ampla faixa de tensão e espaçamento, até que a diferença de potencial seja suficiente para o sistema entrar na transição, momento em que as descargas de brilho tentam se formar. Toda via, esse comportamento não é bem definido, estabelecendo-se então uma região de transição. Aumentando ainda mais a tensão, a taxa de repetitividade dos pulsos Trichel também se eleva, até atingir o nível

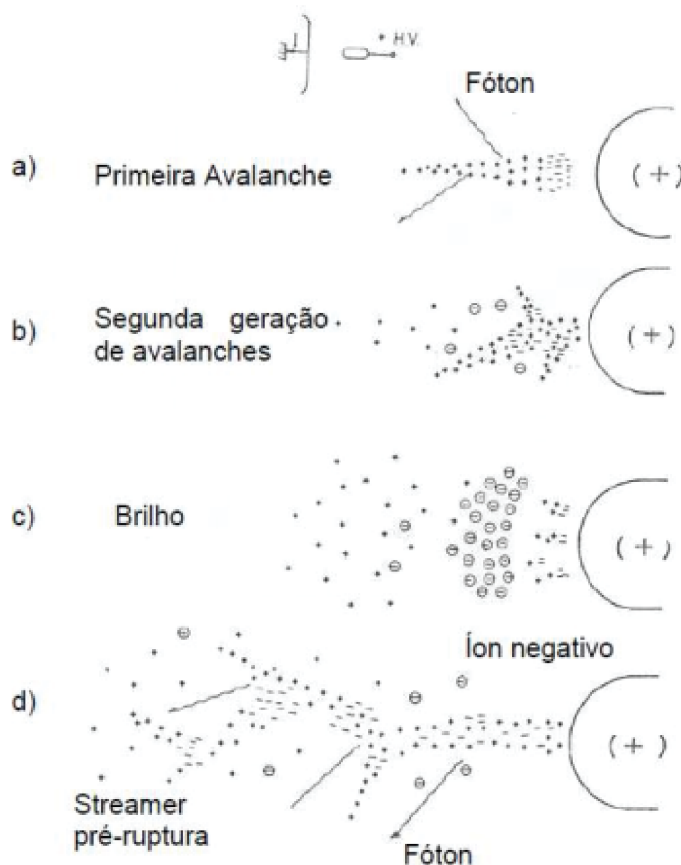
crítico, onde a descarga corona de brilho se estabelece. Para tensões acima desta haverá a formação dos *streamers* e em seguida a ruptura completa.²⁰

Schiavon⁹ observa que sob polaridade negativa a ruptura acontece somente em tensões muito elevadas, o que, por consequência, resulta em uma descarga corona muito mais intensa. Além disso, aponta que, na região entre as curvas tracejadas e contínua, a descarga é praticamente constante e estável, características estas que são interessantes para a construção de geradores de ozônio.

4.1.5.3 CORONA CC POSITIVO

O mecanismo físico da descarga corona com polaridade positiva aplicada ao anodo numa geometria fio-cilindro coaxial, onde o fio é o eletrodo anodo enquanto que o cilindro (catodo) está aterrado, está representado na Figura 8.

Figura 8 – Desenvolvimento das avalanches nas descargas corona positiva



Fonte – Abdel-Salam²¹

Faz-se passar um gás de característica eletronegativa na região intereletrodo aplicando inicialmente uma tensão com nível próximo ao limiar de ionização. Observa-se na Figura 8-a que, com o aumento da tensão, os elétrons livres avançam em direção ao anodo, acelerados pelo campo formam avalanches e deixam para trás canais de íons positivos.

Fótons energéticos são emitidos pela avalanche e acabam ionizando outros átomos e moléculas do gás. Os elétrons liberados geram avalanches secundárias, que por consequência formam uma estrutura ramificada e filamentada em direção ao catodo, chamada de *streamer* como mostra a Figura 8-b. Para níveis maiores de tensão as avalanches extinguem-se, uma vez que os elétrons foto-gerados são emitidos em regiões fracas do campo, onde são formados os íons negativos lentos (Figura 8-c). O campo aplicado continua polarizando a região fazendo com que a nuvem de íons negativos seja atraída e a de íons positivos seja repelida. A atividade transiente cessa e inúmeras descargas tornam-se auto-sustentadas, estabelecendo uma pequena região de brilho corona próximo a superfície do eletrodo. Para tensões maiores, o brilho aumenta tanto em área quando em intensidade, as nuvens de íons de alta densidade colapsam, e intensos *streamers* iniciam-se. Ao atingirem o catodo ocorre então a ruptura completa do espaço intereletrodo (Figura 8-d).

De forma análoga ao apresentado na Figura 7, na Figura 9 está ilustrado graficamente o fenômeno, através das curvas características da descarga corona e ruptura de uma configuração ponta-plano, anodo e catodo respectivamente.

Figura 9 – Curvas limiaries da descarga corona positiva e da ruptura de centelhas na configuração ponta-plano



Fonte – Kuffel et al.²⁰

Abaixo das curvas 1 e 2 na Figura 9, nenhum fenômeno de ionização apreciável é identificado, considerando espaçamento entre eletrodos maior que 2cm. Com o aumento do espaçamento o campo torna-se mais distorcido e aparecem descargas transientes chamadas *streamers* iniciais, que correspondem a pulsos de correntes irregulares (região entre as curvas 2-3). Entre as curvas 1 e 4', ainda ocorre uma região de instabilidade onde, para qualquer variação de tensão, a atividade corona conduz diretamente à ruptura. Aumentando a tensão nota-se que na região entre as curvas 3 e 4, os *streamers* tornam-se mais numerosos e frequentes. A atividade transiente cessa e as descargas corona tomam a forma de brilho quase constante próximo à superfície do anodo. A intensidade e a área do brilho variam com a tensão. Para a mesma faixa de espaçamento e aumentando a

tensão, a nuvem de íons negativos no anodo perde a estabilidade dando início a novos *streamers* (região imediatamente abaixo da curva 4). Para uma tensão um pouco maior, a completa ruptura ocorre através do espaçamento da abertura do gás (região acima da curva 4)²¹. A região entre as curvas 3 e 4 representa para a polaridade positiva o local onde as descargas corona com característica estável estabilizam, sem resultar em ruptura.

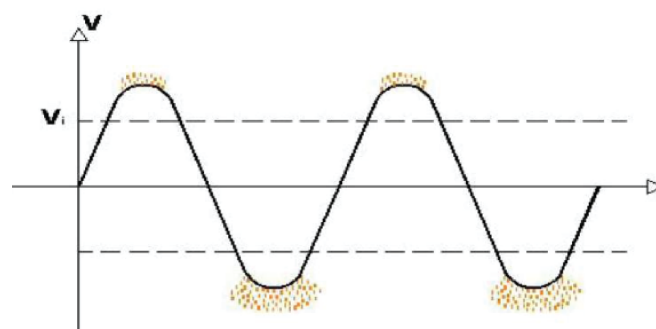
Ao se comparar a descarga corona sob polaridade negativa e positiva, nota-se que na segunda a ruptura ocorre em tensões significativamente menores que no primeiro caso. Segundo Schiavon⁹ a descarga corona positiva é difícil de controlar, ocorrendo frequentemente a ruptura. Desta forma, a produção de ozônio sob polaridade positiva apresenta menor eficiência quando comparada à polaridade negativa.

4.1.5.4 CORONA CA

A diferença básica entre a geração de corona sob tensão CA e a tensão CC está na mudança periódica da direção do campo elétrico e sua influência na carga espacial residual, não considerando a descarga do semi-ciclo precedente. *Streamers* iniciais podem aparecer somente sobre uma pequena faixa de tensão inicial seguidos por corona de brilho²¹.

De acordo com o que foi apresentado na seção 4.1.5.3, a ruptura em polaridade positiva ocorre em um nível de tensão muito menor do que sob polaridade negativa. Conseqüentemente, sob tensão CA, a ruptura ocorre obrigatoriamente durante o semi-ciclo positivo da onda de tensão²⁰. Desta forma, conforme indicado esquematicamente na Figura 10, a geração de ozônio é mais intensa durante o semi-ciclo negativo.

Figura 10 – Intensidade de geração de ozônio sob tensão alternada



Fonte – Schiavon⁹

Comparando os fenômenos ocorrentes em polaridade CC negativa, CC positiva e CA, Amaroli¹⁰, conclui-se que a melhor forma para se obter a descarga corona e, conseqüente a maior geração de ozônio, é sob polaridade CC negativa, ficando a configuração sob tensão CA com valores intermediários entre estas polaridades.

4.1.5.5 DESCARGA CORONA EM ALTA FREQUÊNCIA

Outra possibilidade de se gerar descargas corona com maior eficiência é por meio do uso de conversores de alta frequência ou bobinas de Tesla, com taxa de repetição na faixa de kHz, ao invés das fontes de alimentação de frequência industrial (60Hz) usadas tradicionalmente.

4.1.5.6 DESCARGA CORONA PULSADA

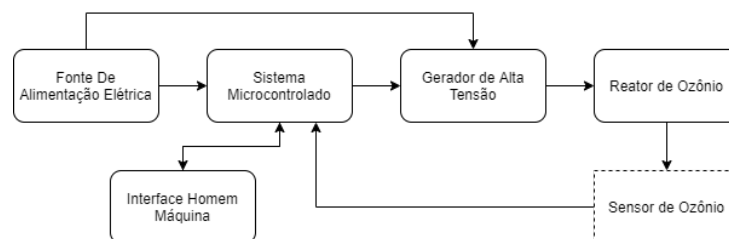
Segundo Samaranyake et al.²², a eficiência energética em geradores de ozônio convencionais, operando a frequência industrial (60Hz) ou até mesmo em sistemas controlados na escala de kHz, é relativamente baixa, devido ao fato de que uma parte da energia aplicada é convertida em calor durante o processo, aquecendo os eletrodos e o gás. Por essa razão, a energia é desperdiçada. A produção de ozônio por descarga corona pulsada na escala de nanosegundos tem se demonstrado muito mais efetiva, sem aquecer significativamente o gás ou induzir ruptura do espaçamento intereletrodo em condições de temperatura ambiente e pressão atmosférica.

