



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

JOÃO VICTOR DELFINO SILVA

**PROPOSTA DE UM PROTÓTIPO DE SENSOR DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO DE OZÔNIO - O₃**

UBERLÂNDIA

2024

JOÃO VICTOR DELFINO SILVA

PROPOSTA DE UM PROTÓTIPO DE SENSOR DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO
DE OZÔNIO - O₃

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em Engenharia
Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de
Uberlândia.

Área de concentração: ICIAG – UFU

Orientador: Dr. Professor Claudionor Ribeiro da Silva

UBERLÂNDIA

2024

RESUMO

O Ozônio (O_3) é atualmente um dos indicadores de qualidade do ar, presente na legislação nacional. É um componente que pode trazer sérios riscos à saúde humana, quando há prolongada exposição, em concentrações inadequadas, indicando a importância do monitoramento contínuo da qualidade do ar para a saúde da população e o meio ambiente, ressaltando a necessidade de soluções acessíveis e eficazes. Nesse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de sensor portátil e de baixo custo para a medição de ozônio, integrando tecnologias com o uso de Arduino e sensores. Para tanto, foram utilizados componentes como medidores de ozônio (MQ-131), monitores display, módulos de armazenamento e sensores de temperatura e umidade (DHT22). A integração desses elementos permitiu a criação de um protótipo funcional, capaz de coletar e armazenar dados de O_3 de forma autônoma. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do protótipo, que se mostrou capaz de realizar o monitoramento da concentração de ozônio de maneira satisfatória. A análise comparativa entre os sensores do protótipo e equipamentos comerciais, como o Aeroqual 200, evidencia a qualidade do sensor desenvolvido, com R^2 de 0,8 para a adesão em algumas das equações de calibração. Outro ponto de destaque é o custo médio do protótipo ser cerca de aproximadamente 12 vezes menor que o equipamento de função equivalente no mercado. Por fim, é concluído que a integração de tecnologias inovadoras e a aplicação de conceitos científicos contribuem para a promoção da saúde pública, a preservação do meio ambiente e o avanço na área de sensoriamento ambiental.

Palavras-chaves: Ozônio (O_3); Arduino; Qualidade do Ar.

ABSTRACT

Ozone (O₃) is currently one of the indicators of air quality in national legislation. It is a component that can pose serious risks to human health when there is prolonged exposure in inadequate concentrations. This work takes the approach of developing a low-cost prototype sensor for measuring ozone. The research involves the integration of technologies such as Arduino and sensors such as the MQ-131 and DHT22 to make up the equipment. The objectives of the study were established, which aim to create a portable device capable of collecting and storing ozone concentration data. The justification for the project highlights the importance of continuous monitoring of air quality for the health of the population and the environment, emphasizing the need for affordable and effective solutions. Components such as ozone meters, display monitors, storage modules and temperature and humidity sensors were used. The integration of these elements enabled the creation of a functional prototype capable of collecting data autonomously. The results obtained demonstrate the effectiveness of the prototype, which proved capable of monitoring ozone concentrations satisfactorily. The comparative analysis between the prototype's sensors and commercial equipment such as the Aeroqual 200 shows the quality of the sensor developed, with an R² of 0.8 for adherence to some of the calibration equations. Another highlight is the average cost of the prototype, which is approximately 12 times lower than equivalent equipment on the market. Finally, it can be concluded that the approach adopted to develop the prototype ozone sensor has produced satisfactory results. The integration of innovative technologies and the application of scientific concepts contribute to promoting public health, preserving the environment and advancing the field of environmental sensing.

Keywords: Ozone (O₃); Arduino; Air Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Diagrama de isopletas de ozônio.	17
Figura 02: Modelo do Protótipo Impresso.	21
Figura 03: Modelo de Testes dos Sensores em Paralelo.	21
Figura 04: Localização de Uberlândia em Minas Gerais.	22
Figura 05: Localização Parque Municipal Victório Siquierolli	22
Figura 06: Fluxograma de teste entre sensores.	24
Figura 07: Medidor Aeroqual 200.....	25
Figura 08: Fluxograma de teste entre sensores e equipamento.	25
Figura 09: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 1 - Teste 1	27
Figura 10: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 2 - Teste 1	27
Figura 11: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 3 - Teste 1	28
Figura 12: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 4 - Teste 1	28
Figura 13: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 1 - Teste 1.....	30
Figura 14: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 2 - Teste 1.....	30
Figura 15: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 3 - Teste 1.....	31
Figura 16: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 4 - Teste 1.....	31
Figura 17: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 1 - Teste 2	33
Figura 18: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 2 - Teste 2	33
Figura 19: [O ₃] e Temperatura (C°) – Sensor 3 - Teste 2	34
Figura 20: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 4 - Teste 2	34
Figura 21: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 1 - Teste 2.....	35
Figura 22: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 2 - Teste 2.....	36
Figura 23: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 3 - Teste 2.....	36
Figura 24: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 4 - Teste 2.....	37
Figura 25: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 1 - Teste 3	38
Figura 26: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 2 - Teste 3	38
Figura 27: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 3 - Teste 3	39
Figura 28: [O ₃] e Temperatura (C°) - Sensor 4 - Teste 3	39
Figura 29: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 1 - Teste 3.....	40
Figura 30: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 2 - Teste 3.....	41
Figura 31: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 3 - Teste 3.....	41
Figura 32: [O ₃] e Umidade (%) - Sensor 4 - Teste 3.....	42

Figura 33: Comparação Gráfica dos Testes Realizados.....	44
Figura 34: Amostragem Sensores x Aeroqual 200 - Paralelo 1.	46
Figura 35: Amostragem Sensores x Aeroqual 200 - Paralelo 2.	46
Figura 36: Amostragem Sensores x Aeroqual 200 - Paralelo 3.	47
Figura 37: Equação de Parametrização – Sensor 1.	49
Figura 38: Equação de Parametrização – Sensor 2.	49
Figura 39: Equação de Parametrização – Sensor 3.	50
Figura 40: Equação de Parametrização – Sensor 4.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Teste ANOVA de Medições Repetidas - Efeito Intra-Sujeitos	43
Tabela 02: Teste ANOVA de Medições Repetidas - Efeito Inter-Sujeitos	43
Tabela 03: ANOVA Sensores X Aeroqual 200 - Efeito Inter-Sujeitos.....	47
Tabela 04: Equações Paramétricas de Calibração	51
Tabela 05: Comparação de Custo Médio – Sensores Comerciais.....	52
Tabela 06: Orçamento – Custos do Protótipo.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	14
2.1	QUALIDADE DO AR.....	14
2.2	FORMAÇÃO DE OZÔNIO	16
2.3	ARDUINO E SEUS USOS.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	MATERIAIS.....	19
3.2	MÉTODOS	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	TESTE 1	26
4.1.1	Temperatura – Teste 1.....	27
4.1.2	Umidade – Teste 1	30
4.2	TESTE 2	32
4.2.1	Temperatura – Teste 2.....	33
4.2.2	Umidade – Teste 2	35
4.3	TESTE 3	37
4.3.1	Temperatura – Teste 3.....	38
4.3.2	Umidade – Teste 3	40
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SENSORES DO PROTÓTIPO ...	42
4.5	COMPARAÇÃO DO PROTÓTIPO COM O AEROQUAL 200	45
4.6	EQUAÇÃO DE PADRONIZAÇÃO	48
4.7	COMPARAÇÃO DE CUSTOS.....	51
4.8	VANTAGESN E DESVANTAGENS.....	53

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A revolução industrial que permeou o final do século XVIII e se estendeu até meados do século XIX proporcionou um grande salto para o desenvolvimento tecnológico, com a criação de maquinários que possibilitaram um crescimento na escala dos sistemas de produção nunca antes visto. Um momento histórico, de proporções grandiosas e com impacto tão significativo que transformou o curso do desenvolvimento da sociedade para os moldes atuais. Um levantamento feito pelo Grupo Ambipar (2018) relata que todo este avanço não veio isento de efeitos colaterais; consigo trouxe um intenso aumento na emissão de poluentes, os quais, mais do que afetam as grandes escalas climáticas do planeta negativamente, atuam de forma direta na qualidade de vida e saúde de toda população.

O lançamento desenfreado de poluentes na atmosfera, por sua vez, teve reflexo direto e significativo no aumento da taxa de mortalidade. Os principais relatos vêm de algumas cidades da Europa e Estados Unidos da América. Como lembrado por Braga et al. (2001), o grave episódio de 1952, na cidade de Londres, no qual uma quantidade significativa de poluentes se manteve sobre a cidade durante três dias, devido a uma inversão térmica. Como resultado, houve um aumento estimado de quatro mil mortes, em média, em relação ao ano anterior, no mesmo período.

Episódios semelhantes passaram a se tornar mais recorrentes em diversas partes do mundo, com destaque para polos mais industrializados. Um dos casos mais conhecidos no Brasil foi a presença de fortes odores, ocorridos em 1970, na cidade de São Paulo, decorrentes da elevada concentração de poluentes atmosféricos lançados pelas indústrias CETESB (2021). Ainda neste documento, CETESB (2021) relata que essa poluição do ar gerou uma grande onda de mal-estar nos habitantes, o que culminou na lotação dos serviços médicos de emergência. Este fatídico episódio de São Paulo é considerado um dos marcos iniciais para que a temática da qualidade atmosférica passasse a ser um assunto de pauta recorrente dentro das esferas civis e governamentais.

O termo poluição, como apontado por Dicio (2018), pode ser definido como todo e qualquer efluente, seja energético ou material, que tenha potencial de alterar as características naturais de um ambiente. Nesse caso, independe do tempo (curto, médio ou longo), basta que interfira negativamente, de forma direta ou indireta, nos processos químicos e biológicos naturais e/ou na qualidade de vida dos afetados.

Atualmente, existem legislações que visam estabelecer parâmetros de tolerância para a classificação e dimensionalização destes poluentes. A Resolução CONAMA 491/2018 é um

exemplo destes parâmetros legais, a qual deve ser utilizada como principal base de referência quando se trata da qualidade do ar, em território nacional. Nessa Resolução, o poluente atmosférico é definido como:

[...] qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade. (CONAMA, 2018).

A Resolução supracitada é a legislação vigente no país, regulamentando temáticas relacionadas à qualidade do ar. A Resolução CONAMA (2018) dispõe de definições atualizadas sobre o tema, além dos valores de referência para Fumaça, Partículas Totais em Suspensão (PTS), Material Particulado (MP10 e MP2,5), Dióxido de Enxofre (SO₂), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Chumbo (Pb₅), Monóxido de Carbono (CO) e Ozônio (O₃). Além destes parâmetros, a legislação ainda apresenta metas para o controle da concentração destes poluentes, incentivando o controle cada vez melhor destas concentrações, a fim de melhorar cada vez mais a qualidade do ar respirado pelas populações.

Estes poluentes apresentados pela CONAMA (2018) estão em concordância com as indicações mais recentes da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), que traz no documento “Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: Partículas inaláveis (MP2,5 e MP10), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono.” as indicações de parâmetros de referência quanto as concentrações de referência dos poluentes em seu título bem como a proposição de algumas medidas de mitigação dos impactos destes.

É importante ressaltar neste contexto como a legislação brasileira já se mostra como um documento bem elaborado, que já traz valores de referência para todos os poluentes identificados no documento da OMS (2021), abordando ainda outros compostos não citados pelo documento internacional, como Fumaça, Partículas Totais em Suspensão (PTS) e Chumbo (Pb₅).

Ainda no contexto de regulamentação da qualidade do ar, trazendo mais para próximo da realidade local, tem-se a Normativa COPAM nº 248, de 23 de novembro de 2023 (COPAM, 2023), que veio para sobrepor a Deliberação Normativa COPAM nº 01, de 26 de maio de 1981, que era até então a última legislação de regulamentação da qualidade do ar emitida pelo estado. Esta nova normativa específica de Minas Gerais tem como fontes principais de referência os padrões de qualidade definidos pela OMS em 2005, além da própria CONAMA (2018),

trazendo os mesmos poluentes definidos nesta, bem como o quadro de padrões estabelecidos pela mesma.

