



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM OZONIZADOR PELA COMBINAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA COM ELETRÓLISE ALCALINA AQUOSA**

Olavo Antonio de Oliveira Reis

Uberlândia-MG

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM OZONIZADOR PELA COMBINAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA COM ELETRÓLISE ALCALINA AQUOSA

Olavo Antonio de Oliveira Reis

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia-MG

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R375 2024	Reis, Olavo Antonio de Oliveira, 1964- PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM OZONIZADOR PELA COMBINAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA COM ELETRÓLISE ALCALINA AQUOSA [recurso eletrônico] / Olavo Antonio de Oliveira Reis. - 2024. Orientador: LUIZ GUSTAVO MARTINS VIEIRA. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.467 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Engenharia química. I. VIEIRA, LUIZ GUSTAVO MARTINS, 1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. III. Título. CDU: 66.0
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA

Programa de Pós graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Defesa de Mestrado, 3/2024, PPGEQ				
Data:	25 de abril de 2024	Hora de início:	8:30	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12212EQU003				
Nome do Discente:	Olavo Antonio de Oliveira Reis				
Título do Trabalho:	Projeto e construção de um ozonizador pela combinação de energia elétrica fotovoltaica com eletrólise alcalina aquosa				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo de concentradores solares				
ODS-ONU:	ODS 6 – Água Potável e Saneamento, ODS 7 Energia Inovação e Infraestrutura _ Limpa e Acessível e ODS 9 _ Indústria,				

Reuniu-se no Auditório Giulio Massarani (Sala 1K 228), a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Rafael de Oliveira Pedro - Departamento de Ciência Exatas e da Terra/UEMG, Patrícia Angélica Vieira - FEQUI/UFU, Ricardo Amâncio Malagoni- FEQUI/UFU, Daniela Pereira dos Santos Ferrari - PPD/FEQUI/UFU e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado

Esta defesa de Mestrado faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/05/2024, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/05/2024, às 14:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Pereira dos Santos Ferrari, Usuário Externo**, em 12/05/2024, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael de Oliveira Pedro, Usuário Externo**, em 13/05/2024, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Angelica Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/05/2024, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5398988** e o código CRC **16F51CC3**.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA. EM 25 DE ABRIL DE 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dra. Daniela Pereira dos Santos Ferrari
PPGEQ/UFU

Prof. Dra. Patrícia Angelica Vieira
FEQUI/UFU

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Pedro
Química/UEMG – Unidade Acadêmica de Ituiutaba

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
FEQUI/UFU

À minha família universal, com amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte primária de todas as coisas, pela oportunidade, saúde e recursos para esta jornada.

À minha família, pelo suporte, amor e compreensão durante todos os dias, principalmente nos períodos de minha ausência.

Ao meu orientador, professor Doutor Luiz Gustavo Martins Vieira pela orientação, confiança, paciência e auxílio, fundamentais à concretização deste trabalho.

Aos professores da FEQUI/UFU pelos ensinamentos ministrados sempre com muita dedicação e profissionalismo.

Às amigas de curso Ana Flávia Alves e Ana Paula Mázaró Gângani, pelo companheirismo e empatia, parceiras durante os momentos difíceis e companheiras nos momentos felizes.

Em especial a minha amiga Áurea Messias de Jesus, colega na UFU e na UEMG, que sempre deu seu apoio e incentivo desde o início desta caminhada.

À instituição UFU, agradecimento especial por fornecer ensino de qualidade, acessível e gratuito, através de pessoas altamente qualificadas, desde as equipes gestão até os professores e técnicos em suas diversas faculdades.

Muito obrigado!

“Quando o servidor está pronto, o serviço aparece.”
(André Luiz)

RESUMO

O ozônio é uma substância com alto poder de oxidação (2,07 V) e sua instabilidade com tempo de meia-vida curta de 20 min em água destilada lhe garante a característica de ser não residual e vantajosa em muitas aplicações industriais. A eletrólise aquosa alcalina é um processo com simplicidade relativa na produção do oxigênio de alta pureza (98%), que serve de matéria-prima para produção do ozônio em reatores corona. Considerando a fonte de energia renovável do tipo solar fotovoltaica como alimentadora para estes dois reatores (eletrolítico e corona), a produção de ozônio torna-se sustentável, vantajosa e pode ser realizada em pressão e temperatura ambiente. Por esta razão, este trabalho teve como objetivo o estudo da produção de ozônio por eletrólise em um gerador corona portátil a partir de energia renovável do tipo solar fotovoltaica nas condições meteorológicas da região do Triângulo Mineiro (MG). Uma célula eletrolítica foi projetada com volume de 1,13 L, com eletrodos de aço inoxidável 316 separados com uma membrana de Nafion®, imersos em solução de hidróxido de potássio (KOH) nas concentrações de 1,0 a 8,0 mol.L⁻¹ em intervalos de 1,0 mol.L⁻¹. Os resultados revelaram as melhores condições de geração volumétrica de oxigênio (3,51 mL/J e 481,56 mL/min) ocorreram na concentração de 7,0 mol.L⁻¹ com três células eletrolíticas em série limitando a corrente abaixo de 20 A. A energia elétrica utilizada no processo foi gerada por uma placa solar fotovoltaica de 365 Wp, conectada por controlador de carga de 40 A em uma bateria automotiva de 45 Ah. Foram monitoradas as produções de oxigênio (O₂), hidrogênio (H₂), ozônio (O₃), umidade relativa, temperaturas internas e externas, corrente e tensões elétricas nos reatores através de sensores eletroquímicos. Os sinais dos sensores foram enviados para a nuvem via *wifi* através de processadores programáveis ESP32 com a plataforma *ThingSpeak* do MATLAB. Os equipamentos e os reatores foram fixados em uma plataforma móvel de aço nas dimensões de 140x100 cm de base e 124 cm de altura, transportável em uma *pick-up* média. A geração de ozônio foi avaliada com sensores eletroquímicos aferidos com iodometria volumétrica. O sensor de ozônio apresentou baixa precisão, e conclui-se que são necessários estudos para melhorias na sensibilidade e nos métodos de análise dos dados como o uso de Redes Neurais. Foi constatado que o formato cilíndrico com dois tubos concêntricos facilita as conexões entre os tubos de gás, comparando-se com reatores de placas planas paralelas. O volume de gás produzido foi proporcional ao volume do reator e ao nível de alta tensão elétrica aplicada e obteve-se uma produção condizente com a literatura (25 g/h e 90 W de consumo de energia elétrica) de acordo com as dimensões físicas do reator (3” de diâmetro e 30 cm de comprimento). Por fim, concluiu-se que o sistema projetado produziu ozônio a partir do oxigênio extraído do ar com uma proporção de 17% em comparação com o oxigênio gerado na célula eletrolítica. O custo financeiro do reator (\$ 27,00 em junho de 2023) ficou dentro do esperado mostrando a viabilidade econômico-financeira do protótipo móvel construído.

Palavras-chave: ozônio, corona, eletrólise alcalina, luz solar, energia fotovoltaica.

ABSTRACT

Ozone is a substance with a high oxidation potential (2.07 V), and its instability with a short half-life of 20 minutes in distilled water gives it the characteristic of being non-residual and advantageous in many industrial applications. Alkaline aqueous electrolysis is a relatively simple process in the production of high-purity oxygen (98%), which serves as raw material for ozone production in corona reactors. Considering renewable energy sources like photovoltaic solar as the power supply for these two reactors (electrolytic and corona), ozone production becomes sustainable, advantageous, and can be carried out at ambient pressure and temperature. For this reason, this work aimed to study ozone production by electrolysis in a portable corona generator using renewable energy from photovoltaic solar under the meteorological conditions of the Triângulo Mineiro region (MG). An electrolytic cell was designed with a volume of 1.13 L, using 316 stainless steel electrodes separated by a Nafion® membrane, immersed in potassium hydroxide (KOH) solution at concentrations ranging from 1.0 to 8.0 mol.L⁻¹ in 1.0 mol.L⁻¹ intervals. The results revealed that the best conditions for volumetric oxygen generation (3.51 mL/J and 481.56 mL/min) occurred at a concentration of 7.0 mol.L⁻¹ with three electrolytic cells in series, limiting the current below 20 A. The electrical energy used in the process was generated by a 365 Wp photovoltaic solar panel, connected through a 40 A charge controller to a 45 Ah automotive battery. Productions of oxygen (O₂), hydrogen (H₂), ozone (O₃), relative humidity, internal and external temperatures, current, and electrical voltages in the reactors were monitored using electrochemical sensors. Sensor signals were sent to the cloud via WiFi using ESP32 programmable processors with the MATLAB ThingSpeak platform. The equipment and reactors were mounted on a steel mobile platform measuring 140x100 cm at the base and 124 cm in height, transportable by a medium-sized pickup truck. Ozone generation was evaluated using calibrated electrochemical sensors with volumetric iodometry. The ozone sensor showed low precision, indicating a need for studies to improve sensitivity and data analysis methods such as using Neural Networks. It was found that the cylindrical shape with two concentric hollow tubes facilitated gas connections compared to reactors with parallel flat plates. The gas volume produced was proportional to the reactor volume and the level of high electrical voltage applied, resulting in production consistent with literature values (25 g/h and 90 W of electrical energy consumption) according to the physical dimensions of the reactor (3" diameter and 30 cm length). Finally, it was concluded that the designed system produced ozone from oxygen extracted from the air at a proportion of 17% compared to oxygen generated in the electrolytic cell. The financial cost of the reactor (\$ 27 as of June 2023) remained within expectations, demonstrating the economic feasibility of the constructed mobile prototype.

Keywords: ozone, corona, alkaline electrolysis, sunlight, photovoltaic energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama de blocos do reator de ozônio proposto.	2
Figura 2.1 – Decomposição do ozônio em água a 20°C em água de várias fontes.	7
Figura 2.2 – Número de publicações sobre aplicações de ozônio entre os anos de 2000 e 2023.	9
Figura 2.3 – Princípio de operação do eletrolisador alcalino da água.	20
Figura 2.4 – Curva tensão-corrente em uma célula eletrolítica.	22
Figura 2.5 – Curva de polarização da eletrólise.	23
Figura 2.6 – Comparação anual de número de publicações científicas e os principais métodos a produção de ozônio.	25
Figura 2.7 – Esquema de geração de ozônio por meio de descarga corona.	27
Figura 2.8 – Ruptura corona no ar atmosférico.	28
Figura 2.9 – Sensor de ozônio.	31
Figura 2.10 – Características típicas de temperatura/ umidade em um sensor de O ₃ .	32
Figura 2.11 – Espectrofotômetro Dobson.	34
Figura 2.12 – Modelos portáteis de detectores de ozônio no ar. Modelo Smart O3(a) e Modelo Handheld (b).	34
Figura 2.13 – Curvas de corrente e potência para um módulo fotovoltaico.	36
Figura 2.14 – Curvas de irradiância solar diária.	37
Figura 2.15 – Curvas de Corrente e Tensão.	37
Figura 2.16 – Ponto de máxima potência em sistema fotovoltaico.	39
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do reator de ozônio.	42
Figura 3.2 – Preparação da solução de hidróxido de potássio (KOH).	45
Figura 3.3 – Preparação dos reagentes para a titulação.	47
Figura 3.4 – Procedimentos da titulação.	47
Figura 3.5 – Procedimentos da titulação – fases da segunda titulação.	48

Figura 3.6 – Esquema de ligação do gerador solar fotovoltaico.	49
Figura 3.7 – Célula eletrolítica.	50
Figura 3.8 – Eletrodos de aço inoxidável 316.	51
Figura 3.9 – Comparação de vazão de O ₂ em função da concentração de eletrólito e para configuração de 3 células eletrolíticas em série.	52
Figura 3.10 – Bobina de ignição automotiva.	53
Figura 3.11 – Bobina tipo flyback para aparelhos de TV.	54
Figura 3.12 – Circuito de excitação para a bobina primária do <i>flyback</i> .	54
Figura 3.13 – Multiplicador de tensão com diodos.	55
Figura 3.14 – Gerador de MAT utilizado no projeto.	56
Figura 3.15 – Formatos de reatores disponíveis no mercado.	57
Figura 3.16 – Reator finalizado.	58
Figura 3.17 – Foto dos arcos formados no reator.	58
Figura 3.18 – Materiais utilizados na construção do reator de ozônio.	59
Figura 3.19 – Montagem do reator de ozônio em bancada.	59
Figura 3.20 – Câmara de medição de gases.	60
Figura 3.21 – Diagrama de conexões elétricas.	61
Figura 3.22 – Comparação entre a placa de ensaios e a PCI elaborada.	63
Figura 3.23 – O sensor de tensão.	64
Figura 3.24 – O sensor de corrente ACS712.	65
Figura 3.25 – O sensor de ozônio MQ-131.	66
Figura 3.26 – Sensores de temperatura e umidade DTH11 e DTH 22.	67
Figura 3.27 – Sensor de luminosidade TSL2561.	68
Figura 3.28 – Medidor múltiplo PZEM-051 0-100A.	69
Figura 3.29 – Volumetria dos gases oxigênio e hidrogênio.	71
Figura 3.30 – Protótipo finalizado.	72

Figura 4.1 – Curvas de irradiância solar diária nos dias 09 e 15 de junho de 2023.	74
Figura 4.2 – Tensão diária nos terminais da placa solar CS3P-365Pe nos terminais do controlador de carga no dia 15 de junho de 2023.	76
Figura 4.3 – Corrente elétrica em função da concentração de eletrólito em configurações de 2 a 5 células em série.	80
Figura 4.4 – Comparação de número de células eletrolíticas em função da concentração de eletrólito e vazão de oxigênio (O ₂).	80
Figura 4.5 – Comparação de número de células eletrolíticas em função da concentração de eletrólito e volume de oxigênio (O ₂) por unidade de energia em mL/J.	81
Figura 4.6 – Dano físico no multiplicador de tensão de 24kV.	82
Figura 4.7 – <i>Driver</i> de excitação MAT do reator de ozônio.	82
Figura 4.8 – Comparação da potência elétrica absorvida da fonte de alimentação e vazão de ozônio em função do comprimento do reator.	83
Figura 4.9 – Comparação da potência elétrica absorvida da fonte de alimentação e vazão de ozônio em função da área externa do cilindro do reator com até 30 cm de comprimento.	84
Figura 4.10 – Comparação da vazão de O ₃ em função da potência elétrica entre os reatores do mercado.	85
Figura 4.11 – Produção de O ₃ em função do tipo de núcleo utilizado.	86
Figura 4.12 – Produção de O ₃ em função do material utilizado no cilindro.	87
Figura 4.13 – Produção de O ₃ em função da fonte de oxigênio.	88
Figura 4.14 – Registro das leituras do sensor MQ-131 sem tratamento de dados.	88
Figura 4.15 – Início do tratamento de dados das leituras do MQ-131.	89
Figura 4.16 – Medição de ozônio, temperatura, umidade e tensão na entrada do controlador de carga no período de 10 a 13 de novembro de 2023.	90
Figura 4.17 – Correlação Concentração de ozônio e umidade relativa do ar.	91
Figura 4.18 – Correlação Concentração de ozônio e temperatura ambiente.	91
Figura 4.19 – Dados correlacionados em análise convencional.	92

Figura 4.20 – Dados correlacionados em análise com redes neurais.	92
Figura 4.21 – Produção de ozônio de acordo com o tempo de borbulhamento utilizando oxigênio de alta pureza.	94
Figura 4.22 – Produção de O ₃ de acordo com o tempo de borbulhamento utilizando o ar como fonte de oxigênio.	94
Figura 4.23 – Produção de O ₃ de acordo com o tempo de borbulhamento utilizando núcleo maciço no cilindro interno do reator de ozônio.	95
Figura 4.24 – Produção de O ₃ de acordo com o tempo de borbulhamento não utilizando tela no cilindro interno do reator de ozônio.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades físico-químicas do ozônio.	6
Tabela 2.2 – Potencial de oxidação de diferentes oxidantes.	6
Tabela 2.3 – Indicações para tratamento de água com ozônio.	11
Tabela 2.4 – Comparação de ações entre ozônio e cloro.	14
Tabela 2.5– Ponto de ebulição os gases da atmosfera.	15
Tabela 2.6 – Características dos sistemas eletrolisadores de alguns fabricantes.	18
Tabela 2.7 – Eletrodos utilizados na eletrólise alcalina..	21
Tabela 2.8 – Métodos de medição de ozônio.	29
Tabela 2.9 – Ponto de ebulição os gases da atmosfera.	28
Tabela 3.1 – Planilha total de reagentes, materiais, equipamentos e diversos.	43
Tabela 3.2 – Faixas de medição do medidor de ozônio Handheld.	70
Tabela 4.1 – Comparação de tipos de diafragmas Zirfon e acrílico com células sem diafragma na eletrólise alcalina..	78
Tabela 4.2 – Medidas de parâmetros elétricos e volume de oxigênio produzido em células eletrolíticas em série.	78
Tabela 4.3 – Investimentos gerais.	96
Tabela 4.4 – Custo do reator	96

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Absorbância
E^0	- Potencial de eletrodo padrão [V]
E_{eletrodo}	- Sobrepotencial de ativação [V]
E_{ohmico}	- Sobrepotencial ôhmico [V]
f	- Constante de Faraday [$C \cdot \text{mol}^{-1}$]
ΔG	- Energia Livre de Gibbs [$\text{kJ} \cdot \text{gmol}^{-1}$]
ΔG_0	- Energia Livre de Gibbs padrão [$\text{kJ} \cdot \text{gmol}^{-1}$]
ΔH	- Variação da entalpia [$\text{kJ} \cdot \text{gmol}^{-1}$]
I	- Corrente elétrica [A]
q	- Volume de gás oxigênio por unidade de energia [$\text{mL} \cdot \text{J}^{-1}$]
QV	- Vazão volumétrica de solução do contaminante [$\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$]
Q_{O_2}	- Vazão de gás oxigênio [$\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$]
PE	- Potência elétrica [W]
P	- Pressão de entrada [bar]
P_v	- Pressão de vapor saturado [Pa]
P_0	- Pressão à montante da placa de orifício [Pa]
P_2	- Pressão à jusante da placa de orifício [Pa]
R	- Resistência elétrica [Ω]
R_1	- Resistência elétrica dos fios e ligações no ânodo [Ω]
$R_{\text{bolhas, O}_2}$	- Resistência devido à cobertura parcial do ânodo pelas bolhas de oxigênio
R_{ions}	- Resistência do eletrólito [Ω]
R_{membrana}	- Resistência da membrana [Ω]
$R_{\text{bolhas, H}_2}$	- Resistência devido à cobertura parcial do cátodo pelas bolhas de hidrogênio
R'_1	- Resistência elétrica dos fios e ligações no cátodo [Ω]
ΔS	- Variação de entropia [$\text{kJ} \cdot \text{gmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
T	- Temperatura absoluta [K]
t	- Tempo [s]
v_0	- Velocidade no orifício da placa [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
v_2	- Velocidade média de escoamento [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
V	- Tensão elétrica [V]
VL	- Volume de líquido [mL]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

DSS - Dodecil Sulfato de Sódio

HC - Cavitação hidrodinâmica (*Hydrodynamic Cavitation*)

GRG - Gradiente Reduzido Generalizado

MPPT - Rastreamento de ponto de potência máxima (*Maximum Power Point Tracking*)

PWM – Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulaion*)

NBR - Norma brasileira

PEM - Membrana de troca de prótons (*Polymer Electrolyte Membrane*)

POA - Processos oxidativos avançados

SOEC - Eletrólise com membrana de óxido sólidos (*Solid Oxide Electrolysis Cell*)

UV – Ultravioleta

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1. Ozônio	4
2.1.1. Breve histórico	4
2.1.2. Propriedades físico-químicas.....	5
2.1.3. Estabilidade.....	7
2.1.4. Toxicidade	8
2.1.5. Aplicações do ozônio.....	9
2.1.5.1. Uso polêmico na medicina	10
2.1.5.2. Tratamento de efluentes	10
2.1.5.3. Indústria alimentícia.....	11
2.1.5.4. Degradação de agrotóxicos	12
2.1.5.5. Efeito germicida	12
2.1.6. Ozônio em relação ao poder de oxidação do cloro	13
2.2. Produção de oxigênio	14
2.2.1. Tecnologia PSA e TSA	15
2.2.2. Decomposição térmica da água	16
2.2.3. Eletrólise	17
2.3. Eletrólise aquosa	17
2.3.1. Eletrólise da água em membrana polimérica de troca de prótons (PEM) ..	18
2.3.2. Eletrólise da água de Óxido Sólido (SOEC).....	19
2.3.3. Eletrolisadores alcalinos	19
2.3.4. Termodinâmica	21
2.4. Métodos de produção de ozônio	24
2.4.1. Produção eletroquímica de ozônio	25
2.4.2. Geração por raios ultravioleta.....	26
2.4.3. Geração por efeito corona.....	27

2.4.3.1.	Geometria do reator corona.....	28
2.5.	Métodos de medição de ozônio	29
2.5.1.	Titulação Iodométrica	30
2.5.2.	Sensores eletroquímicos	31
2.5.3.	Medidores eletrônicos.....	33
2.6.	Fontes renováveis de energia – energia solar fotovoltaica	35
2.6.1.	Módulos fotovoltaicos.....	35
2.6.2.	Inversor	38
2.6.3.	Controlador de carga	38
2.6.4.	Bateria	39
3.	MATERIAL E MÉTODOS	42
3.1.	Lita de reagentes e equipamentos.....	43
3.1.1.	Preparação do eletrólito da célula eletrolítica	45
3.1.2.	Preparação de soluções para iodometria.....	46
3.2.	Gerador solar fotovoltaico	48
3.3.	Construção da célula eletrolítica	50
3.3.1.	Os eletrodos	51
3.4.	O reator de ozônio.....	52
3.4.1.	Geradores de alta tensão	52
3.4.1.1.	Bobina de ignição automotiva.....	52
3.4.1.2.	<i>Flyback</i>	53
3.4.1.3.	Multiplicadores de tensão	55
3.4.1.4.	<i>Drivers</i> CC-CA MAT	55
3.4.2.	Construção do reator de ozônio	56
3.5.	Medições e testes elétricos	60
3.5.1.	Conexões elétricas.....	61
3.5.2.	Placa de ensaios.....	62
3.5.3.	Sensor de tensão elétrica	63
3.5.4.	Sensor de corrente elétrica.....	64
3.5.5.	Sensores eletroquímicos	65
3.5.5.1.	Sensor de ozônio	65
3.5.5.2.	Sensor de temperatura e umidade.....	66
3.5.7.	Multímetro digital	69
3.5.8.	Analizador de ozônio	69
3.6.	Volumetria do oxigênio	70
3.7.	Recomendações de segurança	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74

4.1.	Produção de energia solar	74
4.2.	Configurações do eletrolisador	77
4.2.1.	Material do diafragma	77
4.2.2.	Concentração do eletrólito e quantidade de células em série	78
4.3.	Configurações do reator de ozônio	81
4.3.1.	Dimensões físicas avaliadas	83
4.3.2.	Tipo de núcleo	85
4.3.3.	Material do cilindro	86
4.3.4.	Alimentação de oxigênio – ar ou O ₂ de eletrolítico	87
4.4.	Sensor de ozônio	88
4.5.	Volumetria do oxigênio	93
4.6.	Iodometria	93
4.7.	Custos do projeto	96
4.8.	Resultados obtidos	97
5.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	100
5.1.	Conclusão	100
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	100
APÊNDICES		120
APÊNDICE I – GEOMETRIA DO REATOR DE OZÔNIO		120
APÊNDICE II – DADOS EXPERIMENTAIS		125

1. INTRODUÇÃO

O ozônio foi descoberto em 1840 (Schönbein, 1840), e devido a sua alta capacidade de reação com diversos compostos, permite uma grande gama de aplicações. Ao longo de décadas de pesquisas foram demonstradas diversas aplicações do ozônio as quais incluem: tratamento de água e efluentes, indústria alimentícia, agropecuária até odontologia e medicina. Verifica-se também na literatura que estas aplicações vão crescendo em quantidade e qualidade a cada ano de forma substancial e cada vez mais são encontradas novas aplicações para o ozônio. Porém, sua aplicação que mais tem crescido é em tratamentos médicos e odontológicos (Lima et al., 2021).

O ozônio (O_3) é composto por três átomos de oxigênio, e na forma gasosa é incolor, na forma líquida é azul escuro, mas altamente instável em qualquer estado, sendo necessária a produção sob demanda já no local de utilização. Isto justifica a necessidade de um protótipo móvel para realização de ensaios de utilização no local dos efluentes (Chaves, 2016).

Produz-se ozônio por processo eletroquímico, por irradiação UV ou pelo efeito corona, sendo esta a forma de produção mais utilizada (Maidana et al, 2015). A radiação ultravioleta não atende as necessidades de produção requeridas para a maioria das aplicações industriais devido ao seu alto custo e baixo rendimento (Camboim et al., 2019). O método de descarga corona para produção de ozônio para tratamento de águas é alternativo ao uso do cloro com a vantagem técnica de não desenvolver subprodutos indesejados (Paula, 2021).

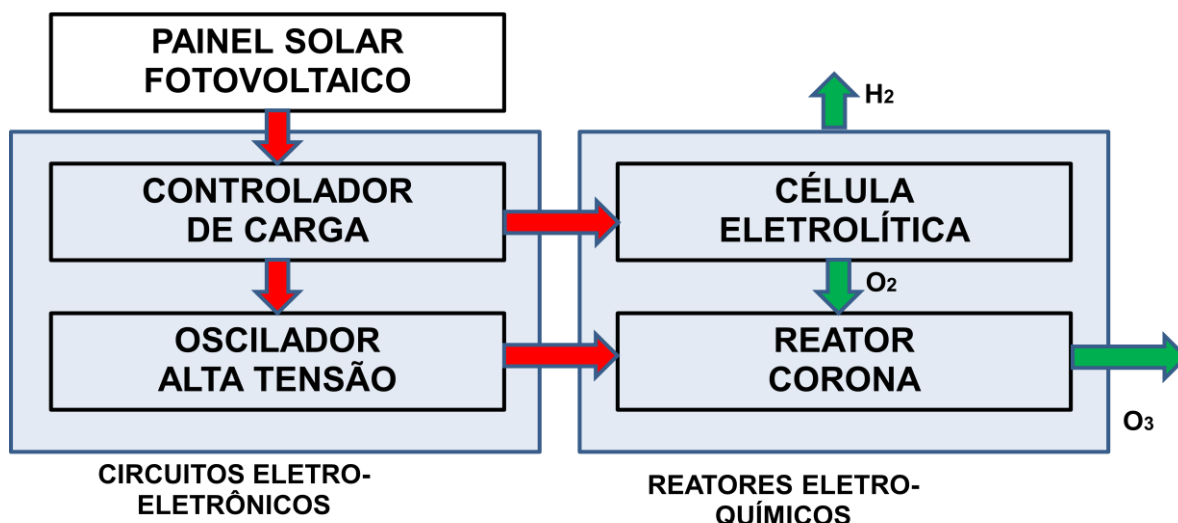
Um dos principais problemas atuais na produção do ozônio em aplicações comerciais e industriais é a demanda de energia elétrica (Metcalf e Eddy, 2014). O alto custo financeiro da energia elétrica pode ser diluído utilizando a combinação da produção do oxigênio de alta pureza por eletrólise da água, geração de ozônio por efeito corona - a partir deste oxigênio puro - e com alimentação elétrica destes dois processos proveniente da produção de energia por painéis fotovoltaicos. É possível ainda obter hidrogênio e consequentemente, o oxigênio no processo de eletrólise com energia solar fotovoltaica consistindo em alto percentual de pureza com baixo custo de manutenção e eficiência próxima a valores encontrados na literatura (Palhares, 2016).

Até o momento não foram encontrados trabalhos correlatos que unam em uma só pesquisa a geração de ozônio por efeito corona, sendo alimentado por oxigênio de alta pureza

fornecido por eletrólise alcalina da água (método eficiente e de baixo custo) com alimentação exclusivamente por energia solar fotovoltaica.

O diagrama de blocos da Figura 1.1 ilustra de forma simplificada a proposta para produção de ozônio pretendida no presente estudo.

Figura 1.1 – Diagrama de blocos do reator de ozônio proposto.



Fonte: O autor. Nota: Setas na cor vermelha apontam o fluxo de energia elétrica e as setas na cor verde apontam o fluxo de gases produzidos.

Diante do cenário exposto, objetivo geral deste trabalho foi avaliar a produção de ozônio por eletrólise em um gerador corona portátil a partir de energia renovável do tipo fotovoltaica.

Assim foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e construir um protótipo portátil e de baixo custo para produção de ozônio de alta pureza a partir de eletrólise e efeito corona.
- Avaliar o efeito de formatos e volumes diferentes do reator de ozônio em sua eficiência de produção por meio de análise quantitativa.
- Comparar os resultados obtidos utilizando geração de ozônio a partir do ar atmosférico e a geração de ozônio a partir da eletrólise alcalina da água por meio de análise qualitativa.
- Estimar indicadores econômico-financeiros do processo: custo de produção do equipamento, portabilidade, despesas operacionais e viabilidade.

Para atingir os objetivos propostos, o Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) do trabalho traz uma revisão teórica sobre o (I) histórico e características do ozônio (principais aplicações e formas de obtenção) e (II) a eletrólise da água na produção de oxigênio de alta pureza como matéria-prima dos reatores de ozônio. Também neste capítulo realizou-se uma revisão bibliográfica sobre a produção de ozônio por eletrólise e do efeito corona alimentados com uso de energia solar fotovoltaica.

A descrição do projeto, metodologia empregada e a execução da montagem do protótipo são apresentados no Capítulo 3 (Material e Métodos) dessa dissertação. Neste capítulo são detalhadas todas as etapas para determinação da capacidade da célula eletrolítica, reator de ozônio, bem como do sistema de energia solar fotovoltaico dimensionado.

O Capítulo 4 deste trabalho (Resultados e Discussão) apresenta os resultados qualitativos e quantitativos para as variáveis de cada etapa do protótipo, avalia e justifica as configurações e ajustes necessários. Também neste capítulo é discutida a viabilidade da produção de ozônio a partir de energia fotovoltaica.

O Capítulo 5 (Conclusão e Sugestões) apresenta as conclusões, projeções e sugestões para a realização de futuros trabalhos, os quais possam melhorar a eficiência e como consequência, melhores resultados na produção de ozônio com energias alternativas e renováveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ozônio

O ozônio é formado por três átomos de oxigênio, sendo dois deles a base da molécula de oxigênio. (Tiwari, 2016; Simoes e Bastos, 2021). Este alótropo triatômico do oxigênio é altamente instável, tendo poder de reação com diversos compostos orgânicos (Cardoso, 2022). Esta característica confere ao ozônio a propriedade de eliminar um amplo espectro de patógenos nocivos, atuando como desinfetante, bactericida, conservante, redutor de odores e clarificador. Uma das suas maiores aplicações atualmente é a destruição de compostos indesejáveis na forma de poluentes (Lima et al., 2021).

O ciclo do oxigênio na natureza é um sistema natural de limpeza da atmosfera que se inicia na produção do oxigênio O_2 liberado no processo da fotossíntese (Batakliiev, 2014). Por ser mais leve que os demais componentes do ar, o O_2 ascende para as camadas mais elevadas da atmosfera e na altura entre 20 e 30 km, a radiação ultravioleta de 185 a 200 nm quebra o oxigênio e o converte em ozônio O_3 formando a fina camada de ozônio que protege a superfície dos efeitos nocivos da radiação e ainda saneia naturalmente a atmosfera com seu alto poder oxidante (Oliveira; Philozon, 2023).

2.1.1. Breve histórico

As primeiras observações do odor característico do ozônio se deram em 1785 por Van Marum durante experiências com máquinas eletrostáticas, onde as descargas elétricas ionizavam o ar e produziam tal efeito (Schönbein, 1840). O nome ozônio deriva da palavra grega *ozein*, que significa mau cheiro.

Nas décadas seguintes o interesse pela substância aumentou culminando na criação de legislação específica para a sua produção e manuseio. Abaixo está listada a sequência de eventos cronológicos mais relevantes na história do ozônio (Philozon, 2023):

- 1785 – Van Marum sente um forte odor próximo a máquinas eletrostáticas.
- 1840 – Crystian Friedrich Schonbein descobre a substância ozônio.
- 1857 – Werner Von Siemens desenvolveu o primeiro gerador de ozônio.

- 1881 – Primeira evidência de uso com função desinfetante – Dr. Kellog (livro sobre difteria).
- 1893 – Primeiro tratamento de água com ozônio em Ousbadem, Holanda.
- 1896 – Tesla patenteou seu primeiro gerador e criou a Tesla Ozone Co.
- 1978 – Publicação da NR15 do Ministério do Trabalho.
- 1982 – FDA - *Food and Drug Administration*, Agência Federal do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos da América, declara GRAS - *Generally Recognized As Safe* - substâncias reconhecidas como seguras à saúde humana - para uso em água engarrafada.
- 1992 – Publicação do Anexo 11 – da NR15 para uso de ozônio no ambiente de trabalho.
- 2001 – FDA atribui o título GRAS para o ozônio e permite uso como antimicrobiano para alimentos.
- 2005 – Fundação da Sociedade Brasileira de tecnologia de Ozônio.
- 2006 – Criada a Associação Brasileira de Ozonoterapia.
- 2008 – FDA permite o uso como aditivo direto em alimentos.
- 2015 – Resolução CFO 166/2015 regulamenta a Ozonoterapia na odontologia.
- 2018 – A Portaria nº 702 do Ministério da Saúde inclui a Ozonoterapia nas Práticas Integrativas e Complementares do SUS.
- 2020 – Resolução nº 321 do Conselho Federal de Biomedicina regulamenta a prática da Ozonoterapia.
- 2020 – Resolução nº 1364 do Conselho Federal de Medicina Veterinária regulamenta o uso da Ozonoterapia em animais.

2.1.2. Propriedades físico-químicas

A Tabela 2.1 apresenta as principais propriedades físico-químicas do ozônio. Destaca-se o valor do ponto de fusão a baixas temperaturas, responsável por dificultar o processo de conversão gás-líquido e armazenagem.

Tabela 2.1 – Propriedades físico-químicas do ozônio.

Propriedades Físico-Químicas do ozônio	
Massa molar	48 Da
Fórmula molecular	O ₃
Massa específica (0 °C e 101,3 kPa)	2,154 kg/m ³
Ponto de ebulição	-111,9 +/- 0,3 °C
Ponto de fusão	-192,5 +/- 0,3 °C
Solubilidade em água a 0 °C	20 g/m ³
Solubilidade em água a 30 °C	1,5g/m ³
Temperatura crítica	-12,1 °C
Pressão crítica	5,53 MPa

Fonte: Adaptado de Sarron (2021).

Atualmente o ozônio é conhecido como um poderoso agente oxidante que pode ser utilizado em grande escala para aplicações em tratamento de água e vem sendo adotado por diversos países. Seu potencial de oxidação pode ser comparado com outros agentes apontados na Tabela 2.2

Tabela 2.2 – Potencial de oxidação de diferentes oxidantes.

Agente oxidante	Potencial de oxidação (V)
Flúor	3,06
Radical hidroxila	2,80
Ozônio	2,07
Peróxido de hidrogênio	1,78
Permanganato de potássio	1,70
Hidrocloreto	1,49
Cloro	1,36
Dióxido de cloro	1,27
Oxigênio	1,23

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2011).

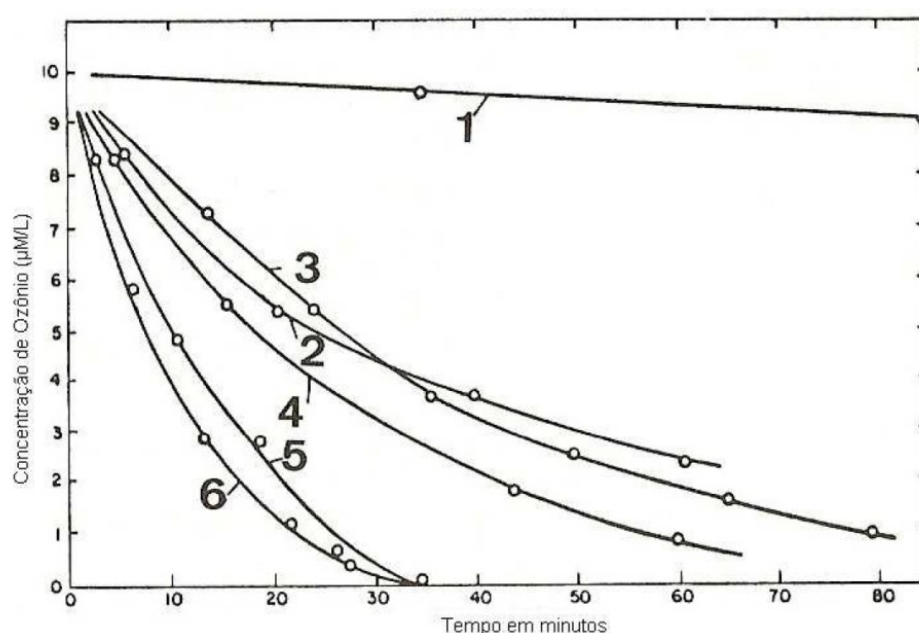
2.1.3. Estabilidade

A estabilidade do ozônio depende de vários fatores, entre eles o seu estado físico. No estado gasoso, o ozônio tem relativamente uma longa meia-vida que corresponde a cerca de 12 h em atmosfera ambiente, mas em solução aquosa a meia-vida é muito curta, cerca de 20 min em água destilada.

A velocidade de dissociação do ozônio em oxigênio ($2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$) depende da temperatura, da concentração do ozônio e do meio. No caso do meio aquoso, a pureza da água é fator de forte influência na velocidade de dissociação, devido ao maior tempo de oxidação das impurezas (Chierigato et. al., 2023; Philozon, 2023).

A relação da concentração e o teor de pureza da água é citada em diversos trabalhos, porém a observação clássica vem de Rice et al. (1986) em que comparou-se a meia-vida do ozônio em águas oriundas de diferentes fontes, sob temperatura de 20°C (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Decomposição do ozônio em água a 20°C em água de várias fontes.



Legenda: 1 – Bidestilada; 2 – Destilada; 3 – De torneira; 4 – Subterrâneas; 5 – Filtrada do lago de Zurique; 6 – Filtrada do lago de Constança.

Fonte: Rice et al. (1986).

Nos tratamentos médicos via ozonoterapia, verifica-se que nos primeiros 10 min em que o ozônio permanece em uma seringa para um procedimento, 10% da dose inicial são perdidos devido à decomposição (Sanchez, 2013). A recomendação é que o uso desse gás seja

feito em até 30 min a partir da geração. A concentração do ozônio na água é avaliada também por Marques (2022).

2.1.4. Toxicidade

A ingestão indireta do ozônio com água ionizada não representa perigo sério ao ser humano, pois a meia vida em ambiente aquoso é relativamente curta (Scaratti, 2015; Chieregato et. al., 2023). Entretanto, a inalação direta do gás possui alta toxicidade. Devido a este efeito nocivo, regulamentações governamentais, as quais variam conforme o país de origem, limitam a exposição contínua (Pereira e Vasconcelos, 2021; Ornelas et al., 2020).

Em doses elevadas o efeito do ozônio na saúde pode causar tosse, dor de cabeça, dor no peito, dificuldades respiratórias, vômitos e irritações na garganta e piorar condições de asma. Os sintomas variam de acordo com as condições de saúde do indivíduo, porém, pessoas saudáveis podem também apresentar problemas quando expostas ao ozônio acima dos níveis seguros (Cavalcante, 2023).

Estudos relatam que em humanos o ozônio tem efeitos danosos no sistema respiratório, sistema cardiovascular, olhos, pele, sistema imunológico e no DNA (Yamamoto et al.; 2021; Lima e Cardoso, 2021; de Souza Gonçalves et al., 2023). Além disso, a exposição em curto prazo ao ozônio pode causar lesões nas células epiteliais das vias aéreas. Outros efeitos documentados induzidos pelo ozônio que também podem estar relacionados à lesão subjacente à resposta inflamatória são: o aumento na obstrução de pequenas vias aéreas; a diminuição da integridade do epitélio das vias aéreas; o aumento na reatividade inespecífica das vias aéreas; e a diminuição da atividade fagocitária dos macrófagos alveolares (Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA, 2020).

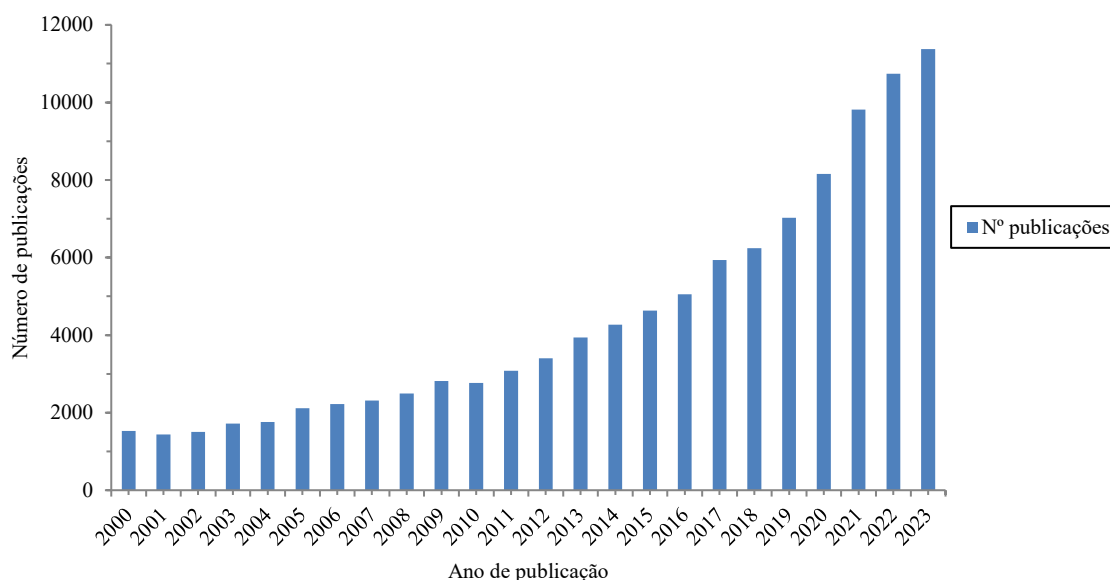
De acordo com a legislação brasileira, é importante garantir uma concentração máxima de ozônio de 0,08 ppm, a qual é segura para o ser humano em uma exposição de até 8 h/dia. Estes parâmetros estão estabelecidos na NR15/78 - Norma regulamentadora do Ministério do Trabalho - que dispõe sobre as atividades que consideradas insalubres. No Anexo 11 da referida norma, consta a definição dos agentes químicos cuja insalubridade é caracterizada por limite de tolerância e inspeção no local de trabalho.