Fukawa et al.²³ explica que o ganho de eficiência está diretamente relacionado ao fato de que o campo elétrico deve ser aplicado somente até a formação dos *streamers* iniciais, para prevenir que o sistema entre na faixa de transição entre os *streamers* e a ruptura completa, momento em que a perda de energia é extremamente alta, devido a alta quantidade de calor liberada.

4.2 OZONIZADORES

Ozonizadores são dispositivos eletro-eletrônicos que empregam um dos fenômenos físicos citados na seção 4.1.5 para gerar ozônio gasoso. Este tipo de equipamento em sua grande maioria está baseado na arquitetura apresentada na Figura 11 e descrita nas seções 4.2.1 4.2.4.

Figura 11 – Arquitetura Padrão de Ozonizadores



Fonte – O Autor

4.2.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

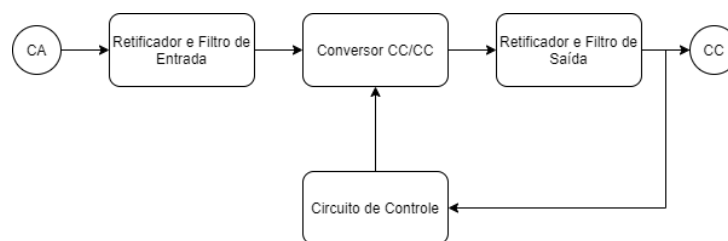
Todo dispositivo que necessita energia elétrica para seu funcionamento invariavelmente irá demandar uma fonte que seja capaz de disponibilizar corrente e tensão elétrica no formato e intensidade que atenda aos seus requisitos de operação.

As fontes elétricas podem ser divididas em dois grandes grupos segundo a natureza da corrente elétrica por elas fornecida: fontes de corrente alternada (CA) e fontes de corrente contínua (CC). No sistema elétrico predial e industrial a natureza oscilante da corrente caracteriza uma fonte de energia elétrica CA, a qual pode sofrer modificações de fase, amplitude e frequência segundo os requisitos da carga a ser alimentada. Por outro lado alguns equipamentos principalmente eletrônicos necessitam de correntes elétricas contínuas para o seu correto funcionamento, ocasião na qual uma fonte de corrente CC se faz necessária.

Segundo Schiavon⁹, as fontes de tensão e corrente contínua são normalmente obtidas a partir de três tecnologias diferentes: ferro ressonante, linear e chaveada. Schiavon⁹ complementa que o emprego da tecnologia chaveada se tornou o mais popular já que esta apresenta maior versatilidade e eficiência.

A elevada eficiência (acima de 70%) do sistema chaveado é oriunda da sua característica idealmente não dissipativa, cujo princípio de funcionamento baseia-se no armazenamento de energia em acumuladores capacitivos e indutivos⁹. Fontes chaveadas são basicamente compostas de um circuito retificador, filtro de entrada, conversor CC/CC, retificador de saída, filtro de saída e circuito de controle arrançados da forma demonstrada na Figura 12.

Figura 12 – Fonte Chaveada



Fonte – O Autor

4.2.2 SISTEMAS MICROCONTROLADOS

Sistemas microcontrolados como sugere a nomenclatura são estruturas que utilizam microcontroladores para controlar, monitorar e em alguns casos desempenhar funções das mais diversas naturezas. Microcontroladores por sua vez são circuitos integrados que possuem a capacidade de executar funções lógicas a partir de instruções previamente programadas²⁴. Por definição, os microcontroladores são constituídos de unidades pro-

cessadoras e unidades periféricas que executam funções específicas, sejam elas de armazenamento de dados, comunicação, PWM, entre outras.

Devido a sua arquitetura os sistemas microcontrolados oferecem recursos para implementação de teorias de controle avançadas, utilização de Interface Homem-Máquina (IHMs), conectividade entre dispositivos, implementação de inteligência artificial e uma infinidade de possibilidades que flexibiliza e potencializa a sua aplicação em todos os setores.

4.2.3 FONTE DE ALTA TENSÃO

Sabendo que o efeito corona é o fenômeno físico mais popularmente empregado nos ozonizadores e que necessita de alta tensão para ser induzido, os equipamentos de ozonização demandam uma fonte ou circuito capaz de atender a este requisito. Tensões da ordem de kV (quilo volts) podem ser geradas de várias maneiras, entre elas elevação por transformadores quando em CA e topologias CC/CC quando em corrente contínua. Equipamentos de ozonização que buscam maior eficiência utilizam geradores de alta tensão CC/CC, normalmente em topologia *Flayback*⁹.

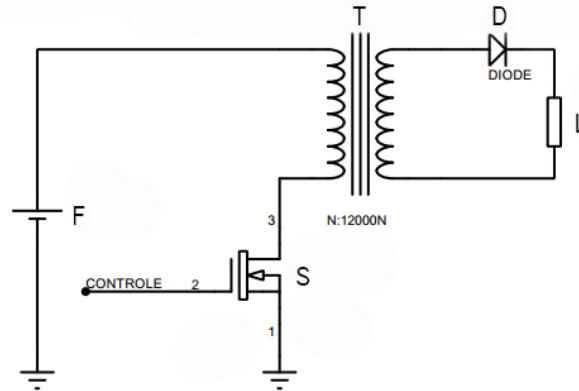
O circuito *Flayback* apresentado na Figura 13 opera a partir de um circuito CC chaveado com um conjunto de indutores acoplados elevadores de tensão. No circuito da Figura 13 ao ligar a chave S a corrente elétrica é fornecida pela fonte F e carrega o núcleo do transformador T (indutor primário do acoplamento), a energia é acumulada na forma de campo magnético no núcleo e se mantém até que a chave S seja desligada, interrompendo a corrente do primário, que ao cessar a corrente de forma brusca faz com que o campo magnético se dissipe no transformador T (indutor secundário do acoplamento) fazendo então circular corrente na carga L, fenômeno descrito pela Lei de Faraday-Lenz.

O diodo D no secundário possui o importante papel de impedir a circulação de corrente durante os transientes no primário, tornando possível então o armazenamento da energia no núcleo do transformador.

4.2.4 REATOR DE OZÔNIO

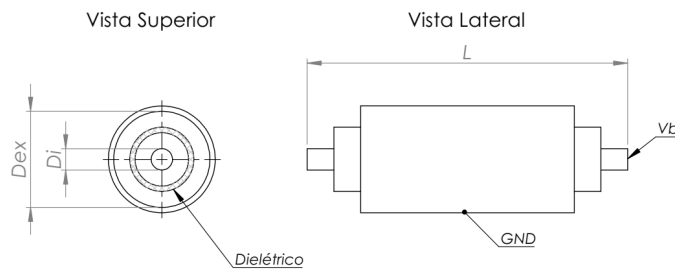
O reator de ozônio é o local onde o fenômeno de geração é induzido, este local é definido pelos requisitos de máxima eficiência do fenômeno para melhor conversão da matéria prima (O_2) em produto (O_3). Para o efeito corona, várias geometrias podem ser utilizadas, entretanto neste contexto trata-se apenas do arranjo de cilindros coaxiais, que é considerado a topologia mais interessante para aplicações comerciais¹⁰.

Na Figura 14 é apresentado uma topologia coaxial com eletrodos metálicos, onde o eletrodo externo possui diâmetro D_{ex} e o eletrodo interno possui diâmetro D_i , e entre os eletrodos um cilindro dielétrico, normalmente um cristal de vidro ou cerâmica. Para que o efeito corona ocorra, uma tensão V_b suficiente é aplicada para formar um campo elétrico

Figura 13 – Topologia *Flayback*

Fonte – O Autor

Figura 14 – Reator Coaxial



Fonte – O Autor

E_b com intensidade de ruptura no espaço entre os eletrodos. A tensão V_b média é dada por:

$$V_b = E_b r_i \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_i} \right), \quad (4.4)$$

onde r_{ex} e r_i são os raios do eletrodo externo e do eletrodo interno respectivamente.

O campo elétrico com intensidade suficiente para se obter uma descarga corona estabilizada (E_b) é calculador a partir de equações resultantes de curvas empíricas, obtidas por diversos pesquisadores do segmento, como por exemplo a Equação de Peek²⁰:

$$\frac{E_b}{\delta} = 31,53 + \frac{9,63}{\sqrt{\delta r}}, \quad (4.5)$$

em que E_b é a intensidade média do campo para se obter a descarga corona estabilizada em função do raio do eletrodo interno e da densidade relativa (δ) do gás entre os eletrodos. O campo E_b é dado em kV/cm e r em cm.

Como pode-se observar o campo E_b é dependente da densidade relativa, ou seja, depende da pressão e temperatura conforme:

$$\delta = 0,386 \frac{p}{(273 + t)}, \quad (4.6)$$

onde p é a pressão e t a temperatura.

4.3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE OZÔNIO NO AR E NA ÁGUA

Métodos iodométricos de medição de ozônio no ar e na água, são baseados em mecanismos de reações químicas conhecidas e fáceis de implementar. Esses procedimentos também são utilizados como métodos de referência e de calibração de instrumentos utilizados para medir concentrações de ozônio na água¹⁶.

4.3.1 MEDIÇÃO DE OZÔNIO NO AR

De acordo com Schiavon⁹, nenhum método para medição de ozônio no ar está padronizado. Desta forma, a medição pode ser feita por iodometria utilizando dois agentes redutores para medir o iodo liberado: arsenito de sódio ou tiosulfato de sódio. Neste método o ozônio é medido por sua ausência.

4.3.2 MEDIÇÃO DE OZÔNIO NA ÁGUA

Embora vários métodos de medição de ozônio na água estejam disponíveis, o método iodométrico continua sendo mais comumente utilizado. Um reagente muito sensível para o iodo é disponível sob a forma de siringaldazina, que foi introduzido inicialmente como reagente para cloro livre. O ozônio liberado por este método pode ser medido por siringaldazina, que assume uma tonalidade rosa/violeta com o máximo de absorção em 585 nm. Como resultado, o ozônio pode ser determinado por espectrofotometria¹⁶.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e os métodos empregados na concretização dos resultados propostos por este trabalho.