No entanto, a COPAM (2023) traz ainda alguns diferenciais mais específicos que a CONAMA (2018), abordando outro poluente que são as partículas sedimentáveis (PS), definido pela legislação como sendo “Partículas com diâmetro médio abaixo de 1.000 μm (mil micrometros) suscetíveis à remoção do ar por ação gravitacional, que causam incômodo à população”. Indica ainda uma abordagem mais abrangente quanto as classificações dos poluentes que quando comparado com as caracterizações apresentadas na esfera federal, e até mesmo mundial, tendo em vista que este poluente ainda não foi estabelecido em nenhuma das duas instâncias.

Voltando o foco para o Ozônio (O_3), é importante compreender que o mesmo apresenta uma distinção quanto a sua forma e local de presença na atmosfera, sendo esta distinção o O_3 troposférico e O_3 estratosférico. Zhang, Wei e Fang (2019) trazem o O_3 estratosférico como sendo um “ O_3 bom”, tendo em vista que este é aquele que compõe a faixa da atmosfera conhecida como camada de ozônio. Esta camada por sua vez desempenha um papel fundamental no planeta, absorvendo a radiação ultravioleta em especial os raios UV-B além de contribuir de forma significativa na retenção e controle da temperatura do planeta.

As elevadas concentrações deste composto na estratosfera também podem trazer seus efeitos negativos como desregular alguns fenômenos climáticos, mas nas concentrações ideais ela desempenha um importante papel na manutenção da vida no planeta. Por outro lado, o O_3 troposférico apresentado por Zhang, Wei e Fang (2019) como sendo um “ O_3 ruim”, traz consigo uma série de problemas e complicações nas mais diversas esferas na vida na terra, tendo em vista que em elevadas concentrações pode impactar negativamente diversos processos naturais além de ter efeitos na saúde humana.

O O_3 é atualmente um dos indicadores de qualidade do ar, presente na referida legislação. É um componente que pode trazer sérios riscos à saúde humana, quando há prolongada exposição, em concentrações inadequadas. Jasinski et al. (2011) avaliaram a relação entre os efeitos da poluição com as morbidades respiratórias de crianças e adolescentes na cidade de Cubatão (SP). Os resultados mostraram que em crianças de 0 a 10 anos foi possível notar os efeitos da interferência de material particulado e do Ozônio; já em adolescentes, foi verificada associação da poluição com a exposição aguda ao Ozônio.

Na pesquisa de Nardocci et al. (2013) foi avaliada a relação que há entre poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares. Foi verificada também: a) a relação de Dióxido de Enxofre com doentes em idade superior a 39 anos; a relação do Ozônio com doenças

cardiovasculares em pessoas acima de 39 anos; e doenças respiratórias para pacientes menores de 5 anos. Ainda como citado em pesquisas realizada pela Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 1994), é recomendado um limite de exposição máxima de 8 horas a uma concentração de 1000 ppb (parte por bilhão) ou 0,1ppm (partes por milhão) de O₃, pois concentrações acima desta dosagem podem causar serias sequelas ao paciente.

O desenvolvimento de legislações que abordam acerca da temática foram essenciais para a apresentação de um material de referência robusto, que contempla de forma satisfatória os maiores indicadores de insalubridade inferidos até o momento. Entretanto, um dos maiores limitadores nas tomadas de decisões, de caráter preventivo ou corretivo, é a dificuldade atrelada ao monitoramento destes gases. Como Dongarrà et al. (2010) discorrem, é notório o fato de que os poluentes gasosos estão presentes no ar e que a abundância desses componentes são espacialmente variáveis na atmosfera, tendo sua origem variada de fontes naturais, antrópicas ou até mesmo como resultado de nucleação heterogênea e condensação de precursores gasosos.

Em um contexto público ou até mesmo industrial, seria de suma importância que fosse possível avaliar sua própria geração de poluentes, a fim de assegurar o controle de suas emissões com base nos valores de referência constantes na legislação. Porém, além da dificuldade presente na localização das fontes de poluentes, os custos de equipamentos capazes de realizar esta medição são ainda muito elevados, o que por vezes não torna esta ação atrativa para a maioria dos casos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva desenvolver um medidor de O₃ de baixo custo e portátil, sendo capaz de coletar e armazenar os valores de concentração deste poluente na unidade de cartão SD. Esse equipamento será uma alternativa viável para o monitoramento de um dos indicadores de qualidade do ar, apontado pela Resolução CONAMA nº 491/2018.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos definidos para o desenvolvimento da proposta apresentada são:

- Desenvolver um equipamento para medição e armazenamento automático de concentrações de O₃;
- Realizar testes em ambiente não-controlado;
- Apresentar uma alternativa de baixo custo para o levantamento de dados de qualidade do ar.

1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto proposto se baseia na importância que há em tratar de forma contínua o levantamento de dados relacionados a fatores que podem interferir direta e/ou indireta na saúde da população. Dessa forma, com um equipamento mais viável para o levantamento / monitoramento das concentrações de O₃ na atmosfera, torna-se possível o aumento substancial na coleta de dados, em diferentes pontos, por ser portátil, corroborando para novos estudos mais assertivos acerca da gravidade desse poluente no ar.

Outro ponto válido a salientar é a possibilidade de que demais entidades, sejam elas governamentais ou privadas, possam adotar este método de levantamento, a fim de que este sirva como um guia nas tomadas de decisões, no intuito de mitigar ou até mesmo inibir a geração do O₃, ou de seus precursores, assegurando assim o cumprimento das normas reguladoras vigentes, bem como a segurança e qualidade de vida da população.

Adicionalmente, o equipamento criado pode ser passível de gerar patente, algo que será analisado posteriormente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar é um importante fator a ser levado em consideração no contexto atual. Este é um problema, por vezes, tratado pela população como algo a nível mundial, porém tem seus efeitos ainda mais acentuados quando se remete a escala local. A qualidade do ar, tal qual indicado por Li et al (2020), se refere a composição da atmosfera em função da concentração de poluentes e substâncias potencialmente nocivas.

Uma baixa qualidade do ar implica na elevada presença de compostos capazes de trazer danos a saúde não só humana, mas ainda, de todo o ecossistema que o compõe. Neste sentido é importante compreender quais impactos esta baixa qualidade pode exercer no ambiente e quais as implicações deste.

Lin (2004) indica alguns impactos negativos que elevadas concentrações de poluentes podem ter na qualidade de vida humana, referenciando em especial as elevadas concentrações de O₃. Segundo a autora, elevadas concentrações de O₃ pode causar irritações nos olhos, nariz e garganta, levando a sintomas como tosse, falta de ar e dores no peito. O mesmo pode ainda

agravar condições respiratórias existentes, como asma, bronquite e enfisema, além de que a exposição prolongada ao composto pode causar danos aos pulmões e reduzir a função pulmonar.

O trabalho de Li et al. (2020) descreve que altos níveis de ozônio estão associados a condições de má qualidade do ar, especialmente quando se tem em vista que além da presença deste poluente, que por si só já é um problema, a elevada concentração deste na atmosfera indica a elevada presença de seus precursores, os quais serão melhor abordados no tópico subsequente. Di et al (2017) associa a elevada presença de poluentes, incluindo o O₃, a um aumento significativo nos casos de internações por doenças respiratórias bem como nas taxas de mortalidades em indivíduos da terceira idade.

Yin et al (2017) destaca um aumento nos casos de mortalidade diários que tem uma relação proporcional a melhora ou piora da qualidade do ar. Segundo o autor, o aumento das concentrações de poluentes pode agravar o estado de saúde de pessoas que já estavam com certo grau de debilidade, em especial com algum tipo de problema respiratório. Isto leva pessoas a óbito, em especial em cidades que não tem tanto recurso. Soma-se ainda o crescimento do número de casos de internações em função deste aumento.

Segundo Anenberg et al (2010), existem outros efeitos associados a elevada concentração do O₃ troposférico, tendo em vista que este também é capaz de impactar, de forma direta, em algumas anomalias atmosféricas, como a capacidade de potencializar a formação de smog e de nevoeiros fotoquímicos.

Li et al (2019) destaca como o O₃ pode afetar ecossistemas terrestres e aquáticos, prejudicando a biodiversidade e a saúde dos organismos vivos. É dado destaque para a capacidade do O₃ danificar plantas em virtude de seu poder oxidativo, interferindo de forma direta na fotossíntese e impactando, por consequência, a produção agrícola.

É importante ressaltar que a simples presença de O₃ na atmosfera não é um problema. A presença desse gás, em quantidade controlada, é até fundamental para alguns processos essenciais da existência da vida na terra. O problema surge quando a concentração deste gás se mostra elevada, tendo em vista sua alta capacidade oxidativa, que é capaz de causar uma série de problemas, tanto para alguns processos naturais quanto para a saúde dos seres vivos (LIMA, FELIX & CARDOSO, 2021).

2.2 FORMAÇÃO DE OZÔNIO

Algo que difere o O₃ troposférico de outros poluentes se deriva do fato deste ser um poluente secundário, isto é, ele não é emitido de forma direta por veículos, sendo em verdade um produto resultante do processo de transformação de outros compostos, denotados como precursores, os quais com condições apropriadas são capazes de promover a sua criação (CARBONE, 2008).

Diversos fatores são capazes de influenciar e conseqüentemente condicionar a formação do O₃ troposférico, tais como: intensa radiação solar, altas temperaturas, baixa umidade relativa, ventos fracos e, como já citado, a existência dos precursores. Estes precursores por sua vez são em suma compostos por óxidos de nitrogênio (NO_x) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV's). Vale citar que a categoria dos NO_x engloba tanto óxido nítrico (NO) quanto dióxido de nitrogênio (NO₂) (SHARKEY ET AL., 1993; CARBONE, 2008; CHIQUETTO ET AL., 2019).

O ozônio é gerado essencialmente por processos fotoquímicos provenientes da interação da radiação com COV's e NO_x, viabilizados por radicais de hidroxila (HO_x ≡ OH + radicais peróxidos) como agentes oxidantes. Em essência, os COVs e NO_x são liberados pela queima de combustíveis. Destaca-se que os COV's apresentam uma maior taxa de emissões, em especial as derivadas de origem industrial, conforme remete Zheng et al. (2018) e ainda de origem biogênica segundo Guenther et al. (2012).

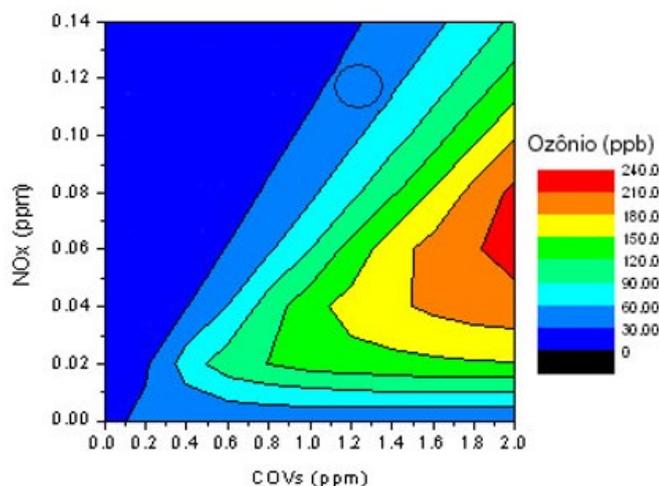
Os fatores climáticos são fundamentais para que os precursores efetivamente possibilitem a formação do O₃. As condições ideais para sua formação ocorrem em especial no verão, estação a qual dispõe essencialmente destes fatores em estado próximo ao ótimo, tornando ainda mais propícia a formação deste composto na troposfera (CARBONE, 2008; RODRIGUES, 2019).

Entretanto, tão importante quanto as condições climáticas, são as concentrações dos precursores na troposfera. Os fatores climáticos são de fundamental importância para a formação do O₃, porém, é válido enfatizar que sem os precursores não há formação do composto em quantidades significativas. Outro aspecto importante a se atentar está associado a condição de que a própria relação entre as concentrações de NO_x e de COV's são fatores decisivos que interferem diretamente na concentração de O₃ gerada (ORLANDO ET AL., 2010).

A relação proporcional existente entre NO_x e COV's presente na atmosfera impacta de forma direta na formação de O₃, visto que uma disparidade muito grande de um para o outro pode, na verdade, ocasionar a inibição da formação do composto. Esta relação é comumente representada com o uso de um diagrama de isopleias de O₃, o qual dispõe de forma colorimétrica

a formação potencial com base na relação existente entre as concentrações dos precursores, bem como é possível identificar na Figura 01 (SEINFELD & PANDIS, 2006).