Para atender a legislação, os sanitizantes devem possuir baixa toxicidade (Beltrame et al., 2012; Monteiro, 2021).

2.1.5. Aplicações do ozônio

Pode-se verificar na Figura 2.2 um aumento exponencial no número de publicações sobre as aplicações do ozônio ao longo das duas últimas décadas, em diversos países.

Figura 2.2 – Número de publicações sobre aplicações de ozônio entre os anos de 2000 e 2023.



Fonte: <https://www.sciencedirect.com/>, utilizando a palavra-chave “*ozone applications*” em 01/12/2023.

O ozônio é amplamente utilizado em diversos setores, incluindo o doméstico, para prevenir insetos e remover odores. Em piscinas e banheiras, é uma opção de baixo custo quando comparado aos tratamentos tradicionais. Na área hospitalar, pode prevenir infecções secundárias e higienizar equipamentos. Na indústria agropecuária, desinfeta resíduos de agrotóxicos, previne infecções em criadouros e aumenta o tempo de estoque de ovos, carnes e hortifrutigranjeiros. Também é útil para distribuição na logística de alimentos, preservando suas características originais e removendo odores indesejáveis de armazéns, caminhões e navios (Santos, 2023).

A ação do ozônio pode variar conforme a resistência de diferentes materiais. O aço inoxidável, vidro e teflon são geralmente resistentes ao ozônio, porém ligas de cobre são

suscetíveis à oxidação. PVC e polietileno são resistentes em baixas concentrações. Borracha natural se desintegra rapidamente, enquanto silicone resiste em curto prazo, mas oxida com exposição prolongada. O aço macio e ferro galvanizado são altamente corroídos pelo ozônio, em contraste com o aço inoxidável capaz de resistir ao efeito corrosivo (Pandiselvam et al., 2017; Monteiro, 2021).

2.1.5.1. Uso polêmico na medicina

A literatura apresenta uma vasta gama de patógenos sujeitos a destruição através do uso do ozônio na destruição destes organismos (Lamb, 2019; Silva, 2020; Silvaa, 2021; Santos, 2023). Contudo o CFM (Conselho Federal de Medicina), e a ANVISA não validam a aplicação de ozonoterapia para qualquer doença, inclusive a Covid-19. A Norma Técnica (NT) nº 108/2020, similarmente a NT 51/2020, descreve ainda que não foram apresentadas à agência evidências científicas suficientes que comprovem a eficácia do uso do ozônio como desinfetante contra a Covid (ANVISA, 2020).

O CFM por meio da Resolução nº 2.181/2018 esclarece ainda que a ozonoterapia não é reconhecida para o tratamento da Covid-19, nem de qualquer outra enfermidade, pois se trata de procedimento ainda em caráter experimental, cuja aplicação clínica não está liberada, devendo ocorrer apenas no ambiente de estudos científicos, conforme critérios éticos e científicos (CFM, 2020).

Entretanto, a Presidência da República sancionou a Lei 14.648/2023, a qual autoriza o uso da ozonoterapia em território nacional como prática integrativa complementar (Paez et al., 2021; Lima et al., 2022; Oliveira, 2023).

A referida lei autoriza a realização da ozonoterapia como procedimento de caráter complementar, observando que somente poderá ser realizada por profissional de saúde de nível superior inscrito em seu conselho profissional e aplicada por meio de equipamento de produção de ozônio medicinal devidamente regularizado pela Anvisa.

2.1.5.2. Tratamento de efluentes

O uso de ozônio no tratamento de efluentes é discutido em MetCalf e Eddy (2015), Cantto (2022), Cardoso (2022), onde os parâmetros operacionais e a avaliação econômica são levados em consideração. A unanimidade dos autores sugere a viabilidade do uso do ozônio para tratamento de uma variedade de efluentes. O tratamento de águas com ozônio tem

desinfecção com elevada eficiência, com fatores de purificação de até 99,9% dos patógenos, além de não implicar na formação de resíduos químicos na água (Pevide e Montoni, 2019).

A dosagem de ozônio em ETA vai depender de fatores como a qualidade da água bruta e do objetivo da aplicação. Isso implica em depender do teor de matéria orgânica ou da quantidade de organismos patogênicos presentes na água bruta. A concentração do ozônio necessária varia, portanto, em função da concentração de matéria orgânica presente na água a ser tratada (Bonates, 2021; Oliveirac, 2019). A Tabela 2.3 mostra os valores recomendados para algumas aplicações no tratamento de água.

Tabela 2.3 – Indicações para tratamento de água com ozônio.

Água tratada	Concentração de ozônio (mg/L)	Tempo (min)	Eficácia (%)
Aquário, Lagoas	0,05 a 0,1	Constante	>90
Banho	0,1 a 0,5	Constante	>90
Piscina	0,5 a 1,0	5	>90
Remoção de odores	0,5 a 1,0	1	>80
Água potável	0,5 a 1,0	5	>99,9
Água limpa	1,0 a 2,0	5	>90
Água suja	2,0 a 3,0	5	>90
Compostos orgânicos	1,0 a 3,0	5	>80

Fonte: Adaptado de O₃ Technology Co (2011).

2.1.5.3. Indústria alimentícia

O ozônio é amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo aquelas que produzem bebidas, carnes, ovos e queijos. O emprego do ozônio é devido aos seus benefícios na melhoria das características físicas, químicas e microbiológicas dos produtos (Nascente, 2019).

Na indústria de bebidas, como vinho e cerveja, o ozônio é aplicado diretamente no produto, melhorando seu envelhecimento, cor e aroma, além de possibilitar a desinfecção dos equipamentos na linha de produção e armazenamento (Cavalcante e Lima, 2023).

Na indústria da carne, o ozônio é utilizado durante o armazenamento para amaciar a carne e reduzir a contaminação bacteriana (Torres; Ferreira; Rímoli, 1996; Silva et al., 2011). Os resultados de pesquisas nesta área indicaram a redução na contagem de mesófilos aeróbios

totais em carcaças suínas (Werlang, 2015; Cavalcante e Lima, 2023). Além disso, o emprego do ozônio pode possibilitar um aumento no tempo de estocagem da carne em estado refrigerado em torno de 30% a 40% - garantindo as condições ideais de umidade e quantidade de micro-organismos (Myozone Blog, 2023).

Em ovos, o emprego do ozônio pode ajudar a reduzir a contaminação por *Salmonella* – importante indicador da qualidade do alimento - (Panini, 2015; Nicolau, 2016; Dobeic, 2017). Entretanto, Monteiro (2021) constatou que o ozônio não foi eficaz da redução *Escherichia coli*, *Salmonella sp* e *Listeria sp* em carcaças suínas. Na produção de queijos, apesar dos resultados promissores em relação ao controle sanitário, determinados tipos de queijo adquiriram um sabor desagradável após a exposição ao ozônio (Cavalcane e Lima, 2023).

2.1.5.4. Degradação de agrotóxicos

A Instrução Normativa n. 2/2008, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, estabelece as normas para a aviação agrícola visando a proteção das pessoas, bens e meio ambiente contra riscos decorrentes do uso de defensivos agrícolas. O texto destaca a importância do uso de equipamentos como geradores de ozônio para degradar moléculas de agrotóxicos, evitando a contaminação ambiental. No inciso VI do art. 7º da referida instrução, há menção de que as empresas devem adotar equipamentos como o gerador de ozônio, que degradam as moléculas de agrotóxico para evitar a contaminação do meio ambiente.

O despejo de água de lavagem de aviões e pulverizadores terrestres com altas concentrações de agrotóxicos é considerado crime ambiental, tornando o ozônio uma opção viável para a remoção desses resíduos. Além disso, a sanitização com uso de ozônio mostra-se eficiente no controle de pragas, doenças e residual de agrotóxicos de frutas e hortaliças (Alves, 2021). O ozônio é eficaz na remoção de agrotóxicos de alimentos e superfícies de contato sem alterar suas características sensoriais (Cavalcante e Lima, 2023).

2.1.5.5. Efeito germicida

O poder germicida do ozônio é específico em relação à determinada espécie de microrganismo. A ação do ozônio sob fungos impede seu crescimento exponencial,

principalmente se estiver no estágio inicial de ataque à superfície de um produto. Este efeito ocorre porque o ozônio é capaz de destruir as culturas formadas e, inclusive, neutralizar os esporos (Fellows, 2019; Monteiro, 2021).

Pilatti et al. (2022) constataram que o ozônio é uma opção eficaz na inativação de diferentes tipos de microrganismos, destacando: bactérias de efluentes sanitários, vírus da Hepatite A, poliovírus, biofilmes microbianos, microrganismos presentes em efluentes de águas residuais, entre outros.

2.1.6. Ozônio em relação ao poder de oxidação do cloro

Embora o ozônio e o cloro sejam gases altamente tóxicos, o ozônio pode ser mais seguro pois seu odor é detectado pelo olfato humano em concentração inferior ao nível de risco. Ademais, devido ao fato de ser gerado *in situ*, não existem riscos de transporte (Lourenção, 2009). Historicamente, a cloração foi o desinfetante mais utilizado para desativar microrganismos patogênicos em águas residuais. Porém, o emprego do ozônio em baixas concentrações e com tempos de contato menores – comparados ao cloro – já são suficientes para fins de desinfecção (Neutegem, 2018).

Em relação ao efeito germicida, o cloro atua por difusão através da parede celular, agindo sobre enzimas, proteínas, DNA e RNA. O ozônio, por apresentar uma capacidade de oxidação superior, age diretamente na parede da célula, causando sua ruptura e morte em menor tempo de contato, inviabilizando a recuperação dos microrganismos após o ataque (Neutegem, 2018).

O ozônio, devido ao seu alto poder oxidante, é instável na água e não deixa resíduos, ao contrário do cloro. No entanto, a legislação brasileira exige um teor mínimo de cloro residual livre na água potável. Esta forma, o ozônio é utilizado em conjunto com o cloro para desinfetar a água, proporcionando eficácia na eliminação de sabores e odores indesejados. Apesar de ser mais eficaz que o cloro, sua ação residual na água é curta, sendo necessário seguir o tratamento com cloração para garantir a conformidade com a regulamentação. Assim atualmente, não é possível utilizar o ozônio como único agente germicida no tratamento de água potável (Neutegem, 2018). Por estas características, o ozônio é aplicado inicialmente no tratamento de água, seguido pela cloração, como sugerido por estudos de Tortora, Funke e Case (2017) , Neutegem, (2018) e Monteiro e Tiecher (2022).

A Tabela 2.4 compara as principais ações do ozônio e do cloro em estações de tratamento de água. Pode-se notar a superioridade do ozônio nestas aplicações.

Tabela 2.4 – Comparação de ações entre ozônio e cloro

Ação	Cloro	Ozônio
Odor	Desagradável	Típico
Cor	Amarelo	Cristalino
Sabor	Desagradável	Nenhum
Atividade Antiviral	Nenhuma	Elevada
Atividade Antibacteriana	Variável	Ampla espectro
Destruição de Algas e Protozoários	Leve	Elevada
Destruição de Fungos	Leve	Elevada
Destruição de Esporos e Cistos	Leve	Elevada
Destruição de Moléculas Orgânicas	Nenhuma	Elevada
Efeito no PH	Variável	Diminui
Cancerígeno	Provável	Improvável
Remoção de cor	Boa	Alta
Meia vida na água	2 a 3 horas	20 min
Toxicidade	Alta	Alta

Fonte: O3 Technology Co (2011).

2.2. Produção de oxigênio

Os métodos para produção de ozônio têm como matéria-prima o oxigênio presente no ar atmosférico ou na água, os quais são fontes altamente disponíveis. O ar seco contém 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,04% de dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases (NASA, 2023).

O oxigênio (O₂) é um gás inodoro, incolor (quando comprimido), azul pálido (quando liquefeito), sendo denominado oxidante, por causar ou intensificar o processo de combustão (Silva, 2019).

A utilização do ar atmosférico em reatores necessita condicionamento, secagem e remoção de material particulado através de filtros específicos. Devido a proporção de oxigênio e nitrogênio no ar, a taxa de conversão de oxigênio em ozônio segue essa proporção de rendimento em comparação com o uso do oxigênio de alta pureza (Metcalf, Eddy, 2014). Ainda, segundo estes autores, são necessários de 6,6 a 13,2 kWh/kg nos alimentadores com oxigênio puro contra de 13,2 a 19,8 kWh/kg com ar (Metcalf e Eddy, 2014).

O oxigênio pode ser obtido por meio da separação da água em diversos processos, entre os quais estão a eletrólise da água, foto-eletrólise, processo foto-biológico e decomposição da água a alta temperatura (Silva, 2017).

Na produção de oxigênio tendo o ar atmosférico como fonte primária, os processos de separação de gases são classificados como não-criogênicos e criogênicos (Carreira, 2019). Os processos químicos, as membranas de transporte de íons e os métodos de adsorção estão entre os métodos não-criogênicos.

O método de separação criogênica consiste na filtragem, compressão e resfriamento do ar atmosférico. As plantas de separação possuem múltiplas colunas criogênicas que utilizam o ponto de ebulição de cada gás na sua liquefação, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Ponto de ebulição os gases da atmosfera.

Gases presentes na atmosfera	Temperatura de ebulição (1 bar)	Temperatura de ebulição (1,55 bar)	Temperatura de ebulição (6,2 bar)
Oxigênio (O ₂)	-183,0 °C	-178,6 °C	-163,3 °C
Argônio (Ar)	-185,9 °C	-181,6 °C	-164,4 °C
Nitrogênio (N ₂)	-195,8 °C	-191,9 °C	-176,4 °C

Fonte: Linde (2017).

No sistema criogênico, o ar atmosférico é filtrado e comprimido. Em seguida, é feita a remoção dos contaminantes (H₂O, CO₂ e hidrocarbonetos) e resfriamento a baixas temperaturas (Tabela 2.5), tornando-o liquefeito. É então realizada a destilação fracionada para separação dos gases nitrogênio e oxigênio, utilizando a propriedade do ponto de ebulição de cada um dos gases. A separação dos gases liquefeitos é feita pela altura de posicionamento das bandejas nas colunas de destilação criogênica (Ferreira, 2018).

2.2.1. Tecnologia PSA e TSA

A obtenção do oxigênio pelo processo de adsorção utiliza a tecnologia da oscilação de pressão PSA (*Pressure Swing Adsorption*) ou oscilação térmica TSA (*Temperature Swing Adsorption*) onde são livres de dióxido de carbono, hidrocarbonetos e vapor de água (Neves, 2021, Henrique, 2022). A oscilação térmica TSA consiste em limpar o material adsorvente

saturado com ar seco quente, enquanto a oscilação de pressão PSA utiliza ar seco frio pressurizado. A secagem por adsorção é um processo químico baseado no princípio de que o ar úmido flui sobre um material higroscópico (geralmente materiais em sílica gel ou alumina ativa) onde o ar segue seco (Henrique, 2022).

A regeneração TSA ou oscilação térmica, utiliza de 5 a 6% do ar comprimido seco e puro, aquecido eletricamente ou a vapor por aquecedor até 180 a 250°C, enquanto a outra coluna age na secagem ativa em ciclos que variam de 4 a 8 h. Em contrapartida, a regeneração PSA despressuriza a coluna em regeneração para retirar a umidade do material adsorvente. Para isso, é utilizado de 9 a 14% do ar comprimido seco e puro, enquanto o ciclo de operação cai para até 8 min (Breathe, 2024).

A PSA é uma alternativa de menor custo e melhor eficiência energética, se comparada com o processo criogênico, mas produz um gás com percentual de oxigênio inferior (Moraes, 2004).

Os concentradores de oxigênio normalmente empregam projetos de múltiplas câmaras, de modo que as câmaras sofrerão pressurização e adsorção a qualquer momento, enquanto outras sofrerão despressurização e dessorção. À medida que o leito da peneira molecular é carregado com nitrogênio e umidade, eles são absorvidos pelo meio ambiente na forma de vapor e capacidade de adsorção do leito da peneira é restaurado (Myozone, 2024).

2.2.2. Decomposição térmica da água

Um dos processos para produção de oxigênio é a decomposição direta da molécula de água que libera como produtos o oxigênio e o hidrogênio. Para viabilizar esta reação são necessárias temperaturas elevadas acima de 2500°C. Ciclos termoquímicos em reações intermediárias produzem oxigênio a temperaturas mais baixas, próximas a 1000 ° C (Palhares, 2016).

Os ciclos com duas ou mais etapas utilizam energia geotérmica, nuclear ou raios solares concentrados de acordo com a temperatura (Ferreira, 2011). Mas apresenta desvantagens como recombinação de gases e corrosão devido a temperaturas extremas (Palhares, 2016).

2.2.3. Eletrólise

A formação do oxigênio também pode ser realizada através da reação eletroquímica com o uso da eletricidade diretamente no reator, recebendo a denominação de eletrólise (ínea ou aquosa). A passagem da corrente elétrica causa a decomposição eletroquímica convertendo energia elétrica em energia química (Hamann et al., 2007; Cavaler, 2020).

Como exemplos, a eletrólise ínea do sal de cozinha (NaCl) separa os elementos sódio (Na) e Cloro (Cl) segundo a equação global: $2 \text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH} + \text{H}_2 + \text{Cl}_2$. A eletrólise aquosa com a mistura de água e sal, é um processo industrial importante para a obtenção do oxigênio (O_2), hidrogênio (H_2), cloro (Cl) e soda cáustica (NaOH) (Fernandes, 2020).

A maioria das obras literárias mostra que o processo de eletrólise é simples, mas inviável devido ao custo da energia elétrica necessária para produção de hidrogênio e oxigênio (Barroso et al., 2021; Iberdrola, 2022; Silva, 2023). Entretanto, Palhares (2016) relata que quando se utiliza fontes de energia renováveis como a energia solar fotovoltaica diretamente no reator eletrolítico, o método torna-se atrativo.

A eletrólise aquosa é um método que pode ser executado com materiais de baixo custo, fácil acesso e com as condições termodinâmicas ideais, a temperatura ambiente e a pressões atmosféricas e que será discutido a seguir em seção específica.

2.3. Eletrólise aquosa

Quando uma corrente elétrica é aplicada a dois eletrodos imersos em uma solução aquosa condutora, ocorre a eletrólise da água. No ânodo (pólo positivo), ocorre a oxidação, produzindo oxigênio, enquanto no cátodo (pólo negativo), ocorre a redução, gerando hidrogênio (Cunha, 2021). As tecnologias mais comuns para essa produção são os eletrolisadores de membrana semipermeável de troca de prótons (PEM) e os eletrolisadores com membrana de óxido sólido mais eficiente SOEC (Nejadian et al., 2023). Outras tecnologias, como a fotoeletrólise, que utiliza luz solar, necessita de semicondutores que ainda não foram suficientemente desenvolvidos (Iberdrola, 2023).

A Tabela 2.6 mostra a comparação dos eletrolisadores em diversos locais demonstrando que o consumo e a eficiência apresentam resultados similares independente da capacidade de produção, da pressão de trabalho e da tecnologia empregada.

Tabela 2.6 – Características dos sistemas eletrolisadores de alguns fabricantes.

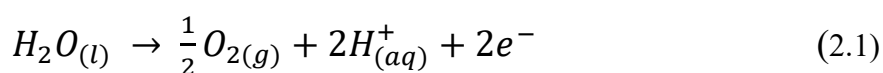
Fabricante	Origem	Tecnologia	Capacidade (Nm ³ /h)	Pressão	Consumo (kWh/Nm ³)	Eficiência (%)
NEL	Noruega	Alcalina	480	1	4,5	65
Hydrogenics	Canadá/Europa	Alcalina	60	10-25	5,2	60
McPhy	França	Alcalina	60	10	5,2	60
Siemens	Alemanha	PEM	60	30	4,9	60
ITM	Reino Unido	PEM	2.4	15	4,8	60

Fonte: O autor adaptado de Bhandari et AL. (2014) e Karagöz et al. (2015).

2.3.1. Eletrólise da água em membrana polimérica de troca de prótons (PEM)

Os eletrolisadores com membrana de troca de prótons, também conhecida como membrana polimérica (*Proton Exchange Membrane*, PEM) ou polímero de eletrólito sólido (*Solid Polymer Electrolyte*, SPE), possuem uma membrana de polímero de 20 a 300µm de espessura com resistência à passagem de gás e alta condutividade dos íons H⁺ por troca iônica. O ácido sulfônico é responsável por essa troca (Paiva, 2022).

As equações (2.1) e (2.2) descrevem a formação do oxigênio e do hidrogênio nos eletrolisadores PEM:



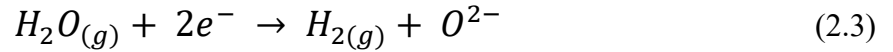
Os eletrolisadores PEM possuem maior eficiência e maior taxa de produção, porém apresentam custos maiores de investimento associado às membranas e seus eletrodos que contêm metais nobres (Ursua et al., 2012).

No ano de 2018 em Copenhague, um eletrolisador PEM de 1,2 MW produziu 120 t de hidrogênio, possibilitando a entrega 24 horas por dia, 7 dias por semana, de 60 toneladas de hidrogênio para um cliente industrial, fato que demonstrou sua capacidade de uso equilibrado da rede elétrica. As 60 toneladas restantes foram fornecidas a outros clientes, incluindo estações para abastecimento de táxis movidos a células de hidrogênio (Cummins, 2021).

2.3.2. Eletrólise da água de Óxido Sólido (SOEC)

Nos eletrolisadores com óxidos sólidos (*Solid Oxide Electrolyzers* – SOE) ou (*Solid Oxide Electrolyzers Cell* – SOEC), a eletrólise ocorre a temperaturas de 800 a 1000°C (Franco, 2021). Para a produção de gases, até 40% da energia fornecida pode ser na forma de calor, reduzindo a necessidade de eletricidade em até 25%, elevando sua eficiência para até 86% (Bahndari et al., 2014). Entretanto as altas temperaturas causam o envelhecimento do eletrólito e desativação do eletrodo (Ursua et al., 2014).

O hidrogênio é produzido no cátodo, onde é feita a entrada do vapor, e os íons de óxido passam pelo eletrólito sólido formando o oxigênio no ânodo. As reações nos eletrolisadores SOEC são descritas nas Equações (2.3) e (2.4):

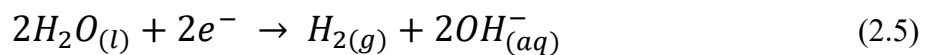


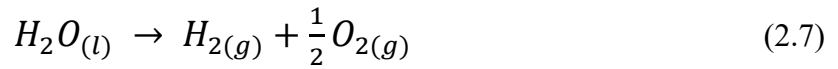
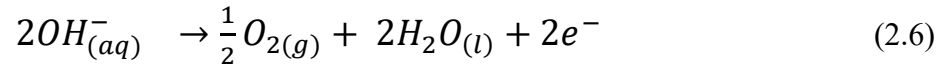
2.3.3. Eletrolisadores alcalinos

Os eletrolisadores alcalinos geralmente utilizam uma solução de hidróxido de potássio (KOH) com concentrações mássicas entre 20 e 40% (Palhares, 2016; Balbuena, 2021). Isto se deve à alta condutividade elétrica desta substância, e pelo fato de que ele não participa da reação química e tampouco gera outros subprodutos dessas reações (Rossi et al., 2022, Leludak et al., 2024)

Um diafragma pode ser utilizado por segurança ou para aplicações onde a separação dos gases é necessária, garantindo purezas da ordem de 98,5% (Cunha, 2021). Os níveis de pureza de hidrogênio e oxigênio podem chegar até 99,9 e 99,7%, respectivamente. (Ursua et al., 2012; Palhares, 2016).

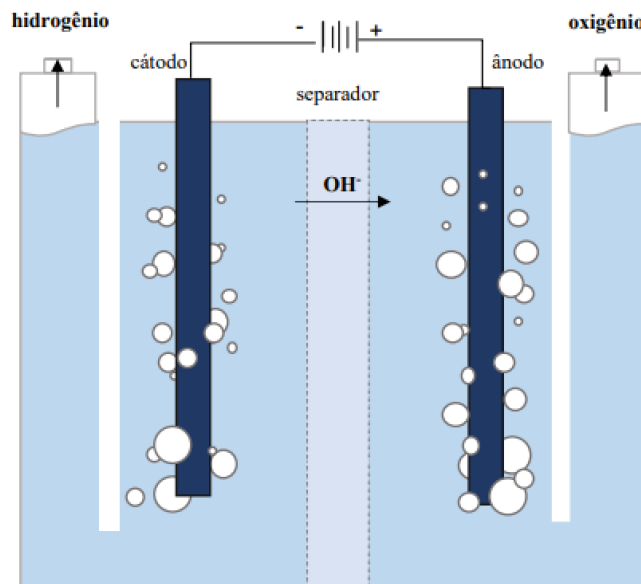
As reações na eletrólise alcalina são descritas pelas equações (2.5) e (2.6):





Os elétrons fluem do terminal negativo da fonte de energia externa para o cátodo onde serão combinados com os íons do hidrogênio (prótons) para formar o gás hidrogênio. Mantendo o equilíbrio de cargas, os ânions (íons hidróxido) deixam no ânodo os elétrons que irão retornar para o terminal positivo da fonte de energia externa, formando, assim, o gás oxigênio (Zeng; Zhang, 2010), conforme representação esquemática da Figura 2.3.

Figura 2.3 – Princípio de operação do eletrolisador alcalino da água.



Fonte: Adaptado de Vidas e Castro (2022).

A membrana do tipo diafragma deve ser utilizada entre os dois eletrodos. Sua função é manter separados os gases oxigênio e hidrogênio gerados para as aplicações posteriores. Um dos materiais utilizados como membrana é a Zirfon que consiste em uma combinação de óxido de zircônio e polissulfona. Sendo utilizada tanto nos processos do tipo PEM quanto nos eletrolisadores alcalinos de alta eficiência (Groot; Vreman, 2021; Cunha, 2021).

Os eletrodos podem apresentar problemas de corrosão e reações secundárias. A literatura apresenta uma série de materiais para esta finalidade.

Os eletrodos podem ser inertes, aqueles que não sofrem alteração durante a eletrólise ou ativos que sofrem algum tipo de alteração durante a eletrólise. Os eletrodos ideais são de platina e ouro, o que inviabiliza muitos projetos de eletrolisadores devido ao custo muito elevado. Os mais comuns são os eletrodos de níquel devido ao custo baixo e resistência a corrosão. Entretanto, Palhares (2016), mostrou que o uso de aço inoxidável vem ganhando espaço nos trabalhos da última década.

A pesquisa mais recente demonstrou que as últimas publicações seguem a tendência do uso do aço inoxidável, conforme apresentado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Eletrodos utilizados na eletrólise alcalina.

Fonte bibliográfica	Materiais dos eletrodos
Ahmad e Shenawy (2006)	Níquel
Olivares-amirez et al. (2007)	Aço inoxidável 304, 316 e 430
Djafour et al. (2011)	Aço macio
Fatouh et al. (2013)	Aço galvanizado, cobre, titânio, aço inoxidável e alumínio puro
Slama (2013a)	Cobre, aço Mario, aço inoxidável, bronze, grafite, alumínio e chumbo
Knob (2013)	Alumínio, aço niquelado e níquel
Cabezas et al. (2014)	Aço inox 2016
Shedid e Elshokary (2015)	Aço inoxidável
Guerra (2015)	Grafite
Palhares (2018)	Aço inoxidável
Lavoante e Franco (2016)	Aço inox 316
Da Cunha (2017)	Aço inox 304
Da Cunha (2021)	Aço inox 316

Fonte: O autor, adaptado de Palhares (2016).

2.3.4. Termodinâmica

Os fundamentos da termodinâmica descrevem os processos que ocorrem em uma célula eletrolítica (Emerik, 2023). As grandezas termodinâmicas são relacionadas de acordo com a Equação 2.8 (Cunha, 2021).

$$\Delta G = \Delta H - Q = \Delta H - T\Delta S \quad (2.8)$$

sendo que: ΔG é a variação da energia livre de Gibbs, ΔH é a variação de entalpia que determina a energia necessária para a reação de eletrólise, Q é a energia térmica, T é a temperatura e ΔS é a variação de entropia.

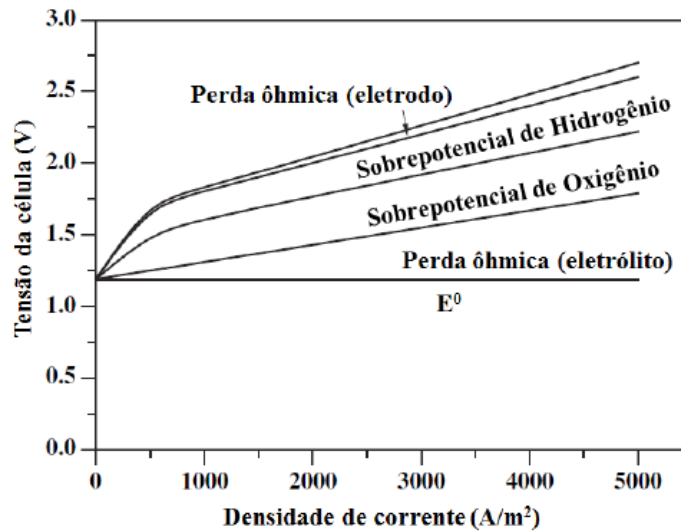
A tensão mínima necessária para que o processo ocorra é determinada pela Equação 2.9, onde E^0 é a tensão reversível mínima, ΔG^0 é a variação da energia livre de Gibbs, z é o número de elétrons da reação e f é a constante de Faraday (Cunha, 2021). O consumo de energia no processo de eletrólise depende da temperatura e da pressão, e a tensão reversível E^0 é dependente destes parâmetros (Ursua et al., 2012).

$$E^0 = - \frac{\Delta G^0}{zf} \quad (2.9)$$

A tensão elétrica da célula de um eletrolisador é a soma do potencial reversível do oxigênio e do hidrogênio com os sobre potenciais de ativação $E_{eletrodo}$ e o sobre potencial de queda ôhmico E_{ohmico} . E^0 é o potencial acima da tensão de equilíbrio necessário para que a reação de eletrólise ocorra. A Equação (2.10) mostra esta relação de tensões formando a tensão da célula $E_{célula}$. Este sobrepotencial também é apresentado na Figura 2.4.

$$E_{célula} = E^0 + E_{eletrodo} + E_{ohmico} \quad (2.10)$$

Figura 2.4 – Curva tensão-corrente em uma célula eletrolítica.

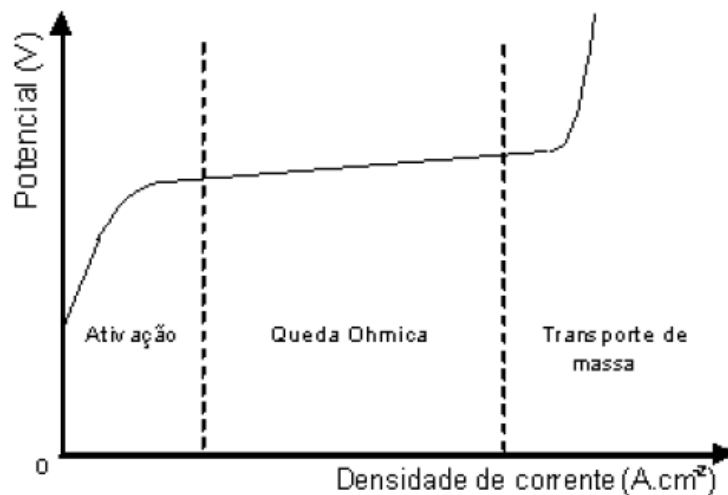


Fonte: Adaptado de Zeng e Zhang (2010).

Pela Figura 2.4 verifica-se o valor do potencial de equilíbrio de 1,23 V. Esta é a tensão da reação global da eletrólise da água a 25°C e 1 atm. Devido a esse valor limite inferior, as células industriais operam com tensões entre 1,8 e 2,6 V, aumentando a taxa de eletrólise (Wang et al., 2014).

A Figura 2.5 apresenta a curva de polarização que divide o comportamento da eletrólise em três regiões definidas e demonstra que o desempenho do eletrolisador é proporcional ao aumento da densidade da corrente, o que resulta por sua vez, em uma maior potência elétrica.

Figura 2.5 – Curva de polarização da eletrólise.



Fonte: Silvab (2011).

A sobretensão ôhmica pode ser encontrada somando várias componentes resistentes a corrente elétrica no ciclo da eletrólise conforme mostram as Equações (2.11) e (2.12) (Cunha, 2021).

$$E_{\text{ohmico}} = I \sum R_i \quad (2.11)$$

$$\sum R_i = R_1 + R_{\text{bolhas}, O_2} + R_{\text{ions}} + R_{\text{membrana}} + R_{\text{bolhas}, H_2} + R'_1 \quad (2.12)$$

sendo:

R_1 - resistência do circuito elétrico externo incluindo fiação e conexões.

R_{bolhas, O_2} - resistência da cobertura parcial do ânodo pelas bolhas de oxigênio.

R_{bolhas, H_2} - resistência da cobertura parcial do cátodo pelas bolhas de hidrogênio.

R_{ions} - resistência devido aos íons.

$R_{membrana}$ - resistência da membrana do diafragma.

R'_l - resistência elétrica dos fios e ligações no cátodo.

2.4. Métodos de produção de ozônio

A produção de ozônio pode ser realizada de três formas principais: com eletroquímica (eletrólise), com radiação ultravioleta (foto catálise) e com o efeito corona (plasma frio) (Paula, 2021).

Entre os métodos utilizados para produção do gás, o que mais se destaca e possui um maior número de trabalhos acadêmicos é a obtenção por meio de produção eletroquímica. Entretanto, esse método apresenta alguns pontos negativos, como eletrodos de óxido de chumbo (PbO_2) ou platina - onerosos e não muito disponíveis no mercado -, e altas densidades de corrente elétrica necessária para a reação. Embora na produção eletroquímica de ozônio, eliminar o uso de gases purificados e ter operação em baixas diferenças de potencial (<8 V) e elevadas correntes (40 A) sejam vantagens apontadas (Souza, 2017; Santana, 2024). Também destacou-se na pesquisa que o processo eletroquímico está associado a custos mais elevados de consumo de energia elétrica (Valdivia, 2019).

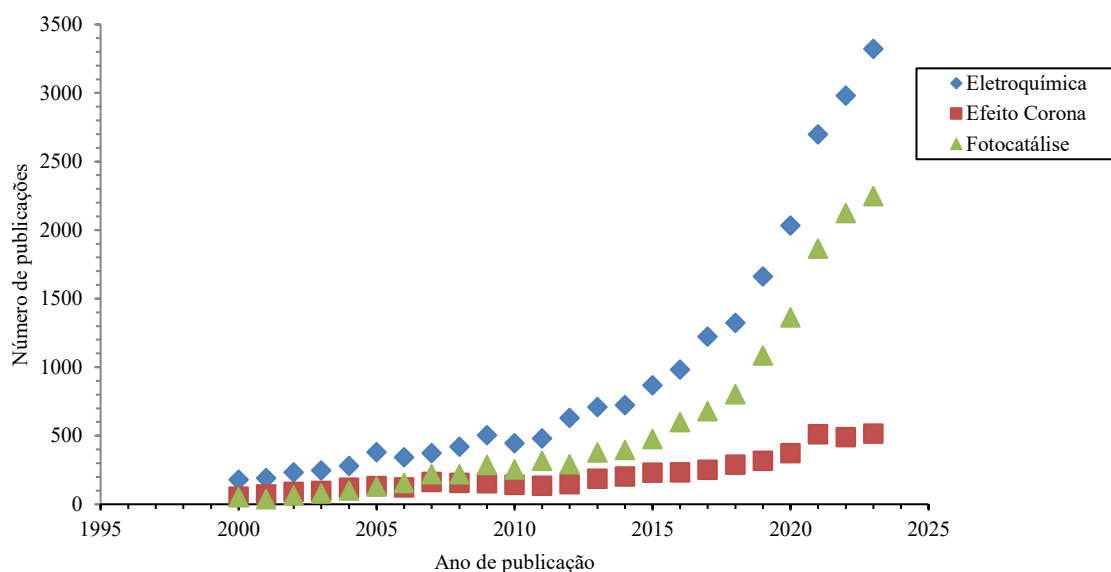
O método da radiação ultravioleta é a segunda forma mais investigada na literatura científica. Apesar de ser o método que mais se assemelha ao processo natural do ciclo do ozônio na atmosfera, o requer um alto custo e proporciona um baixo rendimento, sendo de difícil implantação em escala industrial.

Por fim, a produção por descarga corona, é capaz de gerar quantidades significativas a custos reduzidos e material de fácil acesso, sendo o método mais utilizado para a obtenção do produto (Maidana et al., 2015).

A Figura 2.6 ilustra a evolução do número de publicações científicas desde o ano 2000, quando a pesquisa é feita com as palavras: eletroquímica, corona e foto catálise. O gráfico mostra claramente a lacuna de pesquisas utilizando o efeito corona na produção de ozônio. Tais achados estão em sentido contrário à produção industrial, pois as empresas que

fabricam e comercializam reatores para diversas finalidades, preferem o método corona para fabricação e comercialização (Myozone; Philozon; Wier, 2023).

Figura 2.6 – Comparação anual de número de publicações científicas e os principais métodos para a produção de ozônio.



Fonte: O autor.

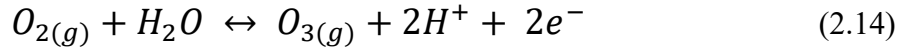
Fonte: <https://www.sciencedirect.com/>, palavra-chave “*Electrochemical ozone*”, “*Corona ozone*” e “*photocatalytic ozone*” em 05/11/2023.

2.4.1. Produção eletroquímica de ozônio

A produção eletroquímica de ozônio conhecida também através do termo PEO ou como produção de ozônio por eletrólise é realizada por reatores eletroquímicos capazes de promover a oxidação da água utilizando eletrodos inertes (Souza, 2017). Estes reatores são classificados em relação ao eletrólito empregado, nos tipos:

- 1 – Em que o anodo é imerso em eletrólitos líquidos adequados.
- 2 – Em que o anodo poroso é prensado contra um eletrólito polimérico sólido (EPS), formado por uma membrana condutora de prótons, sendo o conjunto eletrodo-membrana (CEM) imerso em água desprovida de eletrólito líquido (Silva et al., 2010).

Na geração PEO, o átomo de oxigênio que forma o ozônio, é obtido da molécula de água por meio de uma reação eletroquímica. Souza (2017) utilizou um reator eletrolítico do tipo filtro-prensa com eletrodo de PbO_2 .



A Equação (2.14) mostra a reação eletroquímica do oxigênio gasoso e a água em um reator PEO.

Segundo Silva (2003), a produção eletroquímica de ozônio é vantajosa em relação ao processo corona convencional, nos casos em que a demanda de concentração requerida de ozônio na fase gasosa é elevada, ou em casos em que a sua aplicação na degradação de compostos orgânicos recalcitrantes é de interesse ambiental. Nos demais casos, o processo corona é muito mais viável economicamente. Um estudo de Sousa (2017) utilizou eletrodo polimérico sólido (EPS) em um ozonizador eletroquímico com eficiência esperada. Os eletrodos empregados têm alto potencial de liberação de oxigênio, por serem fabricados a partir de ligas de titânio.

2.4.2. Geração por raios ultravioleta

Pela ação fotoquímica dos raios ultravioleta no oxigênio atmosférico, o ozônio é produzido naturalmente na estratosfera. Inicialmente é feita a separação dos dois átomos de oxigênio da molécula de O_2 , produzindo assim o oxigênio atômico conforme apresentado na Equação 2.15. O comprimento de onda ideal é de 242 nm onde há uma maior eficiência na produção fotoquímica. Posteriormente o átomo de oxigênio formado associa-se a uma molécula de O_2 formando o ozônio, como demonstra a Equação 2.16.



A reprodução deste método apresenta baixas eficiências devido à decomposição parcial do ozônio, causada também pelo processo fotoquímico – conforme demonstrado na Equação (2.17). O termo $O^*(^1D)$ representa o singlete, estado fundamental da molécula de oxigênio (Valdez, 2022).



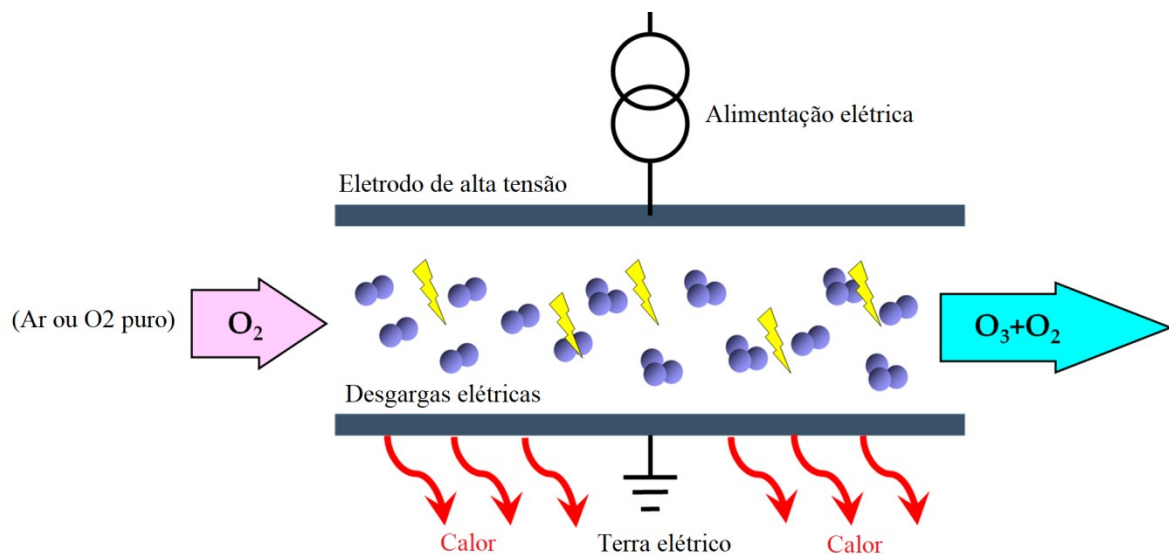
2.4.3. Geração por efeito corona

Um dos fenômenos mais comuns vistos na atmosfera é o efeito corona, sendo um mecanismo de descarga eletrostática devido à ionização do ar. Neste fenômeno, os gases são submetidos a um campo elétrico com intensidade suficiente para romper a sua rigidez dielétrica (Paula, 2021). A terminologia oficial para o termo corona, segundo a NBR 5456 é "eflúvio que se manifesta em um campo elétrico não uniforme e de intensidade muito elevada, tendo uma parte visível perto do condutor" (Schiavion, 2012).