5.1 PROJETO E DESENVOLVIMENTO ESTRUTURAL

Para atender a proposta da construção da câmara de ozonização fez-se necessário o projeto e a construção de uma câmara propriamente dita, um reservatório fechado para abrigar os equipamentos/produtos a serem ozonizados. Por conveniência optou-se por implementar o gerador de ozônio em um compartimento da estrutura. Os requisitos de projeto estão listados no Quadro 3.

Quadro 3 – Requisitos do Projeto Estrutural

1	Volume útil de 60 l;
2	Material não reagente com ozônio;
3	Material compatível com ambiente laboratorial e hospitalar;
4	Construção otimizada para fluido dinâmico;
5	Compartimento para alojar ozonizador;
6	Aberturas e/ou suporte para <i>IHM</i> ;
7	Aberturas e pontos de fixação para ventilação forçada do ozonizador;
8	Pontos de fixação para componentes eletrônicos, PCBs e afins;
9	Tampo removível para acesso facilitado do compartimento do gerador;
10	Tampo removível com vedação para acesso ao compartimento de ozonização;
11	Estrutura de montagem simples para fácil reprodução em larga escala;
12	Materiais e componentes acessíveis para reprodução com orçamento limitado.

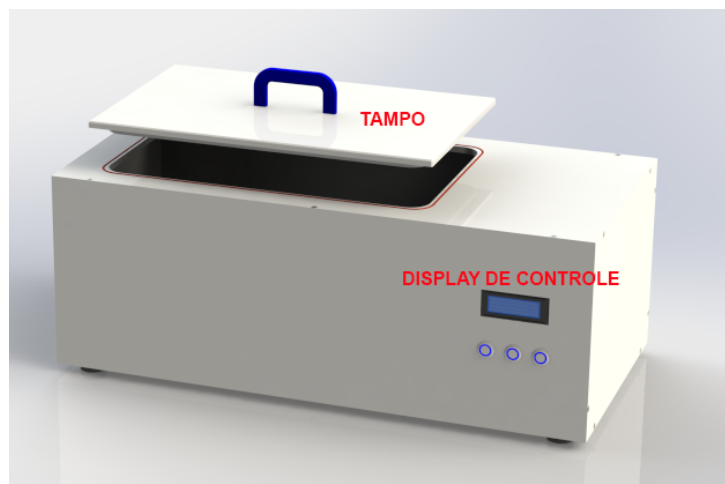
Fonte – O Autor

Considerando a lista de requisitos, o modelo tridimensional apresentado na Figura 15 foi desenvolvido e construído.

O material empregado na construção foi o Cloreto de Polivinila (*PVC*) que atendeu todos os requisitos do projeto. As peças foram usinadas em *router* com chapa de 10 mm e unidas com cola à base de ciano acrilato e parafusos fenda cruzada M3 de rosca auto atarraxante.

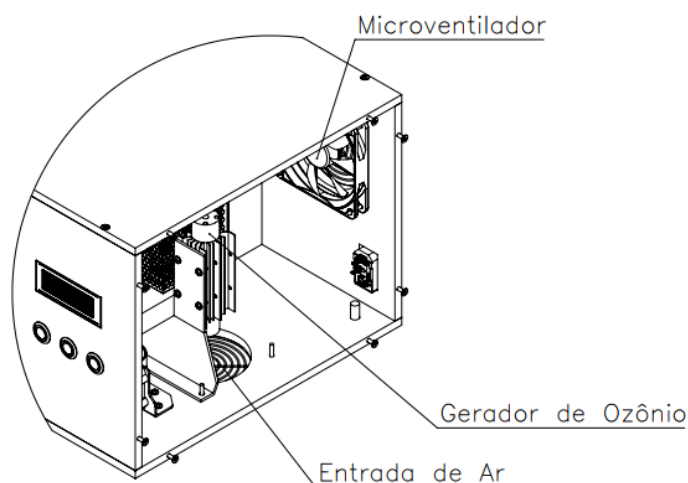
Foi implementado na câmara de ozonização um tampo removível superior com fechamento por gravidade e vedação com *O'ring* de silicone. A localização do tampo foi escolhida estrategicamente levando em consideração a densidade do ozônio, que por ser maior que a do ar, tende a concentrar o ozônio gerado no fundo da câmara, reduzindo assim a possibilidade de vazamento na junta entre o tampo e o reservatório.

Figura 15 – Câmera de ozonização



Fonte – O Autor

Figura 16 – Compartimento Ozonizador

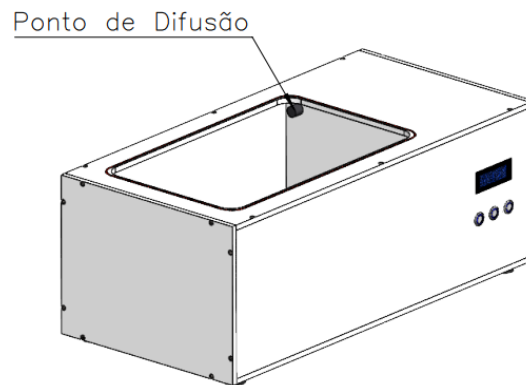


Fonte – O Autor

O mesmo conceito foi utilizado para o posicionamento do ponto de difusão interno, Figura 17, a fim de “despejar” o ozônio sobre os materiais dentro da câmara, garantindo a circulação do gás por gravidade.

O compartimento do gerador foi projetado na lateral da câmara, conforme a Figura 16, objetivando a acessibilidade para montagem e manutenção do sistema, o gerador de ozônio foi posicionado afastado da parede da câmara de forma a mitigar efeitos térmicos no processo de ozonização.

Respeitando a dinâmica das correntes de convecção na troca de calor dos componentes, um micro ventilador de exaustão foi instalado na parte posterior da câmara próximo ao tampo superior, e uma entrada de ar no tampo inferior imediatamente abaixo do reator, de forma a manter a temperatura do reator dentro dos limites previstos na especificação.

Figura 17 – Ponto de instalação do difusor de ozônio

Fonte – O Autor

Na face inferior da câmara foram instalados “pés” de borracha antiderrapante para garantir a estabilidade da estrutura e a segurança da operação em superfícies lisas, como bancadas e móveis em ambientes laboratoriais e hospitalares. No requisito *IHM* foram projetadas aberturas no tampo anterior para um *display* de cristal líquido (4×20) e três botões de painel 22 mm. Outra abertura prevista no projeto foi para a entrada de energia elétrica da rede, onde foi alojado um conector com fusível de proteção e chave liga/desliga.

As folhas e detalhamentos do projeto estrutural da câmara podem ser encontradas no Apêndice C.

5.2 PROJETO E DESENVOLVIMENTO ELÉTRICO E ELETRÔNICO

Nesta sessão estão descritos os requisitos do sistema elétrico e eletrônico da câmara de desinfecção de máscaras bem como os materiais e os métodos empregados para satisfazer tais requisitos.

O Quadro 4 apresenta os requisitos elétricos e eletrônicos básicos para a implementação da câmara de ozonização, que permitiram elevado grau de liberdade no desenvolvimento do projeto.

O sistema implementado para satisfazer os requisitos de projeto seguiu a arquitetura apresentada no diagrama da Figura 18 que está detalhado bloco a bloco nas subseções seguintes.

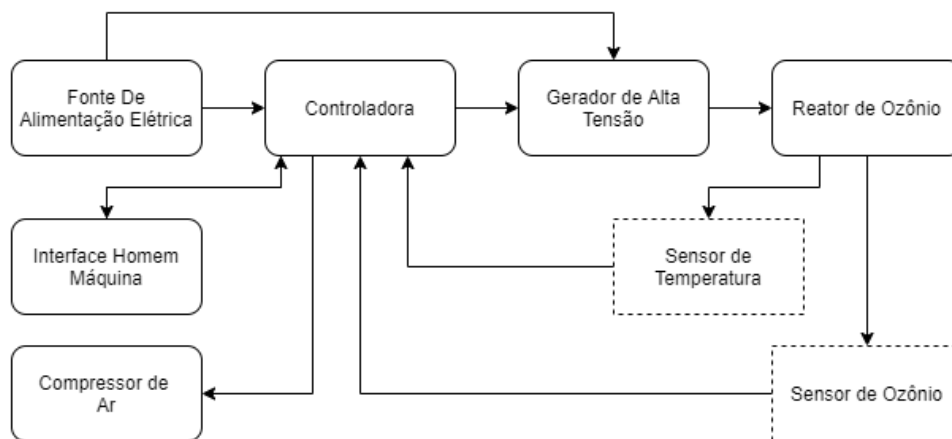
5.2.1 ESCOLHA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

Os requisitos de disponibilidade e acessibilidade apontaram diretamente para as fontes chaveadas popularmente conhecidas como fonte colmeia (Figura 19), facilmente encontradas no mercado com valor acessível, viabilizando a aquisição ao invés de um projeto

Quadro 4 – Requisitos do Projeto Elétrico e Eletrônico

1	Alimentação elétrica em rede 127V e 220V;
2	Circuitos protegidos contra curto circuito e sobrecarga;
3	IHM simples e operacional;
4	Circuito microcontrolado para controlar reator de ozônio;
5	Sensor de temperatura para o reator;
6	Circuito microcontrolado para controlar ventilação forçada;
7	Suporte para reator de ozônio de até 100 W;
8	Acionamento do compressor de circulação dos gases no reator.

Fonte – O Autor

Figura 18 – Arquitetura do sistema implementado

Fonte – O Autor

personalizado específico para a câmara desinfetadora. A fonte escolhida para alimentar o sistema foi de 120 W com entrada bivolt 127 V/220 V corrente alternada, e saída 12 V corrente contínua, com as devidas proteções contra curto circuito e sobrecarga.

5.2.1.1 CONTROLADORA

Para realizar o controle eletrônico da câmara de desinfecção foi projetado e implementado um circuito micro-controlado com recursos suficientes para processar uma *IHM* e interfacear os periféricos do ozonizador. O microcontrolador utilizado foi o PIC16F877A no encapsulamento TQFP44 da fabricante microchip. A Figura 20 apresenta o diagrama de blocos do circuito com detalhamentos das especificações em cada bloco.

O Apêndice A apresenta o esquemático completo da controladora não incluindo os periféricos, apenas suas interfaces, *drivers* ou conexões, com as respectivas indicações dos principais blocos do circuito.