Figura 01: Diagrama de isopletras de ozônio.



Fonte: Orlando et al., 2010

Com o uso deste modelo se torna possível compreender a ocorrência de alguns cenários onde, por mais que disponha das condições adequadas e da elevada concentração de algum dos precursores, não necessariamente condicionará a formação de O₃ em quantidade significativa. Um ponto importante de se atentar, citado por Rodrigues (2019), é o constante aumento no consumo de etanol e biodiesel pelos veículos automotivos, o que, por mais que em seu processo de queima libere menos Monóxido de Carbono (CO), acaba por liberar mais formaldeído e acetaldeído compostos que favorecem a formação do O₃.

Mas a queima de combustíveis não é a única fonte destes precursores, tal qual destacado por Fehsenfeld et al. (1992) que analisam as emissões de COV's devidos de fontes naturais como plantas, microrganismos do solo e algas. Estas emissões de origens naturais são muito menores do que as derivadas de fontes antropogênicas, tal qual reforça McDonald et al. (2018). No entanto, as emissões de origens naturais destes precursores não podem ser descartadas como contribuintes significativos para o saldo final da geração de O₃.

Devido ao seu caráter de poluente secundário, implica que não existem fontes naturais de emissão direta de O₃. Neste sentido, a formação do O₃ deriva da fotodecomposição de NO₂, que gera o oxigênio atômico O (³P), indicado na reação 1. O oxigênio atômico, ao reagir com o oxigênio molecular O₂, leva a formação de ozônio troposférico O₃, indicado na reação 2. A reação consegue se manter estável tendo em vista que, conforme mostra a reação 3, o processo

de formação e dissociação é continuada em virtude da presença do NO, que reage consumindo o O₃ formado na reação 2 e recompõe o NO₂ que é consumido na reação 1 (SEINFELD & PANDIS, 2006).



Neste contexto, M tem a função de atenuar a energia excedida nas reações e é considerado como um terceiro corpo na reação, que na maioria dos casos é o N₂ e o hv, corresponde a radiação solar no comprimento de onda $\lambda < 420\text{nm}$.

O acúmulo do O₃ na atmosfera se deriva da emissão adicional de diversas fontes de forma paralela a emissão de NO₂, tal qual é o caso da formação do NO₂ por meio da via de radicais hidroperoxila (HO₂^{*}) e peróxiorgânicos (RO₂^{*}) indicado na reação 4.



Neste caso, R representa uma cadeia carbônica. Estes compostos peróxidos são formados na atmosfera derivados da reação dos COV's com outros oxidantes, como o próprio radical hidroxila (HO₂^{*}). Neste sentido, nota-se que o acúmulo de O₃ deriva-se da presença destes radicais peróxido na atmosfera, que ocasionam a formação do NO₂, que quando na presença de radiação solar potencializa a formação de mais O₃ vide a reação 3 (SEINFELD & PANDIS, 2006).

2.3 ARDUINO E SEUS USOS

Atualmente o uso da tecnologia se mostra como um fato essencial para a otimização de diversos processos nos mais variados setores e áreas de produção e/ou conhecimento. O desenvolvimento de softwares, mecanismos e equipamento capazes de automatizar processos que eram anteriormente realizados apenas de forma manual vem se mostrando como um diferencial.

Um dos métodos de automação mais popularmente difundido na atualidade é a adoção de placas Arduino, um método que ao longo dos anos tem ganhado ainda mais destaque visto a

sua versatilidade, baixo custo, e que demanda uma linguagem de programação de baixa complexidade para suas operações (DIPOVA, 2017).

A aplicação do Arduino tem mostrado seu valor não apenas pelo seu módulo de processamento facilitado, mas pelo fato de contar com código aberto e uma comunidade ativa, a qual constantemente propõe atualizações de bibliotecas para os mais diversos módulos, que vão desde simples sensores de luminosidade até equipamentos mais complexos, os quais podem ser integrados para diversas propostas (CID & CORREA, 2019).

O Arduino conta ainda com diversos modelos próprios de funcionamento, o qual pode ser alterado conforme a necessidade do usuário. Esses modelos variam desde placas mais simplificadas, como o Arduino UNO, o qual conta apenas com uma unidade de processamento básico, e indo até modelos mais robustos e complexos, tal como o Arduino MEGA. Este último conta com uma capacidade de processamento significativamente maior e mais de 50 portas digitais, modelo amplamente aplicado na área da robótica vide sua alta capacidade de processamento simultâneo (CAGNA ET AL., 2022).

A aplicabilidade das placas Arduino não se limitam unicamente ao aspecto dos diferentes modelos de placas. É certo que algumas placas apresentam um melhor desempenho em algumas operações do que outras, mas o aspecto que mais diferencia o funcionamento de cada sensor é o tipo de módulo que é utilizado. Utilizando a linguagem correta para cada módulo é possível desenvolver o processo de automação das mais diversas atividades, tais como a coleta de dados em tempo real e seu armazenamento para análises (PAES, J. L. ET AL. 2021).

É válido salientar que o Arduino efetivamente se mostra como um instrumento fantástico de automação, entretanto é necessário se atentar ao aspecto da sensibilidade e viabilidade da aplicação deste em algumas atividades, em especial para a coleta de dados. Sanches *et al.* (2021) alerta para a necessidade de um processo de refinação da calibração dos sensores empregados, pois, por mais que os módulos tenham sua confiabilidade e atestada pelo fabricante, é essencial o desenvolvimento de teste que minimizem a margem de erro do equipamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento do trabalho será criado um equipamento de prototipagem que se baseia na integração hardware e software da série ARDUINO. Para tanto, serão utilizados:

- ✓ medidor de O₃ Aeroqual 200;

- ✓ quatro ARDUINO UNO, para integração dos componentes de coleta, visualização e armazenamento;
- ✓ quatro módulos do medidor sensível ao gás ozônio (MQ-131), compatível como o módulo de prototipagem escolhido;
- ✓ quatro monitores display oled, para visualização dos dados em tempo real;
- ✓ quatro módulos shield SD, para o armazenamento local dos dados;
- ✓ quatro módulos do medidor de temperatura e umidade (DHT-22), compatível como o módulo de prototipagem escolhido;
- ✓ os softwares Stata, R, Jamov e/ou Excel para análises de correlação e ajuste dos dados.

3.2 MÉTODOS

Para o desenvolvimento do equipamento de prototipagem, primeiramente foi criada a base para integração dos componentes de coleta, visualização e armazenamento de dados, utilizando o modelo de Arduino uno. Este modelo do Arduino é compatível com o encaixe para o módulo de Shield SD, que possibilita a integração da coleta de dados e o armazenamento no cartão de memória.

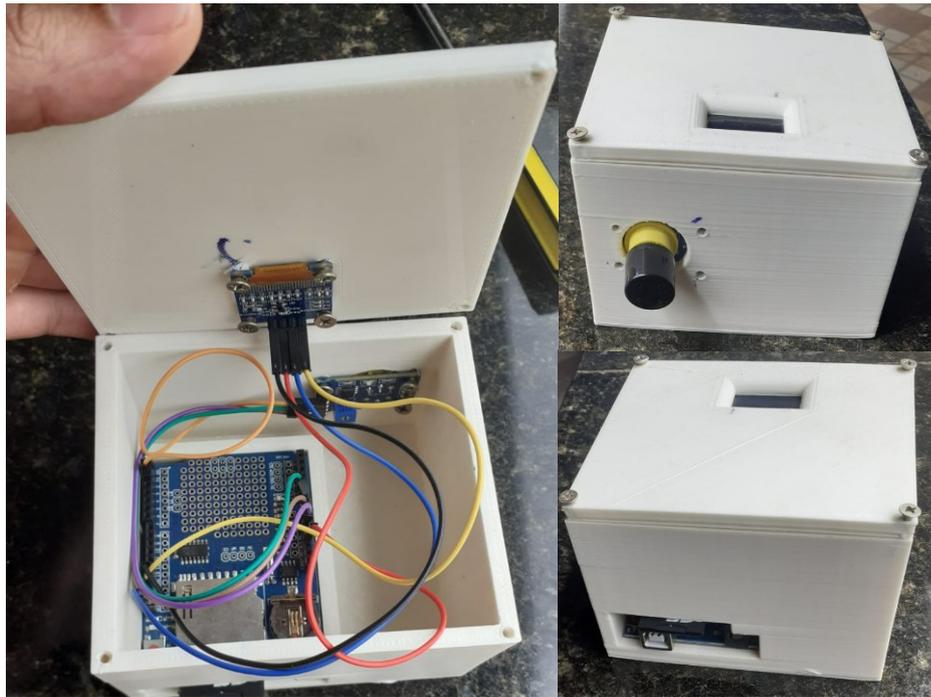
Para a coleta de dados/informações, foi acoplado ao sistema de prototipagem, um sensor de gás ozônio, modelo MQ-131, com sensibilidade capaz de detectar concentrações entre valores de ~10 a 1000 ppb, totalmente compatível como o módulo de prototipagem escolhido.

Para o quesito de visualização dos dados coletados, em tempo real no equipamento, foi inserido um monitor display Oled, o qual tornou possível o acompanhamento das amostragens feitas, pontualmente, apresentando as concentrações de O₃ nas unidades de ppb e µg/m³.

Para o armazenamento local, foi introduzido, no sistema, um módulo *shield* SD, o qual possibilita a utilização de um cartão SD para o registro de dados no próprio equipamento. Com este módulo foi possível gerar uma planilha, a qual armazena os valores de concentração de O₃ em uma planilha de Excel, que pode ser acessada na memória do próprio cartão SD.

Para encerrar a elaboração do equipamento de prototipagem, todos os equipamentos supracitados, após conectados, já com saída para conexão na energia (tomada ou pilha), foram acomodados em uma caixa impressa em PLA na impressora 3D cedida pela Faculdade de Química da UFU, a qual foi projetada e totalmente ajustada, para facilitar o manuseio. Foi impressa apenas uma caixa para testar como ficaria a organização do equipamento no modelo físico, o qual pode ser melhor visualizado na Figura 02.

Figura 02: Modelo do Protótipo Impresso.

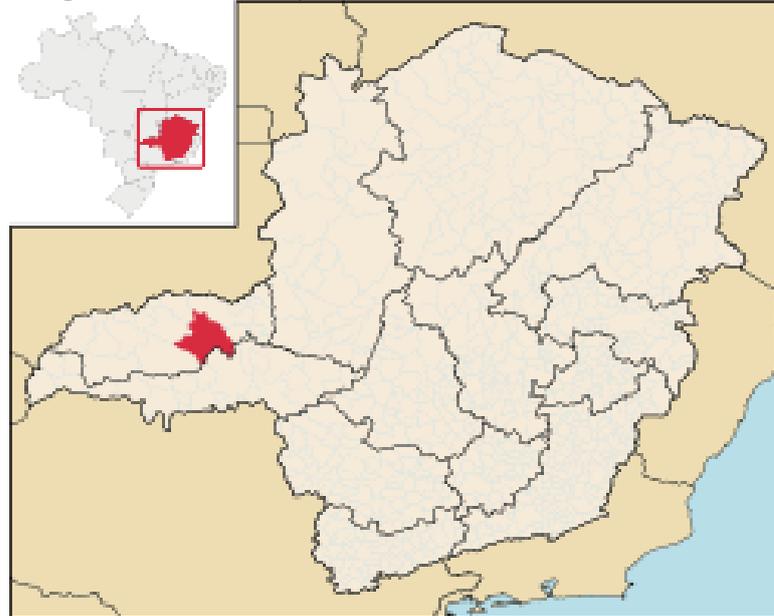


Com o protótipo montado, foram realizadas as coletas de dados (O_3), em diversas campanhas, nas proximidades do Parque Municipal Victório Siquierolli (Figuras 04 e 05), para verificar o funcionamento do equipamento. Nesta primeira etapa foi desenvolvido um teste em paralelo entre 4 (quatro) sensores do modelo MQ 131 com a mesma base de programação para verificar qual a margem de erro entre cada uma das amostragens. Estes sensores foram programados por meio da interface da IDE do Arduino e integrado com o sensor de temperatura e umidade DHT-22. A Figura 03 apresenta a composição em paralelo utilizada para o desenvolvimento dos testes.