Atualmente, um dos métodos mais utilizados no processo de produção de ozônio utiliza o efeito corona. Por meio deste método o ozônio é gerado por uma descarga elétrica em um tubo metálico denominado reator de ozônio (Figura 2.7). Neste tubo, aplica-se uma descarga elétrica de alta tensão, juntamente com um fluxo de ar ou gás contendo oxigênio. A produção final é de concentrações de 1% a 3% de ozônio quando o gerador é alimentado com ar, e de 2% a 6% quando o gerador é alimentado com oxigênio puro (Rice et al., 1986).

A Figura 2.7 apresenta um esquema de geração de ozônio por meio de descarga corona.

Figura 2.7 - Produção de ozônio por efeito corona.

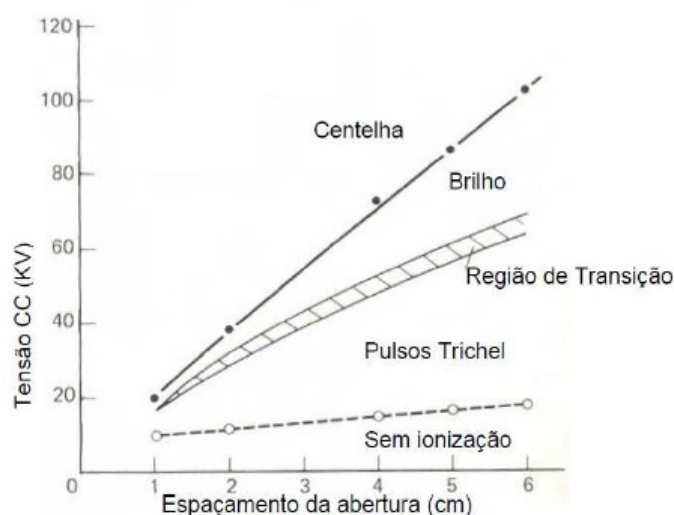


Fonte: Adaptado de Sarron et al. (2021).

A descarga elétrica aplicada pode ser em corrente contínua (CC) positiva ou negativa, ou corrente alternada (CA).

A Figura 2.8 apresenta a relação da distância entre os eletrodos e a tensão CC aplicada. Conforme a tensão é aplicada, ocorre a ionização e o processo de bombardeamento retira elétrons da superfície do cátodo. O campo elétrico afasta a nuvem de íons da região de ionização que recupera o valor crítico de ruptura. Em consequência é desencadeada uma nova avalanche, em um processo repetitivo chamado de Pulsos Trichel (Schiavon, 2012).

Figura 2.8 – Ruptura corona no ar atmosférico.



Fonte: Kuffell, Zaengl (1984).

A principal diferença entre a geração de corona sob tensão CA e a tensão CC está na mudança periódica da direção do campo aplicado sob tensão CA. Segundo Schiavon (2012), a melhor configuração para geração do efeito corona para produção de ozônio é sob polaridade negativa.

2.4.3.1. Geometria do reator corona

A literatura científica sugere dois formatos geométricos para os reatores de ozônio: o formato cilíndrico com eixos coaxiais e o formato retangular com placas planas paralelas. O trabalho de Paula (2021) apresentou viabilidade na produção de ozônio com placas planas paralelas. Os trabalhos de Kuffell e Zaengl (1984), Schiavon (2011) e Camboim et al. (2019), demonstram que é possível se obter a descarga corona com a utilização do formato cilíndrico,

mesmo com um cilindro interno de raio pequeno, da ordem de 1 a 4 mm - o que equivale a um fio de cobre comum - e com valores não muito elevados de tensão.

O cálculo da geometria do ozonizador está detalhado no Apêndice I da presente dissertação, conforme estudo de Schavion (2012).

2.5. Métodos de medição de ozônio

Reações químicas conhecidas são usadas como métodos de referência e calibração de instrumentos utilizados para medir concentrações de ozônio. A maioria destas reações envolve iodo, definindo os métodos iodométricos de medição de ozônio no ar e na água. (Schiavon, 2012).

A Tabela 2.8 apresenta os métodos de medição de ozônio relatados na literatura e também suas vantagens e limitações.

Tabela 2.8 – Métodos de medição de ozônio.

Método	Princípio	Vantagens	Limitações
Iodometria	Oxidação de I ⁻ para I ₂ ; detecção de I ₃ ⁻ por titulação	Alta sensibilidade 2 µg/L	Perdas de ozônio no processo
Espectrofotometria Ultravioleta	Luz UV de 254 nm	Alta sensibilidade 20 µg/L	Interferências
Leuco Cristal Violeta	Oxidação de leuco cristal violeta para cristal violeta	Alta sensibilidade 1 µg/L	Uso de corante do kit teste
Dietil-p-fenilenodiamina (DPD)	Oxidação do DPD, detecção por titulação	Sensibilidade abaixo de mg/L	Instabilidade de reagentes
FACTS Siringaldazina	Oxidação do iodeto para iodo	Sensibilidade moderada;	Requer adição de dois reagentes
Glicina	Glicina adicionada ao retirar ozônio	Sensibilidade abaixo de mg/L	Determinações distintas de oxidante
Azul-índigo	Branqueamento com ozônio por corante índigo	Sensibilidade abaixo de mg/L	Peróxido não interfere
Ácido Violeta Cromo K	Branqueamento por corante ACVK	Sensibilidade de detecção moderada	Sensibilidade de detecção moderada
Eletrodos Amperométricos	Redução de O ₃ para O ₂ diretamente na solução;	Boa sensibilidade	Interferências de agentes oxidantes
Amperométrica de Estado Estável	Difusão por meio de filmes de O ₃ a serem reduzidos para O ₂ em uma película fina do eletrólito	Boa seletividade para o ozônio	Forte dependência da temperatura
Amperométrico Pulsante		Mesmas vantagens do anterior	dependência com a temperatura não tão significativa
Sensores eletrônicos	Reações eletroquímicas	Portabilidade	Custo muito alto

Fonte: O autor com informações de Schiavon (2012).

Na prática, os dois métodos utilizados com mais frequência e considerados padrões, são: o processo iodométrico e ultravioleta direta (UV) por absorbância (Schiavon, 2012).

2.5.1. Titulação Iodométrica

A iodometria é um método volumétrico indireto, em que um excesso de íons iodeto são adicionados a uma solução contendo o agente oxidante, que reagirá produzindo uma quantidade equivalente de iodo, que por sua vez será titulado com uma solução padronizada de tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (Cardoso, 2021). A iodometria baseia-se no fato de que em se conhecendo a quantidade da solução padrão necessária para reagir totalmente com a amostra e a reação química que ocorre entre estas espécies, pode-se calcular a concentração da substância a ser titulada (Andrade, 2001). Na absorção do ozônio (O_3), quando em contato com a solução de iodeto de potássio (KI), há a formação de iodato de potássio (KIO_3). Na sequência deve-se adicionar um reagente auxiliar conhecido como indicador (amido) em um meio neutro ou moderadamente acidulado com ácido sulfúrico (H_2SO_4). Assim, o amido reage com o iodeto e, na presença de um redutor (solução padronizada de tiosulfato de sódio) forma-se um complexo azul escuro (Andrade, 2001).

O volume de tiosulfato de sódio gasto na titulação da solução de KI ozonizada determina a produção de ozônio gerada pelo equipamento em um tempo definido, como demonstra a Equação (2.29), cuja unidade é (g/h) (Schiavon, 2014).

$$P_{\left(\frac{\text{g}}{\text{h}}\right)} = \frac{N_{tio} V_{tio} V_{KI} 1,44}{t V_{AM}} \quad (2.29)$$

em que:

P = Produção de ozônio (g/h) ou (g/min).

N_{tio} = Normalidade do tiosulfato de sódio (N).

t = Tempo de contato (min).

V_{tio} = Volume consumido de tiosulfato de sódio (mL).

V_{AM} = Volume da amostra a ser titulada (mL).

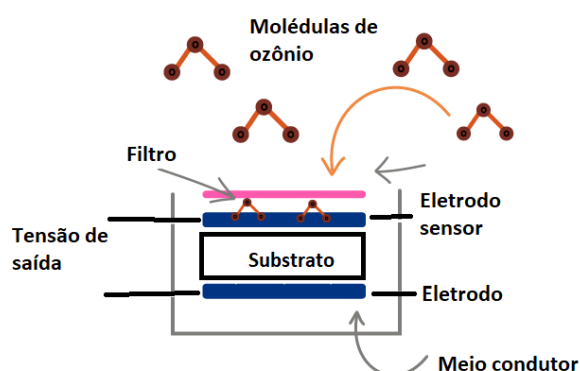
V_{KI} = Volume da solução de iodeto de potássio (mL).

2.5.2. Sensores eletroquímicos

O elemento sensor para o gás ozônio é uma célula de dióxido de estanho (SnO_2), capaz de detectar concentrações do ozônio entre 10 e 1000ppb no ar ambiente, utilizando a tecnologia de semicondutores de óxido metálico “*Metal Oxide Semiconductor (MOS)*”.

De maneira típica, estes sensores possuem um filme de óxido de metal - que pode ter como base o dióxido de estanho (SnO_2) (Moreira, 2014) - aplicado sob um material de substrato isolante – que pode ser o óxido de alumínio (Al_2O_3) (Hübert et al., 2011) - entre dois eletrodos como apresentado na Figura 2.9. É necessário o aquecimento da película para facilitar a reação com o gás redutor ou oxidante também a remover a umidade formada na reação (Strelow e Mendes, 2015). A taxa de sensibilidade do sensor é dada pela razão entre a resistência do sensor submetido ao gás alvo e a resistência do sensor quando submetido ao ar puro.

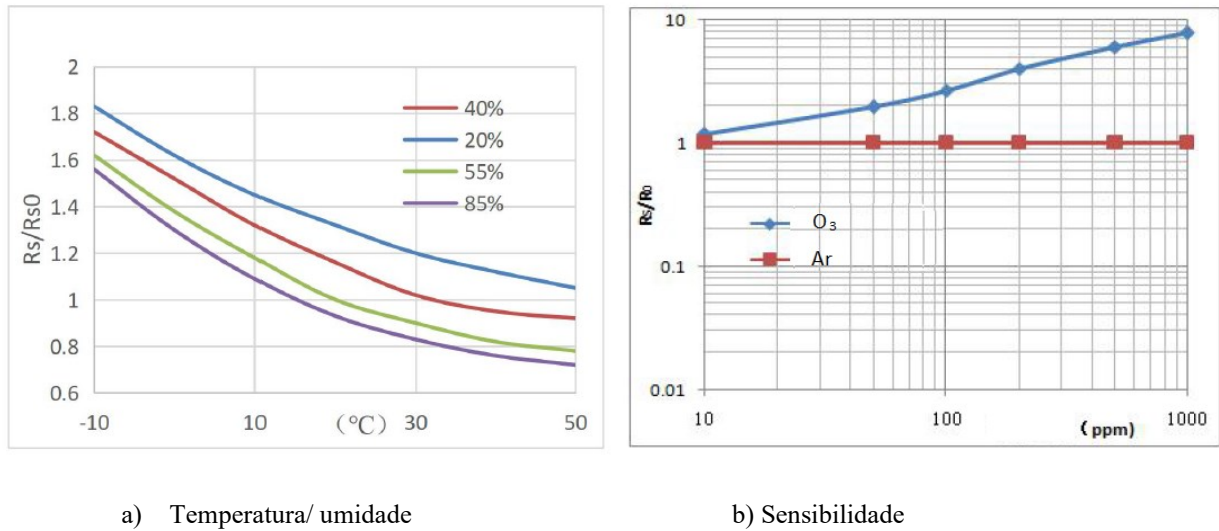
Figura 2.9 – Sensor de ozônio.



Fonte: Adaptado de Braga (2023).

A Figura 2.10 a mostra no eixo das ordenadas a taxa do sensor (R_s/R_{so}) onde R_s é a resistência do sensor em 200 ppm de O_3 em diferentes temperaturas e umidade relativa do ar em 20%, 40%, 55% e 85%. R_{so} é a resistência de referência a 300 ppm de O_3 a 20 °C e 55% de umidade relativa do ar. O sensor fornece respostas químicas estáveis quando a temperatura de operação varia de forma suficientemente lenta, se comparada com o tempo de resposta química (Strelow e Mendes, 2015; Capsistema, 2022). A Figura 2.10b ilustra concentração do sensor de ozônio em ppm em razão da sensibilidade, onde R_0 é a resistência elétrica quando submetido ao ar puro.

Figura 2.10 – Características típicas do sensor de ozônio MQ 131.



a) Temperatura/ umidade

b) Sensibilidade

Fonte: Winsen (2021).

A cassiterita (SnO_2) é a principal fonte de estanho e apresenta estrutura cristalina tipo rutilo tetragonal com dois átomos de estanho e quatro átomos de oxigênio, e tem os elétrons da banda de condução levados a superfície por moléculas de oxigênio adsorvidas na fase gasosa, formando os íons O_2^- ou O^- (Das e Jayaraman, 2014). As Equações (2.31) e (2.32) descrevem as reações dos íons do oxigênio na superfície do óxido de estanho, onde k_1 e k_2 constituem as taxas de reações diretas e reversas, respectivamente e descrevem o princípio operacional do sensor de oxigênio (Strelow e Mendes, 2015).



O consumo dos íons descritos nas Equações (2.31) e (2.32) altera a condutividade eletrônica na superfície próxima a camada de depleção de elétrons (Kohler et al., 1999).

A Equação (2.33) representa a sensibilidade do sensor aos gases oxidantes ou redutores.

$$R_s = A[C]^{-\varepsilon} \quad (2.33)$$

Em que: R_s é a resistência elétrica do sensor, A é uma constante, C é a concentração do gás e ε o coeficiente de ajuste.

Os sinais provenientes dos sensores podem ser processados em um microcontrolador ou microprocessador e posteriormente enviados para a nuvem ou um banco de memória para as devidas análises. Foram utilizados também no projeto os sensores de temperatura e umidade DHT22 e o sensor de luminosidade TSL2561, descritos no Capítulo 3 desta dissertação.

A plataforma *web* ThingSpeak recebe, armazena e permite visualizar estes dados em tempo real. O ThingSpeak também possui um serviço de análise de IoT e permite a execução de códigos do MATLAB, por meio do qual os dados podem ser analisados e processados de forma on-line e em tempo real (Thingspeak, 2024). Sua versão gratuita permite até três milhões de mensagens por ano. O limite de intervalo de tempo para atualização de mensagens é de apenas 15 s (Rogrigues, 2023). Para utilização da plataforma é necessária a aquisição de uma licença para o uso em ambiente de produção.

Há na literatura científica diversos estudos ressaltando os benefícios representados pela portabilidade e baixo custo dos protótipos de monitoramento de qualidade do ambiente utilizando essa tecnologia, quando comparados com estações convencionais utilizando sensores (Avelino, Camboim et. al., 2019; Galetti, 2020; Baumgarten, 2021; Maker, 2022; Dias et. al., Araújo et al., Rodrigues, 2023).

2.5.3. Medidores eletrônicos

O Espectrofotômetro Dobson, é o instrumento mais antigo para medir o ozônio. É um sistema óptico que mede a radiação ultravioleta em dois comprimentos de onda. Pela radiação medida pode se calcular a coluna total de ozônio.

Dois exemplares do espectrofotômetro Dobson estão disponíveis no Brasil: um na cidade de Natal e outro em Cachoeira Paulista. Este último em operação de forma manual desde 1974 (ICETESB 2014).

A Figura 2.11 mostra estes equipamentos quanto colocados próximos para realização de calibração.

Figura 2.11 - Espectrofotômetro Dobson.



Fonte: INPE (2021)

A Figura 2.12 apresenta dois modelos de detectores de ozônio no ar que podem ser encontrados no comércio a custo moderado. Ambos utilizam sensores do tipo eletroquímico. O modelo Smart O₃ (a), possui faixa de medição de 0 a 5 ppm e tempo de resposta de 1,5 s, e o modelo O₃ Handheld (b), de 0 a 5 ppm de faixa de medição e tempo de resposta de 15 s.

Figura 2.12 – Modelos portáteis de detectores de ozônio no ar. Modelo Smart O₃(a) e Modelo O₃ Handheld (b).



Fonte: O autor

2.6. Fontes renováveis de energia – energia solar fotovoltaica

A média anual diária da irradiação solar mostra que a região do Triângulo Mineiro poderia produzir até cerca de 6 kWh/m².dia (IBGE, 2014), suficientes para atender a demanda de energia de 180 kWh/mês em uma residência durante um dia. Tal potencial ressalta a relevância da utilização de energia solar como fonte alternativa na geração de gases verdes, como o hidrogênio, oxigênio e ozônio.

Os módulos fotovoltaicos e inversores ligados à concessionária elétrica compõem o sistema *on-grid*, por sua vez os módulos, controladores de carga, baterias e inversores nos sistemas independentes compõem o sistema *off-grid* (Alves, 2019).

O termo “fotovoltaico” tem origem na junção das palavras foto, relacionada à luz e a palavra *volt*, originada no sobrenome do físico Alessandro Volta, italiano inventor da pilha elétrica (Loys, 2019). O termo descreve a geração de tensão elétrica ou eletricidade em geral, a partir da luz. Um conjunto de fatores favorece a adoção da energia solar fotovoltaica atualmente, como a queda no custo das células fotovoltaicas de USD 76,00 em 1977 a USD 0,10 em 2020, devido aos avanços da tecnologia e do aumento da escala de produção (ADEEL, 2023).

2.6.1. Módulos fotovoltaicos

Os módulos são formados por células fabricadas a partir de materiais semicondutores dopados para gerar elétrons livres. Esta etapa do processo de fabricação conhecida como *dopping*, envolve a deposição eletroquímica para criar semicondutores do tipo P e N, geralmente com elementos químicos combinados. Neste processo, as características eletrônicas dos materiais como silício (Si), germânio (Ge), arsenieto de gálio (GaAs), sulfeto de cádmio (CdS), índio (In) e gálio (Ga), são alteradas de semicondutores para componentes eletrônicos ativos e condutibilidade controlada (Mattos, 2023). As junções entre os materiais tipo P e tipo N geram uma barreira de potencial que, quando superada pela energia dos fótons da radiação solar, libera elétrons, gerando corrente elétrica (Reis, 2022; Mattos, 2023).

Existem diferentes tipos de células solares, como monocristalino, policristalino e amorfo, com monocristalino sendo mais eficiente. As células são conectadas em série para aumentar a tensão e em paralelo para aumentar a corrente do módulo.

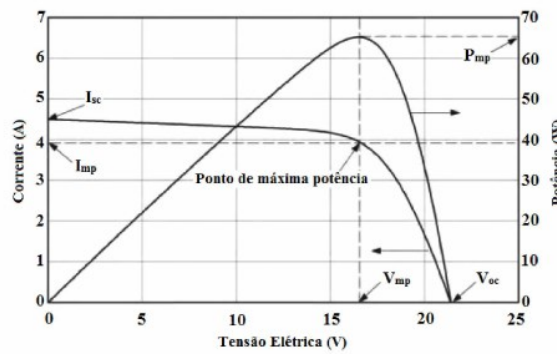
Em 2015 foi estabelecido o recorde de eficiência energética – taxa de conversão da energia solar em energia elétrica - com 46% utilizando técnica de multi-junção, resultado da união de esforços da Soitec, CEA-Teti (França) e Fraunhofer (Alemanha) (ADEEL, 2023).

A relação entre corrente e tensão tem a sua variação de acordo com a Equação (2.34) produzindo resultados conforme demonstrado no gráfico da Figura 2.13, também denominado curva característica (Pinho; Galdino, 2014).

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV + IR_s}{n_i k T} \right) \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.34)$$

Na Equação (2.34), R_s é a resistência em série e R_p a resistência em paralelo nos pontos da junção p-n, I_L é a corrente gerada; I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo; n_i é o fator experimental adimensional entre 1 e 2, que mostra o quão ideal é o diodo; q é a carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C); k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) e T é a temperatura absoluta (K) (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 2.13 – Curvas de corrente e potência para um módulo fotovoltaico.



Fonte: Duffie e Beckman (2013).

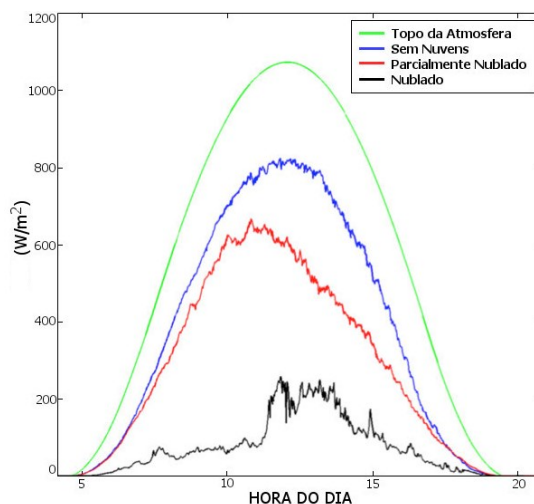
A Equação (2.35) define eficiência de uma célula solar dada pela razão entre a potência gerada e a potência solar, onde A_c é a área da célula em m^2 , G é a irradiância solar em W/m^2 e P_{mp} é a potência de pico da célula em W_p (Pinho; Galdino, 2014).

$$\eta = \frac{P_{mp}}{A_c G} 100 \quad (2.35)$$

A irradiância solar depende da posição geográfica e do ângulo de inclinação da placa com relação ao horizonte e da posição da terra no movimento de diário de rotação como mostra a Figura 2.14. Além disso, o movimento de translação da terra causa variações na declinação solar da ordem de $23,45^\circ$ nos solstícios até nula nos equinócios (Soares, 2020).

Situado no hemisfério sul, o Triângulo Mineiro tem inclinação de 20° e orientação para o norte geográfico como condições ideais de posicionamento das placas solares.

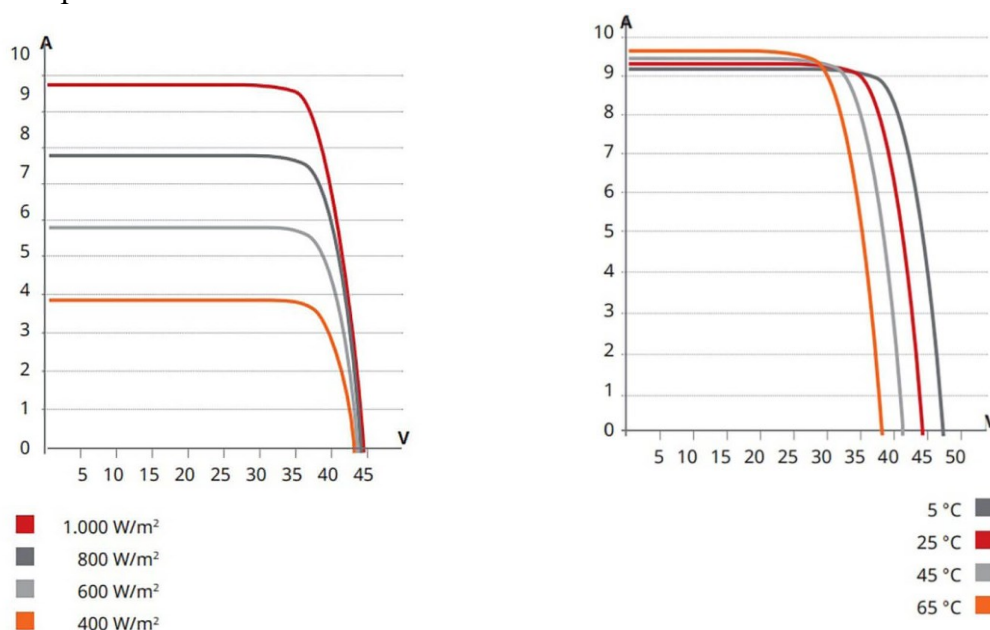
Figura 2.14 – Curvas de irradiância solar diárias.



Fonte: GeoDesing Internacional, NRLE, Folden, CO (2016).

A corrente elétrica produzida em um painel fotovoltaico é sensível em maneira direta a irradiância solar, conforme apresentado na Figura 2.15a. Pode-se notar também que o aumento da temperatura reduz a tensão elétrica, resultando na redução da eficiência (Figura 2.15b) (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 2.15 – Curvas de Corrente e Tensão. a) em função da irradiância solar e b) em função da temperatura.



a)

b)

Fonte: E4 Energias Renováveis (2023).

2.6.2. Inversor

O inversor é o componente responsável pela conversão da energia CC, oriunda da placa fotovoltaica para uma energia CA, com frequência e nível de tensão solicitada pela rede ou carga ao qual se conecta (Oliveira, 2023). Usualmente, opera com tensão de entrada de 40 a 1000 V CC e tensão de saída de 220V CA bifásico, com frequência de 60 Hz, informação amplamente disponibilizada nos *data-sheets* dos fabricantes.

2.6.3. Controlador de carga

Os controladores de carga conseguem aperfeiçoar a eficiência da geração de energia pelos painéis fotovoltaicos. Também são capazes de gerenciar a energia consumida pelo conjunto da carga e da bateria. Isso garante uma carga e descarga segura e eficiente, preservando a vida útil das baterias dentro de seus ciclos de carga (Ribeiro, 2023).

Existem duas tecnologias concorrentes para a fabricação dos controladores de carga: o tipo rastreamento do ponto de máxima potência MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) e a modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) (Moraes, 2018). Vale destacar que em sistemas *off-grid* ou mistos é necessário o uso de baterias e, portanto, o uso de controladores de carga para melhorar as condições destes sistemas (Hidalgo, 2023).

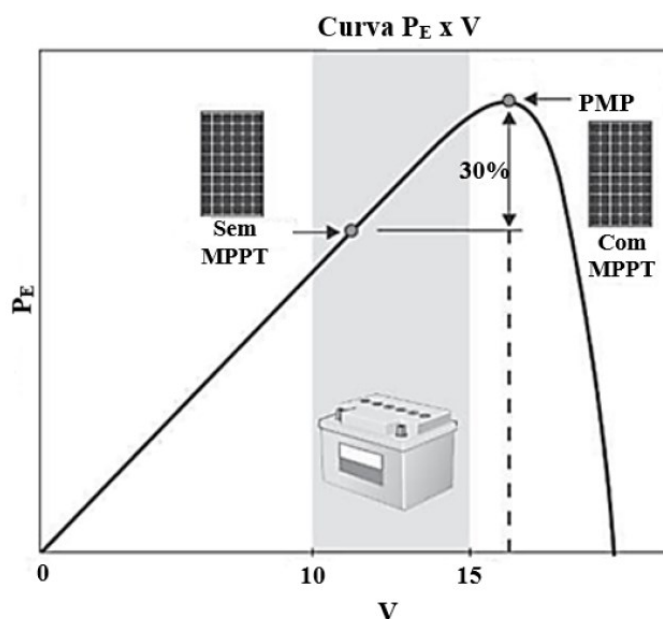
De acordo com Villalva (2015), com o uso da tecnologia MPPT pode-se ter um ganho de até 30% de energia com relação aos demais tipos de controle, pois há um aperfeiçoamento na carga da bateria utilizando o ponto de máxima potência da curva potência e tensão em um painel solar fotovoltaico. O algoritmo MPPT altera a relação de tensão e a corrente aumentando proporcionalmente a corrente quando a tensão de saída é diminuída (Rocha, 2023). A Figura 2.16 mostra a otimização no ponto máximo da curva de potência e tensão em um módulo fotovoltaico

Segundo Cunha (2021), o sistema *off-grid* permite a operação da eletrólise em uma faixa de corrente mais constante. Nos momentos em que a energia fornecida pela placa fotovoltaica não era suficiente para suprir a demanda da célula, o controlador de carga acionava a bateria para fornecer a energia necessária. Isto pode ser observado claramente no

trabalho de Palhares em 2016, onde a irradiância solar irregular durante o dia causa variações proporcionais nos experimentos de produção de gases.

A Figura 2.16 compara a ação de controladores de carga com e sem MPPT na curva de potência elétrica em função da tensão de saída dos módulos fotovoltaicos.

Figura 2.16 – Ponto de máxima potência em sistema fotovoltaico.



Fonte: Cunha (2021).

Importante mencionar que os estudos demonstram que a tecnologia MPPT é mais eficiente, porém, tem um custo mais elevado do que a tecnologia PWM (Schiavon, 2012; Ramalho, 2023; Rocha, 2023).

2.6.4. Bateria

Nos sistemas fotovoltaicos isolados, o armazenamento de energia é crucial para suprir a demanda em períodos de baixa ou nula geração solar, como à noite, em dias nublados ou em momentos para atender a demanda (Pinho; Galdino, 2014).

As baterias estacionárias são projetadas para suportar ciclos de descarga profunda e longos períodos de uso, sendo ideais para os sistemas fotovoltaicos. Embora as baterias automotivas sejam mais baratas, elas não são adequadas para sistemas fotovoltaicos devido à sua construção e quantidade de ciclos de carga limitados. Existem baterias de até 6000 ciclos

de carga (Silva Neto, 2019). Se considerar um ciclo diário, são mais de 16 anos de vida útil, mas o alto custo deve ser avaliado. Desta forma, a escolha das baterias depende das necessidades do sistema e da demanda diária de energia.

A dimensão física desses arranjos de baterias é proporcional à necessidade de autonomia de energia do sistema (Pinho e Galdino, 2014). A demanda de energia diária é a somatória das energias de cada carga conectada ao sistema conforme a Equação (2.36) (Schiavon, 2012).

$$E_c = 1,3 \sum \left[\left(\frac{P_i n}{12} \right) t_i \right] \quad (2.36)$$

sendo:

E_c – Energia diária consumida [Ah], com fator de correção de 30%.

P_i – Potência consumida por cada carga [W].

n – Quantidade de cargas com o mesmo consumo e tempo de uso.

t_i – Tempo de uso diário [h].

12 – Tensão nominal das baterias [V].

O fator de correção é devido a perda de rendimento, degradação natural da bateria e painéis, temperaturas, acúmulo de poeiras, conexões e demais fatores relacionados

Diariamente considera-se uma insolação de 6 kW/m² durante 5 horas para a nossa região do Triângulo Mineiro. A Equação (2.38) define a quantidade de corrente mínima a ser fornecida pelos painéis solares na variável I_p .

$$I_p = \frac{E_{cc}}{5} \quad (2.38)$$

A corrente suportada pelo controlador de carga deve ser superior a corrente total dos painéis, podendo ser configurados mais de dois controladores em série ou paralelo conforme a necessidade de corrente dos painéis de tensão das baterias.

O banco de baterias pode ser determinado com base na sua autonomia em dias e uma profundidade de carga de 50 a 70%. Considerando a profundidade de 70%, a Equação (2.39)

nos dá a capacidade desejada do banco dada pela variável Cap e a variável Aut é a correspondente a autonomia em dias.

$$Cap = \left(\frac{E_C 1,1}{0,7} \right) Aut \quad (2.39)$$

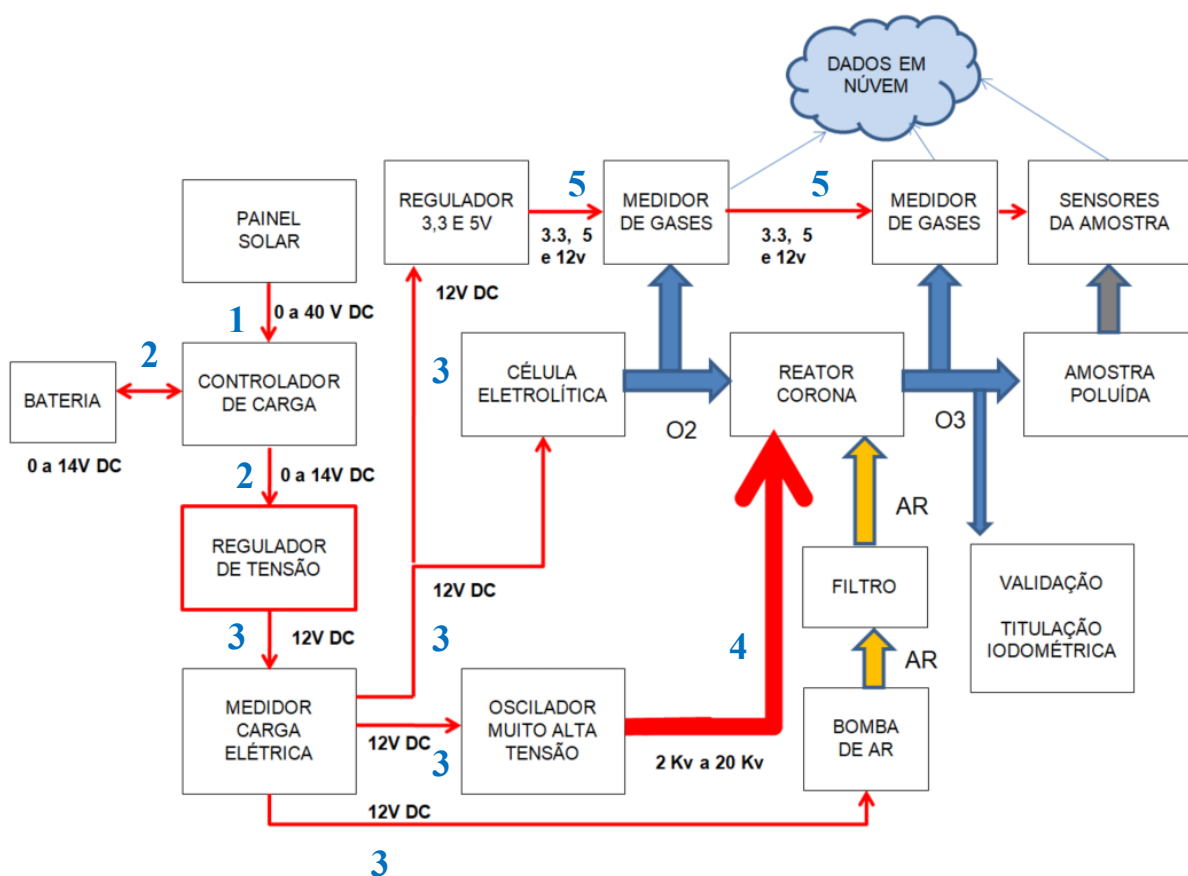
Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica necessária para o melhor entendimento da produção de ozônio por eletrólise e do efeito corona alimentados com uso de energia solar fotovoltaica. O próximo capítulo apresenta a metodologia utilizada para a construção do protótipo e do planejamento experimental.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta inicialmente a descrição do gerador solar fotovoltaico projetado para atender a demanda elétrica dos reatores, com o painel solar, o controlador de carga e a bateria. Em seguida foram descritos o material escolhido, os eletrodos, eletrólito e material da cuba escolhidos para a construção da célula eletrolítica. Na sequência foram descritos o material, tecnologia empregada, tipos de excitadores para gerar alta tensão elétrica e formatos utilizados na construção do reator de ozônio. Na última etapa final deste capítulo, foram apresentados o planejamento experimental com o uso de sensores e as técnicas de volumetria e iodometria.

As etapas de desenvolvimento do protótipo estão detalhadas no diagrama de blocos da Figura 3.1.

Figura 3.1 - Diagrama de blocos do reator de ozônio.



Fonte: O autor.

A numeração da Figura 3.1 indica o fluxo da corrente elétrica e as tensões elétricas nos pontos, sendo: 1) de 0 a 40 V, 2) de 0 a 14 V, 3) 12 V estabilizados, 4) alta tensão de 2 kV a 20 kV e 5) tensões de 3,3, 5 e 12 V alimentando os sensores.

Todo o projeto foi baseado em energia solar fotovoltaica e todas as tensões elétricas necessárias a cada etapa foram convertidas eletronicamente.

O desenvolvimento foi realizado em etapas de forma cronológica conforme descrito nas próximas seções, iniciando na montagem dos equipamentos, conexão entre os geradores e reatores, preparação e caracterização de reagentes e sensores e, por fim, os testes quantitativos e qualitativos.

3.1. Lista de reagentes e equipamentos

Os materiais entre sensores, componentes eletrônicos, medidores, sensores, vidraria foram agrupados em centros de custo e demonstrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Planilha total de reagentes, materiais, equipamentos e diversos.

SUBGRUPO	DESCRIÇÃO	QTDE
APARELHOS	Modus Mini Balança Digital Alta Precisão 0,01g Até 50g	1
APARELHOS	Balança Digital Alta Precisão 5Kg	1
ELETRONICO	Ferro De Solda Bivolt 80w Ajustável Regulagem Digita	1
ELETRONICO	Kit Protoboard 400 Pontos + Jumper Mxm + Mxf	1
ELETRONICO	Protoboard Breadboard De 830 Pontos Furos Para Arduino Pic	4
MEDIDOR	MEDIDOR OZONIO	1
MEDIDOR	MEDIDOR DIGITAL CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIA	1
MEDIDOR	OSCILOSCOPIO DSO-TC3	1
SENSOR	Sensor De Fluxo De Precisão, 75 A 570ml/min	2
VIDRARIA	Proveta 1000 ml Pp Autoclavável - Nalgon	3
VIDRARIA	Kit Completo De Becker + Proveta + Pisseta Marca Nalgon	1
VIDRARIA	Pinça Dupla Com Mufa Suporte Para Buretas	2
VIDRARIA	Bureta Graduada Torneira De Teflon 100ml	1
VIDRARIA	SUPORTE BURETA AÇO INOX	3
ELETRONICO	Esp32 Wroom Devkit V1	2

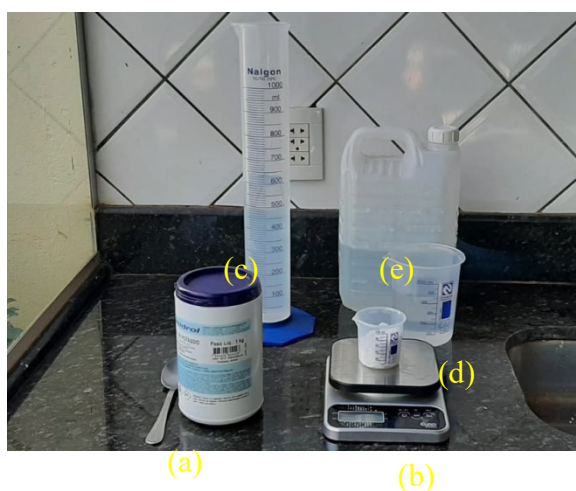
ELETRONICO	Jumper Macho Macho 65 Unidades	1
ELETRONICO	Placa Esp32 Wifi Bluetooth Com Esp32-wroom-32d + Base	2
ELETRONICO	Regulador De Tensão Lm1117 3,3v - 05 Peças Para Projetos	1
ELETRONICO	2x Regulador De Tensão 7805 5v Para Projetos	3
ELETRONICO	Esp32 Wroom 32d Devkit V4 38 Pinos	3
ELETRONICO	Módulo Regulador De Tensão Ajustável Dc-dc Lm317	2
ELETRONICO	Display Lcd 16x2 Serial I2c Com Backlight Azul	1
ELETRONICO	Módulo Serial I2c Para Display Lcd 16x2 E Display Lcd 20x4	1
ELETRONICO	Kit 10 Dissipador Alumínio 20mm P/ Transistor To220 To218	1
ELETRONICO	Caixa Plástica Patola Pb115 Preta	1
ELETRONICO	Dissipador De Calor Alumínio To-220 16x27x20mm - Kit C/ 10pç	1
ELETRONICO	Mini Bomba Água Submersa P/ Arduino 3v A 6v Dc 120l Micro	2
ELETRONICO	Fonte Mb102 Para Protoboard	2
ELETRONICO	FONTE DC AC 2KV	2
INSUMOS	Sensor De Ph Ph4502c Com Eletrodo Sonda Bnc	1
REAGENTES	Iodeto De Potássio Pa Acs 100g	10
REAGENTES	Tiosulfato De Sódio 5h2o Pa 1 Kg	2
REAGENTES	Hidróxido De Potássio Koh - Potassa 86% Mín. 1 Kg	10
REATOR	PLACAS INOX 304 11X11	6
REATOR	PLACAS INOX 304 12X12	6
REATOR	Tela Para Calha E Ralos Em Alumínio - 1,40m X 1,00m	1
REATOR	CILINDROS AÇO INOX 30cm bitolas diversas	6
REATOR	SUPORTE MOVEL PLACA SOLAR	1
REATOR	MULTIPLICADOR DE TENSÃO 24KV	1
REATOR	MULTIPLICADOR DE TENSÃO 60KV	1
REATOR	GERADOR OZONIO 60GX48G, 20 G, 30 G	1
SENSOR	Sensor De Gás Mq-2 Mq-3 Mq-4 Mq-5 Mq-6 Mq-7 Mq-8 Mq-9 Mq-135	1
SENSOR	Sensor De Corrente Acs712 30a	2
SENSOR	Sensor De Tensão Dc 0v A 25v	2
SENSOR	Dht11 Modulo Sensor Temp Umidade P/ Arduino / Esp32 / Pic	2
SENSOR	Sensor De Corrente Não Invasivo Sct-013 30a	1

SENSOR	Sensor De Luminosidade Tsl2561	2
SENSOR	Sensor De Temperatura E Umidade Dht22 Am2302 Para Arduino	2
SENSOR	Sensor De Fluxo Vazão Yf-s401 1/8 0 A 6 L/min 0,8 Mpa	2
SENSOR	Sensor De Turbidez Arduino Para Monitoramento Da Água	2
SENSOR	SENSOR MQ 131	6
SENSOR	SENSOR MICS-4514, MG 6814	1
DIVERSOS	MODULO SOLAR 365 Wp	1
DIVERSOS	CONTROLADOR DE CARGA 40 A	1
DIVERSOS	MANGUEIRAS, CONEXÕES, FIOS ELÉTRICOS, CONECTORES	1

3.1.1. Preparação do eletrólito da célula eletrolítica

A escolha do eletrólito baseou-se nas análises de Palhares (2016) com eletrodos de aço inoxidável 316, onde a vazão de gás foi superior aos eletrodos de grafite e monel 400. Além disso, a literatura confirma a eficiência do eletrodo de aço inoxidável 316 em eletrólises aquosas alcalinas (Cunha, 2021). A Figura 3.2 apresenta a preparação do eletrólito hidróxido de potássio (KOH), cuja escolha foi baseada no trabalho de Cunha (2017), onde foi constatado que as maiores vazões de gases de eletrólise foram obtidas quando se utilizou hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito, em comparação com os eletrólitos de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de lítio (LiOH) (Cunha, 2017).