O circuito foi implementado em uma placa de circuito impresso, cobre dupla face com substrato de fibra, o layout projetado está disponível no Apêndice B.

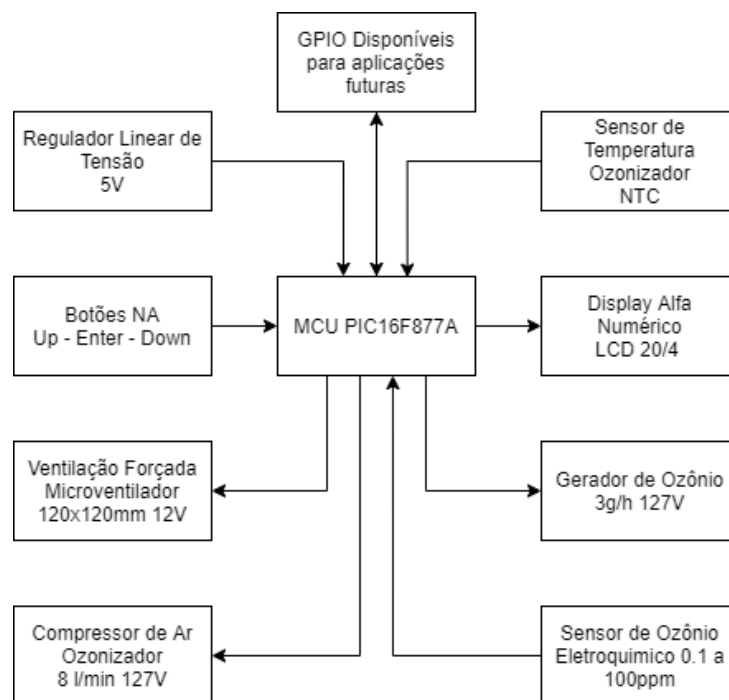
O fluxograma da Figura 21 demonstra de forma simplificada a lógica de funcionamento

Figura 19 – Fonte colmeia



Fonte – Hayonic²⁵

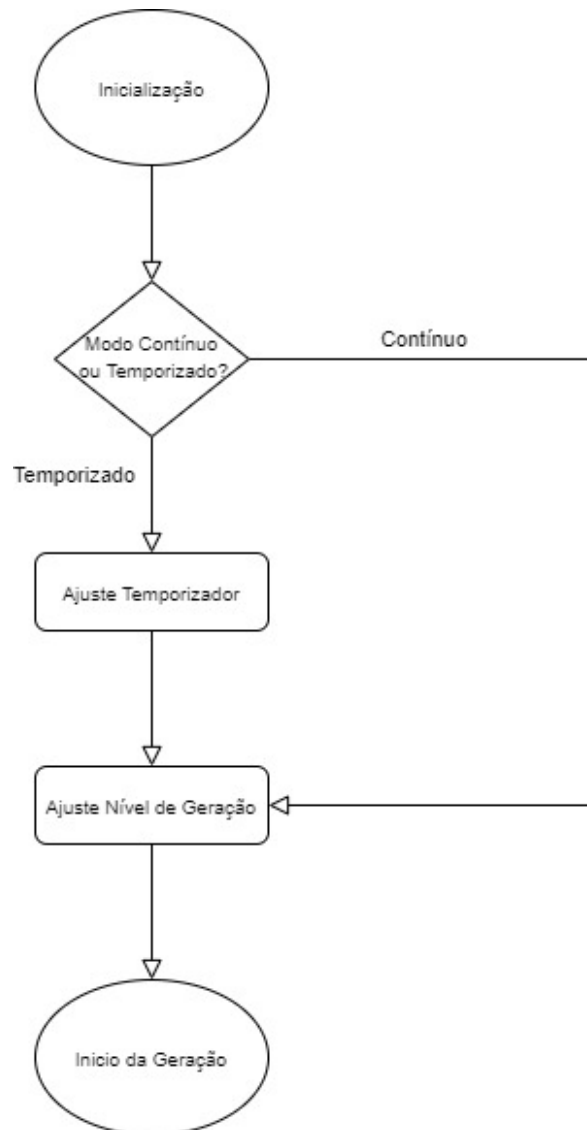
Figura 20 – Diagrama do circuito de controle



Fonte – O Autor

base para o *firmware* programado no microcontrolador. A lógica se resume a seleção de duas formas básicas de operação, geração de ozônio por tempo indeterminado, denominado modo contínuo, e geração por tempo configurado, modo temporizado. Uma vez selecionado o modo desejado o próximo passo é ajustar o nível de geração, ou seja, nível de potência do gerador de ozônio, que pode ser ajustado entre de 10 e 100%, em passos de 10%.

Figura 21 – Fluxograma de funcionamento



Fonte – O Autor

5.2.1.2 GERADOR DE ALTA TENSÃO

Devido a natureza do efeito corona exposta no Capítulo 4, uma tensão elétrica na ordem de kV é necessária para a ocorrência do fenômeno. O valor desta tensão é uma função das características geométricas do reator de ozônio. Para o reator em questão foram determinados os seguintes requisitos:

Levando em consideração o alto custo associado a fabricação e a escassez de alguns componentes eletrônicos no mercado nacional, optou-se por fontes disponíveis no mercado, a fonte escolhida que atendeu aos requisitos do Quadro 5 está ilustrada na Figura 22.

Quadro 5 – Requisitos da Fonte de Alta Tensão

1	Tensão de entrada 127 V e 220 V;
2	Frequência de entrada 60 Hz;
3	Potência 35 W;
4	Tensão de Saída 2,4 kV;
5	Frequência de Saída 12 kHz.

Fonte – O Autor

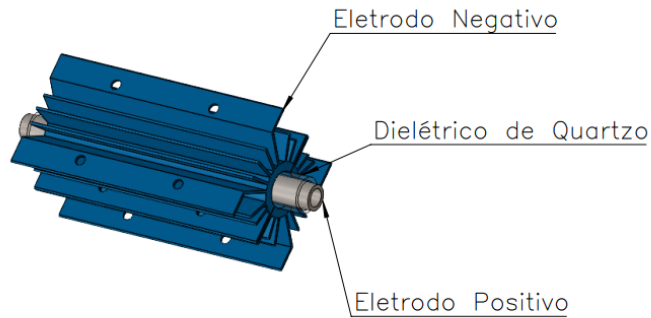
Figura 22 – Fonte de Alta TensãoFonte – OzoneFac²⁶**5.2.1.3 REATOR DE OZÔNIO**

Para a execução do projeto foi utilizado um reator de geometria coaxial com dielétrico de quartzo, capacidade de geração de 3 g de ozônio por hora, alimentado em 2,4 kV a uma frequência de 12 kHz e com consumo máximo de 35 W, dispositivo indicado na Figura 23. Foi optado pela aquisição de um reator comercial a partir da disponibilidade e acessibilidade de forma a viabilizar a produção da câmara de desinfecção.

Figura 23 – Reator de OzônioFonte – OzoneFac²⁶

A Figura 24 apresenta o detalhamento interno da arquitetura do reator destacando os três principais elementos que o constituem: eletrodo negativo, dielétrico e eletrodo positivo.

Figura 24 – Detalhamento do reator de ozônio

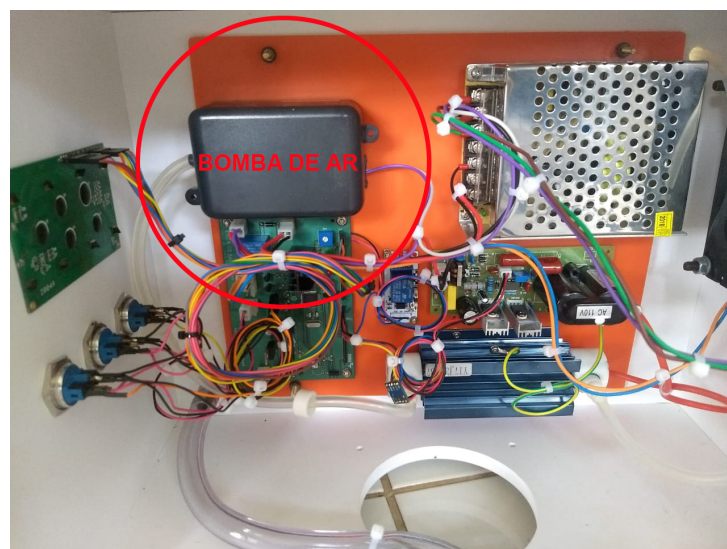


Fonte – O Autor

5.2.1.4 COMPRESSOR DE AR

A fim de garantir o máximo de eficiência do gerador, o fabricante do reator recomenda um fluxo contínuo de 8 a 10 l/min de ar ambiente ou 0,5 a 2 l /min de gás oxigênio pelo reator, desta forma um compressor de ar/bomba de ar foi instalado na linha pneumática de alimentação do reator. A bomba escolhida atendeu as especificações de tensão e vazão necessárias para o correto funcionamento da desinfetadora. A Figura 25 ilustra a bomba utilizada.