Figura 03: Modelo de Testes dos Sensores em Paralelo.



Figura 04: Localização de Uberlândia em Minas Gerais.



Fonte: Raphael Lorenzeto de Abreu (2006)

Figura 05: Localização Parque Municipal Victório Siquieroli



Fonte: Google Earth (2024)

A integração do sensor de umidade e temperatura foi aplicada para alimentar o sensor MQ-131 sobre as condições ambientais do local, a fim de aferir um maior refino nos dados coletados pelos sensores. A coleta e processamento inicial destes dados foi realizada pela

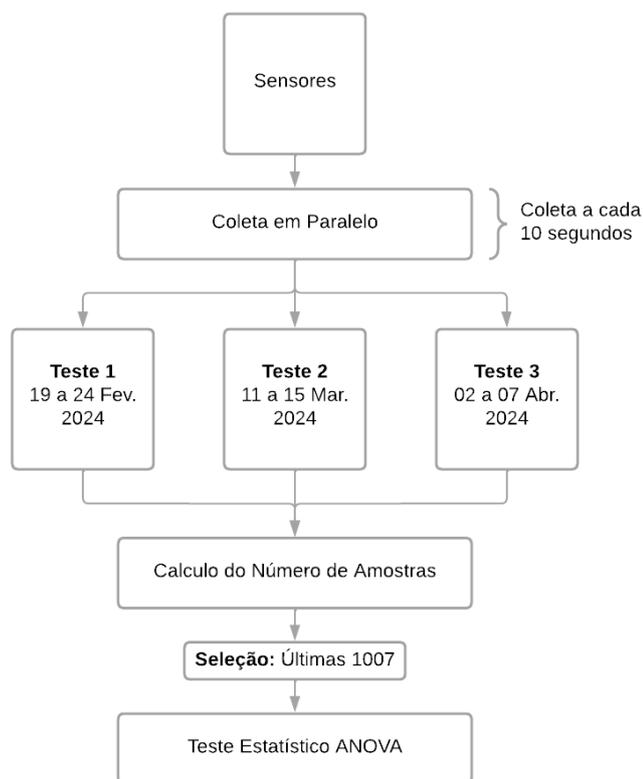
biblioteca “MQ131.h” disponibilizada pela fabricante, a qual já dispõe de um processo de calibração prévia e integração dos dados de umidade e temperatura próprias para o funcionamento dos sensores.

Foram realizados 3 testes ao longo do período experimental, estes testes foram realizados com os quatro sensores coletando em paralelo, com intervalo de coleta de 10 segundos, em um período de 5 dias para cada um dos testes. É válido ressaltar que, segundo indicações do fabricante, o sensor demanda um período de 48 horas de aquecimento para chegar ao máximo de sensibilidade amostral. Contudo, foram registrados dados antes e depois desse tempo determinado, justamente para verificar como se dá o comportamento do sensor no período nessas medições. Após a coleta destes valores/dados, foi realizada a plotagem dos gráficos para verificar as curvas de comportamento de cada um dos sensores ao longo do período de testes.

Com este período de testes extenso, e uma taxa de coleta de dados de 6 amostras por minuto, a base de dados final foi de fato significativa, impossibilitando uma análise estatística refinada com toda a população amostrada, por este motivo foi realizado o cálculo do tamanho de amostra necessário para a comparação entre mais de 2 Médias com Grupos Independentes (ANOVA), e com base na estimativa, considerando um número de 4 grupos, com desvio padrão estimado de 3,2238 e buscando identificar uma mínima diferença de 0,5 entre os sensores, se definiu uma amostra composta por 1007 indivíduos. Os dados utilizados foram referentes as últimas 1007 amostras coletadas pelos sensores, tendo em vista que as amostras finais já teriam passado do período de aquecimento demandado pelos sensores. Este processo inicial de aquecimento já foi identificado nos testes realizado no projeto de iniciação científica precursor a este trabalho, desenvolvido por Delfino (2022), e ainda, é perceptível ao longo das amostragens, como é possível notar nos gráficos apresentados de cada teste, no qual os períodos iniciais têm uma oscilação mais acentuada do que quando comparado com os valores finais aferidos ao longo das medições, por este motivo os mesmos não serão utilizados para o trabalho de teste estatístico.

Uma vez definido o tamanho das amostras, foi realizado o teste ANOVA para identificar se o comportamento dos sensores de fato se deu de forma semelhante ao longo dos testes, buscando identificar se houve variação entre eles, em todos os três testes realizados. Uma vez realizados dos testes ANOVA, os valores foram comparados e plotados a fim de identificar o comportamento dos mesmos.

Figura 06: Fluxograma de teste entre sensores.



O novo experimento foi realizado com base em comparação de dados com um equipamento comercial (Aeroqual 200). Para tanto, foi desenvolvido o processo de amostragem dos quatro sensores paralelamente ao Aeroqual 200 (Figura 04). Para a realização deste teste foi necessário adaptar os sensores para atuarem em sincronismo com o equipamento comercial, com leituras/coletas a cada 1 minuto. Foi então realizado o pré-aquecimento dos sensores, e após este período de 48 horas foi realizada uma triplicata de amostragens em paralelo, totalizando uma coleta de 10 amostras por teste. Tendo em vista que o equipamento Aeroqual 200 demanda um trabalho de registro manual direto, os dados coletados pelo visor do equipamento foram anotados e exportados para uma tabela afim de realizar a plotagem e comparação dos valores registrados tanto pelo equipamento quanto pelos sensores.

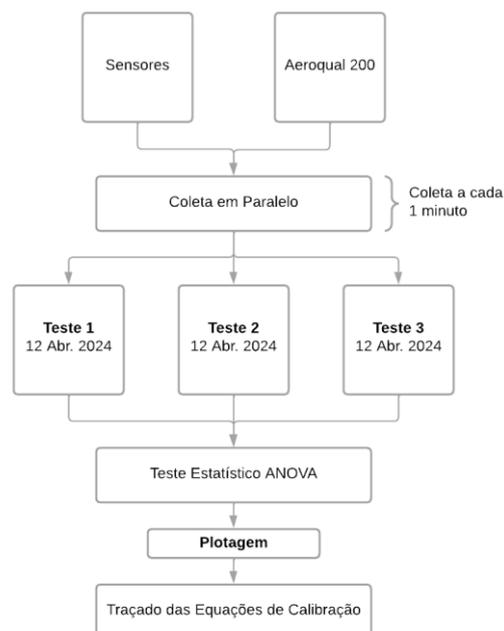
Uma vez desenvolvida a coleta, em paralelo, foi realizado um novo teste ANOVA, a fim de verificar a diferença ou semelhança entre os valores coletados com o equipamento comercial em relação àqueles coletados com os sensores. Definido esta diferença estimou-se a necessidade da proposição de uma equação de parametrização que seja própria para o comportamento de cada um dos sensores, a fim de que os mesmos se adequem aos valores de referência coletados pelo equipamento comercial certificado, que é o Aeroqual 200.

Figura 07: Medidor Aeroqual 200.



Tendo estas equações de parametrização, as mesmas são então incorporadas ao código computacional do sensor para realizar a correção antes do lançamento dos dados no cartão SD. No caso do Arduino UNO, que tem uma certa limitação de memória, ainda mais em casos de equações que demandam uma maior capacidade de processamento, esta parametrização pode ser realizada com um pós-processamento, na própria planilha excel de lançamento dos dados coletados. É válido destacar que todos os testes estatísticos utilizados foram realizados por meio do software estatístico gratuito Jamov.

Figura 08: Fluxograma de teste entre sensores e equipamento.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme indicado, em um primeiro momento, foi realizado o teste em paralelo dos quatro sensores desenvolvidos, os quais ficaram amostrando por 5 dias, de forma contínua, a fim de verificar o número de erros, eventuais falhas de funcionamento e inconsistência dos dados coletados pelos sensores. Tendo em vista que tanto os quatro sensores de temperatura e umidade, quanto os quatro sensores de O_3 são das mesmas marcas, é esperado então uma baixa diferença entre os valores aferidos para cada uma das amostragens.

Neste sentido, o trecho abaixo se dedicará a análise de cada uma das amostragens realizadas, partindo inicialmente apenas do aspecto da análise direta dos gráficos resultantes dos experimentos. Assim, foram separados os testes 1, 2 e 3, referenciados aos sensores 1, 2, 3 e 4 sucessivamente, cada um com sua subseção de comparação dos valores de O_3 com a temperatura, seguido da comparação de O_3 com a umidade. Esta separação em dois grupos distintos se deve as escalas distintas que compõe cada um dos parâmetros, assim sendo, para garantir uma melhor visualização do comportamento de cada uma destas foi realizada esta secção dos testes.

4.1 TESTE 1

O primeiro teste foi realizado do dia 19 ao dia 24 do mês de fevereiro de 2024, os equipamentos foram ligados paralelamente, conforme indicado na imagem de organização do experimento, as 17h16, e foram deixados coletando dados até o mesmo horário do dia final. Os resultados obtidos foram plotados nas Figuras 09 a 16, sendo os quatro primeiros correspondentes a relação da concentração de O_3 com a temperatura e os quatro últimos relacionando a umidade.