Figura 3.2 – Preparação da solução de hidróxido de potássio (KOH) nas concentrações de 1 até 8 mol.L⁻¹, com variações a cada 1 mol.L⁻¹: (a) reagente KOH; (b) balança com Becker 50 mL pesando 56 g de KOH; (c) proveta 1000 mL; (d) becker 500 mL; (e) água destilada;



Fonte: O autor

Uma unidade da célula eletrolítica foi submetida diretamente à saída do controlador de carga, o medidor de corrente registrou um valor de 55 A. Imediatamente, a proteção interna de sobrecorrente foi acionada automaticamente e a geração de energia elétrica foi desligada. Com o objetivo de prevenir esse efeito indesejável, foram adicionadas células eletrolíticas em série, o que resultou em uma corrente elétrica compatível com o sistema solar fotovoltaico.

Com a adição de células consecutivamente uma a uma na configuração em série, de 1 até 5 células e variando-se a concentração do eletrólito de 1 até 8 mol.L⁻¹, com aumento a cada 1 mol.L⁻¹, ficou estabelecido o número de 3 células em série com concentração de 7 mol.L⁻¹ de KOH com uma corrente de trabalho inferior a 20 A. A concentração escolhida resultou em uma vazão de O₂ próxima de 490 mL/min², valores desejáveis para o experimento.

3.1.2. Preparação de soluções para iodometria

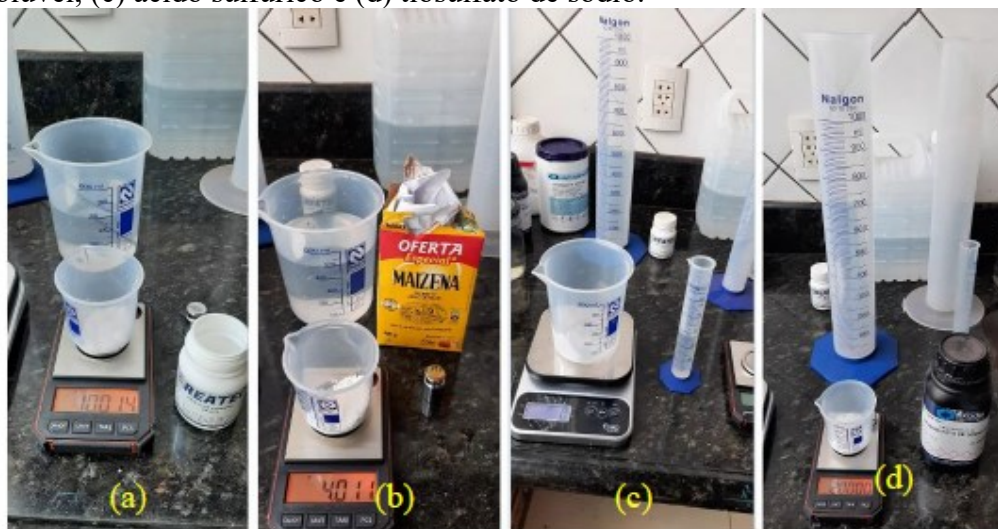
O método iodométrico por meio de titulação indireta utilizado neste trabalho para determinação do volume de ozônio segue a técnica de referência descrita em APHA (1995) descrita a seguir:

1. Submeter 500 mL de iodeto de potássio por 3 min ao borbulhamento de ozônio (solução de cor transparente para cor laranja);
2. Adicionar 8 mL da solução de ácido sulfúrico;
3. Titular com tiossulfato de sódio (até a cor amarelo claro)
4. Adicionar 5 mL da solução de amido solúvel (a solução se tornará azul escuro)
5. Titular com tiossulfato de sódio (até que a solução se torne transparente)
6. Os cálculos foram realizados com as Equações 2.29 e 2.30.

Na preparação das soluções foram seguidas as seguintes condições, demonstradas na Figura 3.3:

- A) Solução de iodeto de potássio (0,12 mol.L⁻¹): 10 g de KI em 500 mL de água destilada.
- B) Solução de amido solúvel (5%): 4 g de amido e 450 g de água destilada, fervido por 5 min.
- C) Solução de ácido sulfúrico: 27,6 mL de H₂SO₄ 1 M, água destilada até completar 500 mL.
- D) Solução de tiossulfato de sódio: 20 g de Na₂S₂O₃ (0,1 N) em 1000 mL de água destilada.

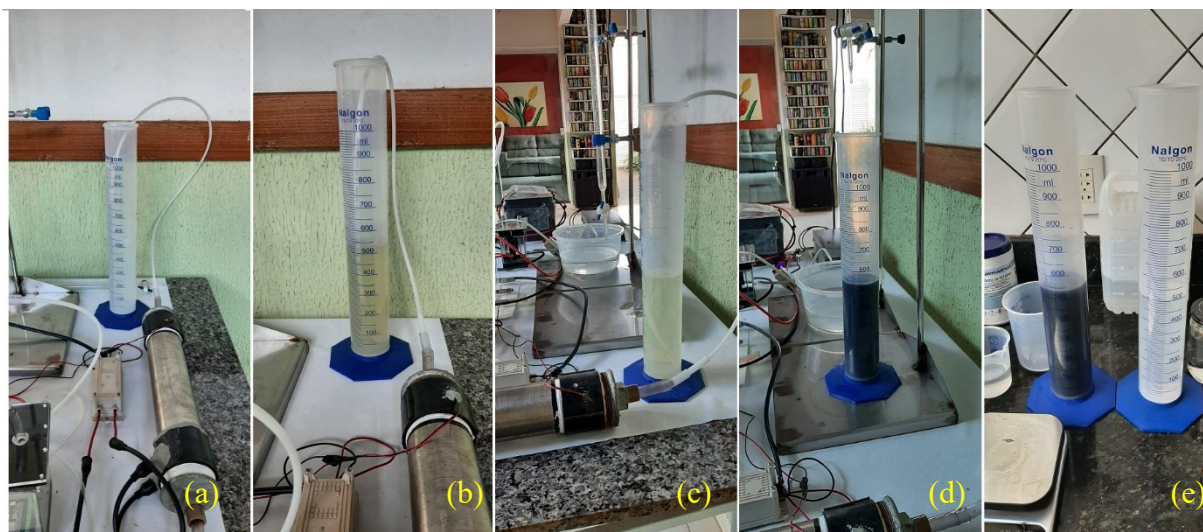
Figura 3.3 – Preparação dos reagentes para a titulação: (a) iodeto de potássio, (b) amido solúvel, (c) ácido sulfúrico e (d) tiosulfato de sódio.



Fonte: O autor.

A Figura 3.4 demonstra os procedimentos da titulação, iniciando Na Figura 3.4a com o borbulhamento da solução inicial com 500 mL de iodeto de potássio. A Figura 3.4b demonstra a solução de iodeto de potássio com ácido sulfúrico após 3 min de borbulhamento com ozônio apresentando coloração alaranjada.

Figura 3.4 – Procedimentos da titulação: (a) aplicação de ozônio por borbulhamento, (b) solução com 3 min de aplicação de ozônio, (c) primeira titulação, (d) adição de amido solúvel e (e) resultado final após a segunda titulação.



Fonte: O autor.

A Figura 3.4c demonstra a solução resultante da primeira titulação com tiosulfato de sódio. A Figura 3.4d demonstra a adição da solução com amido solúvel, tornando a coloração azul escuro. A Figura 3.4e apresenta a solução final de cor transparente após a segunda titulação com tiosulfato de sódio, onde o volume de ozônio pode ser calculado a partir do volume de tiosulfato de sódio titulado, através da Equação (2.29).

A Figura 3.5 mostra as fases da titulação, com tempos de 1, 1,5, 2 e 3 min, nas quais se observou a alteração da cor da solução de azul escuro para transparente.

Figura 3.5 – Procedimentos da titulação – fases da segunda titulação: (a) 1 min, (b) 1,5 min, (c) 2 min, (d) 3 min.



Fonte: O autor.

3.2. Gerador solar fotovoltaico

O projeto de um sistema gerador de energia solar fotovoltaica do tipo *off-grid* foi elaborado e executado para atender a demanda da presente dissertação utilizando os seguintes equipamentos:

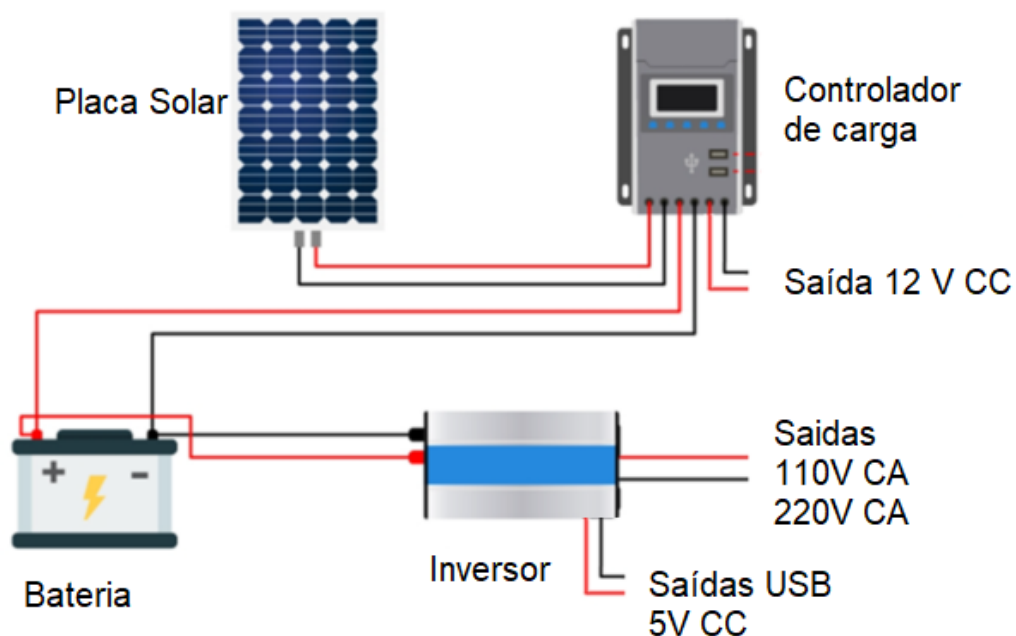
- Uma placa solar fotovoltaica de 365 Wp da marca Canadian Solar, com tensão de operação de 39,8 V, corrente de operação de 9,18 A (modelo CS3P-365P) e dimensões de 199,8 cm x 99,2 cm.

- Um controlador de carga (Modelo Tracer-4210RN) do tipo MPPT com tensão de 12/24 V e corrente de 40 A, com potência máxima de 500 W em 12 V e 1000 W em 24 V, uma bateria da Marca Baterax, automotiva (modelo B45D), com capacidade de 45 Ah, tensão de 12 V e corrente de partida de 280^a.
- Um medidor de tensão, corrente, potência e energia da marca Peacefalr (modelo PZEM-051) com faixas DC de 0 a 100 V e de 0 a 100 A.
- Um inversor da marca Knup, com entrada DC 12 V e saída AC 110 V tipo senoidal com potência de 300 W

As conexões CC foram feitas com cabo solar isolado com 4 mm de espessura utilizando terminadores tipo garfo e pino. Na bateria foram utilizados dois terminadores universais tipo sapo de cobre parafusados e cobertos com parafina para mitigar o efeito da corrosão eletroquímica.

A Figura 3.6 demonstra o esquema simplificado de ligação elétrica entre a placa fotovoltaica, o controlador de carga e a bateria acumuladora de energia elétrica.

Figura 3.6 – Esquema de ligação do gerador solar fotovoltaico.



Fonte: O autor.

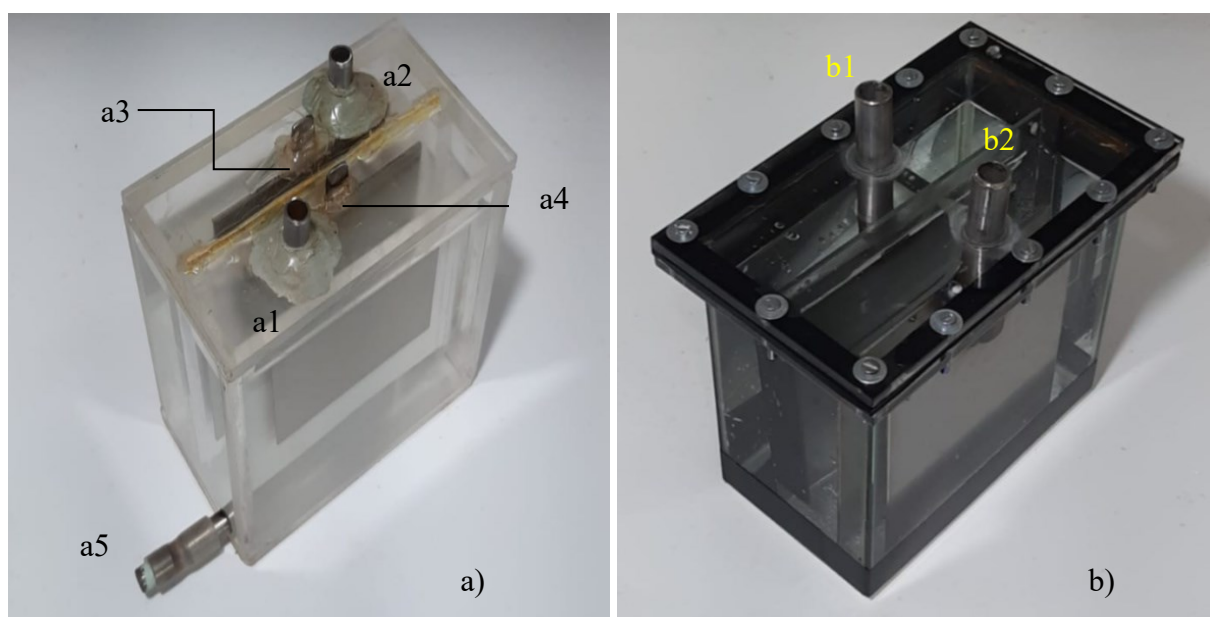
3.3. Construção da célula eletrolítica

Os primeiros testes foram realizados com uma célula eletrolítica retangular de acrílico, baseada no trabalho de Cunha (2021), com capacidade de 1,13 L, com geometria de 13,5 cm x 12,0 cm x 7,0 cm. A extremidade superior da célula foi projetada para receber as conexões elétricas necessárias, bem como, conter os dutos de passagem de fluidos. Paralelamente aos eletrodos foram ajustadas duas tubulações (diâmetro interno de 0,4 cm), de forma a permitir a saída de cada um dos gases produzido.

A célula possuía ainda duas saídas inferiores com diâmetro de 0,4 cm para a drenagem da solução eletrolítica. Houve a necessidade de fabricação da célula com vidro na espessura de 0,6 cm com as mesmas dimensões das células de acrílico, devido à elevada temperatura nos conectores dos eletrodos, o que poderia ocasionar a fusão e derretimento do acrílico e, conseqüentemente, o vazamento de gás.

A Figura 3.7 compara a célula eletrolítica utilizada como referência (Figura 3.7a) e a nova célula construída (Figura 3.7b), onde as principais diferenças estão no uso de um único tubo de aço inoxidável em cada polo, para entrada de energia e também para saída de gases. O dreno da célula modelo também foi suprimido no modelo novo para mitigar vazamentos.

Figura 3.7 – Célula eletrolítica: a) com paredes de acrílico e b) com paredes de vidro sendo (a1) e (a2) saída de gases, (a3) e (a4) eletrodos, (a5) dreno do eletrólito, (b1) e (b2) saída de gases, eletrodo e dreno.



Fonte: O autor.

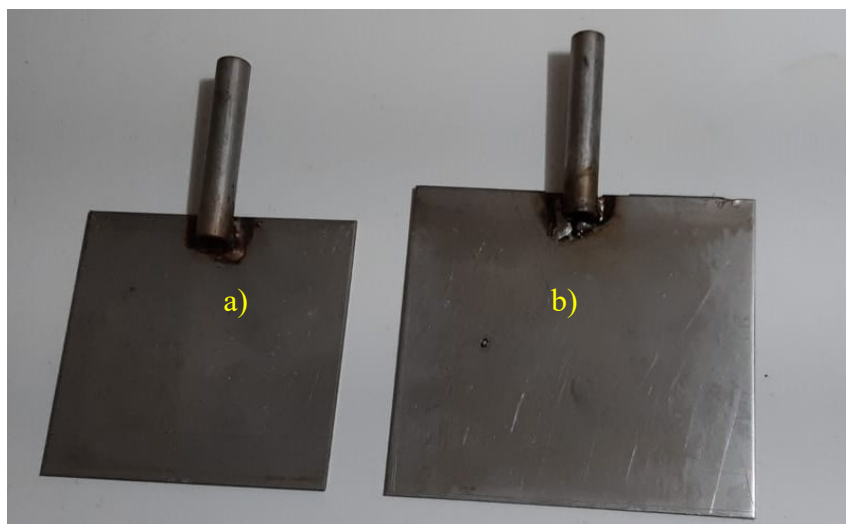
A vedação da célula de vidro foi feita em sua parte superior com 12 parafusos, porcas e arruelas de aço inoxidável que pressionavam uma cinta de borracha sintética de 4,0 mm de espessura e 2,0 cm de largura.

3.3.1. Os eletrodos

Os eletrodos foram fabricados em pares de formato quadrado de 9,0 cm x 9,0 cm e foram avaliadas variações de 10,0 cm x 10,0 cm, 11,0 cm x 11,0 cm e 12,0 cm x 12,0 cm para testes, utilizando placas de aço inoxidável 316 de 2,0 mm de espessura (Figura 3.4). Optou-se pelo uso do aço inoxidável devido ao custo baixo comparado com metais nobres, tais como prata, ouro e platina (Barco-Burgos et al., 2020). Estudos comprovam a eficiência dos eletrodos de aço inoxidável nas eletrólises aquosas alcalinas (Lavorante e Franco, 2016; Cunha, 2021).

A Figura 3.8 demonstra os eletrodos de aço inoxidável 316 utilizados nos ensaios. Na extremidade superior foram soldados tubos de aço inoxidável 316 e serviram para as conexões elétricas e também para saída dos gases produzidos.

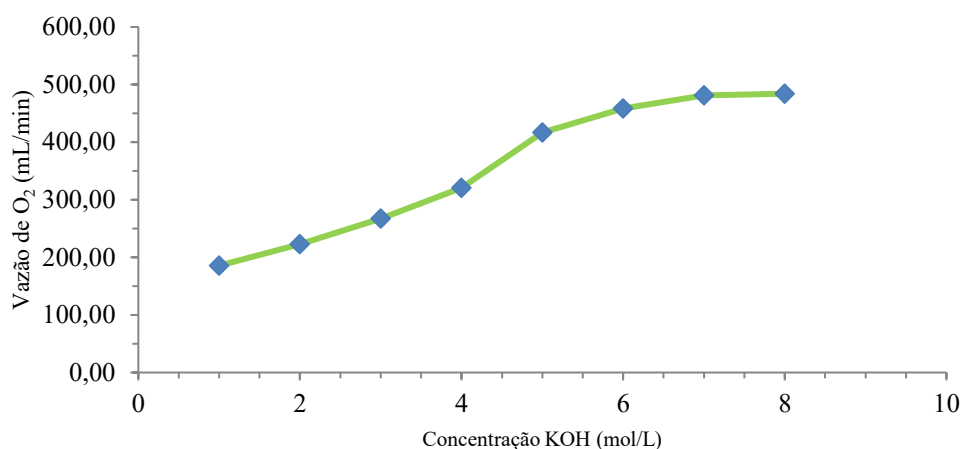
Figura 3.8 – Eletrodos de aço inoxidável 316 onde a) dimensões 10 x 10 cm e b) 12 x 12 cm.



Fonte: O autor.

A Figura 3.9 compara a vazão de oxigênio em uma configuração com 3 células eletrolíticas em série, em função da concentração de eletrólito de hidróxido de potássio (KOH) variando de 1 a 8 mol.L⁻¹.

Figura 3.9 - Comparação de vazão de O₂ em função da concentração de eletrólito e para configuração de 3 células eletrolíticas em série.



Fonte: O autor.

3.4. O reator de ozônio

O reator foi alimentado com oxigênio com alta pureza (maior que 98%) obtido através da eletrólise alcalina da água, e também o ar atmosférico (21%).

Estudos com diferentes métodos de produção de ozônio foram conduzidos fundamentando a escolha do método de descarga elétrica ou efeito corona como mais adequados para o protótipo (Maidana et al., 2015; Valdivia, 2019; Santana, 2024).

Os equipamentos eletrônicos testados para gerar tensões elevadas estão detalhados a seguir.

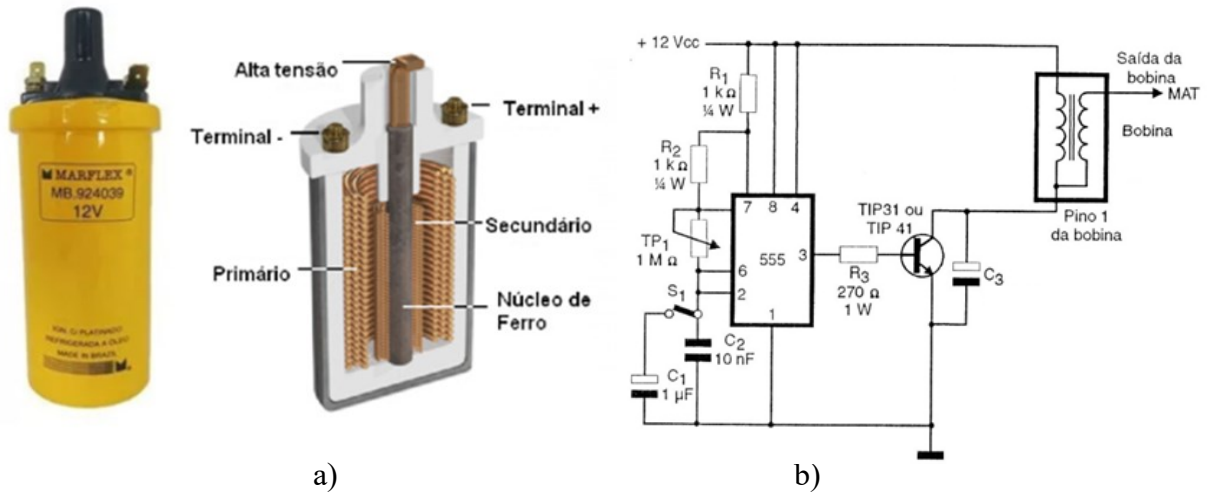
3.4.1. Geradores de alta tensão

O nível de tensão necessária para combinação das moléculas de oxigênio em ozônio deve ser suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar (30 kV/cm). Os dispositivos testados para a geração da alta tensão foram: (1) Bobina de Ignição automotiva, (2) *Flyback*, (3) Multiplicadores de tensão e (4) *Drivers* CC-CA.

3.4.1.1. Bobina de ignição automotiva

Para estabelecer o arco elétrico, foi testada inicialmente uma bobina de ignição automotiva da marca MARFLEX (modelo MB.924039) de 12 V própria para ignição a platinado e refrigerada a óleo, usada em veículos populares (Figura 3.10).

Figura 3.10- Bobina de ignição automotiva: a) Corte transversal e aspecto físico e b) circuito eletrônico padrão de excitação.



Fonte: Braga (2023).

Em sua bobina primária a tensão variou de 12 a 14,7 V, fornecidos através de um sistema eletrônico de chaveamento que simulou a função do platino no sistema de ignição automotivo convencional. A corrente injetada variou de 6 a 20 A e a frequência pode variar de 10 a 150 Hz de acordo com rotação do motor entre 10 a 10000 rpm elevando a tensão secundária para valores entre 25 e 45 kV. Este mecanismo pode fornecer até 240 W de potência elétrica para a câmara de reação de ozônio.

O circuito oscilador mostrado na Figura 3.7, consiste em um circuito integrado 555 alimentado com 12 V CC e o conjunto RC formado pelo potenciômetro TP1 e os capacitores C1 e C2 que controlam a frequência de oscilação variando de 1 Hz a 48 kHz. Este sinal é entregue no enrolamento primário da bobina através de um transistor de média potência montado em um dissipador. Foram testados transistores TIP31, TIP 41 convencionais e transistores de efeito de campo IRF540, todos montados em dissipador de calor.

3.4.1.2. *Flyback*

Foram testados também os *flybacks* de TVs de tubo. O modelo selecionado consiste em um *kit driver* 12-30V ZCS (interruptor de zero tensão) *coil flybay* composto de um driver e a bobina de alta tensão. A bobina tipo *flyback* possui uma tecnologia já ultrapassada para aplicações em televisores, mas que pode ser utilizada em aplicações diversas que requerem

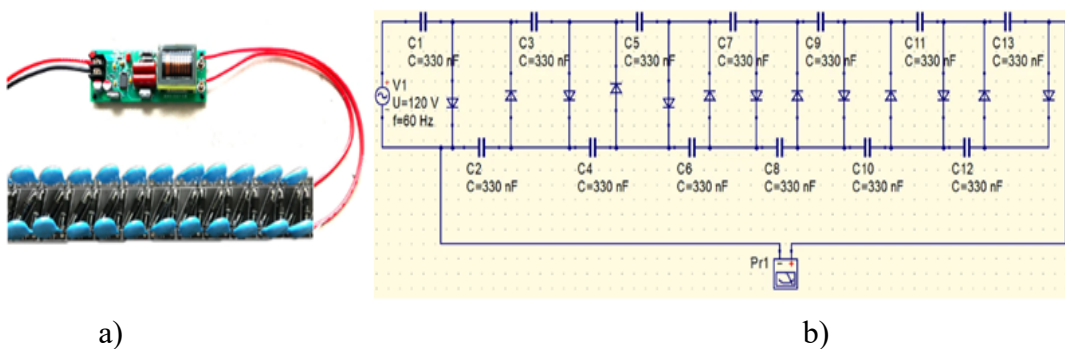
3.4.1.3. Multiplicadores de tensão

A tecnologia de multiplicadores de tensão sem uso de bobinas foi avaliada com os modelos DY-PA com aumento de 24 vezes a tensão de entrada.

Estes módulos usaram diodos e capacitores configurados em cascata de maneira que a tensão acumulada em um capacitor de soma com a tensão acumulada no capacitor vizinho multiplicado o valor da tensão de entrada pelo número de estágios em série. As tensões individuais nominais foram de 6 kV tanto para os diodos quanto para os capacitores. Como não há transformador acoplado, o custo foi reduzido e mesmo assim apresenta bom desempenho. A saída pode fornecer até 60 kV, para uma entrada de 1 a 2 kV, fornecidos por um *driver* adicional. Este *driver* foi necessário para o uso com alimentação em CC, que a transforma em CA para a entrada adequada no multiplicador. Também foi utilizado um multiplicador de tensão de 8 vezes a tensão de entrada com capacidade de fornecer até 24 kV.

A Figura 3.13 apresenta o esquema eletrônico do *driver* e a sua montagem em placa de circuito impresso, na qual cada capacitor se carrega com o valor da tensão elétrica de entrada e a saída é calculada como a multiplicação do número de capacitores pelo valor da tensão elétrica acumulada em um capacitor.

Figura 3.13. Multiplicador de tensão com diodos: (a) *driver* e placa montada com diodos e capacitores (b) diagrama eletrônico do módulo multiplicador.



a)

b)

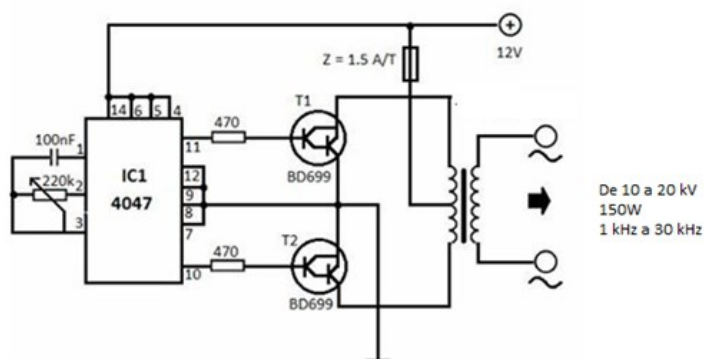
Fonte: O autor

3.4.1.4. Drivers CC-CA MAT

Foi testado também o *driver* de excitação CC-CA com entrada de 12 V DC e saída de 10 a 20 kV AC elevado por uma bobina acoplada conforme mostra o diagrama eletrônico na Figura 3.14a. Estes circuitos também são conhecidos como inversores de alta tensão ou

boost, tem como base um oscilador com entrada CC 12V, como os *drivers* anteriores, mas dotados de uma bobina que tem saída de tensão na faixa desejada de 10 a 60 kV. O circuito foi adquirido a baixo custo já montado no mercado como mostra a Figura 3.14b.

Figura 3.14. Modelo de gerador MAT utilizado no projeto. (a) diagrama eletrônico (b) produto montado já disponível no mercado



(a)



(b)

Fonte: Folhas de dados dos fornecedores.

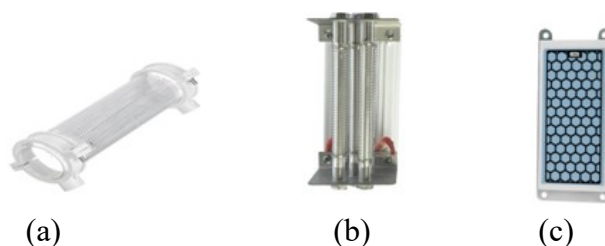
Estes circuitos também são conhecidos como inversores de alta tensão ou *boost*. Possuem como base um oscilador com entrada CC 12V, como os *drivers* anteriores, e dotados de uma bobina que tem saída de tensão na faixa desejada de 10 a 60 kV.

3.4.2. Construção do reator de ozônio

A alta tensão obtida nos métodos testados na etapa anterior foi submetida ao reator de ozônio propriamente dito, onde as moléculas de oxigênio foram combinadas pela energia fornecida em níveis de tensão para vencer a rigidez dielétrica do ar ou da massa de oxigênio de pureza elevada.

Quanto ao formato geométrico, foram testadas as formas retangulares, múltiplos cilindros e cilindro único com e sem núcleo. A Figura 3.15 detalha estas formas construtivas disponíveis no mercado e utilizadas como referência.

Figura 3.15. Formatos de reatores disponíveis no mercado. (a) cilindro único, (b) cilindros múltiplos, (c) retangular plano.



Fonte: O autor.

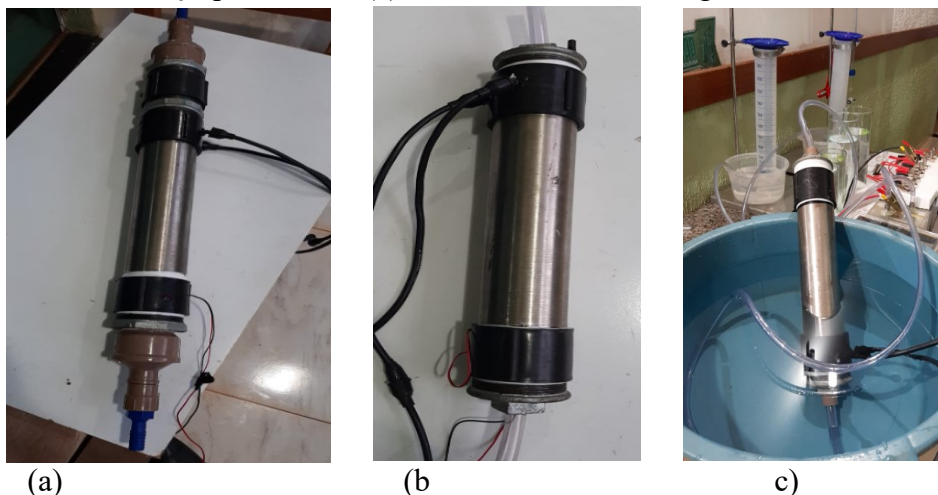
O formato geométrico utilizado neste trabalho foi o cilíndrico composto por um tubo externo de aço inoxidável de 3” de diâmetro e 4 mm de espessura denominado pólo 1, permitindo robustez mecânica e resistência ao poder oxidante do oxigênio e do ozônio. Este formato mostrou-se prático para uso de conexões terminais disponíveis em lojas de materiais de construção ou de ferragens. Diretamente nas extremidades do cilindro externo, foram instaladas conexões direcionando o fluxo do ozônio para os aparatos de medição de vazão e concentração. Para os demais formatos foi necessário, desenvolver uma cápsula para conter e direcionar o gás.

A Figura 3.16 mostra duas versões para o reator de ozônio. A Figura 3.16a apresenta o reator com luvas de PVC rosqueáveis na entrada e na saída, conectadas a redutores de 3” para 3/8” onde mangueiras de silicone foram presas sem dificuldade através de abraçadeiras. A Figura 3.16b mostra a segunda versão, com conexões terminais de aço galvanizado com furos de 3/8”, onde as mangueiras de silicone foram inseridas por pressão mecânica. Ambas as versões apresentaram vazamento de ozônio, mesmo submetidas a pressão atmosférica nas situações de injeção de oxigênio do ar ou conectadas diretamente na saída de oxigênio da célula eletrolítica, como demonstra a Figura 3.16c. A solução empregada para sanar tal efeito negativo, foi utilizar maior quantidade de juntas do produto “veda-rosca” nas conexões.

Em cada uma das luvas do reator foi adaptado um micro ventilador de 12 V e 0,5 A, de 3”, com a finalidade de causar turbulência no fluxo da mistura de gases dentro da câmara e avaliar sua influência na eficiência na produção do ozônio O_3 .

As ligações elétricas para entrada de alta tensão e para a alimentação dos ventiladores foram feitas através da luva de PVC e dos orifícios de 2 mm de diâmetro e vedados com cola de silicone. Os reatores finalizados e a simulação para o teste de vazamento de gás estão apresentados na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Reatores finalizados. (a) versão 1 com conexões de PVC, (b) versão 2 com conexões de aço perfuradas, (c) teste de vazamento de gás.

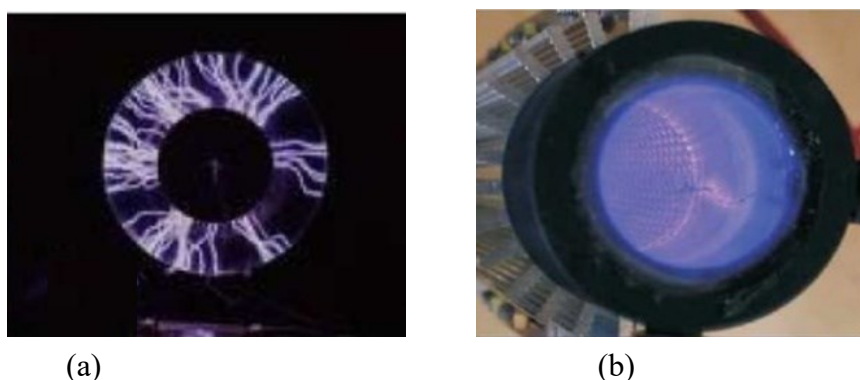


Fonte: O autor.

Para o pólo 2, sempre concêntrico e internamente ao primeiro, foi projetado um cilindro vazado na forma de tela também de aço inoxidável, com furos de 0,4 mm. Os cálculos para o dimensionamento dos tubos, justificando a distância entre os pólos e o diâmetro de cada pólo, estão demonstrados no Apêndice I.

O uso de tela para o pólo interno facilitou a distribuição uniforme dos arcos de descarga corona, tornando homogênea a produção do ozônio, como mostrado na Figura 3.14b, ao contrário do metal liso e compacto da Figura 3.17a. Isso se deve ao fato de que o metal com superfície lisa apresenta irregularidades imperceptíveis ao olho nu mas não ao fluxo de corrente, que sempre escolherá o caminho de menor resistência entre dois pontos. No caso, as irregularidades do metal apresentam picos onde a distância entre os eletrodos é menor.

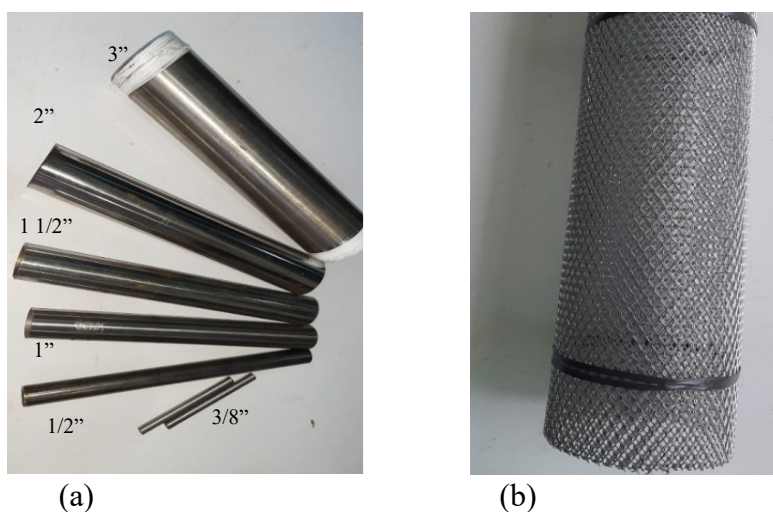
Figura 3.17 - Foto dos arcos formados no reator. (a) reator com tubo de aço inoxidável liso e (b) reator com tubo de tela de aço inoxidável.



Fonte: *Ozonium Systems* (2011).

A Figura 3.18a ilustra as diferentes bitolas de tubos de aço inoxidável utilizadas como pólo externo do reator. A Figura 3.18b mostra a tela de aço inoxidável utilizada como pólo interno do reator. Adicionalmente, foi colocado um tipo de vidro comum internamente a este pólo para dar formato cilindro e sustentação mecânica.

Figura 3.18 – Materiais utilizados na construção do reator de ozônio. (a) tubos de aço inoxidável em diversas bitolas e (b) tela de aço inoxidável utilizada no cilindro interno.



Fonte: O autor.

As ligações elétricas para entrada de alta tensão e para a alimentação dos ventiladores foi feita através da luva de PVC através de orifícios de 2 mm de diâmetro e vedados com cola de silicone.

A Figura 3.19 demonstra a montagem do reator na bancada, em que o tubo externo (pólo 1) foi montando com o auxílio de uma morsa. Foram fixadas duas luvas terminais de PVC rígido, sendo uma em cada extremidade do tubo externo. Foram testadas também luvas de aço e ferro galvanizado, mas descartadas devido ao peso e dificuldade de vedação.

Figura 3.19 - Montagem do reator de ozônio em bancada.



Fonte: O autor.

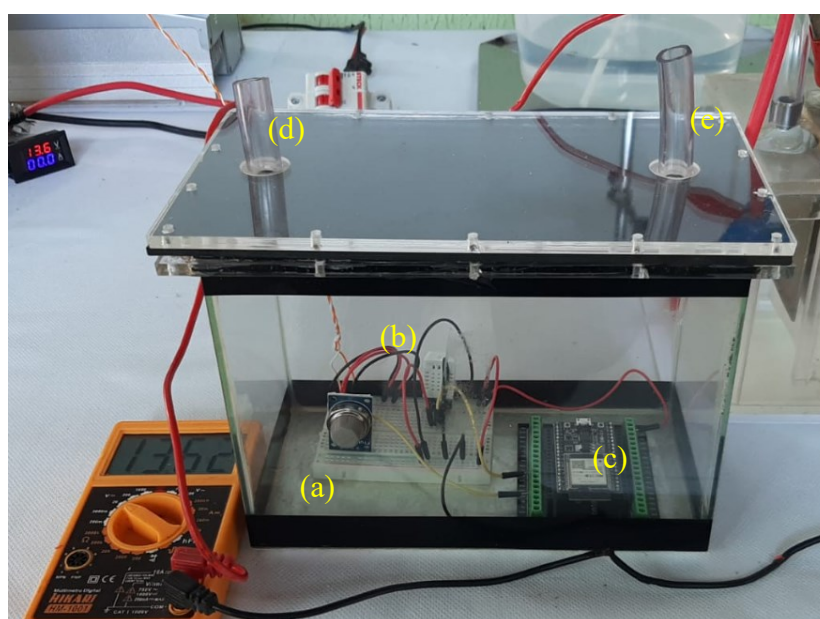
A entrada de ar ou oxigênio e a saída de O_3 do reator foram feitas com conexão de aço de 3" parafusada nas luvas e com orifício de 3/8" onde foram coladas as mangueiras de silicone de mesma bitola.

Uma vez concluída a etapa de execução da montagem do reator, foram realizadas as conexões de gases desde origem da matéria-prima, gerada na célula eletrolítica ou captada do ar, proveniente do pressurizador eletromagnético. A saída do gás ozônio foi conectada no medidor de vazão volumétrico através de uma célula de medição. Foram acionadas as conexões elétricas dos pólos da célula eletrolítica, na entrada do *driver* CC-CA e sua saída no reator corona. Os exaustores internos do reator de ozônio também foram acionados. Os processos de mensuração elétrica e gasosa serão apresentados a seguir.

3.5. Medições e testes elétricos

Foi elaborada uma câmara de medição para acomodar e proteger os componentes eletrônicos de impactos mecânicos e de contaminação com impurezas ou outros gases como demonstra a Figura 3.20. Foram construídas três células e o material utilizado foi o vidro no mesmo formato, dimensões e técnicas de construção da célula eletrolítica recebendo cada uma por sua vez apenas os gases hidrogênio e oxigênio gerados na eletrólise e o ozônio (O_3) do reator.