Figura 25 – Bomba de Ar/Oxigênio

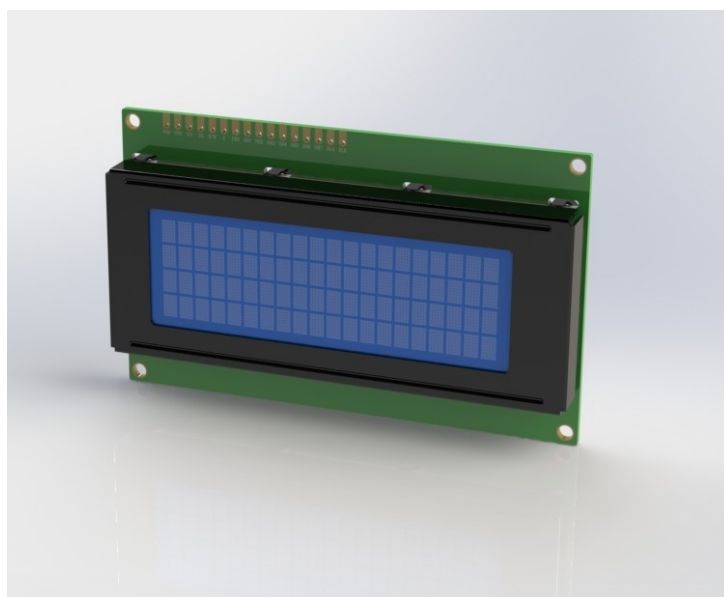


Fonte – O Autor

5.2.1.5 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

O processo de desinfecção baseado em gás ozônio é dinâmico e exige o ajuste de alguns parâmetros dependendo do tipo do alvo (vírus e/ou bactéria) a ser desinfectado e da superfície na qual está alojado. Desta forma, para que a câmera possa apresentar efetividade em diferentes cenários foi instalado uma interface para que o operador tenha a possibilidade de ajustar os principais parâmetros do processo: modo de operação, tempo de exposição do alvo ao gás e a concentração do ozônio gerado. Nesta interface ainda é possível monitorar o processo através de indicadores de tempo e diagnóstico do sistema. A interface implementada consiste em um *display* de cristal líquido alfanumérico de 80 dígitos, na configuração 20 colunas e 4 linhas como mostra a Figura 26, e três botões sem retensão de contato normal aberto, Figura 27. Nesta interface, o usuário pode utilizar os botões para navegar nas configurações e configurar valores de acordo com o processo a ser executado. A Figura 28 apresenta o detalhe da interface montada na câmera de desinfecção.

Figura 26 – *Display* alfanumérico 20x4

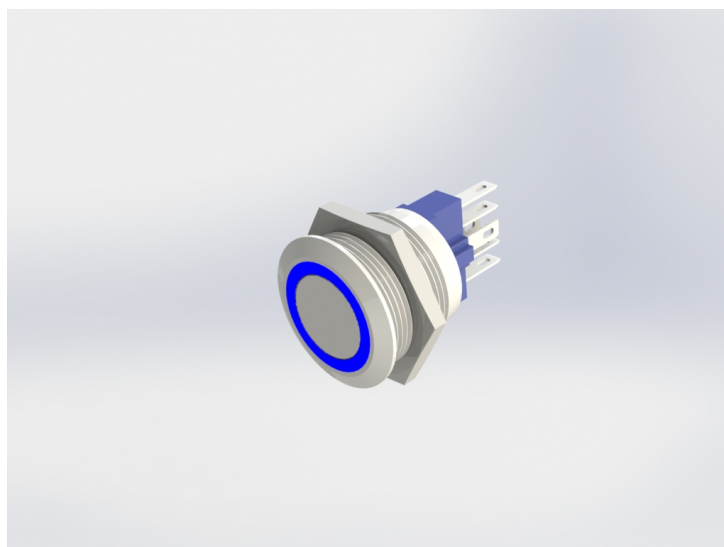


Fonte – O Autor

5.2.1.6 SENSOR DE TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO

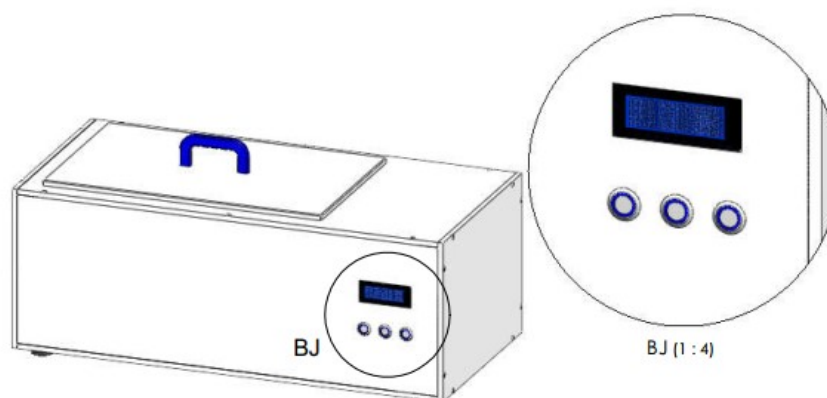
A placa de controle foi projetada para receber dois sensores de diagnóstico e monitoramento do sistema, sendo eles um sensor de temperatura do reator e um sensor de concentração do ozônio gerado. Por não serem componentes essenciais para o funcionamento da desinfetadora estes não foram implementados na construção final do projeto e ficam como sugestão para trabalhos futuros.

Figura 27 – Botoeira



Fonte – O Autor

Figura 28 – Detalhe IHM



Fonte – O Autor

5.3 VALIDAÇÃO DO GERADOR DE OZÔNIO

Para validar o funcionamento do gerador e quantificar a produção de ozônio foi utilizado iodimetria, ou titulação iodométrica. Este tipo de processo é uma análise química volumétrica, em que o aparecimento ou desaparecimento do iodo elementar indica o ponto final.

O agente redutor empregado na titulação iodométrica é o tiosulfato de sódio, este é utilizado para titular o iodo com a finalidade de determinar a quantidade do agente oxidante (ozônio) na solução. No processo uma solução de amido é utilizada como um indicador, pois pode absorver o iodo liberado e tornar mais nítida a mudança de cor que

indica o ponto final.

Para realizar o processo uma solução de iodeto de potássio foi depositada em um lavador de gases adaptado, onde foi infundido o oxidante (ozônio) na forma gasosa por 10 min via borbulhamento. Após esta etapa ao conteúdo do lavador de gases foi adicionado ácido sulfúrico. Titulou-se com tiosulfato de sódio até que a cor amarelada do iodo quase desaparecer, em seguida foi adicionado o amido indicador, tornando a solução azulada, e novamente titulou-se até a cor azul se tornar imperceptível indicando o ponto final da titulação.

A titulação iodométrica é um método extremamente confiável e acessível para a determinação da quantidade de ozônio que reagiu em uma solução, sendo inclusive utilizada para calibrar alguns tipos de sensores eletrônicos de medição de concentração de ozônio.

5.4 VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO

A câmara desinfetadora desenvolvida neste trabalho se propõe a desinfecção do novo coronavírus, entretanto, devido as limitações estruturais e de bio segurança dos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo, não foi possível trabalhar com a manipulação direta da cepa do novo coronavírus, desta forma bactérias foram empregadas como alternativa para a realização dos testes. A escolha por bactérias, principalmente esporulantes, se dá inclusive nas normas e recomendações para validação de processos de esterilização, uma vez que neste formato apresentam elevada resistência a desinfecção, muito superior aos tipos virais.

Neste trabalho foram escolhidas bactérias vegetativas *E. coli*, e esporulantes *Geobacillus stearothermophilus*. As bactérias foram preparadas em inóculo *overnight*, em seguida realizado o ajuste de concentração celular para obtenção da solução “mãe”. O próximo passo foi a impregnação de tiras de papel com a solução “mãe”, após impregnadas as tiras passaram por uma secagem de 4 horas para então serem submetidas a exposição ao ozônio. As tiras foram submetidas de forma individual por um período de ozonização de 30 min, com o gerador de ozônio configurado para a máxima capacidade de geração. Da solução “mãe” também foram preparadas as tiras que não passaram pela ozonização, configurando o grupo de controle do processo.

Após ozonizadas, as tiras foram agitadas com pérolas de vidro numa solução fisiológica até a dispersão das fibras do papel, em seguida depositadas em placas de Petri onde receberam o meio de cultura. Posteriormente passaram por um processo de incubação de 48 horas. Exceto pela ozonização o mesmo processo foi replicado para o grupo de controle. Após a incubação foram realizadas as análises de crescimento das bactérias e formação de colônias. Todo o processo foi realizado em triplicata.

Uma vez assegurado que neste processo não há o crescimento das bactérias, ou que o crescimento está dentro de limites aceitáveis, pode se inferir que a câmara está apta para executar a função de desinfetadora.

6 RESULTADOS

No decorrer deste capítulo serão apresentados os resultados da implementação da câmara de desinfecção de máscaras.

6.1 MONTAGEM MECÂNICA E ELETRÔNICA

Na seção 5.1 foi apresentado o projeto estrutural com as especificações e materiais necessários para a implementação. Nas Figura 29 e Figura 30 está apresentado o resultado da montagem do projeto. O resultado atendeu as expectativas, o volume da câmara foi suficiente para alojar o material de teste e a estrutura apresentou resistência mecânica satisfatória, entretanto, no quesito isolamento algumas deficiências foram detectadas, pois ocorreram vazamentos de ozônio em alguns pontos de irregularidades nos encaixes e conexões.

Figura 29 – Desinfetadora montada



Fonte – O Autor

Figura 30 – Desinfetadora montada tampo aberto

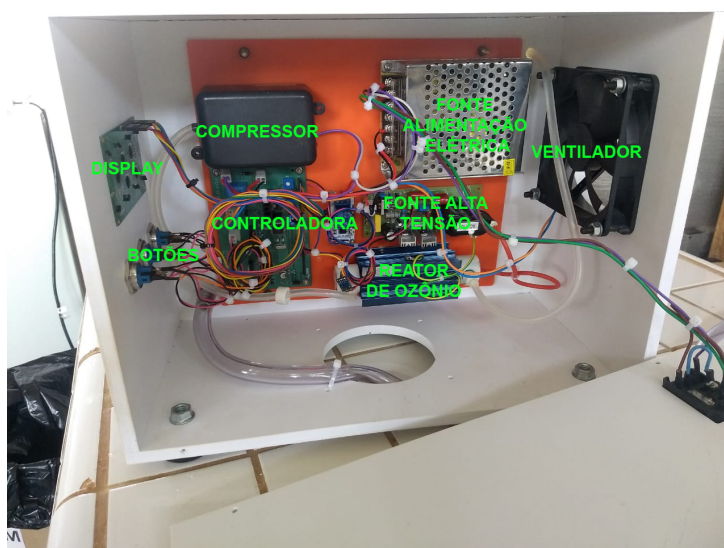


Fonte – O Autor

Na Figura 31 é possível observar o resultado da montagem eletrônica com os componentes identificados, todos conectados prontos para operação. A disposição dos elementos

dentro do compartimento ficou acessível. A modularidade da montagem conferiu a característica de fácil manutenção do sistema. O posicionamento do reator de ozônio não seguiu as especificações do projeto por dificuldade na obtenção do suporte, de forma que a refrigeração do reator não atingiu a eficiência desejada, sendo perceptível o sobreaquecimento, porém dentro dos limites de operação. A Figura 32 apresenta a IHM funcionando durante o regime de ozonização temporizada. A IHM apresentou boa navegabilidade e as informações intuitivas.