4.1.1 Temperatura – Teste 1

Figura 09: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 1 - Teste 1

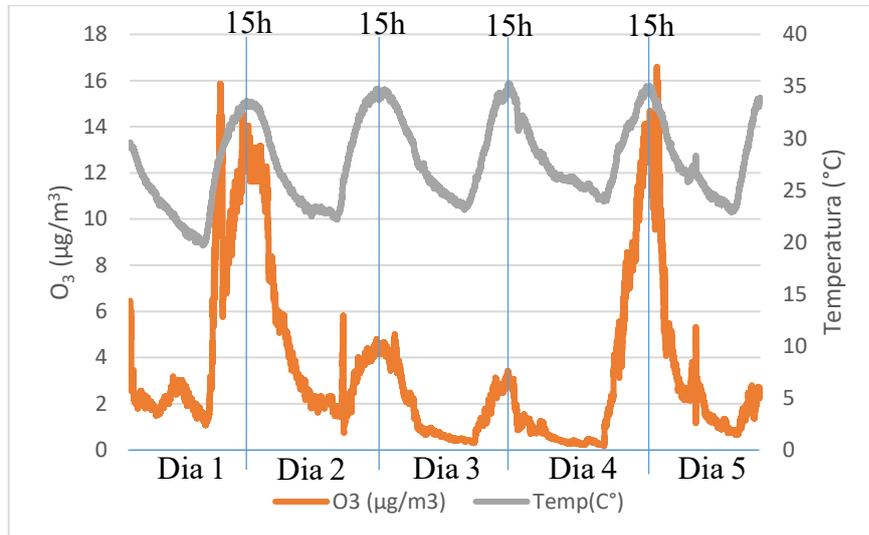


Figura 10: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 2 - Teste 1

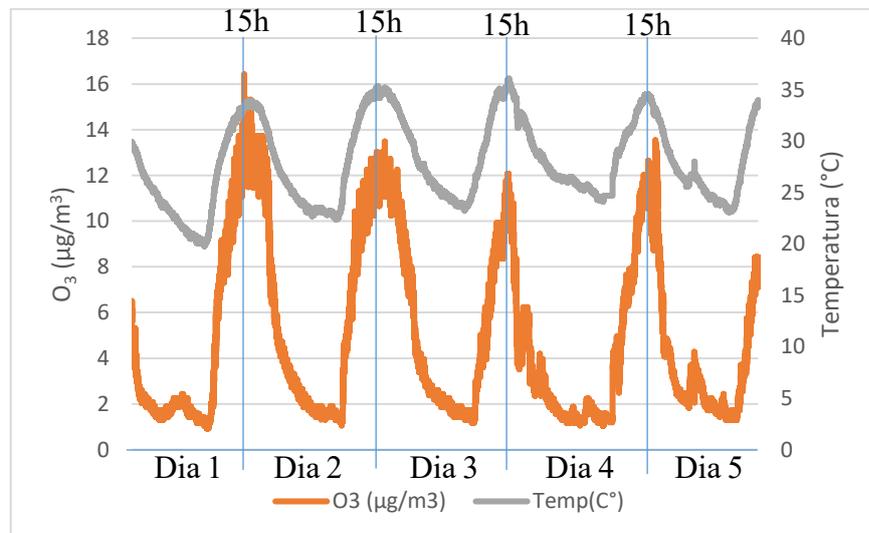


Figura 11: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 3 - Teste 1

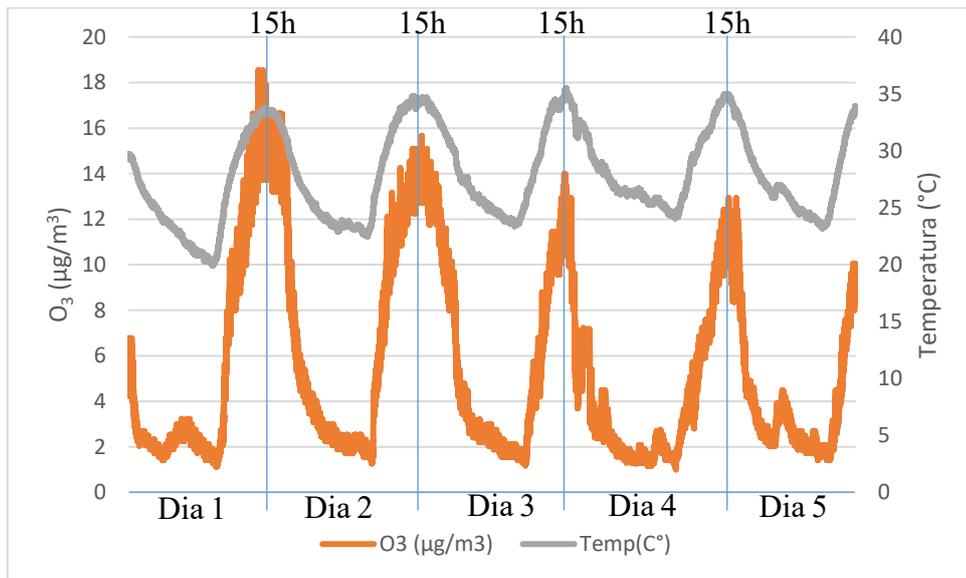
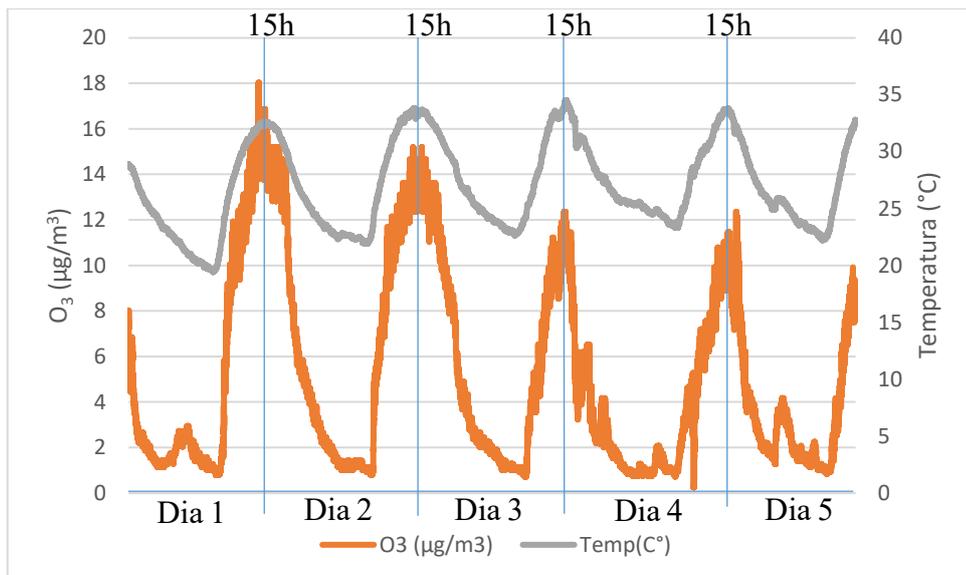


Figura 12: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 4 - Teste 1



Com base nos gráficos é possível notar que houve um comportamento relativamente uniforme dos sensores, que apresentaram valores mais elevados na concentração de O₃, mas que ao longo da semana foram se estabilizando em concentrações mais controladas e uniformes, até chegar em uma aparente normalização a partir do terceiro dia, que passou a ser mais constante e captar uma maior oscilação das concentrações do que se comparado aos períodos iniciais dos testes.

Este comportamento seria esperado, tendo em vista a recomendação do próprio fabricante dos sensores, que indica a necessidade de uma curva de aquecimento do sensor para

que o mesmo seja capaz de trabalho de forma mais precisa. Segundo o fabricante este período seria de dois dias, e que após isto o equipamento já estaria aquecido e melhor adaptado para a efetiva medição das concentrações do O₃.

Num primeiro momento é possível notar como existe uma relação diretamente proporcional entre a concentração de O₃ e os valores de temperatura medidos. Este também é um ponto esperado, tendo em vista as particularidades para a formação do O₃; assim sendo, a elevada temperatura indica a possibilidade de um maior índice de incidência solar, o que propicia a formação deste composto.

No entanto, é válido realizar uma ressalva com relação ao sensor 1, que, ao passo que os demais sensores apresentaram um valor padrão, o mesmo apresentou um comportamento tanto quanto destoante dos demais. Enquanto os sensores 2, 3 e 4 se comportaram de forma diretamente proporcional ao fator temperatura, o sensor 1 não seguiu este padrão, e ainda, diferentemente dos demais sensores que foram capazes de captar uma maior variação das concentrações de O₃ a partir do segundo dia, o sensor 1 apresentou um grande pico no primeiro dia, mas apresentou registros abaixo dos demais até o quarto dia, onde apresentou um novo pico que foi ainda maior que os valores registrados pelos demais.

Este comportamento pode ser devido a algum problema estruturado do sensor 1 em específico, tendo em vista que o mesmo apresentou uma menor amplitude amostral ao longo de todos os testes realizados. Isto pode ser uma limitação que deve ser identificada e avaliada, uma vez que esta baixa amplitude inicial pode vir a ser corrigida com o processo de calibração que será melhor abordado a frente no estudo.

No entanto, é importante identificar se esta calibração proposta de fato se mostra capaz de desempenhar uma boa correção e conseqüente normalização dos resultados amostrados com as referências do equipamento comercial calibrado. Caso mesmo após esta calibração, o equipamento continue apresentando erros significativos nas concentrações amostradas, o mesmo deve ser substituído.

Importante lembrar ainda que estes sensores são sensíveis e não podem ficar diretamente expostos a intemperes, visto que esta exposição pode reduzir de forma significativa a vida útil do sensor ou até mesmo danificá-lo.