Figura 3.20 - Câmara de medição de gases. (a) Sensor de gás, (b) sensor de umidade e temperatura, (c) microprocessador, (d) e (e) entrada e saída de gases.

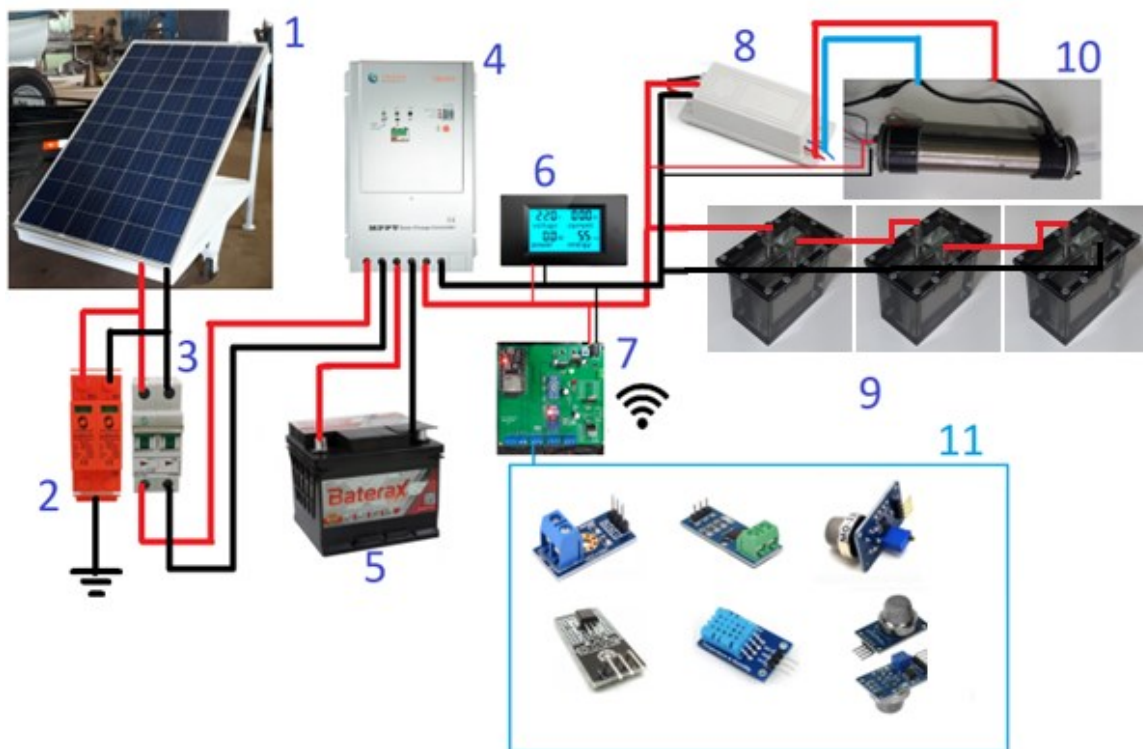


Fonte: O autor.

3.5.1. Conexões elétricas

O módulo solar foi instalado no suporte projetado para receber até três unidades, sendo uma central fixa e duas unidades opcionais em paralelo, retráteis por dobradiças. O módulo foi conectado ao controlador de carga e este, por sua vez, conectado à bateria conforme apresentado na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Diagrama de conexões elétricas.



Fonte: O autor.

Na sequência numérica da Figura 3.21, tem-se:

- 1 – Módulo solar fotovoltaico canadian solar de 370 Wp;
- 2 – Sistema de proteção DPS 40 kA – Sistema de proteção contra surtos;
- 3 – Disjuntor termomagnético de 63 A;
- 4 – Controlador de carga Tracer 40 A;
- 5 – Bateria Baterax automotiva de 45 Ah, 12V
- 6 – Módulo medidor de tensão, corrente, potência e energia;
- 7 – Placa de monitoramento com microprocessador e entrada para sensores;
- 8 – *Driver* de alta tensão CC-CA, 12V – 20 kV

- 9 – Três células eletrolíticas em série;
- 10 – Reator de ozônio;
- 11 – Sensores diversos.

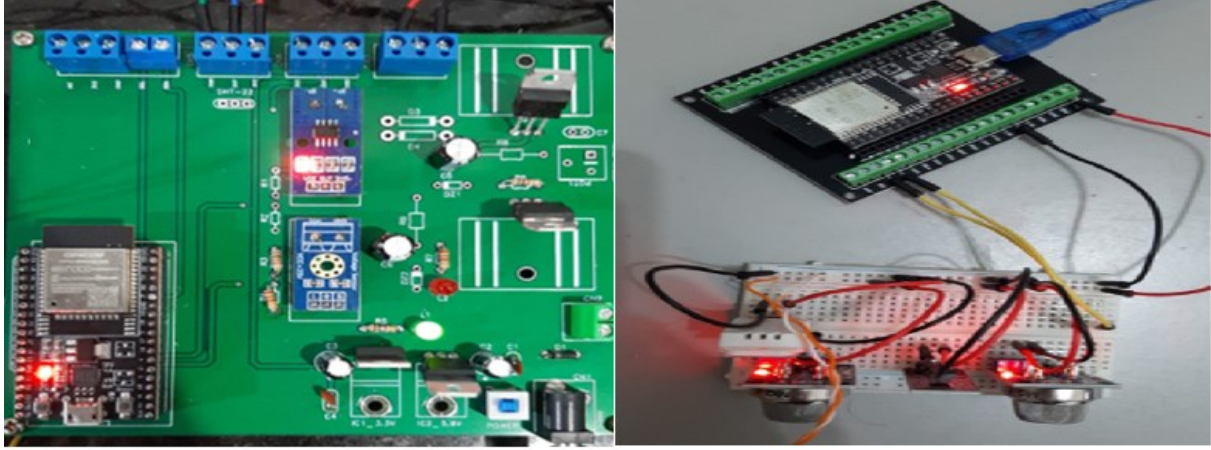
Os cabos utilizados form do tipo solar com bitola de 6 mm na cor vermelha para o pólo positivo e cor preta para o pólo negativo na alimentação polarizada contínua (CC), como mostrado na Figura 3.18. A conexão de alimentação do medidor de tensão, corrente, potência e energia na saída do controlador de carga foi feita com cabos de 1 mm, também padronizados na cor vermelha e na cor preta para a alimentação CC. O controlador de carga tem uma entrada CC positiva e outra entrada CC negativa para receber a energia do módulo solar fotovoltaico. Possui uma conexão com a bateria, também com os pólos negativo e positivo e uma saída também CC polarizada para as cargas. A ligação da saída de alta tensão para o reator de ozônio foi feita com cabos com isolação especial para 30 kV e bitola de 4 mm. As conexões entre os cabos foram soldadas com estanho e isoladas com fita auto fusão. A ligação elétrica nos bornes da bateria e nos eletrodos das células eletrolíticas foi feita com garras jacaré para correntes de até 100 A. No DPS, no disjuntor e no controlador de carga foram utilizados terminadores elétricos tipo pino parafusados e prensados nas extremidades dos cabos de 6 mm.

3.5.2. Placa de ensaios

Os ensaios com os sensores e componentes eletrônicos foram iniciados utilizando placas de ensaio do tipo *protoboard*, sendo as conexões feitas com cabos dotados de terminadores próprios. Entretanto, devido à quantidade de ligações elétricas esta montagem começou a apresentar problemas nos contatos e perda de sinal resultando em atrasos e falha nas medições.

Foi elaborada a placa de circuito impresso (PCB) *Printed Circuit Board*, adaptada de trabalho de Rodrigues (2023). Sua montagem está apresentada na Figura 3.22a onde os sensores de tensão, corrente e temperatura ambiente já se encontram fixos. Nota-se também os conectores (em azul) para a conexão com os sensores eletroquímicos instalados próximo aos reatores. A Figur 3.22b mostra os sensores conectados em uma placa de ensaios, antes da fixação definitiva na placa impressa PCB.

Figura 3.22 - Comparação entre a placa de ensaios e a PCI elaborada. (a) Placa de circuito impresso com os componentes soldados e (b) montagem em placa de ensaio.



(a)

(b)

Fonte: O autor, baseado em Gonçalves, Rodrigues (2023).

O projeto da PCB foi feito com o *software* P-CAD 2006 e o termo CAD - *Computer Aided Desing* é o nome genérico de programas de computador utilizados para facilitar o projeto e desenhos técnicos (GONÇALVES , 2023)

3.5.3. Sensor de tensão elétrica

A entrada do sensor de tensão elétrica foi ligada através de um divisor de tensão simples formado por dois resistores $R1$ e $R2$ na entrada de tensão da placa conforme a Equação (3.1), ajustando a entrada para níveis de 0 a 25 V, faixa de trabalho do sensor. Outro divisor de tensão formado por dois resistores $R3$ e $R4$ e conforme a Equação (3.2), ajustam a saída do sensor à tensão máxima de 3,3 V no pino GPIO 39 do microcontrolador ESP32.

$$V_{in} = \frac{R1}{R1+R2} \quad (3.1)$$

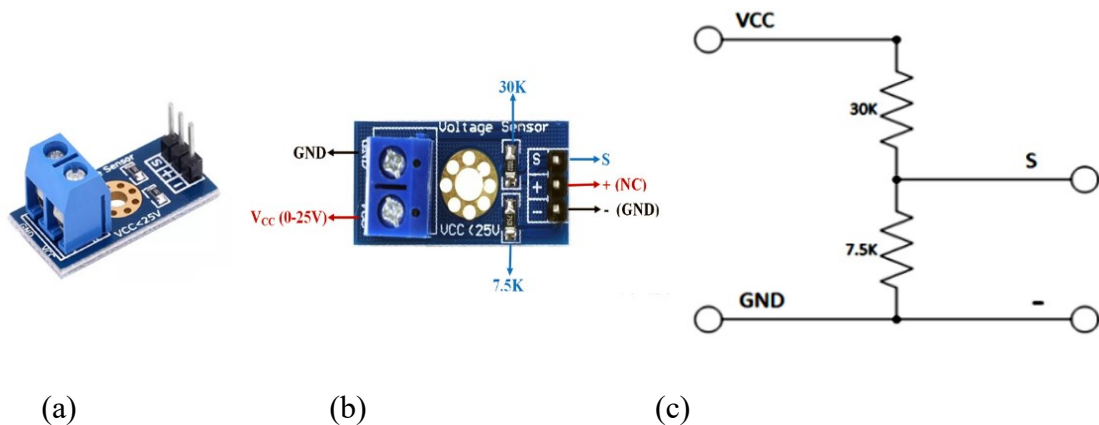
sendo que: V_{in} é a tensão na entrada do sensor, $R1$ é o resistor superior ligado ao positivo e $R2$ é o resistor inferior ligado ao pino terra.

$$V_{out} = \frac{R3}{R3+R4} \quad (3.2)$$

Em que V_{out} é a tensão na saída do sensor, $R3$ é o resistor superior ligado ao positivo e $R4$ é o resistor inferior ligado ao pino terra.

A Figura 3.23a mostra o aspecto físico do sensor de tensão elétrica utilizado no protótipo, a Figura 3.23b mostra os pinos para ligações de alimentação elétrica e saída de dados e a Figura 3.23c mostra o diagrama elétrico dos resistores internos formando um divisor de tensão.

Figura 3.23 - O sensor de tensão. (a) Aspecto físico, (b) Pinagem e (c) Divisor de tensão interno.



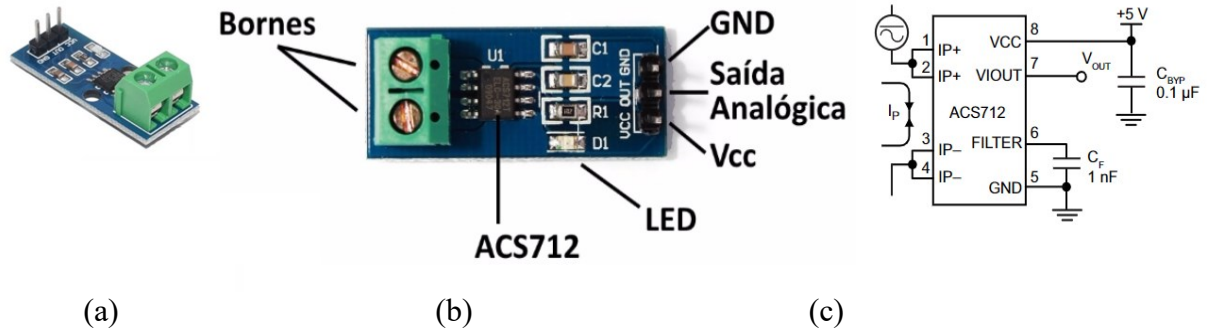
Fonte: O autor.

3.5.4. Sensor de corrente elétrica

Os sensores de corrente elétrica ACS712 usam o efeito *hall* para detectar o campo magnético gerado pela passagem de corrente, gerando na saída do módulo (pino OUT), uma tensão proporcional de 66 mV/A. Ele pode ser utilizado com corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), e os bornes de ligação são completamente isolados da saída para o microcontrolador. A capacidade de medição é de 30 A, o que equivale a $30 \times 66 \text{ mV} = 1980 \text{ mV}$ na saída. A tensão de saída varia de 520 a 4480 mV. Como a entrada ESP32analógica CC suporta até 5 V, a saída do sensor AC712 pode ser conectada diretamente ao processador.

A Figura 3.24a mostra o aspecto físico do sensor de corrente elétrica utilizado no protótipo, a Figura 3.24b mostra os pinos para ligações de alimentação elétrica e saída de dados e a Figura 3.24c mostra o diagrama eletrônico para uma aplicação típica do sensor.

Figura 3.24 - O sensor de corrente ACS712. (a) Aspecto físico, (b) Pinagem e (c) aplicação típica.



Fonte: O autor.

3.5.5. Sensores eletroquímicos

Os sensores utilizados têm como entrada o parâmetro alvo a ser mensurado e na saída é produzido um sinal proporcional à entrada já convertido na forma elétrica, ideal para aplicações com um microcontrolador. O microcontrolador através de *software* fará o tratamento matemático, calibração, conversão digital, captura e armazenagem ou transmissão remota via *web*. Foram adquiridos sensores eletroquímicos da série MQ, onde o MQ-131 tem sensibilidade ao ozônio, o MQ-8 para amônia, O MQ-5 para gás natural, como exemplos. Um estudo anterior também relacionou os sensores da série MQ e suas aplicações (Araújo, 2023). O sensor MQ-131 para ozônio foi instalado na saída do reator de ozônio juntamente com um medidor eletrônico comercial modelo O3 Handheld para comparação de medidas.

As informações obtidas com os sensores são enviadas para um microprocessador ESP32 através de cabos de 1 mm conectados aos pinos de entrada e saída programáveis. Uma rotina do *software* específico para cada sensor processa estas informações e envia para um repositório gratuito *on-line* via conexão *wifi* ou armazena na memória interna par envio posterior no caso de falta de sinal de comunicação.

3.5.5.1. Sensor de ozônio

O sensor de ozônio utilizado foi o modelo MQ131 para altas concentrações, que é um semicondutor tipo-n de dióxido de estanho SnO_2 , muito utilizado em sensores semicondutores

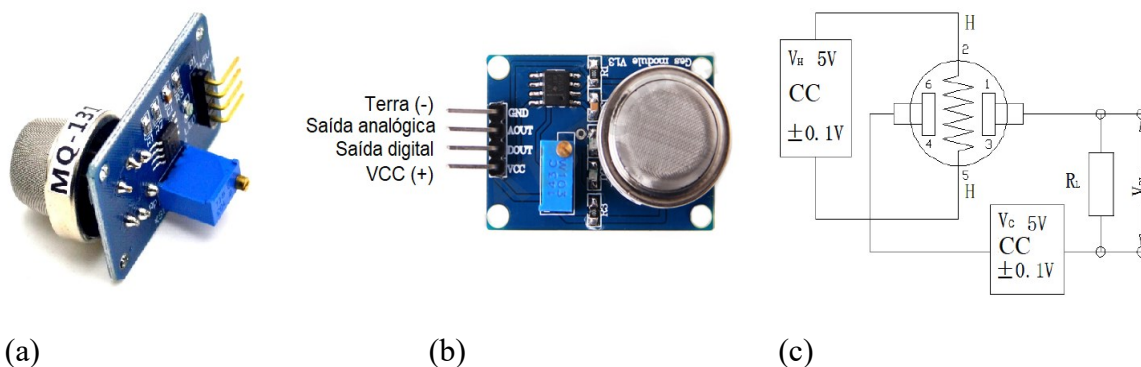
devido à sua sensibilidade elevada e a amplitude de temperatura variando de 25°C até 500°C. O fabricante aconselha um pré-aquecimento de 48 h a uma temperatura de 300 a 450°C, através de corrente elétrica, de maneira a atingir a temperatura de operação ideal para captura eletroquímica dos íons.

A Figura 3.25a mostra o aspecto físico do sensor de ozônio utilizado no protótipo, a Figura 3.25b mostra os pinos para ligações de alimentação elétrica e saída de dados e a Figura 3.25c mostra o diagrama eletrônico para uma aplicação típica do sensor com a conexão elétrica do aquecedor interno. Um potenciômetro ajusta a sensibilidade do sensor e é útil para calibração.

Este sensor é altamente sensível ao ozônio, mas também sensível a cloro (Cl_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2). A escolha deste dispositivo para uso no protótipo foi justificada pelo baixo custo e simplicidade de ligações, apesar das dificuldades de pré-aquecimento e de calibração.

Os métodos para se obter as curvas de calibração podem ser encontrados nos manuais dos fornecedores dos sensores. O estudo de Avelino (2019) foi utilizado como referência para montagem do sensor de O_3 .

Figura 3.25 - O sensor de ozônio MQ-131. (a) Aspecto físico, (b) pinagem e (c) aplicação típica.



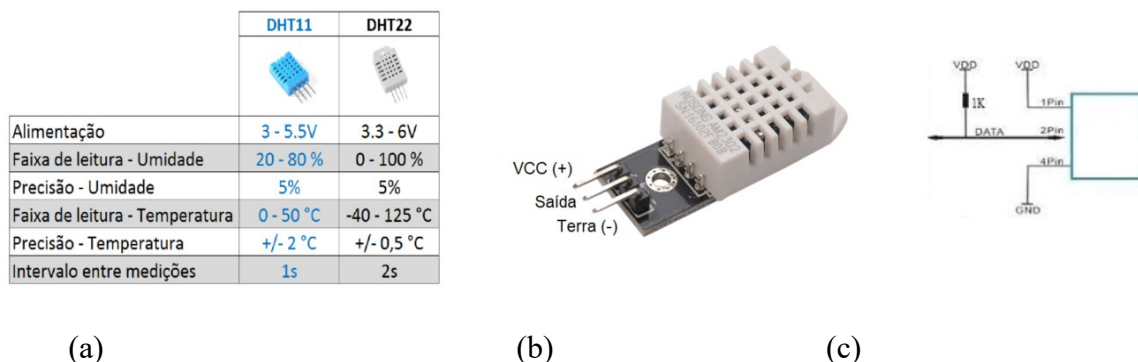
Fonte: O autor.

3.5.5.2. Sensor de temperatura e umidade

Para medição e aferição da umidade e temperatura tanto no interior do suporte dos reatores como na área externa foram utilizados os sensores de umidade e temperatura DHT11

e DHT2, cujas diferenças de faixa de leitura estão dispostas na Figura 3.26a. A Figura 3.26b mostra a pinagem do sensor e a Figura 3.26c mostra a aplicação típica.

Figura 3.26 - Sensores de temperatura e umidade DHT11 e DTH 22. (a) Comparação de faixas de leitura e precisão, (b) pinagem e (c) aplicação típica.



Fonte: O autor.

Embora o DHT22 possua um intervalo entre medições menor (2s), sua faixa de leitura é mais larga (de 0 a 100% de umidade relativa e de -40 a 125 °C), foi o sensor escolhido para a aplicação. Ele possui dois componentes ativos para as medições. Um componente é um termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) cuja resistência interna fabricada com cerâmica ou polímero varia inversamente com a temperatura. O segundo componente mede a umidade e é composto por uma placa de absorção de umidade entre dois eletrodos. A variação de umidade causa variação da condutividade e provoca a mudança na resistência entre os eletrodos.

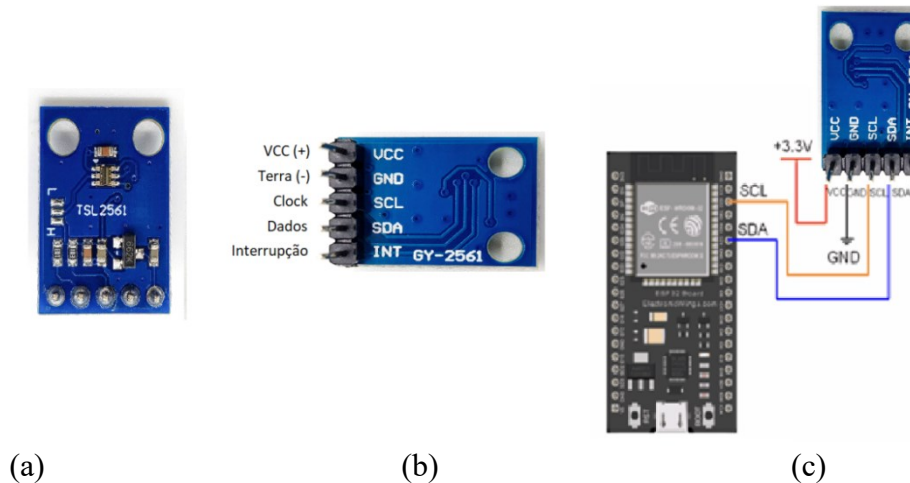
A conexão foi feita ligando o terminal VCC(+) na alimentação de 5 V e o terminal Terra(-) no negativo da alimentação. O pino de dados foi conectado no pino 29 (GPIO5) do ESP32 protegido por um resistor de 1 kΩ. A Figura 3.23c mostra este esquema de ligação.

Sensor de luminosidade

Foi utilizado um sensor de luminosidade TSL2561 com a finalidade de comparar a geração de energia fornecida com a luminosidade do local e gerar alertas. Este sensor baseia-se em um fotodiodo que trabalha na faixa de luz visível e infravermelho. A alimentação foi feita com 3,3V e a detecção variou de 0,1 a 40.000 Lux. Foi necessário utilizar um filtro ótico solar de baixo custo para leituras até 120.000 Lux (Irradiância até 1000 W/m²).

A Figura 3.27 mostra em (a) o aspecto físico, (b) a pinagem e em (c) a ligação com o ESP32. A pinagem sendo a mesma do sensor de pressão, foi necessária a utilização de um segundo processador para tratar os dados do sensor de luminosidade.

Figura 3.27 - Sensor de luminosidade TSL2561. (a) Aspecto físico, (b) pinagem e (c) aplicação recomendada.



Fonte: O autor.

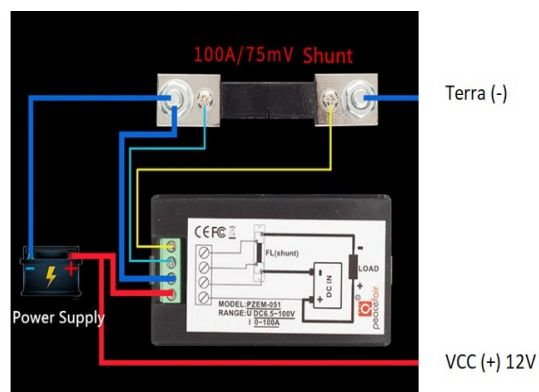
3.5.6. Medidor de tensão, corrente, potência e energia elétrica

Os amperímetros tradicionais de baixo custo medem até 10 A. Em virtude de as primeiras medições superarem 50 A, foi necessário o uso de um medidor de capacidade maior. Foi selecionado o voltímetro digital com amperímetro 100 A / 0 a 100 VCC dotado de um resistor de derivação (*Shunt*) capaz de realizar medições de tensão entre 0 e 100 V DC e de até 100 A corrente contínua. Internamente possui um microprocessador que calcula em tempo real a potência em watts e a energia acumulada em watt-hora mostrando em display como mostra a Figura 3.28a. O medidor foi conectado na saída do controlador de carga fornecendo informações de todas as cargas ligadas a ele. A Figura 3.28b detalha o esquema de ligações, onde se destaca o resistor de baixa resistência série ou de derivação que causa muito pequena interferência no circuito a ser mensurado.

Figura 3.28 – Medidor múltiplo PZEM-051 0-100A. (a) Aspecto físico, (b) esquema de ligações elétricas.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

3.5.7. Multímetro digital

As medições elétricas em todos os componentes foram realizadas com dois multímetros digitais da marca Hikari, modelo HM-1001. As medições de correntes elétricas foram realizadas através do borne número 3 (COMUM) e o borne 5 (entrada de até 10 A CC). As tensões foram feitas através do borne 3 (COMUM) e o borne 4 (entrada de tensão). Estes terminais também foram utilizados para medidas de continuidade dos cabos e conexões entre os dispositivos de leitura e os reatores.

3.5.8. Analisador de ozônio

Foi utilizado o analisador portátil de ozônio Handheld, com faixa de 0,1 a 5,0 ppm. O aparelho possui sensor eletroquímico para ozônio, além de sensor de temperatura e umidade. Através de uma tela de 2,8" são exibidas a concentração de ozônio em quatro faixas programáveis, a temperatura em $^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa do ar em %. Posicionado diretamente na saída do reator, sua medida foi de escala em 5,0 ppm. A solução encontrada para não saturar a escala foi efetuar medidas a distâncias de 1, 2, 3, 4 e 5 metros respectivamente, de

distância do reator, onde a concentração foi mais baixa. As faixas de medição do medidor estão apresentadas na Tabela 3.2,

Tabela 3.2 – Faixas de medição do medidor de ozônio Handheld.

Risco	Concentração
BOM	0,000 – 0,100 ppm
LEVE	0,100 – 0,300 ppm
MODERADO	0,300 – 1,000 ppm
SÉRIO	1,000 – 5,000 ppm

Fonte: O autor com baseado no *data sheet* do fornecedor.

O Medidor possui quatro faixas de exibição no painel do instrumento, comparando a concentração medida com o nível de risco à saúde humana. Os valores das quatro faixas podem ser reconfigurados dentro dos parâmetros de 0,000 a 5,000 ppm.

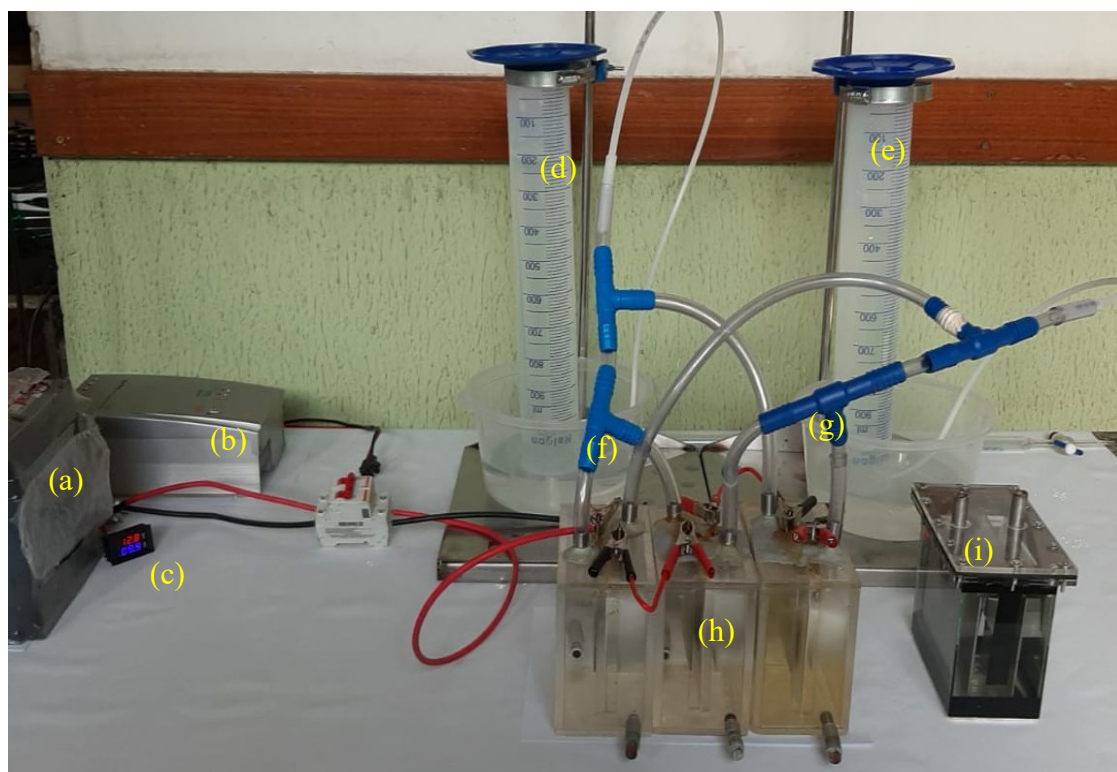
3.6. Volumetria do oxigênio

A técnica de coleta de gases foi utilizada para medição do volume de gases gerados nas células eletrolíticas, utilizando duas provetas invertidas graduadas de 1000 mL cada, em duas cubas de 2000 mL cada. Tubos de silicone de 6 mm conduziram os gases gerados nas saídas de oxigênio e hidrogênio até a extremidade submersa das provetas. À medida que as bolhas dos gases entram na proveta, o nível de água cai. Assim é possível medir o volume. Um cronômetro do celular foi utilizado para medir o tempo, tornando possível obter a vazão volumétrica de cada gás.

O líquido utilizado como coleta foi a água comum de torneira. Os ensaios foram realizados, sempre em triplicata, na sequência: (1) anotação dos níveis iniciais das provetas, (2) acionamento simultâneo do cronômetro e o disjuntor que alimenta as células eletrolíticas, (3) após 60s, desligamento simultâneo dos aparelhos, (4) leitura final dos níveis na planilha de experimento.

A Figura 3.29 permite visualizar este experimento, mostrando a utilização de duas provetas invertidas onde foram medidas as vazões dos gases oxigênio e hidrogênio produzidos na célula eletrolítica.

Figura 3.29 – Volumetria dos gases oxigênio e hidrogênio; (a) bateria automotiva; (b) controlador de carga; (c) medidor de tensão e corrente; (d) proveta para O₂; (e) proveta para H₂; (f) saída de gás O₂; (g) saída de gás H₂; (h),(i) células eletrolíticas.



Fonte: O autor.

A Figura 3.30 demonstra os equipamentos elétricos e os reatores eletrolítico e de ozônio montados no suporte do módulo fotovoltaico configurando o protótipo finalizado. As roldanas auxiliaram no posicionamento correto do módulo fotovoltaico com relação a posição do norte geográfico.

As dimensões (140x100 cm de base e 124 cm de altura), permitem o seu deslocamento utilizando-se uma *pick-up* média e as roldanas possibilitam tanto o deslocamento até a fonte de efluentes a serem tratados ou analisados, e também permitem o seu melhor posicionamento para otimização da captação da energia solar.

Figura 3.30 – Protótipo finalizado. (a) módulo fotovoltaico, (b) controlador de carga, (c) bateria, (d) gerador de alta tensão, (e) células eletrolíticas, (f) câmara de medição, (g) reator de ozônio.



Fonte: O autor.

3.7. Recomendações de segurança

Algumas medidas de segurança foram tomadas durante os experimentos devido ao fato de que as soluções químicas utilizadas são tóxicas e altamente corrosivas.

Os gases produzidos são explosivos, altamente oxidantes e submetidos a fontes de energia elétrica de altas correntes com risco real de explosão.

Foram utilizados EPIs como luvas, óculos e vestimentas adequadas e o tempo de exposição foi controlado e realizado em ambiente com ventilação adequada.

Finalmente, este capítulo apresentou a descrição dos procedimentos para os experimentos, iniciando com a configuração, projeto e execução da unidade geradora de energia solar fotovoltaica, seguindo com a descrição da célula eletrolítica construída, a descrição do reator de ozônio, e finalizando com a descrição dos sensores eletroquímicos e dos materiais e equipamentos utilizados nos experimentos. No próximo capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

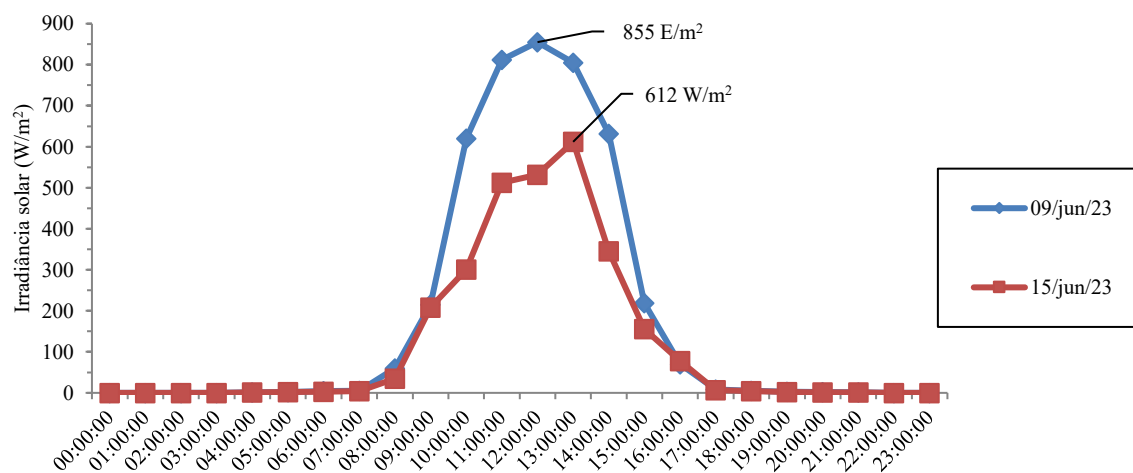
Este capítulo apresenta os resultados obtidos na geração de oxigênio e ozônio com a fonte de alimentação de corrente contínua proveniente de um sistema de geração de energia fotovoltaica para alimentar os eletrolisadores e o reator de ozônio. São apresentados os gráficos e equações que relacionam a vazão de oxigênio e ozônio com variáveis controladas e os resultados qualitativos obtidos para cada configuração da célula eletrolítica e do reator de ozônio.

O O_3 é uma molécula alvo de preocupações crescentes exploradas pela mídia, sempre ligada a questões de ordem ambiental tais como: camada de ozônio, aquecimento global, ecologia, poluição climática, atmosfera, ecossistema e - planeta. Contudo, a temática proposta nesta dissertação investigou a produção de ozônio em protótipo portátil - alimentado por energia fotovoltaica – com a finalidade de fomentar a discussão do uso do ozônio em uma gama diversa de aplicações. Os resultados desta iniciativa estão descritos nos tópicos seguintes.

4.1. Produção de energia solar

A irradiância solar diária mensurada em dois dias utilizando o sensor de luminosidade TSL2561 está apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Curvas de irradiância solar diária nos dias 09 e 15 de junho de 2023



Fonte: O autor.

A análise das condições de irradiância solar foi útil para justificar o uso do controlador de carga ao invés da conexão direta da placa geradora solar no eletrolisador e no reator de ozônio. Este sensor foi utilizado também para controle de luminosidade de LED em sistemas robóticos no trabalho de Costa (2020), em estudo colorimétrico com ozônio no trabalho de Bezerra (2023), e como sensor de irradiância para monitoramento de placas fotovoltaicas no trabalho de Gonçalves (2023).

Devido ao uso do sensor de TSL2561, houve a necessidade de converter a unidade de medida do sensor (Lux) para unidade de irradiância (W/m^2). Para a conversão foi utilizada a Equação (4.1) (Michael et al. (2020). Além disso, foi necessário utilizar um filtro solar para reduzir o valor da irradiância solar em três vezes para não saturar o sensor quando exposto à luz solar.

$$Ir = Lu/120 \quad (4.1)$$

sendo: Ir = Irradiância em W/m^2 ;

Lu = Luminância em Lux;

120 = Fator de correção de unidades.

Para a elaboração do gráfico mostrado na Figura 4.1 foram consideradas medidas a cada hora, de 00:00h às 23:59 h para cada um dos dois dias avaliados. Pode-se verificar que o pico de irradiância solar para o dia 09/jun./2023 foi próximo de 12 h com valor encontrado de 855 W/m^2 , em um dia sem a presença de nuvens devido à simetria da parábola invertida verificada. Por outro lado, no dia 15/jun./2023 a curva apresenta-se disforme, denunciando a presença de nebulosidade, cujo pico de radiação aconteceu às 13:30 h com valor encontrado de 612 W/m^2 .

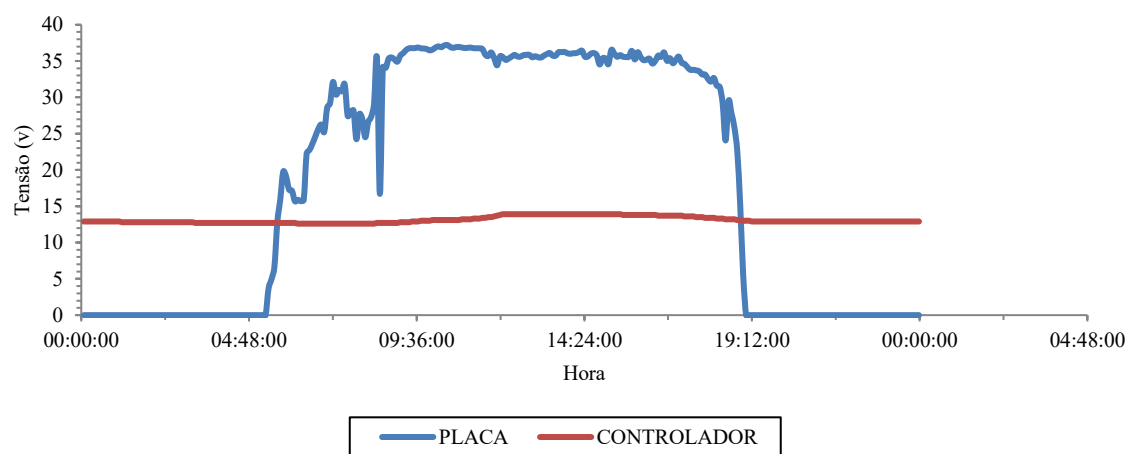
Estas variações de potência de incidência solar refletem diretamente na tensão gerada pela placa solar o que, por sua vez, influência de maneira proporcional a geração de gases nos eletrolisadores. Foi possível constatar ainda que a curva do experimento segue o mesmo formato das curvas de irradiância solar diárias encontradas na literatura (Avelino, 2019).

De acordo com o estudo de Palhares (2016), onde utilizou-se medidor de energia solar da marca *Instrutherm*, modelo MES-200 para avaliação da irradiância solar, foram observados resultados semelhantes com valores na ordem de 600 a 800 W/m^2 .

O uso do sensor de luminosidade comprovou a necessidade do uso do controlador de carga para suprir as condições climáticas desfavoráveis à geração de gases e regular o nível de tensão fornecida ao oscilador sensível do reator de ozônio.

A Figura 4.2 apresenta a geração de tensão elétrica na saída da placa solar de 365 Wp, cuja tensão de saída nominal foi de 39,8 V, em uma corrente de operação de 9,18 A. Na exposição máxima, a irradiância solar produziu até 36 V a vazio (sem carga) nos ensaios. Para esta análise, foram consideradas amostras a cada 5 min no dia 15 de junho de 2023 e o detalhamento mostra a passagem de nuvens densas às 09:36 h e depois às 11:34 h. Os valores de tensões e correntes elétricas foram obtidos com o sensor de tensão elétrica e enviados para plataforma MATLAB, na nuvem via placa coletora de dados contendo um microprocessador ESP-32 equipado com interface *wi-fi*. Trabalhos correlatos utilizaram multímetros convencionais ao invés de sensores, para medições de tensões e correntes elétricas, como nos estudos de Palhares (2016) e de Cunha (2021).

Figura 4.2 – Tensão diária nos terminais da placa solar CS3P-365Pe nos terminais do controlador de carga no dia 15 de junho de 2023.



Fonte: O autor.

Por meio da Figura 4.2 verificou-se também a curva de tensão na saída do controlador de carga, qual oscilou entre 12,9 V nos períodos de ausência de irradiância e de 13,9 V nos períodos de irradiância máxima. A energia elétrica gerada pela placa conectada diretamente nos reatores, sem o controlador de carga foi de 2334 W de média diária e com o uso controlador de carga esta energia aumentou em 24,98%, atingindo 2918 W de média diária. Este incremento justificou o uso do controlador de carga em conjunto com a bateria no

projeto, e pode ser explicado no fornecimento de energia elétrica de forma ininterrupta nos períodos de nebulosidade e no período de 19:00 h até as 05:00 h do dia seguinte, nos quais a geração de energia elétrica pela placa solar é reduzida ou nula.

A tensão de saída da placa fotovoltaica de 365 Wp pode não atingir os 39 V nominais informados no *data sheet*, devido a fatores como: o posicionamento da placa em relação ao movimento diário do sol, o acúmulo diário de vários tipos de partículas presentes na atmosfera que se depositam na superfície da placa e a perda de tensão nas conexões e instrumentos de leitura. O monitoramento de tensão da placa fotovoltaica foi obtido por Martins (2023), com sensor ADS1115 e painel de 10W de pico e obteve tensões da ordem de 6 V.

4.2. Configurações do eletrolisador

Foram realizados testes alterando os parâmetros do eletrolisador como concentração do eletrólito, o número de células em série e o tipo de diafragma para avaliação da influência destas variáveis no processo de eletrólise. Os resultados estão descritos nos tópicos a seguir.

4.2.1. Material do diafragma

Foram realizados testes comparativos utilizando membrana de Zirfon, placa de acrílico e testes sem utilização de membrana para verificar a influência da membrana na corrente aplicada na célula eletrolítica.

A placa de acrílico utilizada deixava uma abertura de 4 cm a partir da base da célula, o que permitiu troca iônica e pouca mistura gasosa.

A retirada total da placa de acrílico entre os eletrodos da célula foi realizada para comparação e referência de corrente elétrica.