Figura 31 – Compartimento do gerador montado



Fonte – O Autor

6.2 TESTE DE GERAÇÃO DE OZÔNIO

A capacidade de geração da câmara foi testada no laboratório de química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo, com o auxílio da acadêmica de eng. de bio-processos Letícia Scussel. A metodologia empregada foi a titulação iodométrica²⁷, nesta metodologia é possível identificar indiretamente a quantidade de gás ozônio que reage em uma dada solução de iodeto de potássio através de uma titulação com tiosulfato de sódio.

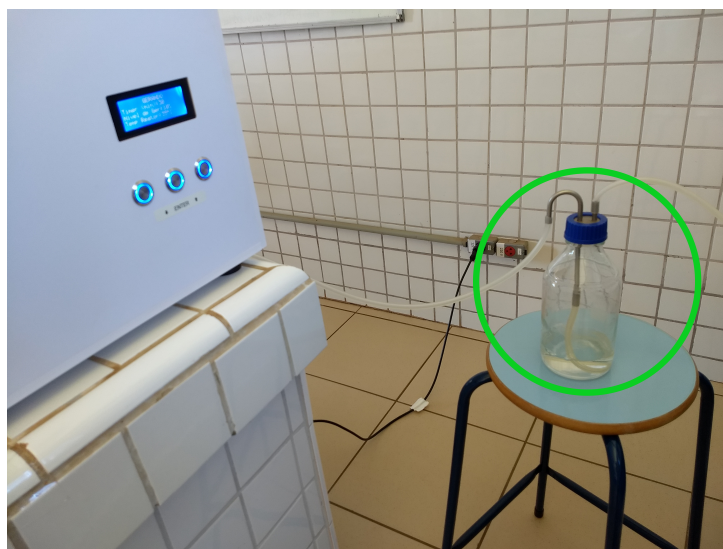
A Figura 33 destaca o equipamento montado para a realização do teste com um lavador de gases (frasco shott adaptado) conectado na saída do gerador. A solução translúcida contida dentro do lavador foi ozonizada por dez minutos, a Figura 34 mostra o ozônio borbulhando no lavador para reagir com a solução, ao final do processo a solução apresentava cor avermelhada como é possível ver na Figura 35, a mudança de cor na solução foi um indicador de que houve a reação com o ozônio e a titulação dessa solução de acordo com a metodologia apontou a quantidade de ozônio que reagiu.

Figura 32 – Interface homem-máquina operando



Fonte – O Autor

Figura 33 – Configuração experimental para a avaliação de concentração de ozônio através de método iodométrico



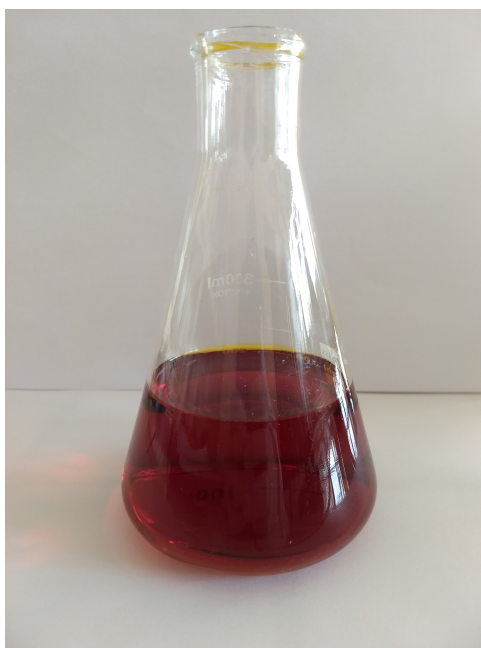
Fonte – O Autor

O teste foi realizado em triplicata com a desinfetadora configurada para nível máximo de geração e tempo de borbulhamento de 10 min. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Os valores medidos no teste iodométrico ficaram abaixo dos valores especificados para a câmara (3 g/h) em aproximadamente 8 vezes. A literatura indica que a concentração de moléculas de oxigênio na entrada do gerador tem impacto significativo na quantidade de

Figura 34 – Ozônio injetado no lavador de gases através do borbulhamento

Fonte – O Autor

Figura 35 – Solução coletada após passar pelo borbulhamento de ozônio

Fonte – O Autor

ozônio gerado, de forma que a recomendação para eficiência máxima é a utilização de gás oxigênio 98%. Devido a disponibilidade, nos testes foi utilizado gás oxigênio na contração natural da atmosfera, em torno de 21%.

Tabela 2 – Resultados obtidos com teste iodométrico

Ensaio	Volume Titulado (mL)	Ozônio Gerado (mg.min ⁻¹)
1	23,5	5,64
2	22,5	5,40
3	21,9	5,25
		Média 5,43

Fonte – O Autor

6.3 TESTE DE DESINFECÇÃO

A capacidade de desinfecção foi avaliada no laboratório de microbiologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo, também com o auxílio da acadêmica de eng. de bio-processos Letícia Scussel no processo foram utilizadas bactérias vegetativas e esporulantes como alternativa ao coronavírus, uma vez que as instalações laboratórias da universidade não permitiam a manipulação direta do vírus. O método de validação do equipamento por meio da desinfecção de bactérias foi viável pelo fato das bactérias geralmente apresentarem maior grau de resistência a esterilização em relação aos vírus, de forma que ao atingir níveis satisfatórios de eliminação de bactérias, automaticamente o resultado poderia ser extrapolado para os vírus.

A execução dos testes seguiu a metodologia apresentada na Figura 36, a qual previa a preparação e exposição das bactérias ao ozônio por um tempo pré-determinado no interior da câmara.

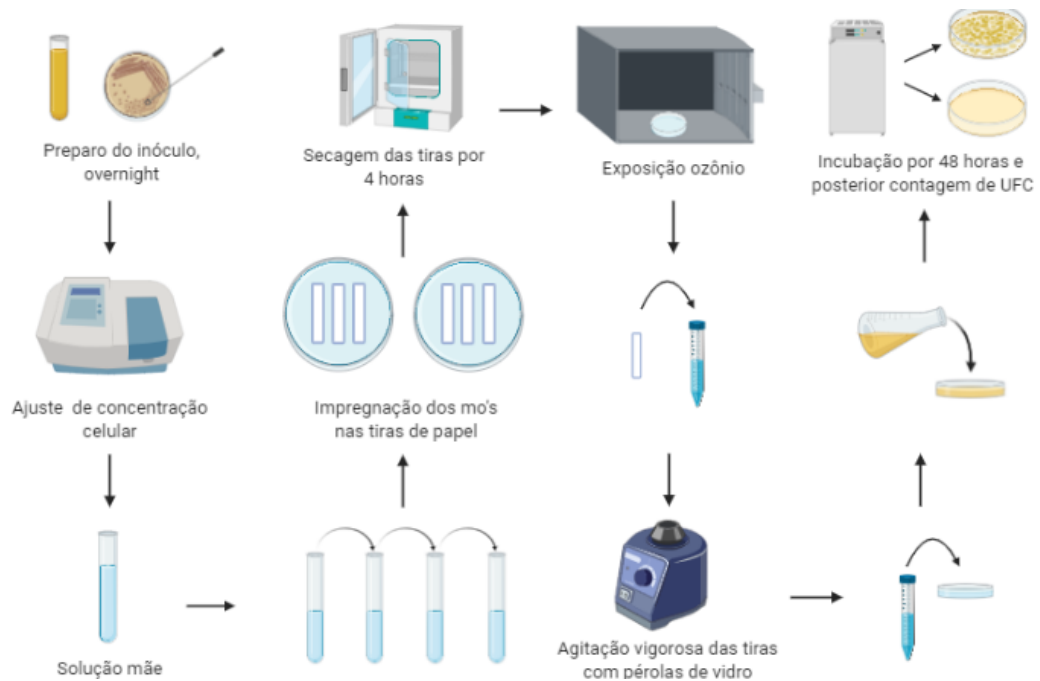
As bactérias utilizadas foram: vegetativas *E. coli*, e esporulante *Geobacillus stearothermophilus*. O tempo inicial configurado foi de 30 min para cada tipo de bactéria. A letalidade do ozônio e eficácia do equipamento foram avaliadas ao final do período.

A Figura 37 mostra um exemplo do teste com a bactéria *E. coli*, onde na placa da esquerda está o controle, com crescimento e formações de colônias visíveis nos pontos esbranquiçados, como destaca o círculo vermelho, e a direita a placa que foi desinfetada, onde se nota que não há formações, resultado positivo do ozônio ao inibir o crescimento das bactérias.

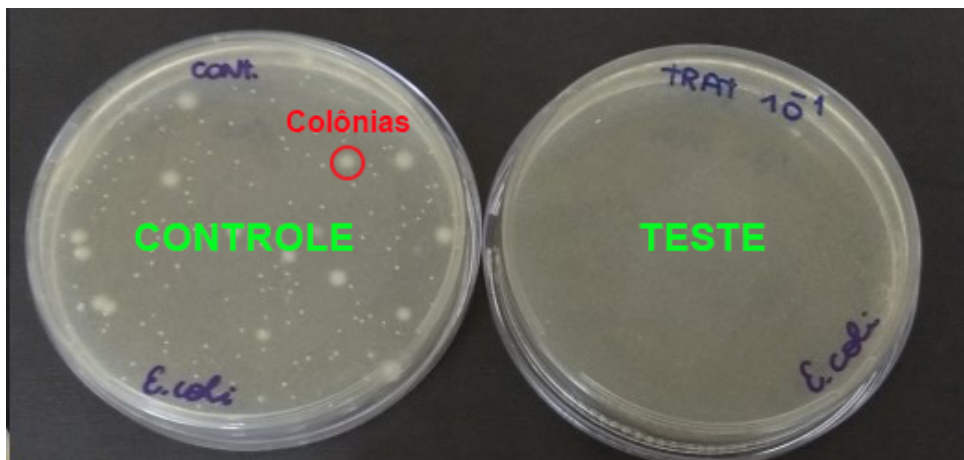
As figuras 38 e 39 apresentam as curvas de letalidade das bactérias vegetativas e esporulantes, respectivamente, após a conclusão dos testes de desinfecção da câmara. Os gráficos são parametrizados pela concentração de bactérias em unidades formadoras de colônias por ml (UFC/mL) no eixo vertical e tempo de exposição ao ozônio no eixo horizontal.