4.1.2 Umidade – Teste 1

Figura 13: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 1 - Teste 1

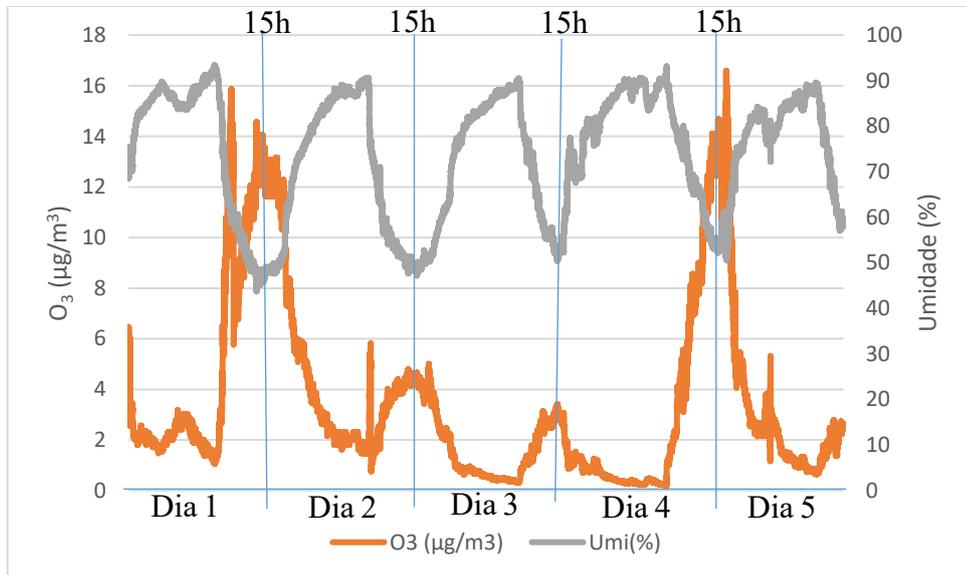


Figura 14: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 2 - Teste 1

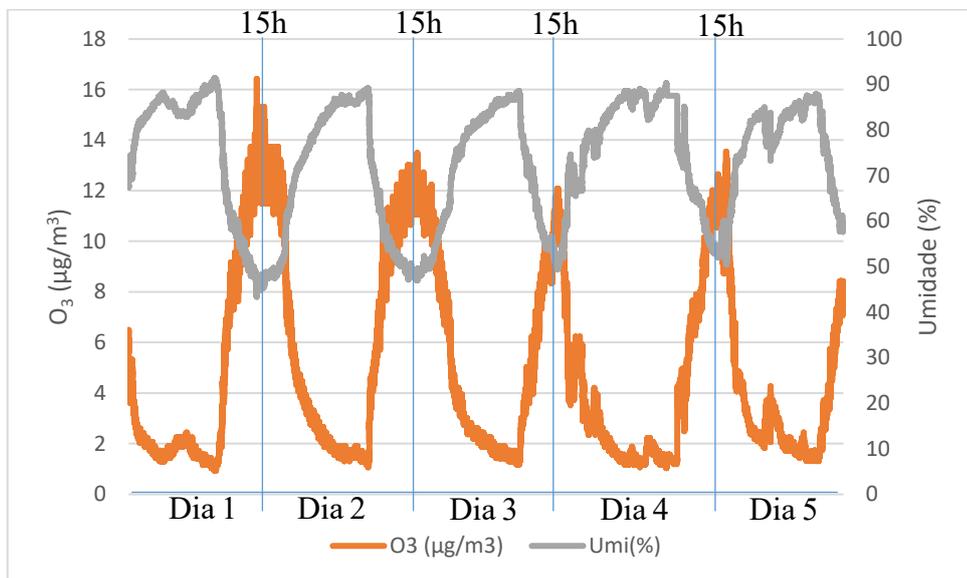


Figura 15: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 3 - Teste 1

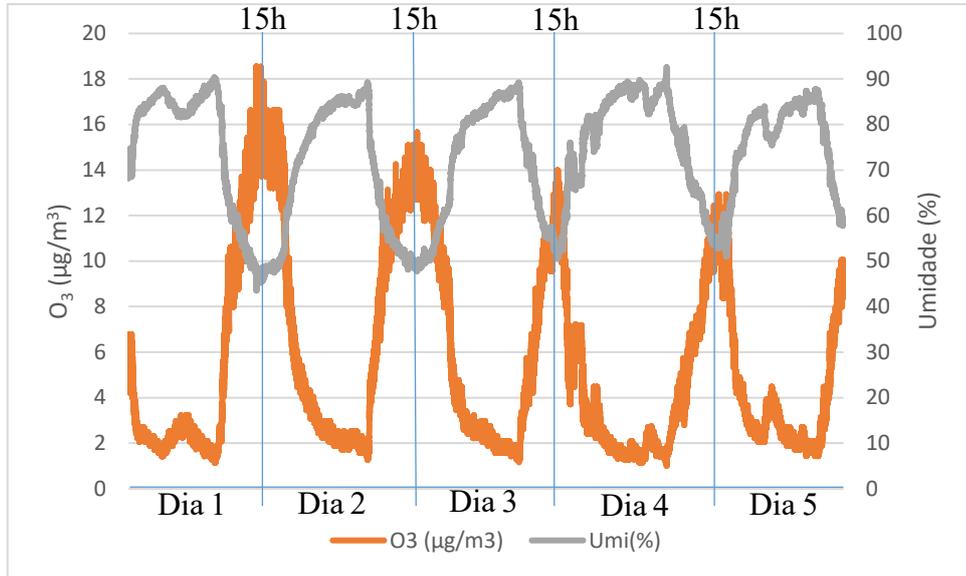
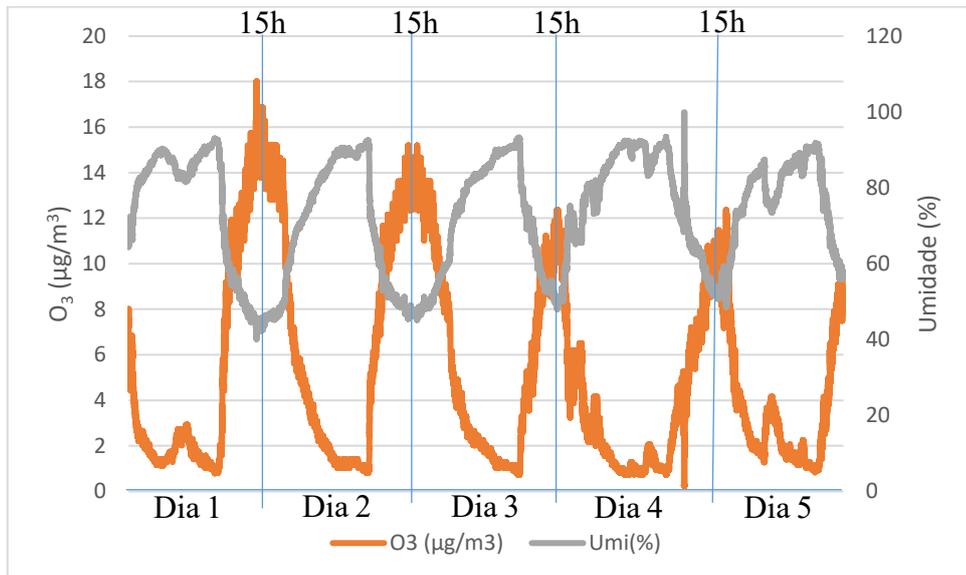


Figura 16: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 4 - Teste 1



Ao analisar os valores amostrados de O₃ comparados com os valores de umidade é possível identificar um padrão de relação inversamente proporcional, ao passo que a umidade se eleva, as concentrações de O₃ são reduzidas de forma quase instantânea. Um comportamento também esperado tendo em vista o fato de que uma maior umidade tender a tornar mais lento o processo de formação do O₃, em especial quando esta umidade se deriva de uma alta nebulosidade, que além de retardar a reação por uma maior presença de água no meio, ainda reduz a incidência solar reduzindo ainda mais a capacidade de formação de O₃.

Neste teste é importante identificar que houve uma inconsistência no valor da umidade, algo que impactou de forma direta na concentração de O_3 , mas que não foi possível identificar de forma tão direta na comparação com a temperatura, que é um ponto que excede o limite de 100% de umidade que aconteceu na fase inicial do quarto pico de concentração de O_3 . Conforme é possível identificar, esta elevação súbita do valor da umidade ocasionou em uma queda abrupta da estimativa da concentração de O_3 .

Este valor discrepante é algo a se atentar para o funcionamento do equipamento, algo que deve ser controlado para evitar a super ou sub estimativa das concentrações reais de O_3 , demandando assim um maior refino do processo de coleta de dados, o qual precisará realizar uma correção ou ao menos o descarte destes dados que são completamente discrepantes da realidade esperada mas pontuais, assim é possível identificar este mais como uma eventual falha de coleta, que de fato pode acontecer ao longo do funcionamento do equipamento do que um problema no sensor.

4.2 TESTE 2

O segundo teste foi realizado do dia 11 ao dia 15 do mês de março de 2024, os equipamentos foram ligados paralelamente, conforme indicado na imagem de organização do experimento as 18h11, e foram deixados rodando até o mesmo horário do dia final. Os resultados obtidos foram plotados nas Figuras 17 a 24 sendo os quatro primeiros correspondentes a relação da concentração de O_3 com a temperatura e os quatro últimos relacionando a umidade.

4.2.1 Temperatura – Teste 2

Figura 17: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 1 - Teste 2

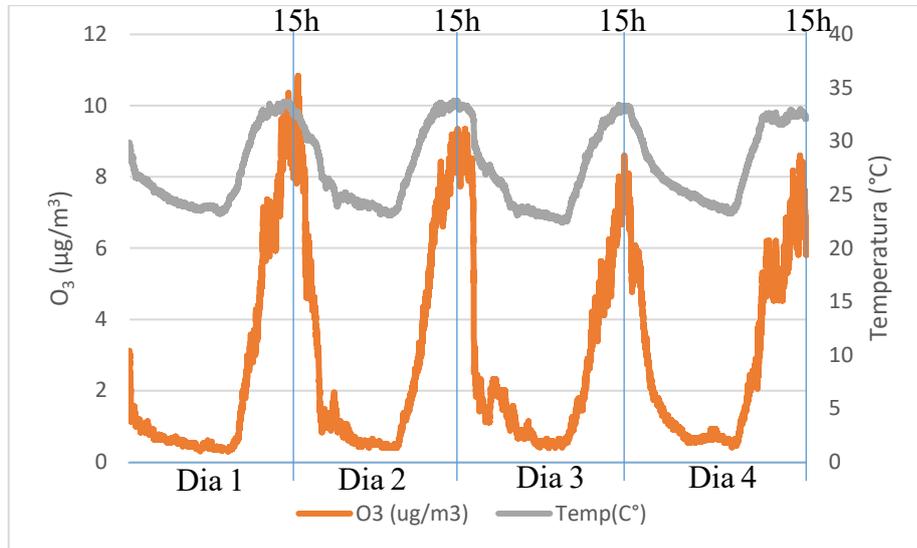


Figura 18: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 2 - Teste 2

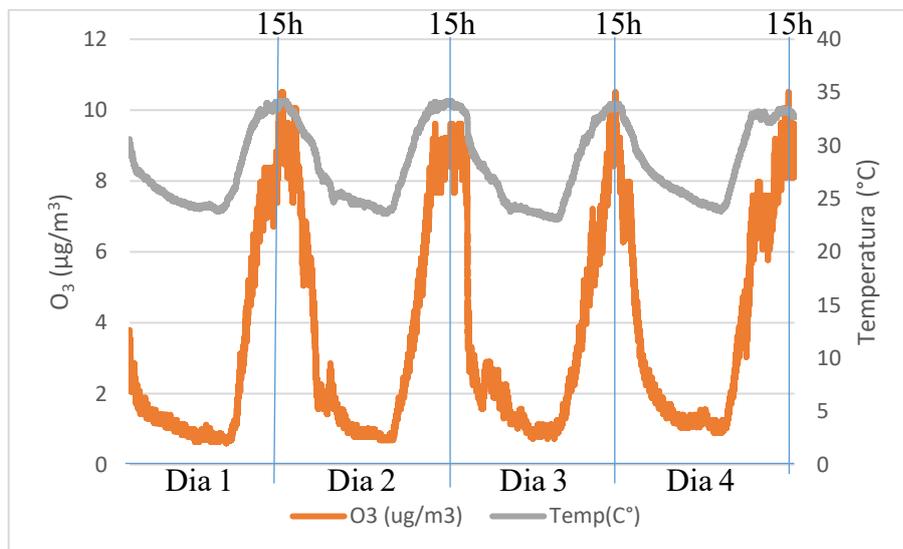


Figura 19: [O₃] e Temperatura (C°) – Sensor 3 - Teste 2

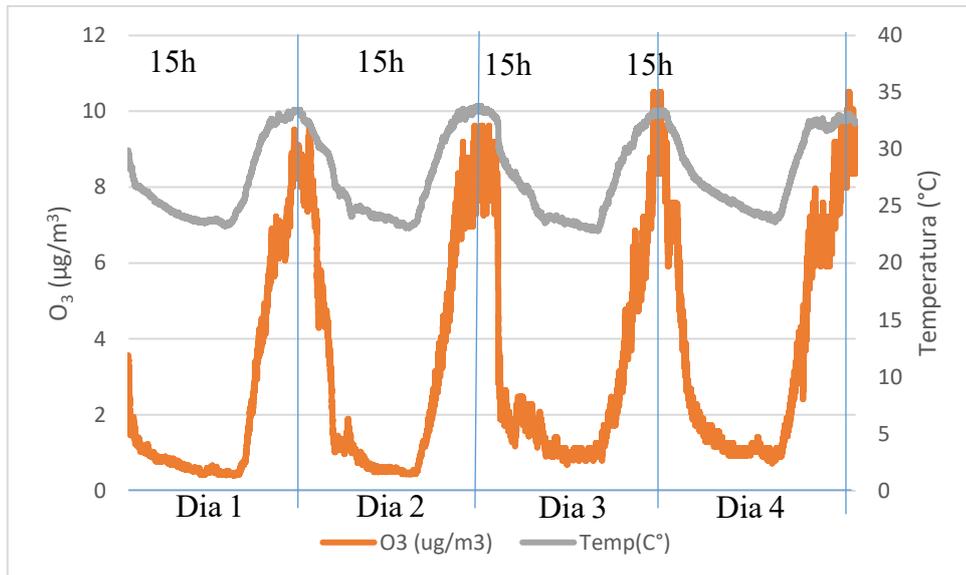
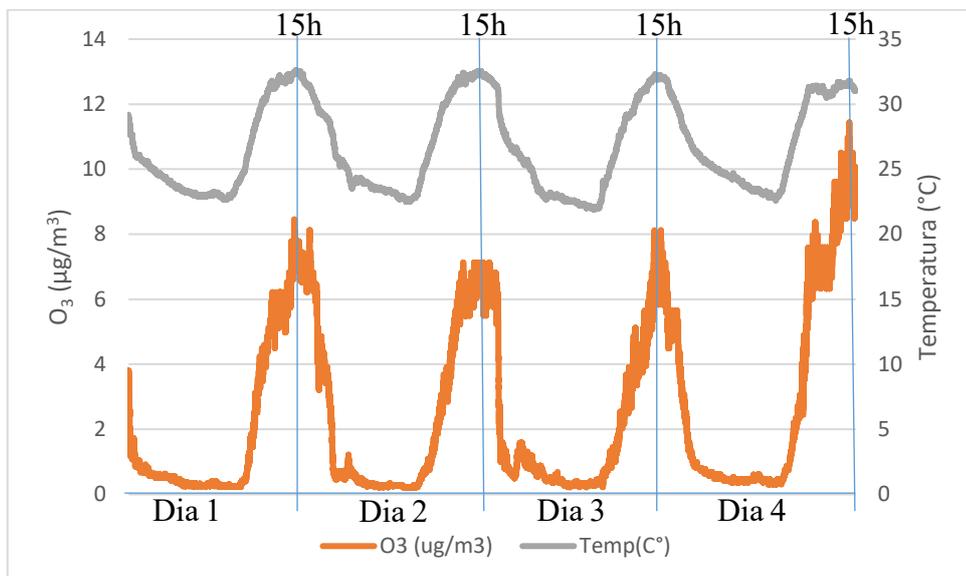


Figura 20: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 4 - Teste 2



Para este teste é possível identificar que houve uma maior variação entre os valores registrados por cada um dos equipamentos. Os sensores 2 e 3 se comportaram de forma muito semelhantes entre si, no entanto os sensores 1 e 4 apresentaram um comportamento tanto quanto destoantes entre si e dos outros dois.

O sensor 1 iniciou o período dos testes de forma muito semelhante aos demais, no entanto, os valores médios de concentração registrados foram decrescendo ao passo que os registrados pelos sensores 2 e 3 se mantiveram mais constantes. Este comportamento de queda

se mostra como algo que não seria muito esperado, tendo em vista que a semana em questão foi uma semana de clima relativamente quente, o que propiciaria a formação de O_3 , indicando mais uma inconsistência no registro do sensor, por mais que os valores de temperatura tivessem se comportado de forma semelhante aos demais.