Os dados apresentados na Tabela 4.1 demonstram que com o uso de membrana de Zirfon, a absorção de corrente elétrica foi quase três vezes maior que com o uso da placa de acrílico e cerca de 30% inferior sem uso de separador entre os eletrodos. Os níveis de corrente elétrica, potência e vazão de O₂ justificam o uso de Zirfon em todas as células utilizadas no experimento e condizem com a literatura pesquisada (Groot; Vreman, 2021 ; Cunha, 2021).

Tabela 4.1 - Comparação de tipos de diafragmas Zirfon e acrílico com células sem diafragma na eletrólise alcalina.

Tipo de Diafragma	Molar (mol.L ⁻¹)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	O ₂ (mL/min)	q O ₂ x 10 ⁺² (mL/J)
-	7	25,12	11,65	292,65	595,56	3,39
Zirfon	7	19,72	11,95	235,65	484,23	3,42
Acrílico	7	7,14	12,00	85,68	174,78	3,40

Fonte: O autor.

4.2.2. Concentração do eletrólito e quantidade de células em série

A Tabela 4.2 apresenta a investigação de arranjos em série de 2 até 5 células e as concentrações de KOH variando de 1 mol.L⁻¹ a 8 mol.L⁻¹.

A primeira linha mostra apenas uma célula com uma corrente superior ao limite do controlador de carga, que causou seu desligamento e impossibilitou a medida de vazão. A Figura 4.3 apresenta este “outlier” (ponto fora da curva).

Por sua vez, a configuração com duas células em série possibilitou apenas duas medidas, devido ao aumento de corrente e queda de tensão no controlador.

Observa-se na Tabela 4.2 que o aumento da concentração molar de eletrólito melhorou a produção de gás na eletrólise drenando maior potência elétrica, o que equivale a diminuição da resistência elétrica do eletrólito. Com a utilização de 3 células eletrolíticas em série, na concentração de 1 mol.L⁻¹, a produção de O₂ foi de 185,60 mL/min consumindo 116,64 W de potência, enquanto a mesma configuração de células eletrolíticas produziu 484,23 mL/min com um consumo de 235,65 W quando utilizou-se a concentração de 8 mol.L⁻¹.

Tabela 4.2 – Medidas de parâmetros elétricos e volume de oxigênio produzido em células eletrolíticas em série com membrana Zirfon.

Células Série	Molar (mol.L ⁻¹)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	O ₂ (mL/min)	q O ₂ x 10 ⁻² (mL/J)
1	1	54,98	12,4	681,75	-	-
2	1	18,75	11,90	223,13	368,90	2,76

2	2	22,35	11,85	264,85	442,68	2,79
3	1	9,72	12,00	116,64	185,60	2,65
3	2	11,92	12,00	143,04	222,72	2,60
3	3	14,22	11,98	170,36	267,26	2,61
3	4	16,22	11,98	194,32	320,72	2,75
3	5	17,22	11,97	206,12	416,93	3,37
3	6	18,32	11,97	219,29	458,63	3,49
3	7	19,12	11,95	228,48	481,56	3,51
3	8	19,72	11,95	235,65	484,23	3,42
4	1	5,71	12,00	68,52	99,98	2,43
4	2	6,51	12,00	78,12	119,98	2,56
4	3	7,41	11,98	88,77	143,97	2,70
4	4	8,03	11,98	96,20	172,77	2,99
4	5	9,02	11,97	107,97	224,60	3,47
4	6	10,12	11,97	121,14	269,51	3,71
4	7	10,92	11,95	130,49	296,47	3,79
4	8	11,52	11,95	137,66	311,29	3,77
5	1	2,75	12,19	33,52	62,97	3,13
5	2	3,73	12,15	45,32	75,56	2,78
5	3	4,23	12,12	51,27	86,90	2,83
5	4	4,73	12,05	57,00	99,93	2,92
5	5	5,12	12,04	61,64	114,92	3,11
5	6	5,72	12,02	68,75	132,16	3,20
5	7	6,54	12,00	78,48	151,99	3,23
5	8	7,14	12,00	85,68	174,78	3,40

Fonte: O autor.

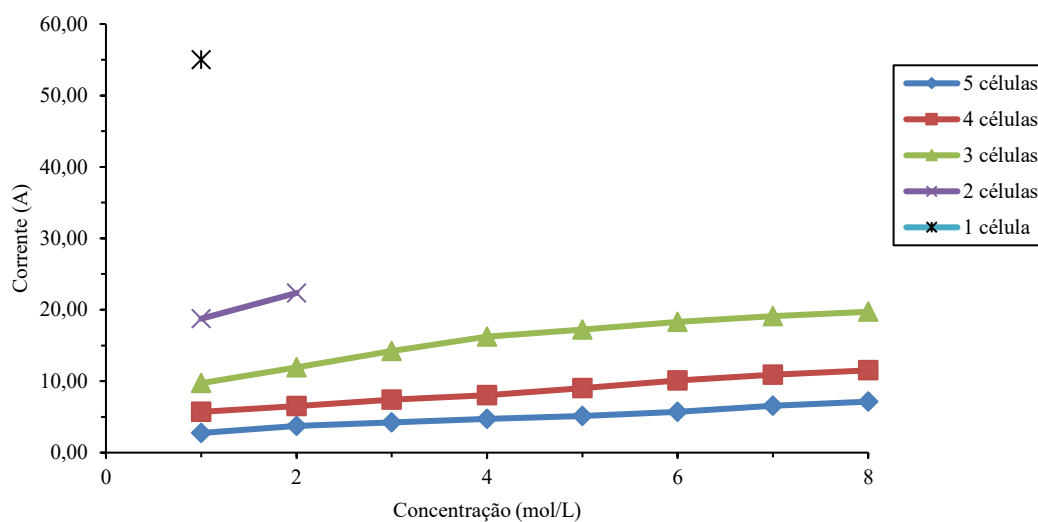
O limite técnico para as correntes do projeto apontou para o uso de 3 células em série e concentração do eletrólito de 7 mol.L⁻¹ (19,12 A). Este limite é dado não apenas pela potência do sistema gerador fotovoltaico, mas também pelo aquecimento das conexões, cabos, garras e solução eletrolítica. Este ponto também sugere uma maior eficiência na produção em mL/J (3,51 x 10⁻² mL/J) .

A pesquisa mostrou que Cunha (2017) também obteve a maior produção de gas uma concentração de 7 mol.L⁻¹ de hidróxido de potássio (173,3 mL/min a 6 mol.L⁻¹, 176,5 mL/min a 7 mol.L⁻¹ e 176,4 mL/min a 8 mol.L⁻¹).

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam que nos pontos com maiores concentrações molares e com menor número de células em série são obtidas as maiores correntes elétricas e maiores vazões de oxigênio. Os pontos fora da curva mostram as concentrações do eletrólito nos

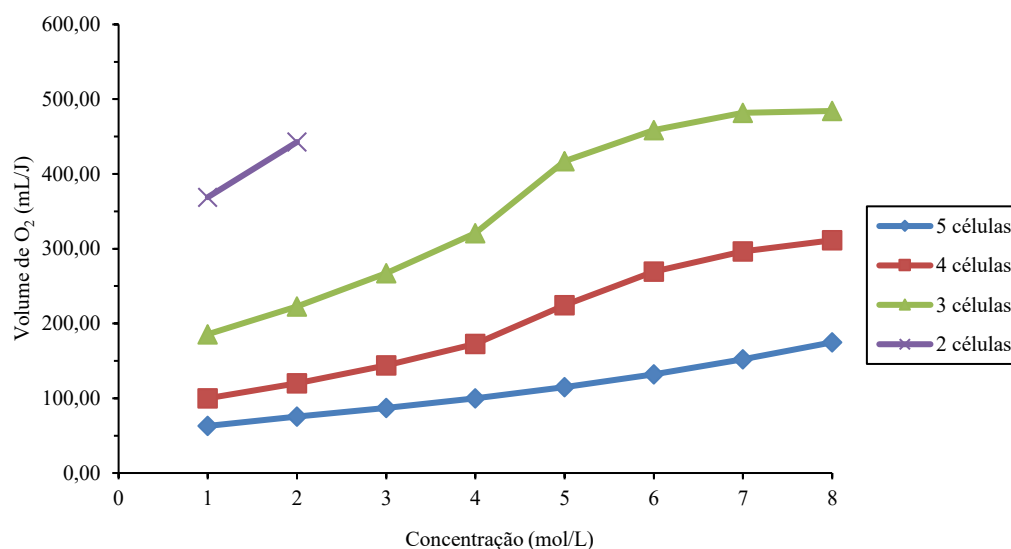
valores de 1 e 2 mol.L⁻¹ respectivamente onde as correntes superaram o limite técnico do gerador fotovoltaico.

Figura 4.3 – Corrente elétrica em função da concentração de eletrólito em configurações de 2 a 5 células em série.



Fonte: O autor.

Figura 4.4 - Comparação de número de células eletrolíticas em função da concentração de eletrólito e vazão de oxigênio (O₂).

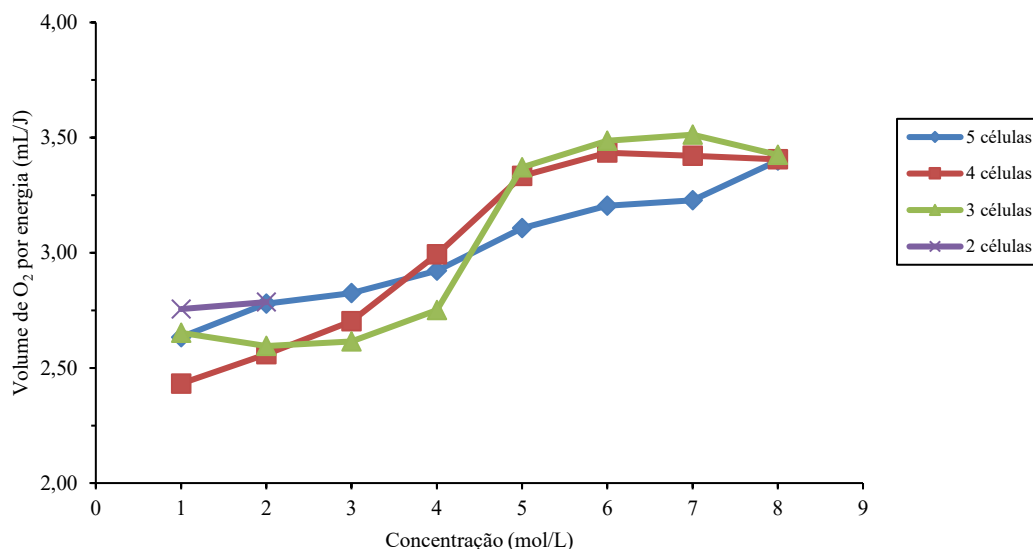


Fonte: O autor

Em uma análise comparando o número de células em função da concentração do eletrólito e do volume do oxigênio gerado por unidade de energia foi observada uma

convergência para a concentração de 8 mol.L^{-1} (Figura 4.5), porém com um volume maior por energia de $3,51 \text{ mL/J}$ na concentração de 7 mol.L^{-1} , o que justificou o uso desta concentração de eletrólito como mais promissora para os ensaios subsequentes de geração de O_2 .

Figura 4.5 - Comparação de número de células eletrolíticas em função da concentração de eletrólito e volume de oxigênio (O_2) por unidade de energia em mL/J .



Fonte: O autor.

Com base nestes resultados apresentados anteriormente, a condição operacional estabelecida para a produção das maiores vazões volumétricas de oxigênio (480 mL/min) foi 3 células a 7 mol.L^{-1} em correntes elétricas em torno de , valores estes condizentes com o estudo de Cunha (2017) onde se obteve $176,5 \text{ mL/min}$ a 7 mol.L^{-1} .

4.3. Configurações do reator de ozônio

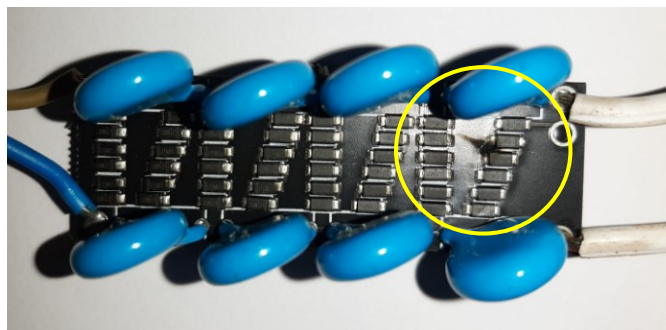
Foram realizados experimentos variando as dimensões físicas, o material e a textura dos eletrodos, tipo de preenchimento do núcleo e a alimentação com oxigênio de alta pureza e com o ar atmosférico com o objetivo de análise quantitativa do ozônio produzido.

Nos testes com a bobina automotiva, o ajuste do circuito eletrônico de excitação no qual os melhores resultados de centelhamento foram obtidos, foram nas frequências mais

baixas próximas de 100 Hz. Entretanto isto provocou interferência eletromagnética verificada em aparelhos de áudio e vídeo próximos e, por essa razão, foi descartada como opção.

Os testes realizados com o *flyback* no kit e também nos multiplicadores de tensão provocou dano físico ao multiplicador de tensão de 24 kV impossibilitando a aferição de resultados (Figura 4.6). Esta configuração de equipamentos foi descartada devido ao aparecimento de arcos elétricos indesejáveis entre os diodos, causando ruptura e danos aos componentes, como mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6 – Dano físico no multiplicador de tensão de 24 kV.



Fonte: O autor.

O dispositivo e a configuração que apresentou resultados com baixo custo foi o *driver* de excitação CC-CA com entrada de 12 V DC e saída de 10 a 20 kV apresentado na seção 3.3.1.4. e ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7. *Driver* de excitação MAT do reator de ozônio.



Fonte: O autor.

O método de descarga corona para produção de ozônio foi, para esse presente estudo, a escolha mais viável para construção de um protótipo de baixo custo porque é capaz de gerar quantidades significativas do gás a custos reduzidos e material de fácil acesso, sendo o método mais utilizado para a obtenção do ozônio (Maidana et al., 2015).

A tecnologia eletroquímica em comparação com o processo corona para produção de ozônio exige o uso de um sistema de refrigeração para controle da temperatura para fluxos volumétricos maiores (Silva, 2004).

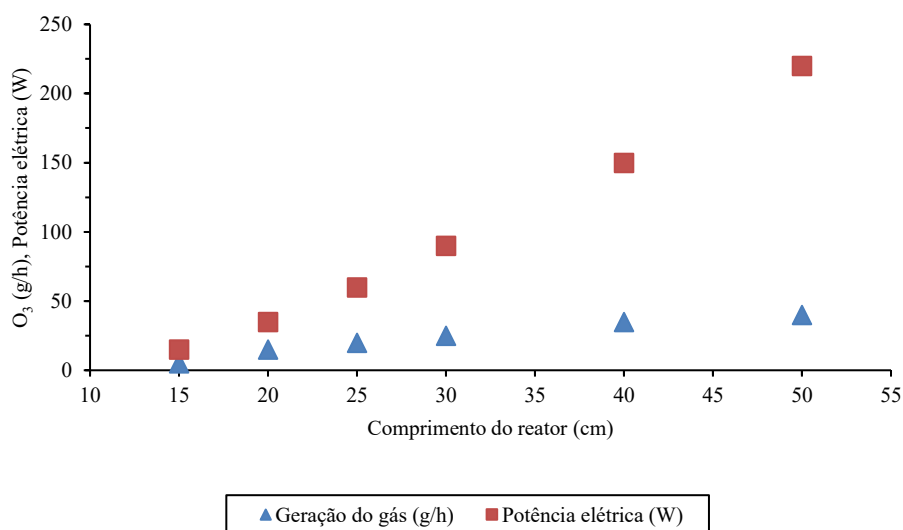
Já a radiação ultravioleta não atende as necessidades de produção requeridas para a maioria das aplicações devido ao alto custo e baixo rendimento dos reatores que utilizam esta tecnologia (Camboim et al., 2019).

4.3.1. Dimensões físicas avaliadas

A partir de um tubo de aço inoxidável de 3" foram realizadas a montagem de 6 reatores cilíndricos de comprimentos de 15, 20, 25, 30, 40 e 50 cm, respectivamente. Foram realizados ensaios nos quais se observou a influência da geometria do reator na produção de ozônio e o consumo de energia elétrica.

A Figura 4.8 apresenta os resultados dos ensaios de geração de O_3 e potência elétrica consumida em função do comprimento do reator.

Figura 4.8 – Comparação da potência elétrica absorvida da fonte de alimentação e vazão de ozônio em função do comprimento do reator.



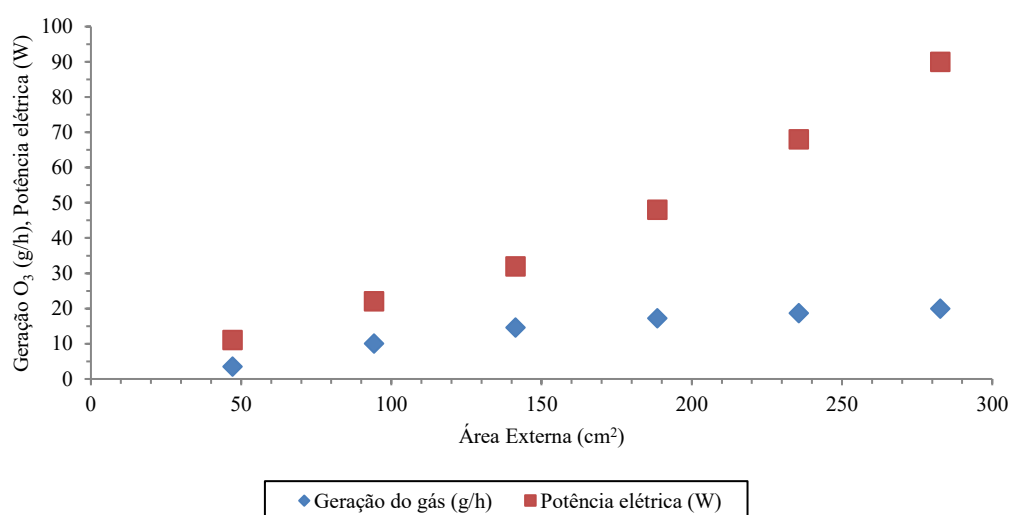
Fonte: O autor.

Os resultados revelaram a não linearidade regida pelas equações linear para a geração de O_3 e polinomial para a potência elétrica. Esta relação indica um aumento maior do consumo de energia com relação ao aumento da geração de O_3 .

A comparação da potência elétrica e volume de ozônio em função do comprimento do reator mostra que a potência necessária para acionar um reator de 50 cm é mais que o dobro (220 W) quando comparada com um reator de 30 cm (90 W), mostrando que o aumento no comprimento do reator, mantendo-se o diâmetro, não traz benefícios quando a eficiência energética. Não foram encontrados trabalhos equivalentes a este ensaio na literatura pesquisada, mostrando ser inovador a esta forma de análise abordada no presente estudo.

A análise da influência da área externa do cilindro do reator é demonstrada na Figura 4.9. De forma análoga à análise do comprimento do reator, aumentando-se o diâmetro externo do reator não implica em benefícios quando a eficiência energética. Não foram encontrados trabalhos equivalentes a este ensaio na literatura pesquisada até a presente análise dos resultados desse trabalho.

Figura 4.9 – Comparação da potência elétrica absorvida da fonte de alimentação e vazão de ozônio em função da área externa do cilindro do reator com até 30 cm de comprimento.

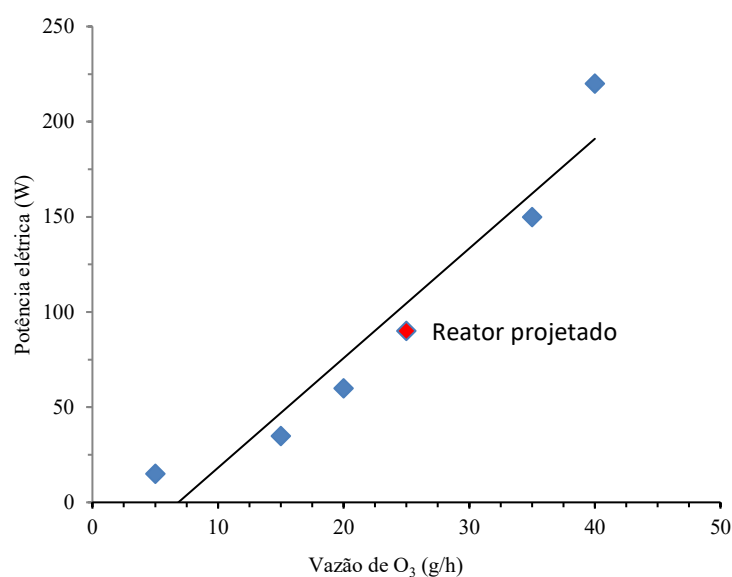


Fonte: O autor.

A Figura 4.10 apresenta potência elétrica consumida em função da produção de gás em ozonizadores disponíveis no mercado. O reator do presente estudo está destacado em

vermelho (Reator projetado) no gráfico, demonstrando a tendência linear, isto é, uma correlação positiva entre a produção de gás O_3 e consumo de energia. Tal correlação foi identificada no protótipo desenvolvido no presente estudo.

Figura 4.10 – Comparação da potência elétrica absorvida da fonte de alimentação com a vazão de ozônio entre ozonizadores disponíveis no mercado e o ozonizador projetado.



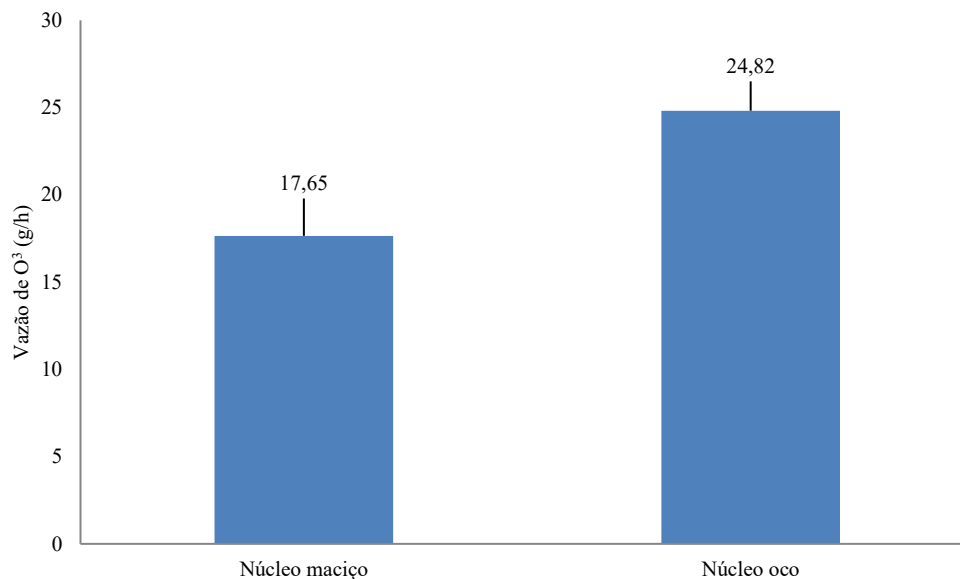
Fonte: O autor.

4.3.2. Tipo de núcleo

Para analisar a influência do tipo do núcleo do reator na geração do gás, foram projetados dois reatores com formato cilíndrico, cada qual medindo 30 cm de comprimento e 3" de diâmetro externo. O primeiro reator possuía um núcleo constituído por um cilindro interno oco e o segundo reator apresentava um núcleo constituído por um cilindro interno maciço. A geração de O_3 com o núcleo oco foi superior à geração do reator com o núcleo maciço, com valores de volume de 17,65 g/h quando utilizado o núcleo maciço e 24,82 g/h, para núcleo oco, diferença esperada devido à resistência ao fluxo de gases no núcleo maciço.

A Figura 4.11 demonstra o resultado deste ensaio.

Figura 4.11 – Produção de O_3 com O_2 puro como matéria prima, em função do tipo de núcleo utilizado. Dados obidos com titulação.



Fonte: O autor.

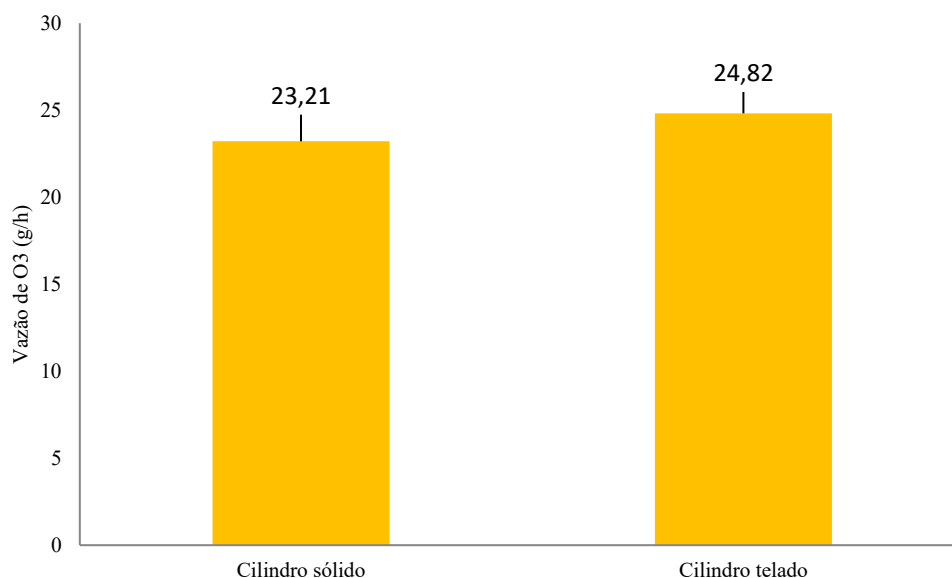
4.3.3. Material do cilindro

O material principal para a montagem do reator foi o aço inoxidável 306. No cilindro externo para vedação e resistência mecânica foi utilizado o aço escovado e para o interno foram testados o aço liso escovado e o aço com orifícios na forma de tela.

A Figura 4.12 mostra a quantitativamente diferença de geração de ozônio entre os arcos do efeito corona formados no reator com tubo de aço inoxidável liso e no reator com tubo de tela de aço inoxidável. Nota-se uma diferença de 23,21 g/h no cilindro sólido para 24,82 g/h no cilindro telado, o que representa uma eficiência ligeiramente superior para o uso de tela na formação do arco elétrico (6,6%). Isso se deve ao fato de o arco elétrico formar o efeito corona em pontos de irregularidades na superfície aparentemente lisa do metal, concentrando a geração de ozônio nestes pontos específicos.

No eletrodo utilizando tela, a geração de ozônio ficou distribuída de forma mais uniforme ao longo do reator, gerando gás em toda a sua área.

Figura 4.12 – Produção de O_3 com O_2 puro como matéria prima, em função do material utilizado no cilindro. Dados obidos com titulação.



Fonte: O autor.

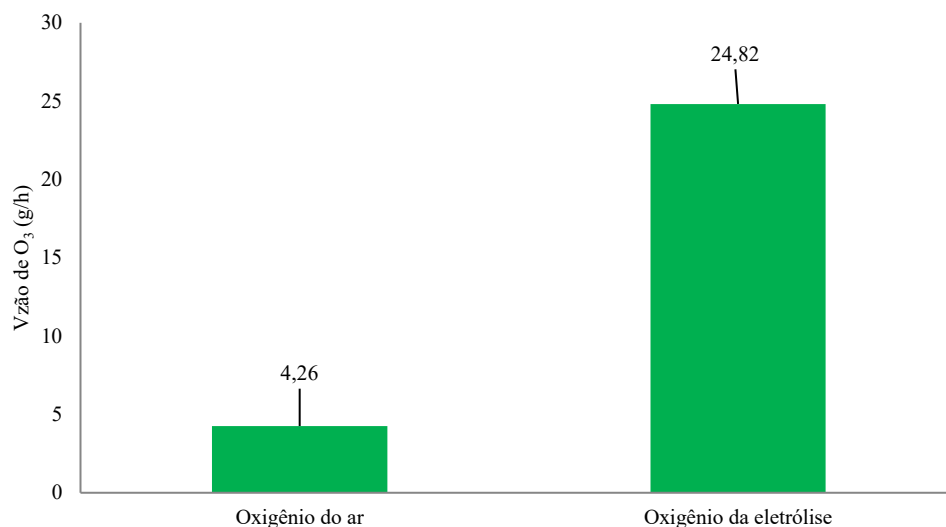
4.3.4. Alimentação de oxigênio – ar ou O_2 de eletrolítico

Duas fontes primárias de oxigênio foram testadas neste ensaio: o oxigênio de alta pureza obtido diretamente da saída das células eletrolisadores discutidas no item 4.2 deste capítulo e o ar atmosférico sem filtro com ventilação forçada por uma micro bomba compressora de ar.

A Figura 4.13 demonstra que neste ensaio, a geração eletrolítica de O_2 proporcionou uma vazão volumétrica de O_3 de 24,82 g/h de O_3 e uma vazão volumétrica de 4,26 g/h a partir da utilização direta do ar atmosférico. A razão entre os dois ensaios foi de 17,16%, próxima da relação de proporcionalidade do O_2 no ar (20,95%).

Esta relação entre geração de ozônio com ar ou com oxigênio puro foi encontrada no trabalho de Metcalf e Eddy (2014) comparando a energia necessária para cada tipo de fonte de oxigênio para geração do ozônio em kWh/kg, resultando em uma média de 40% de consumo menor para o uso do oxigênio puro.

Figura 4.13 – Produção de O_3 em função da fonte de oxigênio. Dados obtidos por titulação.

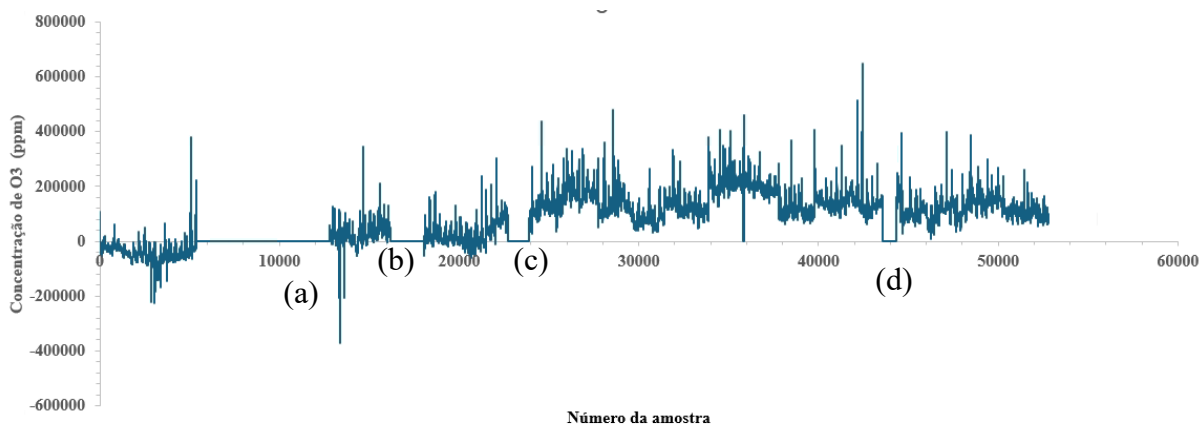


Fonte: O autor.

4.4. Sensor de ozônio

Os dados do sensor de ozônio foram armazenados na plataforma *Thingspeak* de 25/05/2023 até 28/11/2023 a cada 5 min, gerando 52.780 registros. Devido às recomendações de segurança na exposição mínima ao gás, os ensaios utilizando o ozônio foram realizados uma vez em dias programados. Este intervalo de 6 meses nos quais o sensor ficou conectado na fonte de alimentação elétrica serviu para avaliar seu comportamento. A Figura 4.14 mostra as leituras obtidas, mostrando registros negativos sem calibração e sem tratamento de dados.

Figura 4.14. Registro das leituras do sensor MQ-131 sem tratamento de dados.



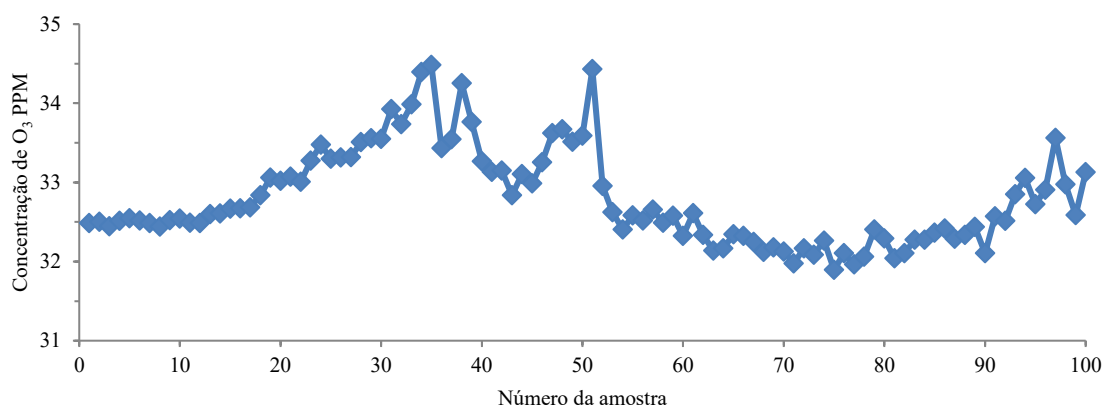
Fonte: O autor.

Durante o período de leituras no sensor de ozônio foram utilizadas 3 unidades do sensor, pois houve necessidade de substituição dos mesmos devido a danos

A Figura 4.14 demonstra o ponto (a) de 13/06 a 10/07/2024 onde houve um desligamento para ajustes nos equipamentos, em (b), (c) e (d) houve substituições do sensor, respectivamente nos períodos de 26/07, 15/08 e 28/10/2024

A Figura 4.15 mostra as leituras automatizadas do dia 28 de novembro de 2023 das 07:56:57 até as 16:15:11h, correspondendo a 100 registros de concentrações de ozônio. O intervalo entre coletas foi de 5 min e os picos representam os momentos de acionamento do reator de ozônio.

Figura 4.15 – Variação da concentração de ozônio em PPM em 100 amostras coletadas no dia 28 de novembro de 2023.



Fonte: O autor.

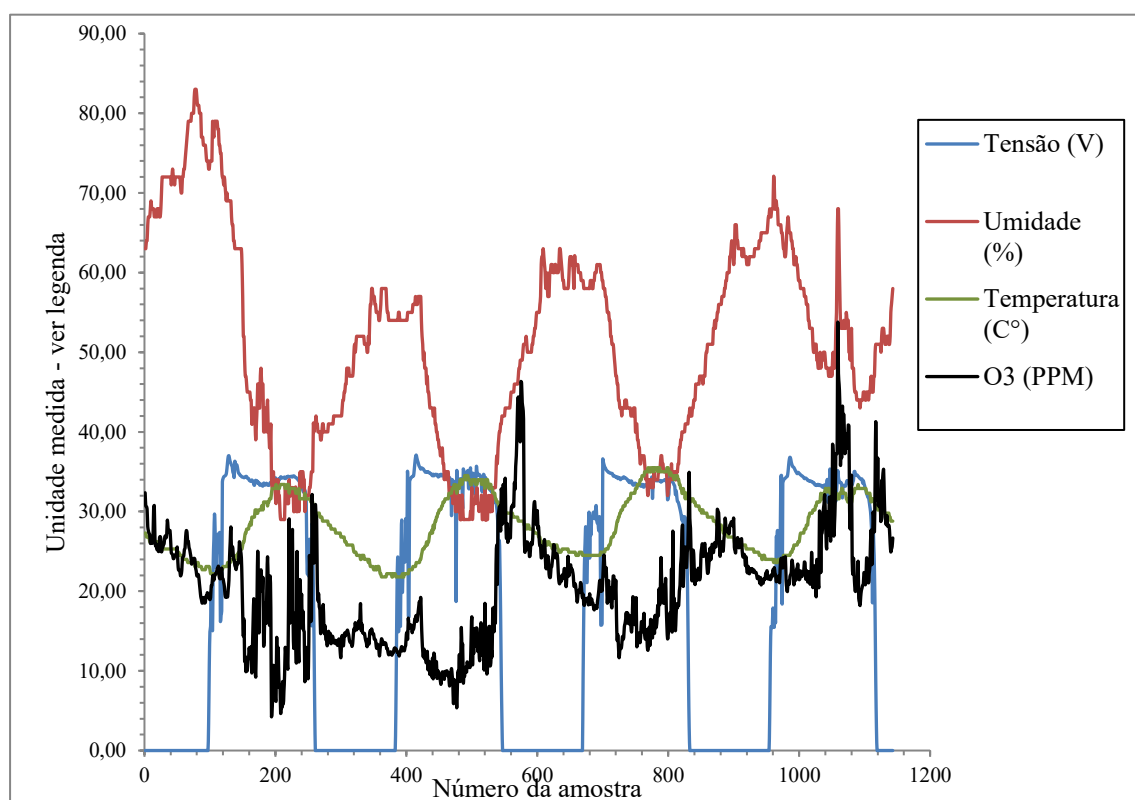
A calibração do sensor não foi possível por falta de informações para a conversão de ppm (do sensor) para g/h (da iodometria). Realizou-se a conversão de ppm para g/m³ utilizando a massa molar de 48 g/mol e o volume molar de 24,47 L, para pressão de 1 atmosfera e temperatura de 25°C, segundo a Equação 4.2 (Avelino, 2019). Segundo Schiavon (2014), essa conversão é apenas aproximada, pois dentro do reator de ozônio formam-se também componentes O₄, O₅ e O₆, além de possuir quantidade de O₂ que não sofreu reação. Esta taxa do fluxo dos gases mistos em L/min não garante a concentração do ozônio.

$$\text{Concentração} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \text{Concentração (ppm)} \cdot \frac{\text{Massa Molar} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{\text{Volume molar (L)}} \quad (4.2)$$

Os picos nas amostras de número 35 e 50 demonstraram o momento de acionamento do reator indicando concentrações de 34,5 PPM ou 70 g/m³ (Figura 4.15).

A Figura 4.16 mostra as medições de volume de ozônio, temperatura, umidade e tensão na saída da placa fotovoltaica no período de 10 a 13 de novembro de 2023. Estas variações também foram observadas no trabalho de Avelino (2023). As medições de temperatura e umidade foram realizadas com o sensor DHT22 e os trabalhos de CIA (2015) e Goncalves (2023) apresentaram curvas semelhantes.

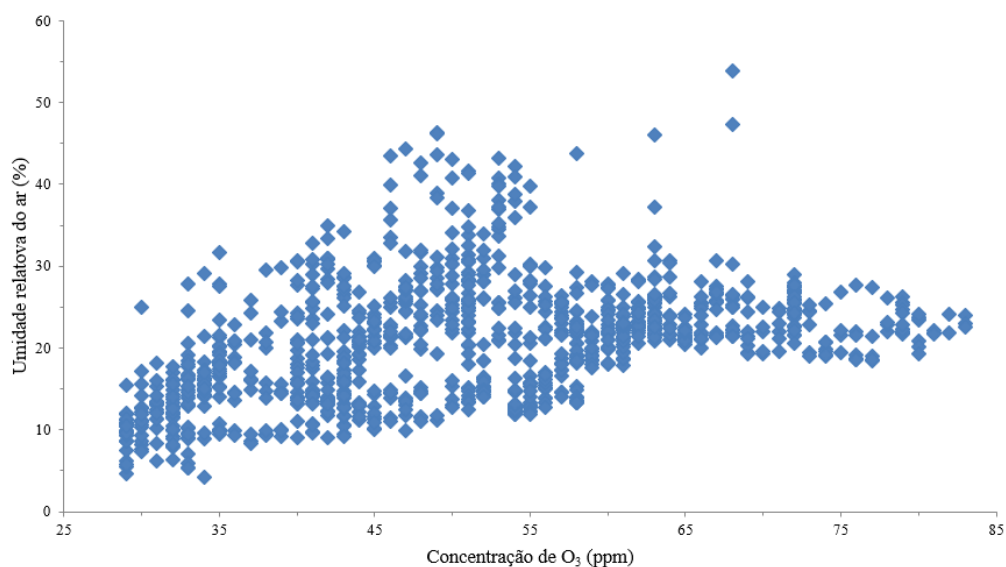
Figura 4.16 – Medição de ozônio, temperatura, umidade e tensão na entrada do controlador de carga no período de 10 a 13 de novembro de 2023



Fonte: O autor.

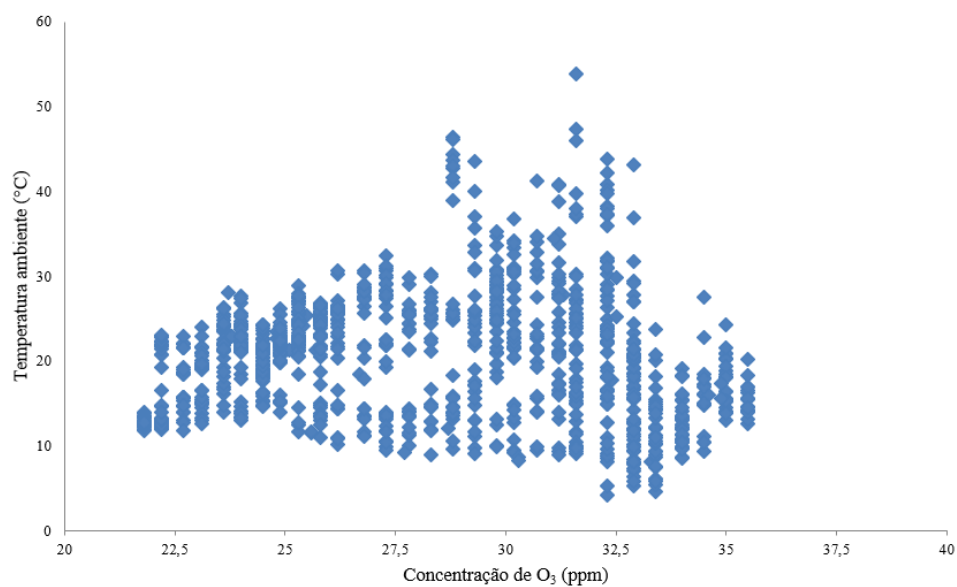
Em uma análise numérica detalhada, não foram encontradas correlações entre as concentrações de ozônio medidas e os valores de umidade relativa do ar na temperatura ambiente, conforme mostrado nas Figuras 4.17 e 4.18, respectivamente.