Verificou-se a partir das curvas obtidas que para as bactérias vegetativas houve inibição de 100% da carga microbiana inicial após 30 min de ozonização. Entretanto, para bactérias esporulantes o gráfico mostra que 30 min foram insuficientes para a eliminação total,

Figura 36 – Metodologia do teste de desinfecção



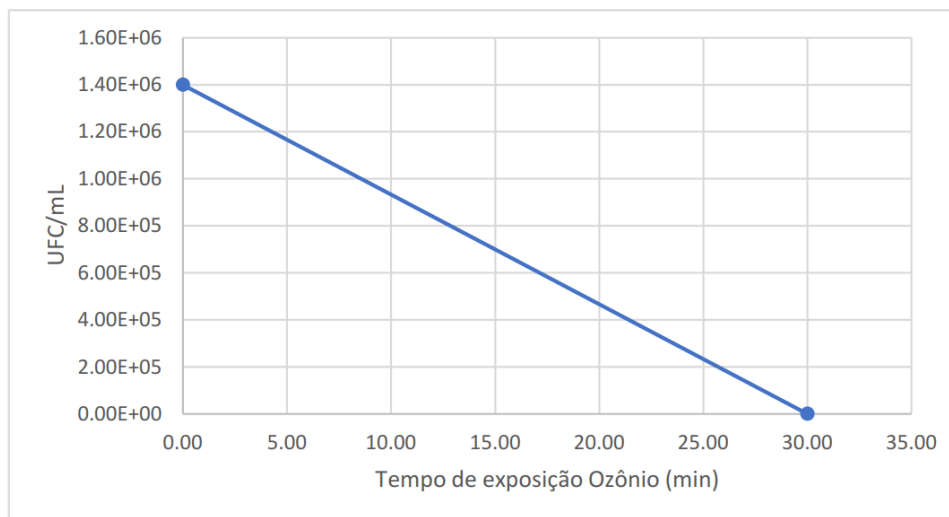
Fonte – Letícia Scussel

Figura 37 – Teste de desinfecção *E. coli*

Fonte – Letícia Scussel

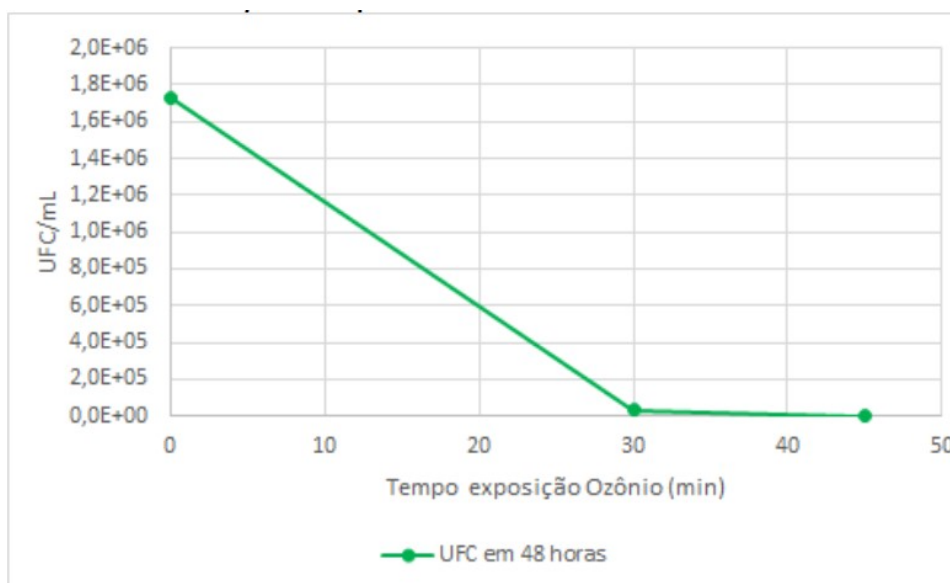
restando uma pequena taxa de sobreviventes que só puderam ser eliminados com tempos entre 45 e 50 min de ozonização. De acordo com os resultados apresentados nos tempos de análise e níveis de geração atingidos, a câmara apresentou boa performance como desinfetadora, permitindo assim sua utilização na desinfecção de máscaras e *face-shields*.

Figura 38 – Letalidade do ozônio sobre bactérias vegetativas



Fonte – Letícia Scussel

Figura 39 – Letalidade do ozônio sobre bactérias esporulantes



Fonte – Letícia Scussel

7 CONCLUSÃO

Compilando os resultados obtidos, apresentados no Capítulo 6, verificou-se que a capacidade de geração de ozônio proposta nos requisitos não foi atingida, os valores medidos estão na escala de 8 a 10 vezes menores que o especificado, diversos fatores podem impactar nesse resultado. A provável e mais significativa causa da divergência está na concentração de moléculas de oxigênio na alimentação do reator, onde foi utilizado nos testes concentração normal da atmosfera, O_2 em torno de 21%. Rice³ sugere que o emprego de O_2 98% pode aumentar em até 9 vezes a capacidade do reator.

Do ponto de vista mecânico, foram detectados vazamentos de ozônio para o meio externo, os impactos dos vazamentos nos resultados não foram avaliados. Quanto aos sistemas eletrônicos implementados, todos os critérios mínimos para o correto funcionamento do equipamento foram satisfeitos. Naturalmente, o projeto oferece inúmeras possibilidades de incrementações e correções para trabalhos futuros, dentre as quais pode se destacar: monitoramento eletrônico da quantidade de ozônio gerada, monitoramento e controle da temperatura do reator, novos tipos de reatores e inclusive melhorias mecânicas na arquitetura e materiais empregados na construção.

Muito embora os níveis de ozônio gerado ficaram abaixo da expectativa, o trabalho rigoroso seguindo as metodologias e critérios da engenharia culminou no sucesso do projeto atingido os objetivos propostos. A câmara desinfetadora apresentou níveis satisfatórios de desinfecção se mostrando aplicável ao que se propõe, desinfecção de máscaras e *face-shields*.

O desenvolvimento de um equipamento é uma tarefa multidisciplinar que exige a aplicação direta e indireta de diversas áreas do conhecimento, inclusive além do escopo da graduação. Portanto, o desafio de passar por cada etapa do projeto foi uma importante e necessária experiência que resultou em inúmeros aprendizados que certamente são fundamentais para a formação profissional.

REFERÊNCIAS

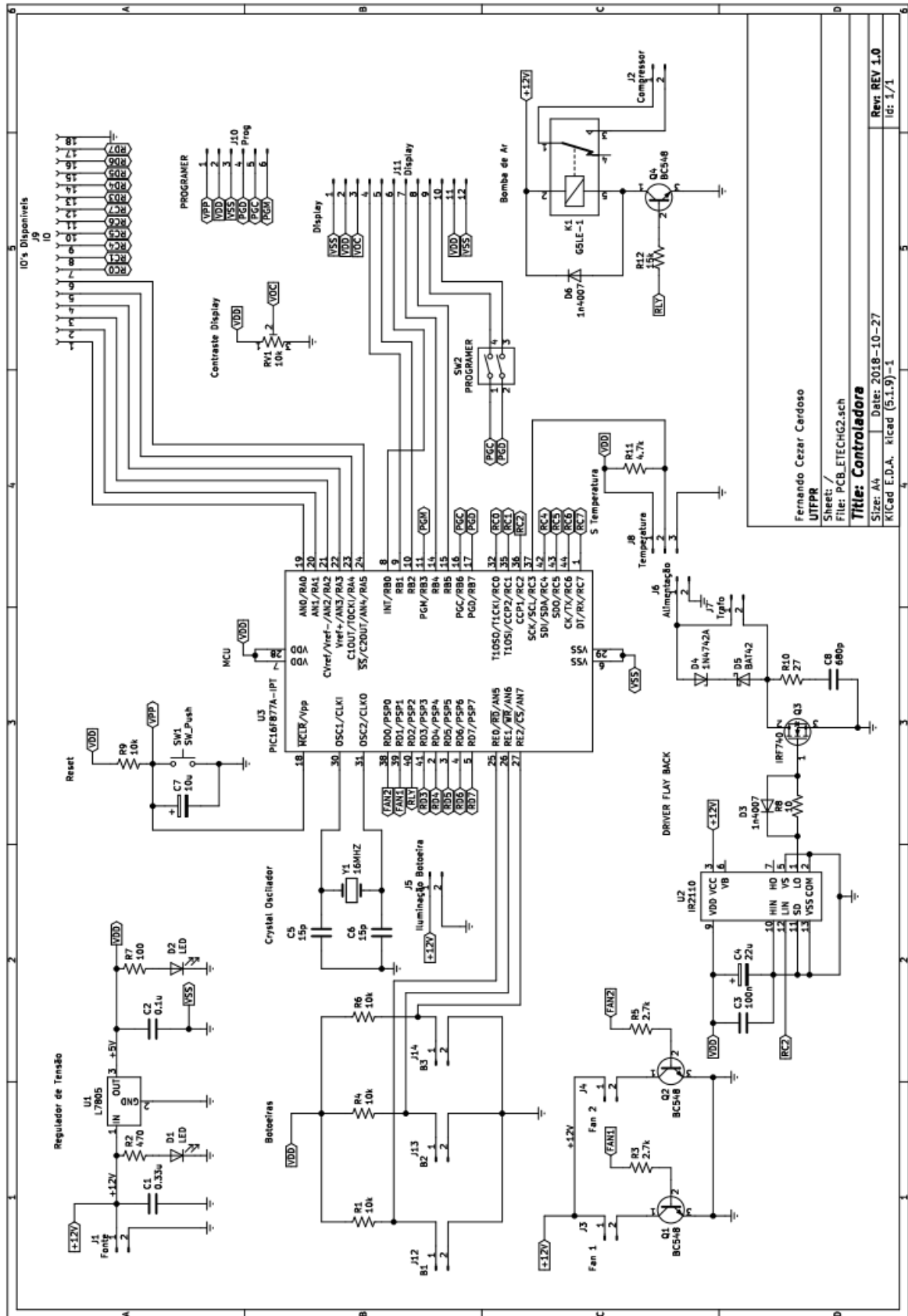
- 1 KUNZ, A. et al. Construção e Otimização De Um Sistema Para Produção e Aplicação de Ozônio Em Escala De Laboratório. **Química Nova**, scielo, v. 22, p. 425 – 428, Junho 1999. ISSN 0100-4042. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40421999000300022&nrm=iso>.
- 2 SCHIAVON, G. J. et al. Projeto e Análise De Um Sistema Gerador de Ozônio Operando Em Alta Frequência Com Controlador Digital de Sinais. **XIX Congresso Brasileiro de Automática**, CBA, Setembro 2012.
- 3 RICE, R. G. Applications of ozone for industrial wastewater treatment — a review. **Ozone: Science & Engineering**, Taylor & Francis, v. 18, n. 6, p. 477–515, 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01919512.1997.10382859>>.
- 4 GARCIA, C. A. et al. O Gás Ozônio Na Descontaminação De Ambientes Cirúrgicos. **Veterinária Notícias** — Artigos, PKP, Uberlândia, n. 2, p. 37–40, Julho 2008.
- 5 TIZAOUI, C. Ozone: A potential oxidant for covid-19 virus (sars-cov-2). **Ozone: Science & Engineering**, Taylor & Francis, v. 42, n. 5, p. 378–385, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01919512.2020.1795614>>.
- 6 FREITAS, A. R. R.; NAPIMOGA, M.; DONALISIO, M. R. Análise da gravidade da pandemia de Covid-19. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, scielo, v. 29, 00 2020. ISSN 2237-9622. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2237-96222020000200900&nrm=iso>.
- 7 MEDEIROS, E. A. S. CHALLENGES IN THE FIGHT AGAINST THE COVID-19 PANDEMIC IN UNIVERSITY HOSPITALS. **Revista Paulista de Pediatria**, scielo, v. 38, 00 2020. ISSN 0103-0582. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-05822020000100101&nrm=iso>.
- 8 DAVE, N. et al. Characterization of a novel, low-cost, scalable ozone gas system for sterilization of n95 respirators and other covid-19 related use cases. **medRxiv**, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2020. Disponível em: <<https://www.medrxiv.org/content/early/2020/06/26/2020.06.24.20139469>>.
- 9 SCHIAVON, G. J. **Modelagem, Desenvolvimento e Análise de Um Sistema Gerador de Ozônio, Operando em Alta Frequência Com Controlador Digital de Sinais**. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.
- 10 AMAROLI, J. G. **Nova Abordagem De Ozonizadores Para Tratamento de Água e Esgoto Por Descarga Corona**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.
- 11 PHILOZON. Sobre o Ozônio. PHILOZON. Disponível em: <<http://www.philozon.com.br/sobre-o-ozonio/>>. Acesso em: 15 set. 2019.