Com relação ao sensor quatro é possível notar um comportamento também discrepante se comparado aos demais, tendo em vista que as concentrações de O_3 registradas por este ao longo de toda a semana se mantiveram cerca de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ abaixo dos sensores 2 e 3. Isto poderia ser apenas um resultado de uma calibração não tão bem executada na inicialização do sensor, tendo em vista que o comportamento do mesmo seguiu o mesmo padrão dos sensores 2 e 3 ao longo de quase toda a semana. Outra anomalia aconteceu no último dia de amostragem, pois os sensores 2 e 3 coletaram valores médios de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enquanto o sensor 4 coletou valores próximos de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, algo que é ainda mais estranho quando se leva em consideração o fato de que a temperatura média registrada pelos sensores 3 e 4 foram próximas de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ enquanto a temperatura média do sensor 4 foi de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, o que deveria implicar em uma menor concentração de O_3 , e não uma maior, como o registrado. Sendo assim, este problema pode estar associado tanto à calibração do próprio sensor de O_3 , quanto aos parâmetros da umidade, já que os valores de temperatura se mostraram próximos aos demais.

4.2.2 Umidade – Teste 2

Figura 21: $[O_3]$ e Umidade (%) - Sensor 1 - Teste 2

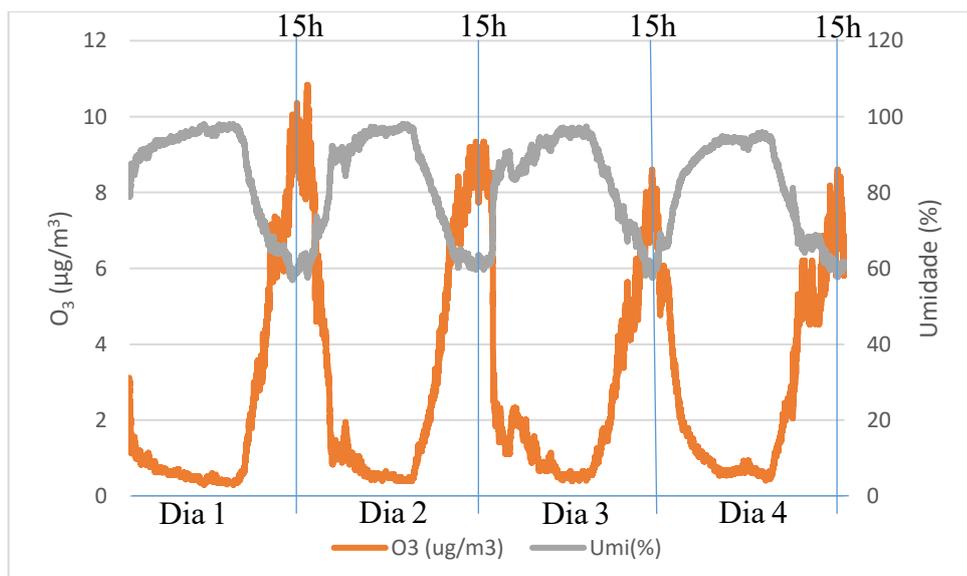


Figura 22: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 2 - Teste 2

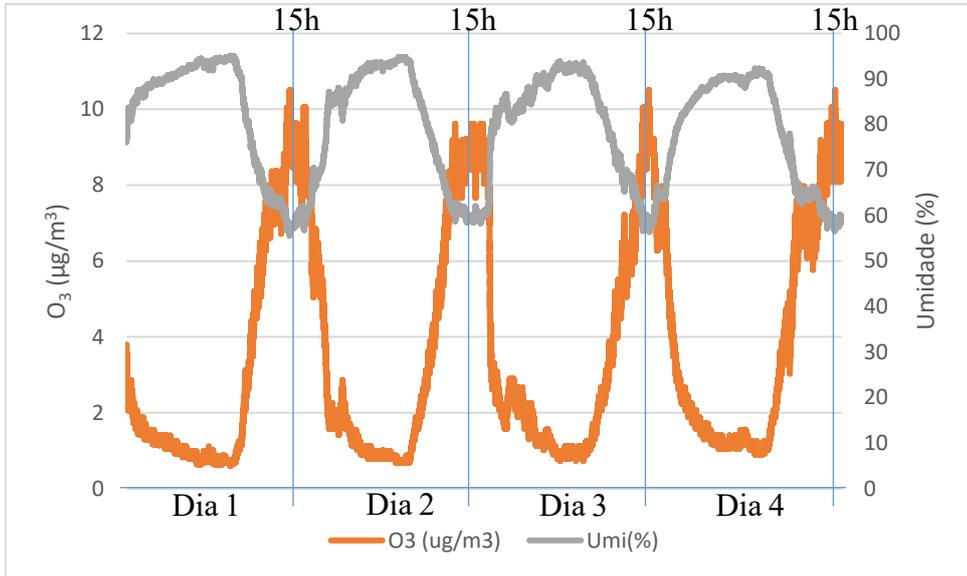


Figura 23: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 3 - Teste 2

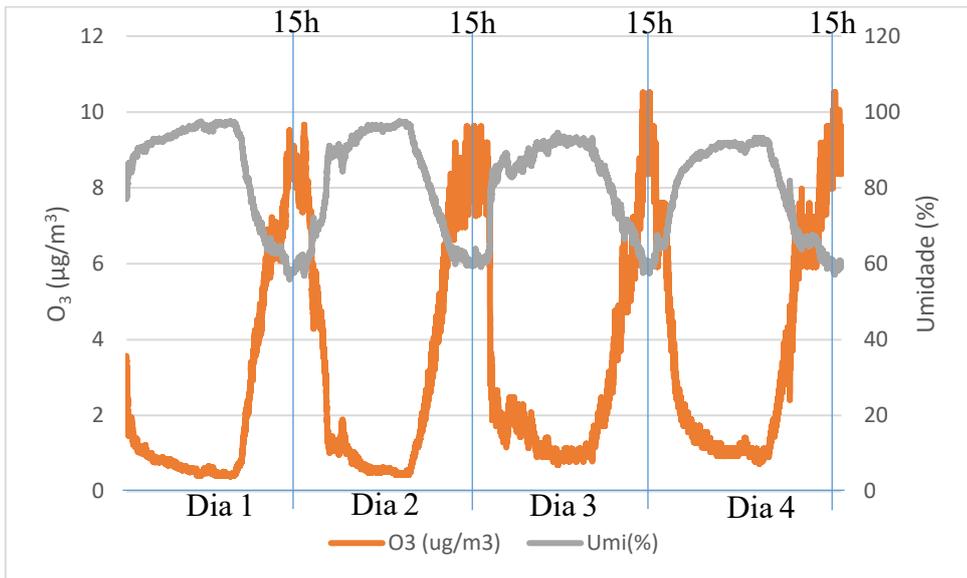
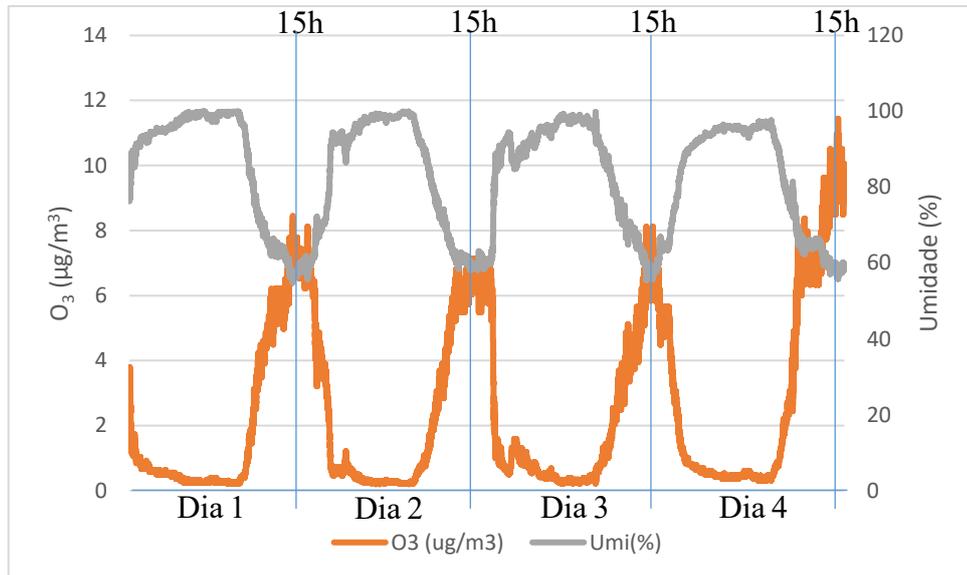


Figura 24: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 4 - Teste 2



Ao analisar os percentuais de umidade é possível notar que estes se mantiveram padrões para os sensores 1, 2 e 3, o que acaba por identificar que as variações nas concentrações de O₃ do sensor 1 sejam em verdade derivadas de algum problema do próprio sensor de O₃ e não derivadas dos demais parâmetros de entrada. Por outro lado, nota-se uma variação dos percentuais de umidade para o sensor 4, como já relatado anteriormente.

Ao analisar a umidade registrada pelo sensor 4 é notado como esta se apresenta, em média, mais baixa que a dos demais sensores, o que explica a baixa concentração de O₃ registrada, por mais que o sensor ainda estivesse se comportando de forma muito semelhante aos demais.

4.3 TESTE 3

O terceiro teste era previsto para se realizar entre os dias 25 e 30 do mês de março de 2024, no entanto esta foi uma semana marcada por chuvas e inconsistência na rede elétrica, o que acabou por impactar negativamente os testes realizados. Por este motivo, o teste foi rodado novamente entre os dias 02 e 07 do mês de abril. De forma semelhante aos anteriores, os equipamentos foram ligados paralelamente, conforme indicado na imagem de organização do experimento (Figura 3). As inconsistências na rede elétrica impactaram de forma negativa no funcionamento das memórias SD dos equipamentos que tiveram de ser formatadas, desta forma, em virtude da ocorrência apontada os sensores foram ligados apenas às 00h37, e foram deixados

rodando até as 22h37 do dia final. Os resultados obtidos foram plotados nas Figuras 25 a 32, sendo os quatro primeiros correspondentes a relação da concentração de O₃ com a temperatura e os quatro últimos relacionando a umidade.