Figura 4.17 – Correlação entre concentração de ozônio e umidade relativa do ar.



Fonte: O autor.

Figura 4.18 – Correlação entre concentração de ozônio e temperatura ambiente.

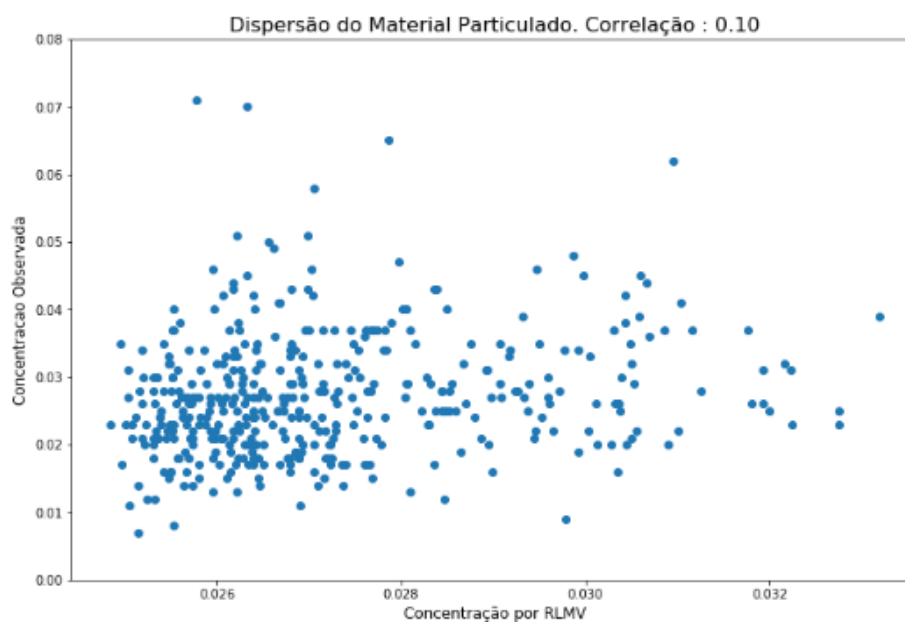


Fonte: O autor.

Segundo Galetti et al. (2020), apenas com o uso de Redes Neurais (RN) foi possível para se obter correlação entre a estação de baixo custo e a estação convencional utilizada para calibração. Avelino (2019) também não obteve correlação em suas observações.

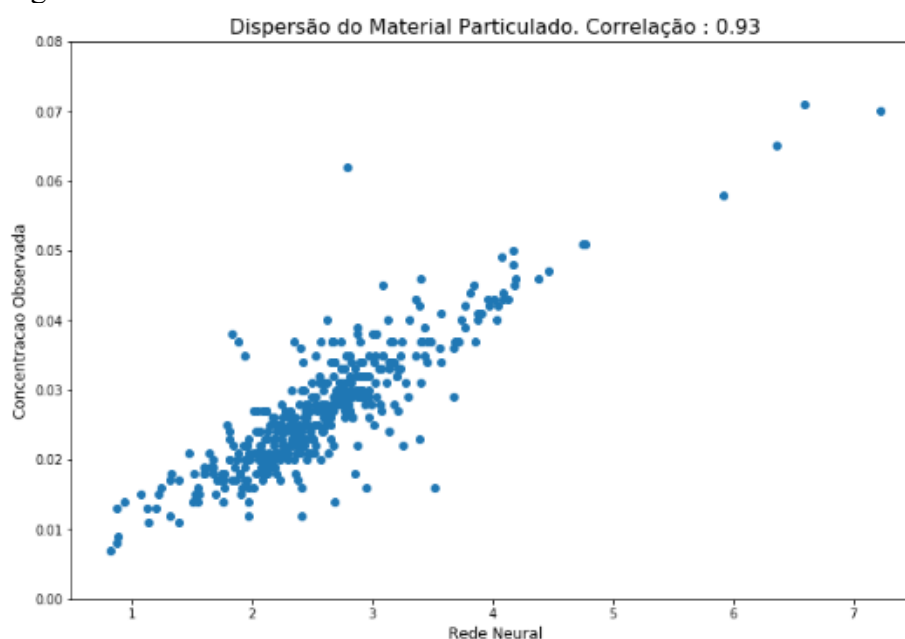
A sugestão para novos trabalhos com sensores eletroquímicos em geral é o uso de inteligência artificial (Redes Neurais) para análise e correlação de dados, possibilitando a calibração dos sensores de ozônio. Essa diferença de análise está evidente nas Figuras 4.19 e 4.20, ambas apresentadas no trabalho de Galetti et al. (2020).

Figura 4.19– Dados correlacionados em análise convencional.



Fonte: Gatelli et al. (2020).

Figura 4.20 – Dados correlacionados em análise com redes neurais.



Fonte: Gatelli et al. (2020).

4.5. Volumetria do oxigênio

Na técnica de volumetria descrita na seção 3.5, foi constatado que a primeira medição de uma série de ensaios apresentou um atraso de cerca de 30 segundos para o aparecimento das primeiras bolhas de gás nas provetas, com relação às medições seguintes. Este *delay* foi atribuído ao tempo que as células eletrolíticas levaram para preencher a tubulação depois que sistema ficou inativo por algumas horas.

Nestes ensaios foram medidos o volume do O_2 produzido nas células eletrolíticas, para utilização posterior na produção de O_3 no reator de ozônio.

Verificou-se que o método é lento (da 1 a 2 min para cada ensaio), e no maior volume obtido com a concentração de 7 mol.L^{-1} com 3 células eletrolíticas em série, a proveta necessitou novo preenchimento com água a cada 2 ensaios sucessivos. A sugestão para novos trabalhos é utilizar sensores de vazão projetados para pequenas vazões, inclusive podendo medir as células individualmente mesmo conectadas em série diretamente na saída de cada uma. Cunha (2021) obteve 400 mL/min com 3 células eletrolíticas (eletrodos de $9 \times 9 \text{ cm}$) a 7 molar de KOH e no presente estudo foi verificado 485 mL/min , onde se utilizou eletrodos maiores ($12 \times 12 \text{ cm}$), e confirmou-se que as vazões encontradas estão coerentes com a literatura pesquisada.

4.6. Iodometria

A iodometria ou titulação pelo Método Iodométrico mediu a geração de ozônio e produziu uma série de resultados que são discutidos abaixo.

O protótipo tem como base a geração de oxigênio com 3 células eletrolíticas alimentadas com energia solar fotovoltaica com controlador de carga do tipo MPPT. O gerador de ozônio consiste em um tubo cilíndrico externo de 3" de diâmetro com outro cilindro interno concêntrico de 2,8" feito com uma tela de aço inoxidável. Estes parâmetros de dimensões físicas foram alterados e posteriormente foram realizadas as medições por iodometria.

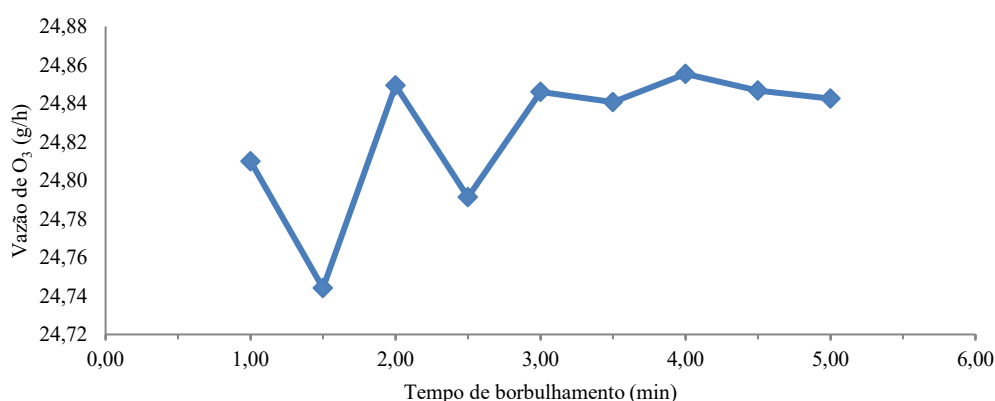
A primeira variável estudada foi o tempo de borbulhamento com ozônio, com leituras de 1 a 5 minutos de posição com variações a cada meio minuto. Para estes ensaios foi utilizada a configuração padrão acima do protótipo ou seja, utilizando oxigênio diretamente da saída dos eletrolisadores a uma vazão média de $21,28 \text{ L/h}$.

As leituras mostradas na Figura 4.21 convergem para a média de geração de ozônio de 24,82 g/h, o que está de acordo com os fornecedores de ozonizadores pesquisados (Wier, 2021; Myozone; Philozon, 2023).

Na sequência de ensaios, a entrada de oxigênio do reator de ozônio foi substituída pela bomba de pressão ajustada para uma vazão de 21 L/h e ar atmosférico em conexão direta, sem utilização de filtro de ar. Verifica-se que o padrão das leituras segue o mesmo da Figura 4.14, com a convergência para o valor médio de 4,26 g/h de ozônio. Schiavon (2024) obteve 1,25 g/h onde se utilizou o ar como fonte de oxigênio.

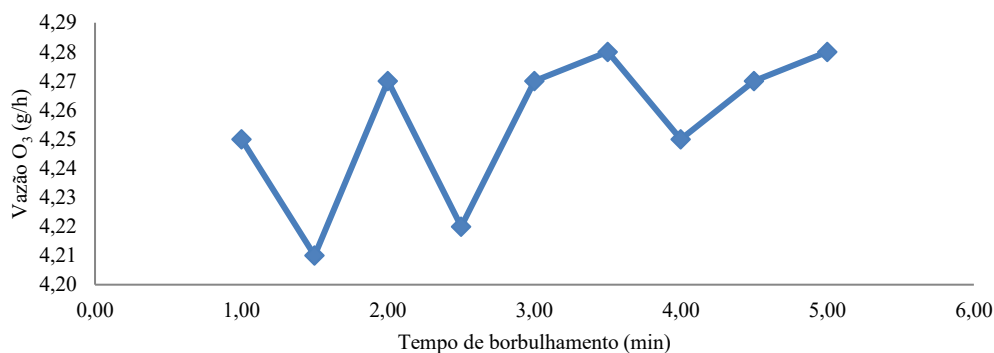
As Figuras 4.21 e 4.22 mostram os dados utilizados para elaboração da Figura 4.13, que compara a produção de ozônio com fonte de oxigênio puro e a produção com fonte de ar.

Figura 4.21– Produção de ozônio de acordo com o tempo de borbulhamento utilizando oxigênio de alta pureza.



Fonte: O autor.

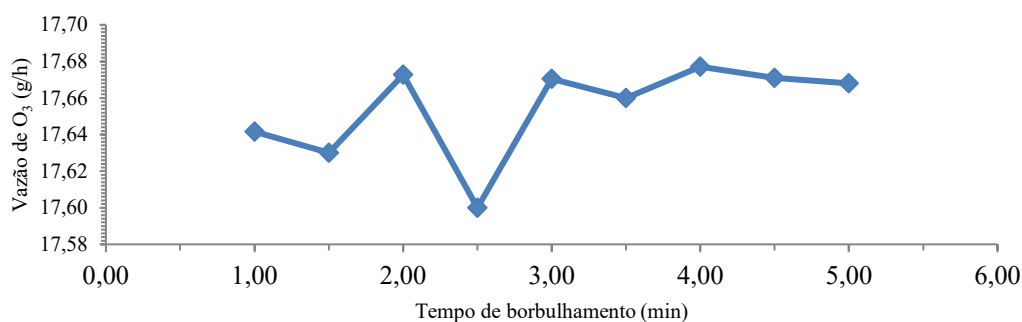
Figura 4.22 – Produção de O₃ de acordo com o tempo de borbulhamento utilizando o ar como fonte de oxigênio.



Fonte: O autor.

Continuando os experimentos, foram acionadas novamente as células eletrolíticas para produção de oxigênio de alta pureza, e colocado um cilindro maciço de aço dentro do tubo interno de forma concêntrica. A influência desta alteração na produção de ozônio está mostrada na Figura 4.11 e abaixo na Figura 4.23, onde a produção converge para 17,65 g/h no uso do núcleo maciço no reator de ozônio.

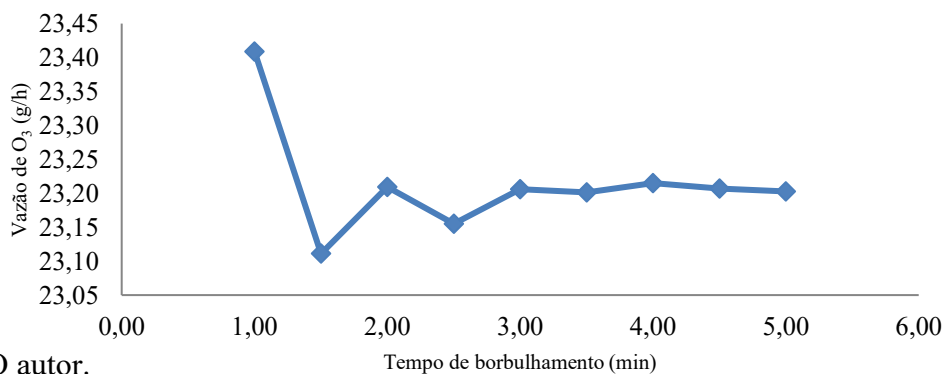
Figura 4.23 – Produção de O_3 de acordo com o tempo de borbulhamento utilizando núcleo maciço no cilindro interno do reator de ozônio.



Fonte: O autor.

No intuito de avaliar a influência da tela utilizada como material para a confecção do cilindro interno, foi construído um segundo reator com as mesmas dimensões e formato do reator de referência e utilizado um tubo oco de aço inoxidável de 2 mm de espessura em suas paredes sólidas. A Figura 4.24 aponta para uma produção de 23,21 g/h de ozônio sem uso de tela metálica no cilindro do reator, que é 6,6% inferior quanto se utiliza a tela (24,82 g/h).

Figura 4.24 – Produção de O_3 de acordo com o tempo de borbulhamento não utilizando tela no cilindro interno do reator de ozônio.



Fonte: O autor.

Estas medições através do método iodométrico mostram-se mais precisas a medida que aumentamos o tempo de borbulhamento do ozônio. Nota-se que a partir de 3 minutos de

exposição ao gás ozônio as leituras mostram valores baixos de desvio padrão como mostram as tabelas de titulação no Apêndice II.

O método de iodometria foi utilizado no trabalho de Schiavon (2014) onde se obteve uma produção de 1,25 g/h de ozônio a partir do ar atmosférico e consumiu 25,8 W.

A pesquisa obteve 4,26 g/h com a mesma fonte de oxigênio, e consumiu 90 W de potência elétrica, dados estes dentro do esperado.

O uso do analisador portátil de ozônio Handheld, mesmo com medidas realizadas a distâncias de 1 a 5 metros do reator, não forneceu leituras fixas e confiáveis da concentração de ozônio em nenhuma das quatro faixas programáveis. Embora seja muito utilizado como alarme, o aparelho de custo moderado não serviu como referência para calibração dos sensores.

4.7. Custos do projeto

A Tabela 4.3 agrupa todos os investimentos, inclusive a vidraria, entre outros itens reutilizáveis, material de consumo como reagentes para titulação. A Tabela 4.4 demonstra apenas os materiais específicos utilizados na construção do reator de ozônio.

Tabela 4.3 – Investimentos gerais.

CENTRO DE CUSTO GERAL	CUSTO (\$)
REATOR	564,01
SENSORES	388,16
REAGENTES	60,80
ELETRONICOS	195,88
VIDRARIA	186,57
MEDIDORES	262,99
DIVERSOS	379,60
TOTAL	2038,01

Tabela 4.4 – Custo do reator

MATERIAL REATOR	CUSTO (\$)
CILINDRO INOX	9,00
TELA ALUMÍNIO	2,00
DRIVE 2-20 kV	5,00
CONEXÕES PVC	3,00
NIPLES	6,00
VEDAÇÃO	2,00
MANGUEIRAS SILICONE	4,00
TOTAL	31,00

Fonte: O autor.

4.8. Resultados obtidos

Em relação à produção de oxigênio nas células eletrolíticas com energia solar, foram obtidos os seguintes resultados:

- A produção de energia elétrica com o uso do controlador de carga do tipo MPPT superou em 25% a produção de energia com o uso da placa solar diretamente nos reatores, o que condiz com a literatura e as curvas de carga destes equipamentos e minimiza o efeito das variações da irradiância solar no volume da vazão dos gases citados em outros trabalhos correlatos;
- A maior eficiência na produção de oxigênio foi obtida com o arranjo de 3 células eletrolíticas em conexão série a uma concentração de 7 mol.L^{-1} do eletrólito hidróxido de potássio. Neste ponto, a corrente drenada foi de 19,12 A com 11,95 V gerando 481,56 mL/min e um volume de oxigênio de 3,51 mL/J;
- A média de proporção entre o oxigênio e o hidrogênio foi de 1,98, próxima da proporção gasosa de 2 para 1 destes dois elementos na água destilada nas condições do experimento, indicando que a mistura entre os gases gerados na eletrólise foi mínima e que a pureza do oxigênio, por dedução lógica, se encontra próxima da pureza do hidrogênio de 98,8% relatada em outros trabalhos com o uso de cromatografia gasosa;
- As células eletrolíticas confeccionadas com acrílico apresentaram problemas de vazamento de eletrólito por borbulhamento excessivo dos gases próximo aos tubos superiores de coleta e derretimento do acrílico na base dos conectores elétricos devido ao aquecimento dos pólos com correntes superiores a 20 A e isso foi um fator limitante para os experimentos;
- As células eletrolíticas confeccionadas com vidro de 6 mm apresentaram problemas de pequenos vazamentos de eletrólito devido ao ataque cáustico do hidróxido de potássio na cola de silicone utilizada;

Em relação a produção de ozônio no reator corona foram obtidos os seguintes resultados:

- O formato cilíndrico apresentou-se mais eficiente e operacionalmente mais viável, pois as tubulações e conexões disponíveis no mercado são fornecidas neste formato;

- O cilindro interno do reator, sendo construído com material feito com metal telado apresenta uma melhor distribuição dos arcos elétricos formados e o preenchimento do seu núcleo com material sólido reduz em média 4,4% a produção de ozônio em gramas por hora;
- A instalação de micro ventiladores no interior do reator não interferiu nos resultados e também não auxiliou no fluxo de gás. Foi necessário utilizar uma bomba de ar pressurizadora para fornecer o ar para os experimentos;
- A produção fixada de ozônio atingiu 25 g/h consumindo 90 W de potência elétrica da fonte de alimentação, o que condiz em eficiência e capacidade de geração em comparação com reatores presentes no mercado;
- O uso do ar como fonte de oxigênio proporcionou uma geração de ozônio em 18% menos que a geração de ozônio com o oxigênio de alta pureza fornecido pelas células eletrolíticas. Valor próximo da proporção de oxigênio encontrada no ar, amplamente documentada.
- O custo de produção do reator foi baixo, chegando a 20% do custo de reatores similares;

De maneira geral, o projeto do protótipo e sua execução geraram as seguintes conclusões:

- A adição de uma plataforma de aquisição e armazenamento de dados como a *ThingSpeak* auxiliou automatizando a tarefa de leitura e apontamento das informações provenientes dos sensores com uma economia considerável de tempo;
- Todos os sensores elétricos de tensão e corrente, temperatura e umidade funcionaram dentro do esperado;
- Os sensores eletroquímicos de ozônio apresentaram problemas de necessidade de pré-aquecimento de no mínimo 48 horas, perda de sensibilidade em uso contínuo por períodos de alguns meses e tempo de resposta de até 3 minutos e sua utilização em sistemas de alarme de gases é excelente, mas a utilização precisa ser reavaliada para sistemas onde a precisão é necessária, apesar dos custos muito baixos;

- Foi necessária a titulação de iodometria para mensurar a quantidade de ozônio produzida, mostrando ser um método eficiente, mas lento e esta etapa é uma das principais sugestões de melhoria em trabalhos futuros;
- O protótipo concluído possui produção e eficiência e custo dentro do esperado e apresentou-se viável com sua característica móvel.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as conclusões referentes à produção de ozônio em reator baseado no efeito corona, utilizando oxigênio proveniente de célula eletrolítica alimentados com energia solar fotovoltaica e também apresenta as sugestões para futuros trabalhos.

5.1. Conclusão

- O formato cilíndrico foi mais conveniente operacionalmente para conexões de tubos.
- O aumento das dimensões do reator de ozônio não traz benefício quanto a eficiência energética.
- A geração de O_3 é proporcional as dimensões físicas do reator de ozônio e foram gerados 25 g/h de ozônio no reator de 30 cm de comprimento e 3” de diâmetro.
- O eletrodo interno feito de tela de alumínio uniformiza o arco elétrico, reduz custo e tem maior eficiência.
- O uso do O_2 puro apresenta produção de O_3 superior em comparação com o uso do ar.
- O consumo de energia elétrica mostrou-se compatível com ozonizadores do mercado (90 W para a produção de 25 g/h de ozônio).
- O protótipo móvel alimentado com energia solar fotovoltaica mostrou-se economicamente viável e prático.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Diante disso, tendo como objetivo o aperfeiçoamento do protótipo desenvolvido, são apresentadas as sugestões para futuros trabalhos:

- Realizar avaliação do uso de outros materiais mais resistentes à característica cáustica do hidróxido de potássio para a construção da cuba da célula eletrolítica em seu uso contínuo por longos períodos de tempo;
- Avaliar a substituição do sistema de conexões gasosas em todo o protótipo, desde a saída das células eletrolíticas até a saída do reator de ozônio para minimizar perdas de gases nas mangueiras e conexões;
- Utilizar arranjos de ambos os reatores, eletrolítico e corona, em configurações mistas em série e paralelo para aperfeiçoar o aproveitamento da energia fornecida pelo sistema de geração solar fotovoltaico;
- Realizar estudo de métodos e equipamentos de medidas de vazão de gases oxigênio e ozônio mais eficientes e precisos.
- Avaliar a compensação da temperatura e umidade na sensibilidade dos sensores eletroquímicos de oxigênio e ozônio;
- Realizar estudo mais detalhado sobre o uso das informações obtidas nos sensores de umidade, pressão e temperatura e sua influência na produção dos gases;
- Reavaliar o material utilizado na fabricação do suporte com o objetivo de reduzir o peso para facilitar logística de transporte;
- Realizar estudo específico e detalhado sobre sensores eletroquímicos de ozônio visando melhoria em tempo de resposta, precisão e aumento de vida útil.
- Realizar testes com o uso do ozônio produzindo no protótipo diretamente no saneamento de efluentes.

Os reatores projetados compilados no protótipo atenderam aos objetivos definidos no projeto preliminar.

ADEEL 2023 Blog. Mapa de Radiação Solar no Brasil. Disponível em: <https://www.adeel.com.br/mapa-de-radiacao-solar-no-brasil/>. Acesso em: 27 fev. 2024.

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade XYZ, Cidade, Ano.

ALVES, Maria Aparecida da Silva. Ozonização no controle de qualidade de frutas e hortaliças: revisão. 2021. 12 f. Monografia (Especialização em Tecnologias Pós-Colheita de Produtos Hortícolas) - Universidade ABC, Cidade, Ano.

ANDRADE, João Carlos de. Determinações iodométricas. Revista Chemkeys, São Paulo, n. 2, p. 1-6, 2001.

ARAÚJO, Alexandre Moreira et al. Equipamentos de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar: uma revisão. Revista Maestria, São Paulo, v. 18, n. 1-135, p. 106-120, 2023.

AROUTIOUNIAN, Vladimir. Metal oxide hydrogen, oxygen, and carbon monoxide sensors for hydrogen setups and cells. International Journal of Hydrogen Energy, v. 32, n. 9, p. 1145-1158, 2007. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.10.024

AVELINO, Tiago Filipe da Silva. Construção de uma Estação Portátil de Baixo Custo para Medição das Concentrações de O₃ e NO₂. 2019. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2019.

BALBUENA, Victor Alejandro Rivarola et al. Caracterização da placa bipolar de eletrolisadores alcalinos para produção de hidrogênio. 2021. 37 f. Monografia (Especialização em Engenharia Química) - Universidade XYZ, Cidade, Ano.

BARBOSA, Harley Alves. Processos de produção e estocagem de hidrogênio: uma revisão da literatura. 2020. Monografia (Especialização em Engenharia de Energias Renováveis) - Universidade ABC, Cidade, Ano.

BARROSO, A. M. R. et al. Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. Revista Arte, Ciência e Tecnologia, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 127-140, 2021.

BASSANI, Leandro et al. Desinfecção de efluente sanitário por ozônio. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20., 2003, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABES, 2003. p. 28-30.

BATAKLIEV, T. et al. Ozone decomposition. Interdisciplinary Toxicology, v. 7, n. 2, p. 47, 2014. DOI: 10.2478/intox-2014-0007

BAUMGARTEN, Maria da Graça Zepka; POZZA, Simone Andréa. Qualidade de águas: descrição de parâmetros referidos na legislação ambiental. 2021. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) - Universidade CDE, Cidade, Ano.

BELTRAME, C.A. et al. Influence of different sanitizers on food contaminant bacteria: effect of exposure temperature, contact time, and product concentration. *Food Science and Technology*, v. 32, n. 2, p. 228-232, 2012. DOI: 10.1590/S0101-20612012000200008

BRAGA, Thereza Juventino Tonoli. A aplicação da ozonioterapia em periodontia: revisão de literatura. 2022. Monografia (Especialização em Odontologia) - Universidade WXY, Cidade, Ano. Introdução.

BEZERRA, Walter Aparecido. Arduino, reações químicas colorimétricas e amostrador passivo no estudo de dióxido de nitrogênio, NO₂, e ozônio, O₃, na atmosfera de Rondonópolis, MT. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade FGH, Cidade, Ano.

BONATES, Fabrizia Henriques; PESSOA, Rodrigo. Efeitos físico-químicos da aplicação de ozônio em água potável. 2021. 14 f. Monografia (Especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade JKL, Cidade, Ano.

BRAGA, Newton C. Sensores de Qualidade do Ar: Como Funcionam. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/meio-ambiente-e-saude/17620-sensores-de-qualidade-do-ar-como-funcionam-art4377.html>. Acesso em: 11 dez. 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Anvisa esclarece sobre uso de ozônio como desinfetante. Brasília, DF, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2020/anvisa-esclarece-sobre-uso-de-ozonio-como-desinfetante>. Acesso em: 27 set. 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Comunicado à imprensa. Brasília, DF, 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2023/comunicado-a-imprensa>. Acesso em: 18 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Ministério da Saúde. Instrução Normativa Conjunta nº 18, de 28 de maio de 2009. Brasília, DF, 2009.

BREATHE. 2024 Blog. Secador de Ar Comprimido para o Ar Respirável e Sua Importância. Disponível em: <https://protecaorespiratoria.com/secador-de-ar-comprimido-para-o-ar-respiravel-e-sua-importa>. Acesso em: 23 fev. 2024.

BRODOWSKA, A. J.; NOWAK, A.; ŚMIGIELSKI, K. Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical*

Reviews in Food Science and Nutrition, v. 58, n. 13, p. 2176-2201, 2018. DOI: 10.1080/10408398.2017.1304966

CAMBOIM, Laércio Ferro; NASCIMENTO, Fabiano Almeida; CAVALCANTI, Luiz Antonio Pimentel. Construção de um protótipo gerador de ozônio de baixo custo. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 8, n. 1, p. 171-187, 2019. DOI: 10.1590/2359-43442019000100010

CANTTO, Antonio Kaique. Tratamento de efluente secundário de estação de tratamento de esgoto contaminado com metilparabeno por processos baseados em ozônio. 2022. 22 f. Monografia (Especialização em Engenharia Ambiental) - Universidade XYZ, Cidade, Ano.

CAPSISTEMA. Referência de pinagem do ESP32: Quais pinos do GPIO você deve usar? 2020. Disponível em: <https://capsistema.com.br/index.php/2020/03/22/referencia-de-pinagem-do-esp32-quais-pinos-do-gpio-voce-deve-usar/>. Acesso em: 03 nov. 2022.

CAPSISTEMA. Detecção de gás e medição de ppm usando microcontrolador PIC e sensores de gás MQ. 2022. Disponível em: <https://capsistema.com.br/index.php/2022/01/11/deteccao-de-gas-e-medicao-de-ppm-usando-microcontrolador-pic-e-sensores-de-gas-mq/>. Acesso em: 23 fev. 2024.

CARDOSO, Fernando Cezar. Câmara desinfetadora de máscaras faciais a base de ozônio. 2021. 42 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Materiais) - Universidade ABC, Cidade, Ano.

CARDOSO, William Acordi et al. Desenvolvimento de um reator de cavitação hidrodinâmica para aplicação de ozônio no tratamento de efluentes têxteis. 2022. 35 f. Monografia (Especialização em Engenharia Ambiental) - Universidade XYZ, Cidade, Ano.

CARREIRA, António et al. Estudo de viabilidade de negócio para a implementação de uma unidade de NRC na Ibéria. 2019. Tese de Doutorado - Universidade ABC, Cidade, Ano. p. 5.

CAVALCANTE, Maria Leidiane; LIMA, Jorgiane da Silva Severino. A utilização do ozônio como sanitizante na indústria de alimentos: uma revisão narrativa. Nutrivisa-Revista de Nutrição e Vigilância em Saúde, v. 10, n. 1, p. e12097-e12110, 2023. DOI: 10.5935/1678-4282.20230013

CAVALHEIRO, Alexandra Lorini et al. Tecnologia de Ponto-de-Uso (POU) para desinfecção de água para consumo humano: reator UV-ozônio. 2023.

CAVALER, Jadiane Paola et al. Remoção de sulfeto de hidrogênio de biogás a partir de soluções de ferro III produzidas por eletrólise: avaliação da cinética química de purificação e regeneração. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade ABC, Cidade, Ano.

CETESB. Ozônio: a camada de ozônio. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/prozonesp/wp-content/uploads/sites/16/2014/02/acamadaozonio.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2024.

CFM, Conselho Federal de Medicina. Ozonoterapia não é válida para nenhuma doença, inclusive a COVID-19. 2020. Disponível em: <https://portal.cfm.org.br/noticias/ozonoterapia-nao-e-valida-para-nenhuma-doenca-inclusive-a-covid-19-2/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

CHAVES, Gabriela et al. TRATAMENTOS DE ÁGUAS POR OZONIZAÇÃO: REVISÃO. Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira, v. 1, p. e12560-e12560, 2016. DOI: 10.18593/apouv.v1n0a12560

CHIEREGATO, Fabiele et al. Análise da degradação do ozônio em diferentes tipos de água. Revista Inspirar Movimento & Saude, v. 23, n. 3, 2023. DOI: 10.21827/inspirar.v23n3a24245

CIA, A. Sensor de temperatura e umidade DHT22 (AM2302). 2015. Disponível em: <https://www.arduinoecia.com.br/2015/02/sensor-de-temperatura-e-umidade-dht22.html/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

COELHO, Caroline C. de S. et al. Ozonização como tecnologia pós-colheita na conservação de frutas e hortaliças: uma revisão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, p. 369-375, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p369-375

COSTA, João Luis Pessegueiro. Sistema de controlo de luminosidade auto-adaptativo usando tecnologias de IoT. 2020. Tese de Doutorado - Universidade XYZ, Cidade, Ano. p. 22.

CUMMINS. Cummins PEM Electrolyzer Will Supply Hydrogen to Denmark, Europe, Demonstrating Strong... 2021. Disponível em: <https://www.cummins.com/pt/news/2021/01/06/cummins-pem-electrolyzer-will-supply-hydrogen-denmark-europe-demonstrating-strong>. Acesso em: 10 fev. 2024.

CUNHA, Paula Cordeiro Rodrigues da et al. Estudo da degradação do surfactante dodecil sulfato de sódio a partir da cavitação hidrodinâmica acoplada à injeção de oxigênio gerado in loco por eletrólise alcalina da água induzida por energia solar fotovoltaica. 2021. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

CUNHA, Paula Cordeiro Rodrigues da. Efeito da adição de hidrogênio produzido a partir de eletrólise alcalina no desempenho de um motor de combustão interna. 2017. 120 f. Dissertação (mathesis) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.137>. DOI: 10.14393/ufu.di.2017.137

DA SILVA, L. M. et al. Advanced technologies based on ozonation for water treatment. In: WATER PURIFICATION CONFERENCE, 5., 2009, New York. Anais... New York: N. Gestsen & L. Sonderby, 2009.

DA SILVA, L. M. et al. Characterization of an electrochemical reactor for the ozone production in electrolyte-free water. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 40, p. 855, 2010. DOI: 10.1007/s10800-010-0091-5

DAS, Soumen; JAYARAMAN, V. SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors. *Progress in Materials Science*, v. 66, p. 112-255, 2014. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.002

DIAS C. de B. et al. Desenvolvimento e calibração de turbidímetro de baixo custo. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABRH, 2019. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0940-1-20190512-191607.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2023.

DOBEIC, Martin. Ozone as a disinfectant in the food industry. *MESO*, v. 19, n. 4, jul./ago. 2017.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

E4ENERGIASRENOVAVEIS. Painel Solar Fotovoltaico. 2023. Disponível em: <https://www.e4energiasrenovaveis.com.br/artigos/painel-solar-fotovoltaico>. Acesso em: 15 jul. 2023.

EMERIK, Rômulo Carlos da Silva. Modelagem e simulação de um sistema de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água – uma abordagem com enfoque na descarbonização e transição da matriz energética atual. 2023. p. 46.

FELICIANO DE LIMA, Ariane Ellen et al. Ozonioterapia como opção ao tratamento de lesões cutâneas em humanos: revisão integrativa da literatura. *Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR*, v. 26, n. 3, 2022. DOI: 10.25110/arqsaude.v26n3a12

FELLOWS, P. J. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática. Métodos de processamento mínimo. In: FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática*. Porto Alegre: Artmed, 2019. cap. 7, p. 376-380.

FERNANDES, Mirella. Da produção à aplicação de ácidos fortes. 2020. p. 21.

FERREIRA, Mônica de Castro. Dimensionamento de rede de distribuição de ar comprimido medicinal em hospital de grande porte. 2018.

FERREIRA, Cintia Alves et al. Produção de hidrogênio a partir da decomposição termoquímica da água. 2011.

FRANCO, A. M. G. Produção de hidrogênio verde a partir da reação de Deslocamento gás água - green hydrogen production from the water gas shift reaction – WGSR. 2021. Monografia (Graduação em Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Ituiutaba, 2021. p. 36.

FREITAS, G. M. T. Hidrogênio verde: estudo de caso sobre o potencial brasileiro como exportador para União Europeia utilizando programação linear. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2022.

GALETTI, Giovana Deponte et al. Desenvolvimento e aplicação de uma estação de qualidade do ar de baixo custo para monitorar a concentração de material particulado. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 12, p. 101272-101287, 2020. DOI: 10.34117 /bjdv6n12-573. DOI: 10.34117/bjdv6n12-573

GALLANDAT, N. et al. An analytical model for the electrolyzer performance derived from materials parameters. Journal of Power and Energy Engineering, n.5, p. 34-49, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.510003>. Acesso em 12 dez. 2022. DOI: [10.4236/jpee.2017.510003](https://doi.org/10.4236/jpee.2017.510003)

GRAÇA, P. C. Sistema de aquisição de dados utilizando o módulo esp8266 nodemcu. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017.

GONÇALVES, Ariane Coelho. Sistema de Monitoramento de Energia Solar Fotovoltaica com Armazenamento de Dados em Nuvem. 2023.

GROOT, Matheus T.; VREMAN, Albertus W. Ohmic resistance in zero gap alkaline electrolysis with a Zirfon diaphragm. Electrochimica Acta, v. 369, p. 137684, 2021. DOI: 10.1016/j.electacta.2021.137684

GUIMARÃES, Claudinei. Controle e monitoramento de poluentes atmosféricos. Elsevier Brasil, 2017.

HAMANN, C. H.; HAMNETT, A.; VIELSTICH, W. Electrochemistry. 2. ed. Weinheim; New York: Wiley-VCH, 2007. 531 p.

HENRIQUE, Gabriel Jesus de Almeida. Avaliação da Separação do Oxigênio a partir do Ar por Pressure/Swing Adsorption. 2022. p. 24.

HIBERDROLA. Eletrolisador. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador>. Acesso em: 23 jul. 2023.

HIDALGO, Júlia Giatti. Investigação do Impacto de Geradores Fotovoltaicos em Ressonâncias Harmônicas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o SimscapeTM/MATLAB. 2023. Tese de Doutorado.

IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications>. Acesso em: 10 jan. 2023.

IRENA. Patent insight report Innovation trends in electrolysers for hydrogen production. 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_EPO_Electrolysers_H2_production_2022.pdf?rev=647d930910884e51b60137bcf5a955a6. Acesso em: 10 jan. 2023.

IRENA. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 10 jan. 2023.

JÚNIOR, Guaracy Garcia Loureiro et al. A relação entre o dimensionamento de bateria e cenários solar para usinas industriais offgrid. *Diálogos Interdisciplinares*, v. 12, n. 1, p. 231-252, 2023.

LAMB, Thaís Aparecida et al. Avaliação da atividade antimicrobiana in vitro do gás ozônio. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 6, p. 152-159, 2021. DOI: 10.5585/iberoamericana.v12n6a11

LELUDAK, F. T.; Haus, T. L. Célula de hidrogênio: Estudo e construção de uma célula eletrolítica para produção de hidrogênio gasoso. *Caderno PAIC*, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 383-397, 2013. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.emnuvens.com.br/cadernopaic/article/view/25>. Acesso em: 21 fev. 2024.

LIMA, Manoel J. A.; FELIX, Erika P.; CARDOSO, Arnaldo A. Aplicações e implicações do ozônio na indústria, ambiente e saúde. *Química Nova*, v. 44, p. 1151-1158, 2021. DOI: 10.21577/0100-4042.20200205

LIMA, Francisco de Assis Rodrigues. O emprego de um sistema individual automático de geração/conversão de energia solar em elétrica, com seguimento automático de intensidade luminosa, como instrumento didático de incentivo, motivação e suporte ao ensino de tópicos interdisciplinares de Física Moderna. 2024. p. 29.

LOURENÇÃO, Juliana. Avaliação da resistência de microrganismos patogênicos à desinfecção sequencial com ozônio-radiação ultravioleta e cloro-radiação ultravioleta. São Carlos, 2009. p. 30.

KOHLER, Heinz et al. New applications of tin oxide gas sensors: I. Molecular identification by cyclic variation of the working temperature and numerical analysis of the signals. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 61, n. 1, p. 163-169, 1999. DOI: 10.1016/S0925-4005(98)00252-5

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; High-voltage engineering: fundamentals. 1. ed. Pergamon Press, 1984.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J.; High Voltage Engineering: Fundamentals. 2nd ed. Newnes, 2000.

MAIA, Cláudio Márcio de Medeiros. Eficácia de protocolos de sanitização na remoção de parasitas em vegetais: uma revisão sistemática com meta-análise. 2022.

MAIDANA, W.; KREUTZ, C.; BERNARDI, R. Análise de clarificação de efluentes industriais utilizando gerador eletrônico de ozônio. In: *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014* [= Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]. São Paulo: Blucher, 2015. P. 6940-6947.

MAKER, S. Sensor de Turbidez Para Monitoramento de Água. 2022. Disponível em: <https://www.sermaker.com/sensor-de-turbidez-para-monitoramento-de-agua>. Acesso em: 16 de julho de 2022..

MARTINS, Lucas Bacich et al. Desenvolvimento de sistema de monitoramento de painéis fotovoltaicos para horta automatizada com internet das coisas. 2023.

MARQUES, Marcelo Borges. Avaliação da concentração de ozônio na água gelada potável e de injeção em relação ao tempo. 2022.

MARUYAMA, Gustavo Yoshio et al. Tecnologias para Implementação de Laboratórios Remotos de Robótica: Revisão Sistemática da Literatura. *Anais do Computer on the Beach*, v. 13, p. 059-065, 2022.

MASON FILHO, Vivaldo. Aplicação de ozônio como sanitizante na indústria de alimentos: uma revisão narrativa. 2023. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/nutrivisa/article/view/12097>. Acesso em: 28 jul. 2023.

MATOS, Daniel Colaciti. Ozonioterapia em saúde: revisão de literatura. 2022.

MATTOS, L. Fernando. O ozônio tem outras aplicações na indústria de alimentos além de sanitizante? Food Safety Brazil, 2022. Disponível em: <https://foodsafetybrazil.org/ozonio-outras-aplicacoes-na-industria-de-alimentos-alem-de-sanitizante/>. Acesso em: 28 jul. 2023.

MATTOS, Guilherme Rodrigues da Silva. Estudo da eficiência de células solares cobertas com compósitos metal-dielétrico formados por vidros dopados com íons de terras-raras e nanopartículas cristalinas. 2023. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo.

MELLO, F. R. de. Controle e qualidade dos alimentos. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. McGraw Hill Brasil, 2015. p. 1343.

MICHAEL, Peter R.; JOHNSTON, Danvers E.; MORENO, Wilfrido. A conversion guide: Solar irradiance and lux illuminance. Journal of Measurements in Engineering, v. 8, n. 4, p. 153-166, 2020. DOI: 10.21595/jme.2020.21444

MICRODIGISOFT. Começando com o Conselho de Desenvolvimento ESP32. 2021. Disponível em: <https://microdigisoft.com/getting-started-with-the-esp32-development-board/>. Acesso em: 22 abr. 2023.

MILANI, Eric de Almeida Costa. Revisão: ozonização no controle da incidência de pragas em grãos armazenados. 2021.

MONTEIRO, J. Caroline. Avaliação do uso do ozônio na sanitização de facas e na eliminação de Salmonella em língua suína. 2021. 45f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021. DOI: 10.37585/frutas

MONTEIRO, E. Rodrigues; TIECHER, A. Sanitização de frutas e hortaliças: uma revisão. Revista Higiene Alimentar, v. 36, jul./dez., 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.37585/frutas>. Acesso em: 22 set. 2023..

MONTENEGRO, José Lucas Pereira Souto. O uso e aplicação do ozônio em atividades residenciais: uma revisão de literatura. 2021.

MORAIS, Lucas Vasconcelos de. Controladores de Carga MPPT para Painéis Solares. UnB Engenharia Elétrica, Brasília, DF, 2018.