- 12 PRESTES, E. B. **Avaliação da Eficiência do Ozônio Como Sanitizante em Hortaliças Folhosas Minimamente Processadas**. 120 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- 13 WINDHOLZ, M. **The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals**. Merck, 1983. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=_-6ljgEACAAJ>.
- 14 SNATURAL. Tratamento e Desinfecção da Água com Ozônio. SNATURAL. Disponível em: <<http://www.snatural.com.br/ozonio-tratamento-agua-desinfeccao/>>. Acesso em: 15 set. 2019.
- 15 O'DONNELL, C. et al. **Ozone in Food Processing**. Wiley, 2012. ISBN 9781118307410. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=4p_14JnPj2kC>.
- 16 RICE, R.; BOLLYKY, L.; LACY, W. Analytical aspects of ozone treatment of water and wastewater - a monograph. final report. 6 1987.
- 17 Van Brunt, R. J. Physics and chemistry of partial discharge and corona. recent advances and future challenges. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 1, n. 5, p. 761–784, Oct 1994.
- 18 Takaki, K. et al. Influence of circuit parameter on ozone synthesis using inductive energy storage system pulsed power generator. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 18, n. 5, p. 1752–1758, October 2011.
- 19 Mukkavilli, S. et al. Modeling of the electrostatic corona discharge reactor. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 16, n. 6, p. 652–660, Dec 1988.
- 20 KUFFEL, J. et al. **High Voltage Engineering Fundamentals**. Elsevier Science, 2016. ISBN 9780080994147. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=IqAGBgAAQBAJ>>.
- 21 ABDEL-SALAM, M. **High-Voltage Engineering: Theory and Practice, Second Edition, Revised and Expanded**. Taylor & Francis, 2000. (Electrical and Computer Engineering). ISBN 9780824704025. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=57Eq3Mf8qdcC>>.
- 22 Samaranyake, W. J. M. et al. Pulsed power production of ozone using nonthermal gas discharges. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 17, n. 4, p. 17–25, July 2001.
- 23 Fukawa, F. et al. Application of nanosecond pulsed power to ozone production by streamer corona. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 36, n. 5, p. 2592–2597, Oct 2008.
- 24 SOUZA, D. D. **Desbravando o PIC: Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A**. Saraiva Educação S.A., 2008. ISBN 9788536528991. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=w4uwDwAAQBAJ>>.
- 25 HAYONIC. Hayonic power supply. Hyonic. Disponível em: <<https://hayonik.com.br/fonte-colmeia-12vdc-10a-120w-bivolt-automatica-ftc1210-hayonik>>. Acesso em: 20 Jun. 2021.

26 OZONEFAC. Quartz ozone generator. OzoneFac. Disponível em: <<https://www.ozonefac.com/product/Quartz-Ozone-Tube/CT-AQ3G-Quartz-Ozone-Generator-tube.html>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

27 APHA. Standard methods for examination of water and wastewater. **American Publications Health Association 19**, A WWA; WEF. Acesso em: 1995.

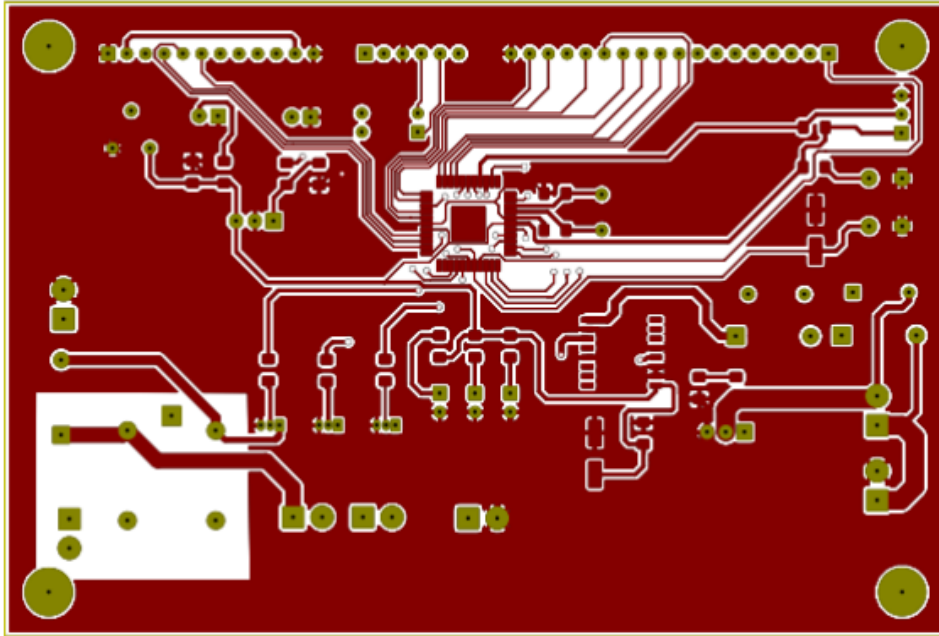
ANEXO A – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DA CONTROLADORA



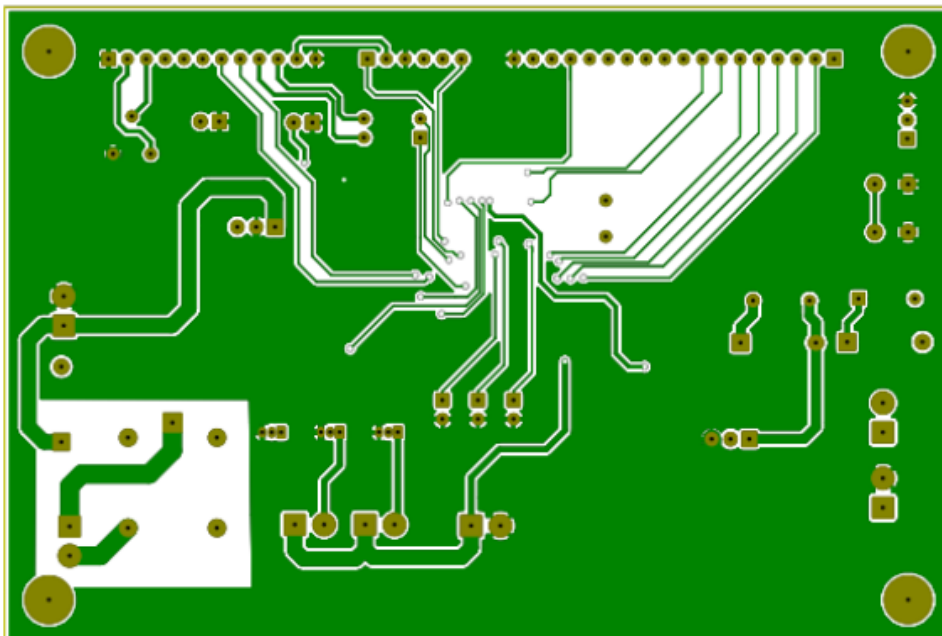
Fernando Cezar Cardoso
 UTEPR
 File: PCB.ETECHG2.sch
Title: Controladora
 Size: A4 Date: 2018-10-27
 KICad E.D.A. kicad (5.1.9)-1
 Rev: REV 1.0
 Id: 1/1

ANEXO B – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO CONTROLADORA

Camada de cobre anterior



Camada de cobre posterior



ANEXO C – MEDIDAS DA CÂMERA DESINFECTADORA