MORAES, Eduardo de; MOREIRA, Jose Roberto Simões; LEITE, Viviane Otero. Desenvolvimento de um Protótipo para Produção de Oxigênio "On Site" para Unidades Hospitalares - Ciclo P&D, 2004.

MOREIRA, Raphael Garcia. Sensoriamento de misturas de H₂, CH₄ e CO por meio de uma matriz de quimioresistores. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2014.

MOREIRA, Raphael Garcia; MOREIRA, Lucia Hiromi Higa; DOS SANTOS FILHO, Sebastião Gomes. Sensoriamento de misturas de H₂, CH₄ e CO por meio de uma matriz de quimioresistores. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 34, n. 1, p. 29-34, 2015. DOI: 10.5935/0103-9741.20150007

MYOZONE. O fornecimento de oxigênio para um gerador de ozônio. Blog, 2024. Disponível em: <https://myozone.com.br/o-fornecimento-de-oxigenio-para-um-gerador-de-ozonio/>. Acesso em: 23 fev. 2024.

MYOZONE. Aplicação de ozônio em carnes. Blog, 2023. Disponível em: <https://myozone.com.br/areas-de-atuacao/aplicacao-de-ozonio-em-carnes/>. Acesso em: 16 ago. 2023.

MYOZONE. Como o ozônio é produzido. Blog, 2023. Disponível em: <https://myozone.com.br/ozonio/como-o-ozonio-e-produzido/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MYOZONE. Ozônio: alternativa segura para indústrias de alimentos. Blog, 2019. Disponível em: <https://foodsafetybrazil.org/ozonio-alternativa-segura-para-industrias-de-alimentos/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MYOZONE. FISPQ do ozônio - Ficha de informação de segurança de produtos químicos. Blog, 2021. Disponível em: <https://www.myozone.com.br/fispq-do-ozonio-ficha-de-informacao-de-seguranca-de-produtos-quimicos/>. Acesso em: 11 out. 2023. (Referência das figuras 1, 2 e 3).

NEJADIAN, Mehrnaz Mohebbali; AHMADI, Pouria; HOUSHFAR, Ehsan. Comparative optimization study of three novel integrated hydrogen production systems with SOEC, PEM, and alkaline electrolyzer. *Fuel*, v. 336, p. 126835, 2023. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.126835

NASCENTE, Eduardo P. et al. Potencial antimicrobiano do ozônio: aplicações e perspectivas em medicina veterinária. *Pubvet*, v. 13, p. 130, 2019. DOI: 10.31533/pubvet.v13n1a130

NEUTEGEM, Kamilla Acosta Vieira von. Estudo comparativo entre métodos de desinfecção por cloro e por ozônio em estações de tratamento de água, com foco na degradação de desreguladores endócrinos. 2018.

NEVES, Sérgio Bello et al. Revisão bibliográfica das principais tecnologias de captura do CO₂. 2021.

NICOLAU, Juliana Pampana. Controle de Salmonella sp. em carcaças de frango pelo uso de descontaminantes químicos durante o processo de abate e as consequências na qualidade da carne. 2016.

LOYS, Isabelle de. O ambiente construído como um grande propulsor de geração de energia renovável nos centros urbanos e sua interferência na estética arquitetônica. 2019.

OLIVEIRA, Mikael Cavalari de. Exposição Eritematosa: Efeitos da radiação ultravioleta no tecido epitelial humano. 2023.

OLIVEIRA, Victória Vasconcelos de. A ozonioterapia nas práticas integrativas e complementares do Sistema Único de Saúde. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

OLIVEIRA, Kelvin Graeff de. Degradação de matéria orgânica em efluente de beneficiamento do leite por ozonização. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019. Citado na página 10.

OLIVEIRA, João Victor Gonçalves. O consumo de energia elétrica na Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, e o impacto da geração fotovoltaica. 2023

ORNELAS, Patrícia Thatiane Sousa Ferreira et al. As evidências científicas da eficácia do uso da ozonioterapia frente à legislação sanitária brasileira. REVISA (Online), p. 320-326, 2020. DOI: 10.5935/2317-269x.20200034

OROSCO, G.W. Eficácia da aplicação de ozônio em carcaças suínas na etapa de resfriamento para o controle de bactérias indicadoras e causadoras de doenças transmitidas por alimentos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

PÁEZ, Thalita Toffoli et al. Ozonioterapia: proposta de conteúdo legislativo. Diálogos Interdisciplinares, v. 10, n. 1, p. 393-405, 2021. DOI: 10.5935/1678-4854.20210030

PAIVA, Suelya da Silva Mendonça de. Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

PALHARES, Dayana D. et al. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. 2016.

PANINI, Anselmo Rodrigo. Ozônio e radiação ultravioleta na higienização da casca de ovos comerciais. 2019.

PANDISELVAM, R.; SHAJAHAN, S.; RAMARATHINAM, M.; KOTHAKOTA, A.; HEBBAR, K. Application and Kinetics of Ozone in Food Preservation. Ozone: Science & Engineering, v. 39, n. 2, p. 115–126, 2017. DOI: 10.1080/01919512.2017.1286446

PAULA, Vinícius Cândido de. Construção de um protótipo gerador de ozônio pelo método descarga de corona. 2021.

PELEGRINI, Marina; ARAÚJO, Wilson RB. Efeito Estufa e Camada de Ozônio sob a perspectiva da interação Radiação-matéria e uma Abordagem dos Acordos Internacionais sobre o clima. *Química Nova na Escola*, v. 40, n. 2, p. 72-78, 2018. DOI: 10.21577/0102-5505.20180014

PEREIRA, Igor Figueiredo; VASCONCELOS, Belmiro Cavalcanti do Egito. Estado atual da legislação acerca do uso da ozonioterapia na odontologia. *Revista de Cirurgia e Traumatologia Buco-Maxilo-Facial, Camaragibe*, v. 21, n. 1, p. 5, 2021. DOI: 10.5935/1678-4499.20210001

PEVIDE, Hugo da Costa; MONTONI, Leonardo Fontinelli. Tratamento de água de chuva com ozônio. 2019. p. 17-18.

PHILOZON. Blog, 2023. Disponível em: <<https://philozon.com.br/o-ozonio/>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos – CEPEL/CRESESB – 2ª Edição. 2014. p. 144-250.

PILATTI, Cleverson Marcelo et al. Interação do ozônio com microrganismos: revisão da literatura. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, p. e37111133363-e37111133363, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33363

PORTAL SOLAR. Célula fotovoltaica: tudo o que você precisa saber. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 27 fev. 2023.

PORTAL SOLAR. Lei 14300: mudanças com o marco legal da geração distribuída. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/lei-14300-confira-as-mudancas-trazidas-pelo-marco-legal-da-geracao-distribuida>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PORTAL SOLAR. Tipos de painel solar fotovoltaico. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 01 mar. 2023.

RAMALHO, Karina de Araújo. Estudo comparativo de diferentes tecnologias em sistemas de energia solar fotovoltaica. 2023.

RANADE, Vivek V.; BHANDARI, Vinay M. Industrial wastewater treatment, recycling and reuse. Butterworth-Heinemann, 2014.

RICE, R. G.; BOLLYKY, L. J.; LACY, W. J. Analytical aspects of ozone treatment of water and wastewater. Chelsea: Lewis, 1986.

RICEa, R. G.; BOLLYKY, L. J.; LACY, W. J. Applications of ozone for industrial wastewater treatment - a review. *Ozone: Science & Engineering*, v.18, p. 477-515, 1996. DOI: 10.1080/01919519608552314

REIS, Mário Luiz Pereira; DE OLIVEIRA, Patrícia Beneti; SOKOLOSKI, Antônio Luiz. As características de um sistema de energia fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica. *Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa*, v. 38, n. especial, p. 1111-1129, 2022.

RIBEIRO, Daniel de Moura. Estudo de viabilidade dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2023. P. 25-26.

ROCHA, Rui Alexandre Gomes da. Estratégias de Controle MPPT para Painéis Fotovoltaicos. 2023. Tese de Doutorado..

RODRIGUES, Joao V. A. Sistema inteligente de baixo custo para o monitoramento da qualidade da água na Piscicultura. 2023.

ROSSI, Raíssa Aparecida da Silveira et al. Produção de hidrogênio via eletrólise alcalina utilizando painel fotovoltaico como fonte de energia. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 2, p. 15223-15229, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n2-640

SANCHEZ, Gregório Martinez. Aspectos práticos en ozonoterapia: Comprobación de la concentración de ozono generada / tiempo de vida media del gas en la jeringuilla. *Revista Española de Ozonoterapia*, vol. 3, nº 1, pp. 67-73, 2013. DOI: 10.1016/j.reo.2013.03.007

SANTANA, Mário Henrique Palis. Produção eletroquímica de ozônio: investigação de aspectos fundamentais e práticos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2014. P.

SANTOS, Tiago de Jesus. Eficiência do hidroresfriamento associado a ozônio e cloro na conservação de morango. 2023..

SARRON, E.; GADONNA-WIDEHEM, P.; AUSSENAC, T. Ozone Treatments for Preserving Fresh Vegetables Quality: A Critical Review. *Foods*, 2021, 10, 605. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods10030605>. DOI: 10.3390/foods10030605

SCARATTI, Gidiane et al. Óxidos de metais de transição aplicados como catalisadores da ozonização de efluente simulado de refinaria de petróleo. 2015, p. 51.

SENTHILKUMAR, S. et al. A Review on MPPT Algorithms for Solar PV Systems. International Journal of Research-GRANTHAALAYAH, v. 11, n. 3, p. 25-64, 2023. DOI: 10.29121/ijrgr.v11.i3.2023.292

SCHIAVON, Gilson Junior. Modelagem, desenvolvimento e análise de um sistema gerador de ozônio, operando em alta frequência com controlador digital de sinais. 2012. P. 47-49, 181.

SCHÖBEIN, C. F. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, 1840, 10, 706.

SILVA, Maria Gabriela Pinto Larcher Martins da. Produção de H₂ a partir de água, em pequena escala, utilizando elétrodos de Ni foam e com recurso a energia fotovoltaica. 2017. Tese de Doutorado.

SILVA, Camila Dos Santos Pereira et al. Gases industriais. Revista Pesquisa e Ação, v. 5, n. 2, p. 135-160, 2019.

SILVA, Yngrid da Cruz et al. Ozônio como agente antimicrobiano na odontologia: revisão de literatura. Revista Da Faculdade De Odontologia Da Universidade Federal Da Bahia, v. 51, n. 3, p. 97-107, 2021. DOI: 10.1590/1981-863720230000201002

SILVA, Marco Antonio Oliveira da. Estudos eletroquímicos de eletrólise a membrana polimérica para produção de hidrogênio. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, Guilherme VL et al. Revisão Sistemática da Utilização de Far-UVC e Ozônio no Combate à Covid-19 e demais Patógenos. Revista Processos Químicos, v. 14, n. 28, p. 32-48, 2020. DOI: 10.5935/1677-7069.20200004

SILVA, Juliana Regina da et al. Fungos: estratégias de descontaminação por plasma a frio e ozônio gasoso na segurança de alimentos extrusados. 2019.

SILVA, E.M. Controle de qualidade: limpeza e higienização nas indústrias alimentícias. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Centro Universitário Internacional – Uninter, [s.l.], 2022. Disponível em: <<https://repositorio.uninter.com/handle/1/944?show=-full>>. Acesso em: 04 ago. 2023.

SILVA, Ana Rafaela Luz. Hidrogênio verde e o ensino da eletrólise a partir de uma revisão bibliográfica. 2023.

SILVA NETO, Fabriciano Gomes da. Sistema fotovoltaico conectado à rede com utilização de baterias de lítio ferro fosfato para backup: viabilidade econômica e perspectiva futura. 2019.

SIMOES, Amanda Victor; BASTOS, Mona Lisa Pontes da Fontoura. O uso da ozonioterapia no tratamento de reparo tecidual: revisão de literatura. 2021. Tese de Doutorado.

SLOMPO, Nathalie Dyane Miranda. Monitoramento e avaliação de sistema de tratamento para águas negras composto por reator UASB, fotobiorreator, flotação e processos de desinfecção. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOARES, João Guilherme. Análise da influência do posicionamento e do ângulo de incidência da radiação solar na eficiência de painéis fotovoltaicos. 2020.

SOPLIN PASTOR, Miguel Antonio. Utilização de ozonização como processo oxidativo avançado para a remoção da matéria orgânica do licor Bayer. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUSA, Danielle da Silva et al. Desenvolvimento de instrumentos de baixo custo e aplicação de métodos analíticos para monitoramento de poluentes atmosféricos em Uberlândia-MG. 2023.

SOUSA, Lindomar Gomes de. Ânodos tridimensionais com elevado tempo de vida útil para a produção eletroquímica de ozônio a partir da eletrólise da água pura. 2017.

STRELOW, Filipe Hernani; MENDES, Regeane Silva. Monitoramento de gases por meio de rede de sensores controlados com Arduino. 2015..

TORTORA, G.J.; FUNKE, B.R.; CASE, C.L. Microbiologia. 10.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THINGSPEAK, 2024. Plataforma <https://thingspeak.com/login?skipSSOCheck=true>.

TIWARI, S. et al. Dental applications of ozone therapy: A review of literature. The Saudi Journal for Dental Research. v. 8, n. 1-2, 2016. p. 105-111. DOI: 10.1016/j.sjdr.2016.02.001

TORRES, E.A.F.S.; FERREIRA, A.F.R.; RÍMOLI, C.D. Estudos das propriedades desinfetantes do ozônio em alimentos. Higiene Alimentar, Itapetininga, v. 10, n. 42, p. 8-23, 1996.

URSUA, Alfredo & GANDÍA, Luis M. & SANCHIS, Pablo. (2012). Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. Proceedings of the IEEE. 100. 410-426. 10.1109/JPROC.2011.2156750. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2156750

VALDEZ, Aldo Sindulfo Barboza et al. Estudo de degradação de corantes alimentícios artificiais via oxigênio singlete (O₂-) utilizando simulador espectral com lâmpada LED RGB. *Revista Virtual Química*, v. 14, n. 4, p. 729-736, 2022..

VALDIVIA, Marlon Jesus Albuquerque. Conversor ressonante para geração de ozônio aplicado à água de processos de higienização industrial, com controle digital. 2019. p. 32.

VIDAS, Leonardo; CASTRO, Rui. Recent developments on hydrogen production technologies: state-of-the-art review with a focus on green-electrolysis. *Applied Sciences*, v. 11, n. 23, p. 11363, 2021. DOI: 10.3390/app112311363

VILLALVA, Marcelo Gadelha. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

WANG, M.; WANG, Z.; GONG, X.; GUO, Z. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 573-588, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.018

WIER. Aplicação de ozônio: a solução para proteger a sua casa. 2021a. Disponível em: <https://wier.com.br/aplicacao-de-ozonio-a-solucao-para-proteger-a-sua-casa/>. Acesso em: 9 jun. 2023.

WIER. Catálogo Digital – Wier. 2021b. Disponível em: <https://conteudo.wier.com.br/catalogo-digital>. Acesso em 18 set. 2023.

WINSEN. Manual do usuário. Sensor MQ131. 2021. <https://device.report/manual/4602227>.

WERLANG, Gabriela Orosco. Eficácia da aplicação de ozônio gasoso em carcaças suínas na etapa de resfriamento para o controle de bactérias indicadoras e causadoras de doenças transmitidas por alimentos. 2015.

YAMAMOTO, Ana Leticia Campos; REBOITA, Michelle Simões; DE PAULA CORRÊA, Marcelo. Conhecendo as diferentes faces do ozônio. *Terrae Didatica*, v. 17, p. e021036-e021036, 2021. DOI: 10.5935/1678-6803.20210013

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 36, n. 3, p. 307-326, 2010. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.11.001

ZHANG, X; LEE, B. J; IM, H. G; CHA, M. S. Ozone production with dielectric barrier discharge: effects of power source and humidity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, [s.l.], v. 44, n. 10, p. 2288-2296, 2016. DOI: 10.1109/TPS.2016.2591268

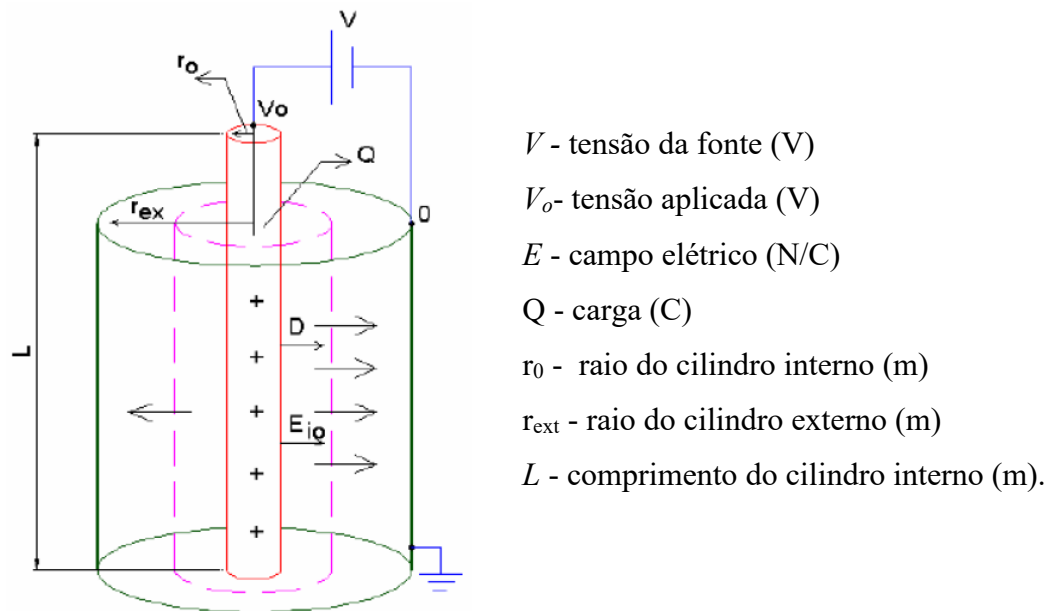
ZOSKI, C. G. *Handbook of Electrochemistry*. Elsevier, 2007. p. 3-29.

APÊNDICES

APÊNDICE I – GEOMETRIA DO REATOR DE OZÔNIO

O formato cilíndrico foi utilizado neste protótipo por ser mais comum e por sua facilidade de modelagem e condução dos gases nas conexões de transferência entre os reatores e a carga a ser tratada.

Figura I-1 – Sistema de geração de ozônio com dois cilindros coaxiais.



Fonte: Armalori (2007).

Os cilindros coaxiais têm raio interno r_0 e raio interno r_{ext} , como mostrado na Figura I-1.

A tensão aplicada em função do campo elétrico obedece a Equação I-1.

$$V_0 = - \int E \cdot dl \quad (I-1)$$

A lei de Gauss estabelece a relação da carga elétrica Q com a permissividade elétrica ϵ_0 através da Equação I-2.

$$\oint E \cdot dl = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (I-2)$$

Com a solução da integral tem-se a equação I-3.

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \varepsilon_0} \quad (I-3)$$

Por substituição de (I-1) em (I-3) e integrando novamente tem-se:

$$Q = \frac{V_0 2\pi r l \varepsilon_0}{\ln \frac{r_0}{r_{ext}}} \quad (I-4)$$

Substituindo (I-4) em (I-3), chegamos na Equação (I-5)

$$E(r) = \frac{\frac{V_0 2\pi r l \varepsilon_0}{\ln \frac{r_0}{r_{ext}}}}{2\pi l \varepsilon_0} \quad (I-5)$$

Após a simplificação de (I-5), tem-se a Equação (I-6) que apresenta a intensidade de campo entre os eletrodos em uma distância radial r onde uma tensão V_0 é aplicada.

$$E(r) = \frac{V_0}{r \ln \frac{r_{ext}}{r_0}} \quad (I-6)$$

Quando a tensão no cilindro com diâmetro inferior atingir a tensão de ruptura E_b , ocorrerá uma descarga corona. Com a tensão aplicada igual a V_b , a Equação (I-6) torna-se a equação (I-7). V_b é a tensão necessária para se obter a descarga corona.

$$V_b = E_b r_0 \ln \frac{r_{ext}}{r_0} \quad (I-7)$$

O valor de E_b é obtido utilizando-se a Figura I-3 a seguir, cujas curvas foram geradas por diversos pesquisadores. Este gráfico compara os valores calculados (E_b/δ), plotados em função do produto (δr) usando a Equação (I-8), a Equação de Zaengl e Nyffenegger (1974 *apud* Kuffel e Zaengl, 1984) e a Equação de Schumann (1923) *apud* Kuffel e Zaengl (1984).

A equação empírica desenvolvida por Peek (1920) *apud* Kuffel e Zaengl, (1984) para cálculo do campo crítico é dada por:

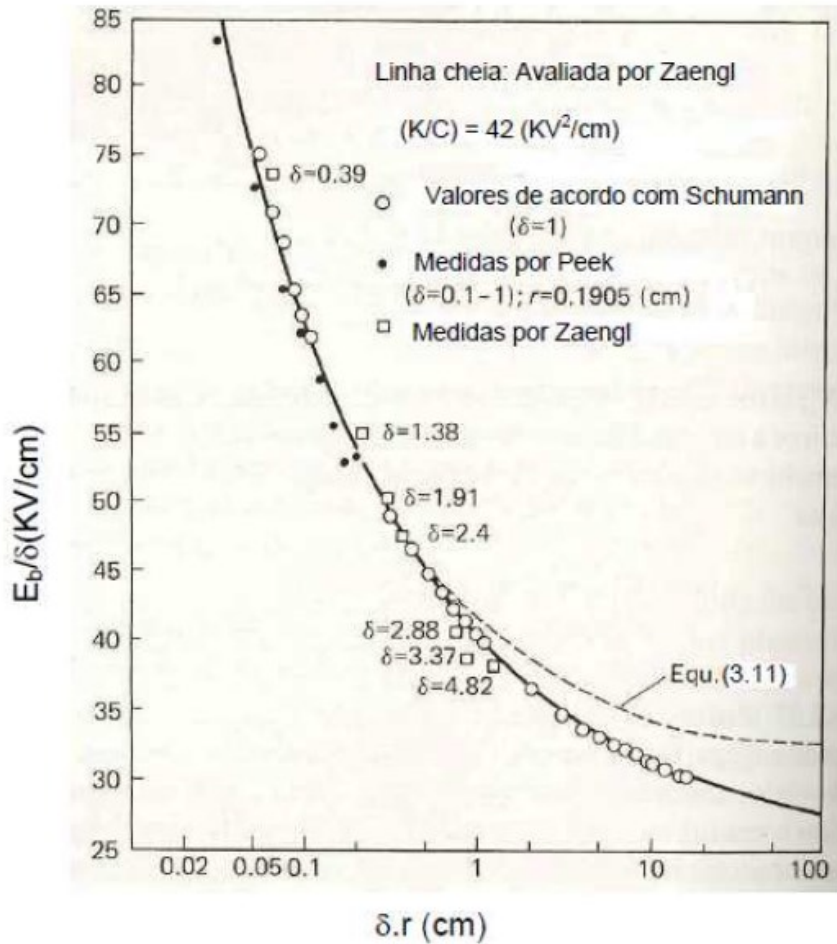
$$\frac{E_b}{\delta} = 31,53 + \frac{9,63}{\sqrt{\delta r}} \quad (\text{I-8})$$

Em que E_b é dado em kV/cm, r em cm e δ é a densidade relativa. Relação da temperatura com a densidade é dada pela Equação (I-9), onde p e t são a pressão e temperatura, respectivamente em bar e K.

$$\delta = 0,386 \frac{p}{(273+t)} \quad (\text{I-9})$$

Então, conhecendo-se os valores da pressão e temperatura para condições ambientais, tem-se a densidade relativa. Para um dado valor de r , obtém-se o campo crítico dado pela Figura I-1 (SCHIAVON, 2012).

Figura I-3 – Variação da intensidade do campo para efeito corona (E_c/δ) com δr em geometria cilíndrica coaxial no ar.



Fonte: Kuffel e Zaengl (1984).

A máxima tensão de corona inicial ou ruptura com delay a r_0 pode ser obtida diferenciando a Equação (I-7). O valor de E_b pode ser assumido constante se não considerar a sua dependência da densidade do gás e do raio interno. Com o raio externo r_{ext} constante pode-se encontrar o ponto com a máxima tensão (KUFFEL, ZAENGL, 1984).

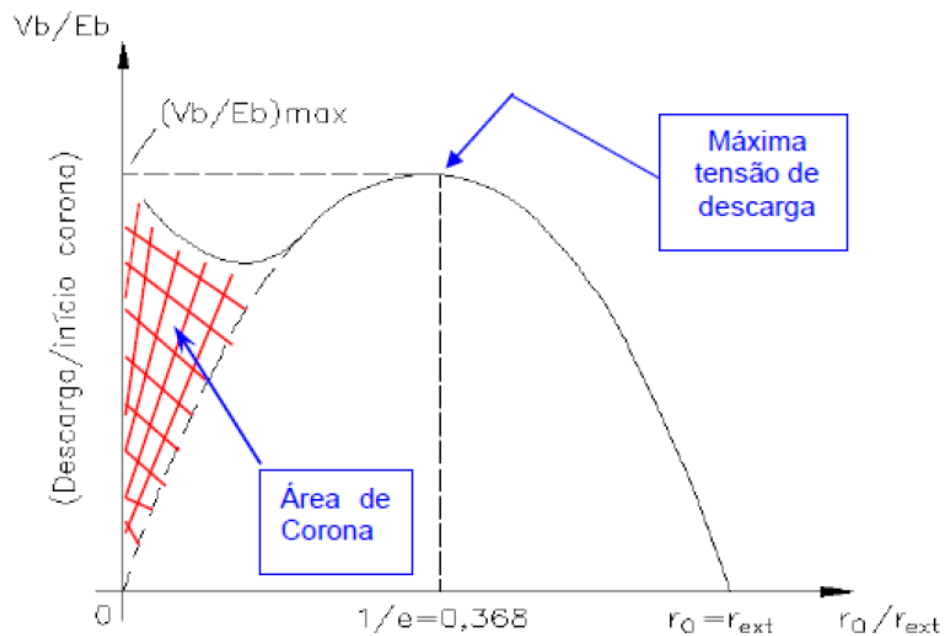
$$\frac{dV_b}{dr_0} = E_b \left(\ln \frac{r_{ext}}{r_0} - 1 \right) = 0 \Rightarrow \frac{r_{ext}}{r_0} = e \quad (\text{I-10})$$

Substituindo a Equação (I-10) na Equação (I-7) tem-se:

$$(V_b)_{\max} = E_b r_0 \quad (\text{I-11})$$

A Figura I-3 mostra relação entre a tensão de ruptura e o raio do cilindro interno, para um cilindro externo de raio fixo r_{ext} . A curva tracejada indica a tensão de início da descarga corona e a curva sólida a tensão de ruptura. A figura mostra também o máximo valor da tensão de ruptura e ela ocorre quando os raios dos cilindros externo e interno, satisfazem a Equação (I-8).

Figura I-3 – Relação entre a tensão de ruptura e o raio interno em um sistema de cilindro coaxial.



Fonte: Kuffel e Zaengl (1984), Armaroli (2007), Schiavon (2012).

Os trabalhos pesquisados mostram que com a utilização de um cilindro interno de raio pequeno, da ordem de 1 a 4 mm, o que equivale a um fio de cobre comum, e com valores não muito elevados de tensão já é possível conseguir a descarga corona. O aumento da tensão aumenta a região de ionização até a descarga completa com a ionização ocupando todo volume entre os cilindros.

APÊNDICE II – DADOS EXPERIMENTAIS

II.1 - IRRADIÂNCIA SOLAR

Dados de irradiância solar obtidas com o sensor de luminosidade TSL2561		
HORA	09/jun/23 (W/m ²)	15/jun/23 (W/m ²)
00:00:00	0	0
01:00:00	0	0
02:00:00	0	0
03:00:00	0	0
04:00:00	1	1
05:00:00	2	2
06:00:00	4	3
07:00:00	5	4
08:00:00	60	35
09:00:00	215	208
10:00:00	620	301
11:00:00	812	512
12:00:00	855	532
13:00:00	805	612
14:00:00	632	345
15:00:00	219	156
16:00:00	70	78
17:00:00	8	7
18:00:00	5	4
19:00:00	3	2
20:00:00	2	1
21:00:00	1	1
22:00:00	0	0
23:00:00	0	0

II.2 - TENSÕES DE SAÍDA – PLACA SOLAR E CONTROLADOR DE CARGA

Tensão na saída da placa solar fotovoltaica T1 e tensão na saída do controlador de carga T2								
HORA	T1	T2	HORA	T1	T2	HORA	T1	T2
05:16:37	0	12,7	10:08:30	36,865	13,1	15:00:20	35,35437	13,9
05:21:39	3,65942	12,7	10:13:31	37,01719	13,1	15:05:22	34,56765	13,9
05:26:41	4,92829	12,7	10:18:33	36,90882	13,1	15:10:24	36,5189	13,9
05:31:43	6,60825	12,7	10:23:35	37,15079	13,1	15:15:26	36,03859	13,9
05:36:45	12,7966	12,7	10:28:37	37,20976	13,1	15:20:28	35,58158	13,9
05:41:47	15,93367	12,7	10:33:39	36,94551	13,1	15:25:30	35,82175	13,9
05:46:49	19,75071	12,7	10:38:41	36,8146	13,1	15:30:32	35,58975	13,8
05:51:51	19,10098	12,7	10:43:43	36,91857	13,1	15:35:34	35,56113	13,8
05:56:53	17,28615	12,7	10:48:45	36,94084	13,1	15:40:36	35,59911	13,8
06:01:55	17,13471	12,7	10:53:47	36,8641	13,2	15:45:38	36,40665	13,8
06:06:57	15,6917	12,7	10:58:49	36,79296	13,2	15:50:40	35,21812	13,8
06:11:59	15,89339	12,6	11:03:51	36,82935	13,2	15:55:42	36,2234	13,8
06:17:01	15,70636	12,6	11:08:53	36,85256	13,2	16:00:44	35,54575	13,8
06:22:03	15,85566	12,6	11:13:55	36,77273	13,3	16:05:46	35,12572	13,8
06:27:05	22,23507	12,6	11:18:56	36,75891	13,3	16:10:48	35,18267	13,8
06:32:07	22,74602	12,6	11:23:58	36,75457	13,3	16:15:50	35,33674	13,8
06:37:09	23,64281	12,6	11:29:00	36,65587	13,4	16:20:52	34,6504	13,8
06:42:11	24,63721	12,6	11:34:02	35,87075	13,4	16:25:54	35,02079	13,8
06:47:12	25,65916	12,6	11:39:04	35,68115	13,5	16:30:56	35,75305	13,7
06:52:14	26,24703	12,6	11:44:05	36,18759	13,5	16:35:58	35,57388	13,7
06:57:16	25,23	12,6	11:49:07	35,41603	13,6	16:40:59	36,19596	13,7
07:02:18	28,56817	12,6	11:54:09	34,40821	13,7	16:46:01	35,02635	13,7
07:07:20	29,18147	12,6	11:59:11	35,64986	13,8	16:51:03	35,39976	13,7
07:12:22	32,11702	12,6	12:04:13	35,5313	13,9	16:56:05	34,69699	13,7
07:17:24	30,38577	12,6	12:09:15	35,14999	13,9	17:01:07	35,14088	13,7
07:22:26	31,0052	12,6	12:14:17	35,36767	13,9	17:06:09	35,61338	13,7
07:27:28	30,84891	12,6	12:19:19	35,61701	13,9	17:11:11	34,76932	13,7
07:32:30	31,79686	12,6	12:24:20	35,8458	13,9	17:16:13	34,59937	13,6
07:37:32	27,45109	12,6	12:29:22	35,62034	13,9	17:21:15	34,14315	13,6
07:42:34	27,98752	12,6	12:34:24	35,60515	13,9	17:26:17	33,77612	13,6
07:47:36	28,1863	12,6	12:39:26	35,81532	13,9	17:31:19	33,79387	13,6
07:52:38	24,22732	12,6	12:44:28	35,84314	13,9	17:36:21	33,70653	13,5
07:57:40	27,66821	12,6	12:49:30	35,86211	13,9	17:41:23	33,58969	13,5
08:02:42	27,02015	12,6	12:54:32	35,51709	13,9	17:46:25	33,14851	13,5
08:07:44	24,49748	12,6	12:59:34	35,66646	13,9	17:51:27	33,14528	13,4
08:12:46	26,56077	12,6	13:04:36	35,52571	13,9	17:56:29	32,53743	13,4
08:17:48	27,2822	12,6	13:09:38	35,48513	13,9	18:01:30	32,15896	13,4
08:22:50	29,04465	12,6	13:14:39	35,75052	13,9	18:06:33	32,66928	13,4
08:27:52	35,36308	12,7	13:19:41	35,96078	13,9	18:11:34	31,60671	13,3
08:32:53	16,69925	12,7	13:24:43	36,11258	13,9	18:16:37	31,43052	13,3
08:37:55	34,15152	12,7	13:29:45	35,74515	13,9	18:21:39	29,13774	13,3

08:42:57	34,05833	12,7	13:34:47	35,74318	13,9	18:26:40	24,05542	13,2
08:47:59	35,32566	12,7	13:39:49	36,22357	13,9	18:31:42	29,50655	13,2
08:53:01	35,49467	12,7	13:44:51	36,2258	13,9	18:36:44	27,79044	13,2
08:58:03	35,21377	12,7	13:49:53	36,26036	13,9	18:41:46	25,86537	13,2
09:03:05	34,91888	12,7	13:54:55	36,07567	13,9	18:46:48	22,52051	13,1
09:08:07	35,7649	12,8	13:59:57	35,99817	13,9	18:51:50	15,0624	13,1
09:13:09	36,10593	12,8	14:04:59	36,07492	13,9	18:56:52	5,52512	13
09:18:10	36,5369	12,8	14:10:01	36,09754	13,9	19:01:54	0	13
09:23:12	36,75615	12,8	14:15:02	36,25223	13,9	19:06:56	0	13
09:28:14	36,78172	12,9	14:20:04	36,42593	13,9	19:11:58	0	12,9
09:33:16	36,77895	12,9	14:25:06	35,5996	13,9	19:16:59	0	12,9
09:38:18	36,87373	12,9	14:30:08	35,6337	13,9	19:22:01	0	12,9
09:43:20	36,74979	13	14:35:10	35,99464	13,9	19:27:03	0	12,9
09:48:22	36,72292	13	14:40:12	36,10682	13,9	19:32:06	0	12,9
09:53:24	36,65168	13	14:45:14	35,8223	13,9	19:37:08	0	12,9
09:58:26	36,47495	13	14:50:16	34,52499	13,9	19:42:10	0	12,9
10:03:28	36,58218	13,1	14:55:18	35,35822	13,9	19:47:11	0	12,9

Medições em 15 de julho de 2023. Lista parcial de 05:16 as 14:55 hs
 Nos demais horários T1 foi nulo e T2 não apresentou alteração.

II.3 - VOLUMETRIA SIMPLES

Experimento 1 – 2 células eletrolíticas em série							
Molar (mol/L)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	O2 (mL/min)	O2 (L/h)	q O2 x 10^2 (mL/J)	
	1	18,75	11,90	223,13	368,90	22,13	2,76
	2	22,35	11,85	264,85	442,68	26,56	2,79

Experimento 2 – 3 células eletrolíticas em série							
Molar (mol/L)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	O2 (mL/min)	O2 (L/h)	q O2 x 10^2 (mL/J)	
	1	9,72	12,00	116,64	185,60	11,14	2,65
	2	11,92	12,00	143,04	222,72	13,36	2,60
	3	14,22	11,98	170,36	267,26	16,04	2,61
	4	16,22	11,98	194,32	320,72	19,24	2,75
	5	17,22	11,97	206,12	416,93	25,02	3,37
	6	18,32	11,97	219,29	458,63	27,52	3,49
	7	19,12	11,95	228,48	481,56	28,89	3,51
	8	19,72	11,95	235,65	484,23	29,05	3,42

Experimento 3 – 4 células eletrolíticas em série							
Molar (mol/L)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	O2 (mL/min)	O2 (L/h)	q O2 x 10^2 (mL/J)	
	1	5,71	12,00	68,52	99,98	6,00	2,43
	2	6,51	12,00	78,12	119,98	7,20	2,56
	3	7,41	11,98	88,77	143,97	8,64	2,70
	4	8,03	11,98	96,20	172,77	10,37	2,99
	5	9,02	11,97	107,97	215,96	12,96	3,33
	6	10,12	11,97	121,14	249,61	14,98	3,43
	7	10,92	11,95	130,49	267,89	16,07	3,42
	8	11,52	11,95	137,66	281,28	16,88	3,41

Experimento 4 – 5 células eletrolíticas em série						
Molar (mol/L)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	O2 (mL/min)	O2 (L/h)	q O2 x 10 ² (mL/J)
1	2,75	12,19	33,52	52,97	3,18	2,63
2	3,73	12,15	45,32	75,56	4,53	2,78
3	4,23	12,12	51,27	86,89	5,21	2,82
4	4,73	12,05	57,00	99,93	6,00	2,92
5	5,12	12,04	61,64	114,92	6,90	3,11
6	5,72	12,02	68,75	132,15	7,93	3,20

7	6,54	12,00	78,48	151,98	9,12	3,23
8	7,14	12,00	85,68	174,77	10,49	3,40

II.4 - TITULAÇÃO IODOMÉTRICA

$$P \text{ (g/h)} = \frac{0,1 \times \text{vol}(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) \times \text{vol}(\text{KI}) * 1,44}{\text{Tempo} \times \text{vol} \text{ (Amostra)}}$$

Tempo x vol (Amostra)

Onde: Tempo (min)

Volumes (mL)

0,1 = Normalidade do tiosulfato de sódio

1,44 = Fator de adequação das unidades

Medição de O₃ por tempo de borbulhamento na solução de iodeto de potássio em 3 células eletrolíticas como fonte de O₂

Experimento Número	Tempo (min)	KI (mL)	Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	Amostra (mL)	O ₃ (g/h)	Média O ₃ (g/h)	Desvio Padrão
1	1,00	500	175,24	508,65	24,81	0,00	0,0000
2	1,50	500	262,21	508,65	24,74	24,77	0,0307
3	2,00	500	351,10	508,65	24,85	24,80	0,0497
4	2,50	500	437,85	508,65	24,79	24,80	0,0063
5	3,00	500	526,58	508,65	24,85	24,81	0,0388
6	3,50	500	614,21	508,65	24,84	24,81	0,0278
7	4,00	500	702,37	508,65	24,86	24,82	0,0365
8	4,50	500	789,89	508,65	24,85	24,82	0,0243
9	5,00	500	877,51	508,65	24,84	24,82	0,0179

Medição de O₃ por tempo de borbulhamento na solução de iodeto de potássio usando o ar como fonte de oxigênio

Experimento Número	Tempo (min)	KI (mL)	Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	Amostra (mL)	O ₃ (g/h)	Média O ₃ (g/h)	Desvio Padrão
1	1,00	500	30,02	508,65	4,25	0,00	0,0000
2	1,50	500	44,61	508,65	4,21	4,23	0,0021
3	2,00	500	60,33	508,65	4,27	4,24	0,0002
4	2,50	500	74,53	508,65	4,22	4,24	0,0013
5	3,00	500	90,50	508,65	4,27	4,24	0,0002
6	3,50	500	105,83	508,65	4,28	4,25	0,0006
7	4,00	500	120,10	508,65	4,25	4,25	0,0000
8	4,50	500	135,75	508,65	4,27	4,25	0,0002
9	5,00	500	151,18	508,65	4,28	4,26	0,0006

Medição de O ₃ por tempo de borbulhamento na solução de iodeto de potássio usando em 3 células eletrolíticas como fonte de O ₂ e núcleo maciço do reator de O ₃							
Experimento Número	Tempo (min)	KI (mL)	Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	Amostra (mL)	O ₃ (g/h)	Média O ₂ (g/h)	Desvio Padrão
1	1,00	500	124,63	508,65	17,64	0,00	0,0000
2	1,50	500	182,82	508,65	17,60	17,62	0,0058
3	2,00	500	249,70	508,65	17,67	17,64	0,0247
4	2,50	500	310,84	508,65	17,63	17,64	0,0361
5	3,00	500	374,50	508,65	17,67	17,64	0,0275
6	3,50	500	436,66	508,65	17,66	17,65	0,0142
7	4,00	500	499,53	508,65	17,68	17,65	0,0268
8	4,50	500	561,77	508,65	17,67	17,65	0,0181
9	5,00	500	624,09	508,65	17,67	17,65	0,0134

Medição de O ₃ por tempo de borbulhamento na solução de iodeto de potássio usando em 3 células eletrolíticas como fonte de O ₂ e superfície não telada do cilindro interno do reator							
Experimento número	Tempo (min)	KI (mL)	Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	Amostra (mL)	O ₃ (g/h)	Média O ₂ (g/h)	Desvio Padrão
1	1,00	500	165,37	508,65	23,41	0,00	0,0000
2	1,50	500	244,90	508,65	23,11	23,26	0,1490
3	2,00	500	327,93	508,65	23,21	23,24	0,0338
4	2,50	500	408,95	508,65	23,16	23,22	0,0660
5	3,00	500	491,83	508,65	23,21	23,22	0,0119
6	3,50	500	573,67	508,65	23,20	23,22	0,0141
7	4,00	500	656,01	508,65	23,21	23,22	0,0003
8	4,50	500	737,76	508,65	23,21	23,21	0,0074
9	5,00	500	819,59	508,65	23,20	23,21	0,0100

Medição de O ₃ por molaridade em 3 células eletrolíticas como fonte de O ₂								
Molaridade KOH	Tempo (min)	KI (mL)	Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	Vazão de O ₂ l/min	Amostra (mL)	O ₃ (g/h)	q O ₃ x 10 ² mL/J	
	1	3	500	202,97	0,1856	508,65	9,58	2,65
	2	3	500	251,50	0,2227	508,65	11,87	2,60
	3	3	500	302,48	0,2673	508,65	14,27	2,61
	4	3	500	362,97	0,3207	508,65	17,13	2,75
	5	3	500	461,26	0,4169	508,65	21,76	3,37
	6	3	500	519,05	0,4586	508,65	24,49	3,49
	7	3	500	526,63	0,4816	508,65	24,85	3,51
	8	3	500	529,55	0,4842	508,65	24,99	3,42