4.3.1 Temperatura – Teste 3

Figura 25: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 1 - Teste 3

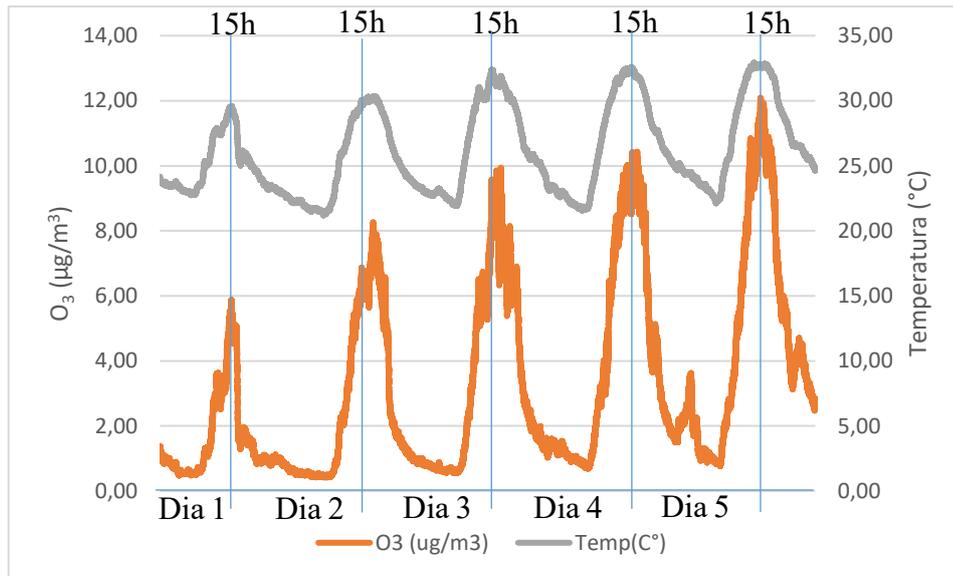


Figura 26: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 2 - Teste 3

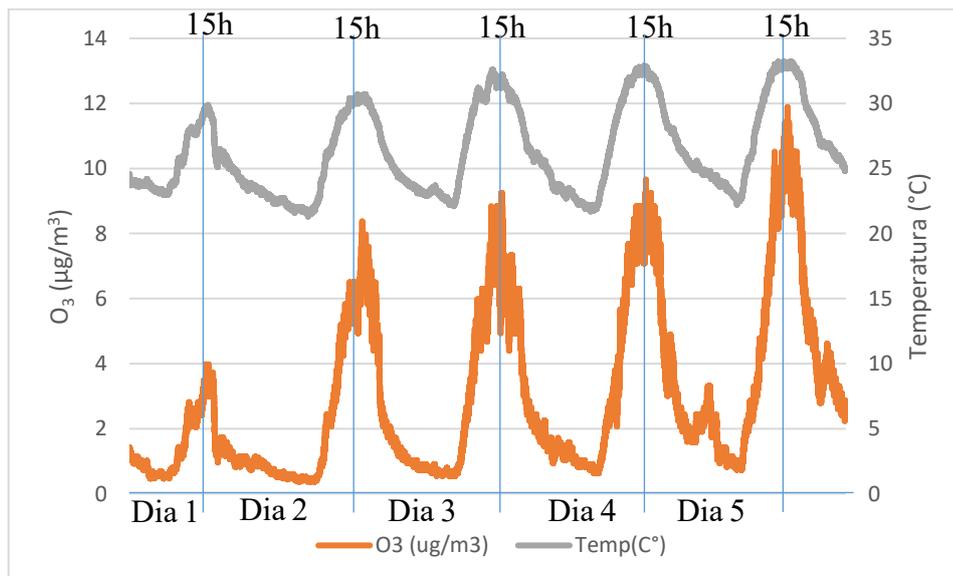


Figura 27: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 3 - Teste 3

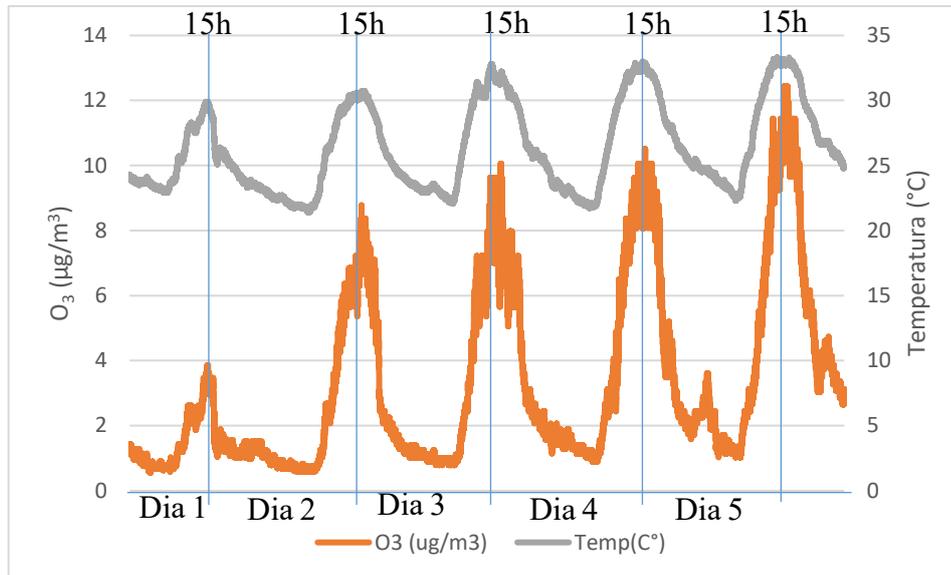
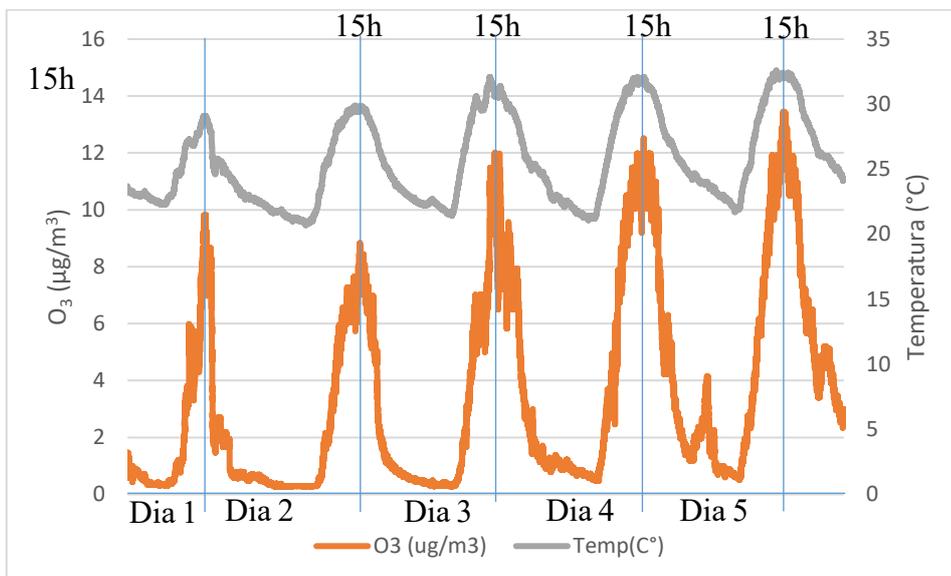


Figura 28: [O₃] e Temperatura (C°) - Sensor 4 - Teste 3



Com relação a temperatura é possível identificar que a mesma se mostrou bem consistente para os sensores 1, 2 e 3 ao passo que houve uma certa dissonância por parte do sensor 4, que apresentou valores relativamente menores do que os demais em alguns pontos. É possível identificar que tal qual nos testes anteriores, os sensores 2 e 3 apresentaram um comportamento bem semelhante, ao passo que o sensor 1 começou com registro de valores um pouco superiores aos registrados pelos sensores 2 e 3, mas foi se normalizando com o passar dos dias.

Vale ressaltar que por mais que o sensor 1 tenha iniciado com valores mais elevados, o mesmo ainda apresentava um comportamento muito semelhante aos dos sensores 2 e 3. Por outro lado, o sensor 4 apresentou uma maior variação nos valores registrados, inclusive com valores de temperatura inferiores aos registrados pelos demais sensores, apresentando não apenas um comportamento diferente dos demais neste período inicial, como também valores significativamente superiores de O_3 mesmo após o terceiro dia, registrando valores médios de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enquanto os demais apresentaram valores médios de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Este caso pode ser identificado como resultado de algum problema na própria coleta dos dados de O_3 por parte do sensor MQ-131, tendo em vista que os valores de temperatura e umidade deste sensor estão muito semelhantes aos demais. Assim é possível que esta falha seja uma falha real do sensor, por uma má calibração, por exemplo, tendo em vista que o mesmo apresentou valores de O_3 com uma certa distinção nos outros testes também, ou ainda pelo próprio efeito de borda, tendo em vista que este sensor estava localizado mais próximo da borda da bancada do que os demais, ficando assim mais suscetível às interferências externas.

4.3.2 Umidade – Teste 3

Figura 29: [O_3] e Umidade (%) - Sensor 1 - Teste 3

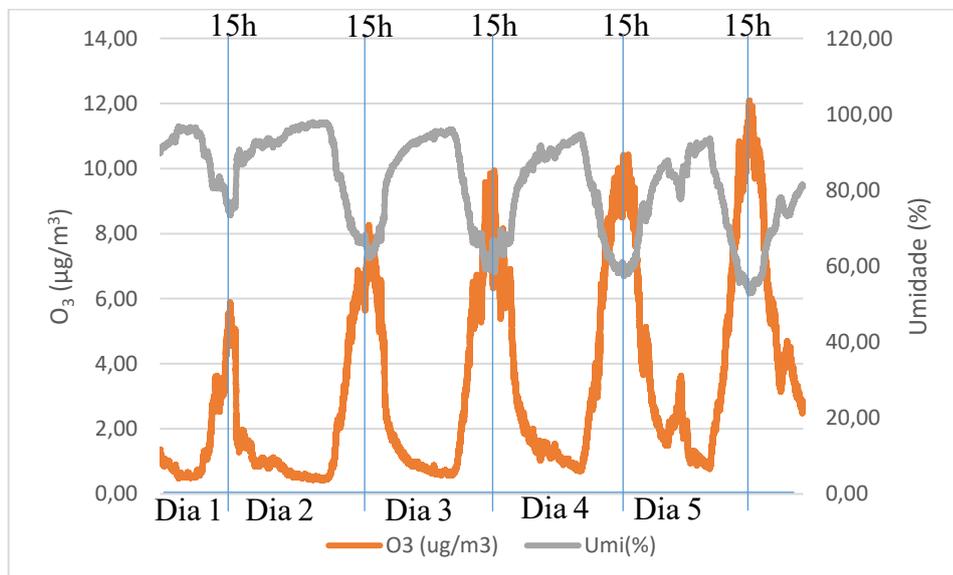


Figura 30: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 2 - Teste 3

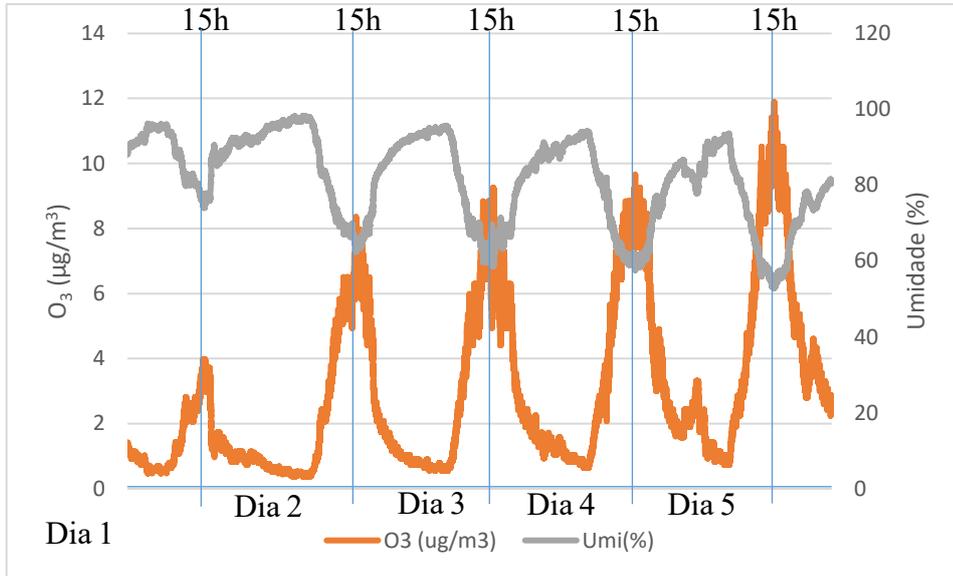


Figura 31: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 3 - Teste 3

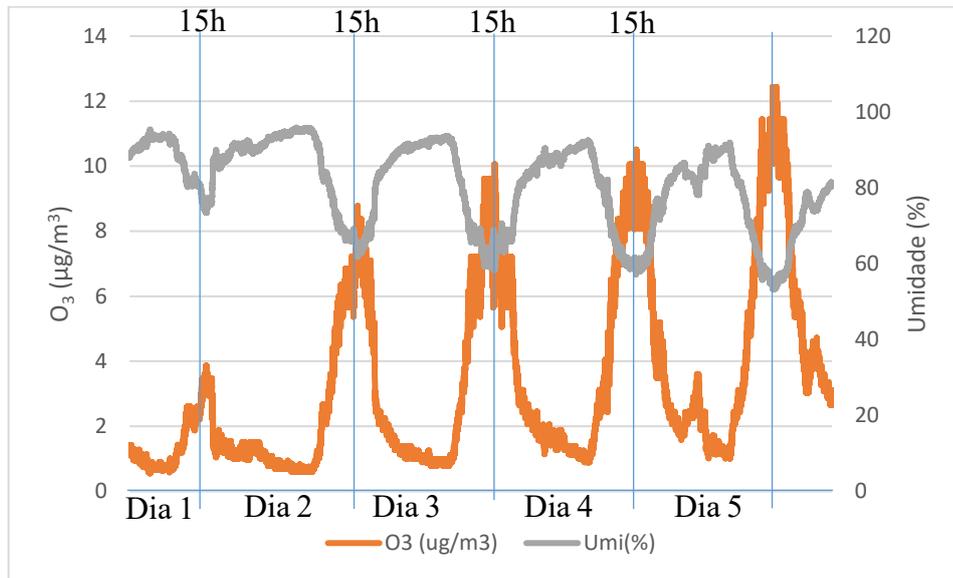
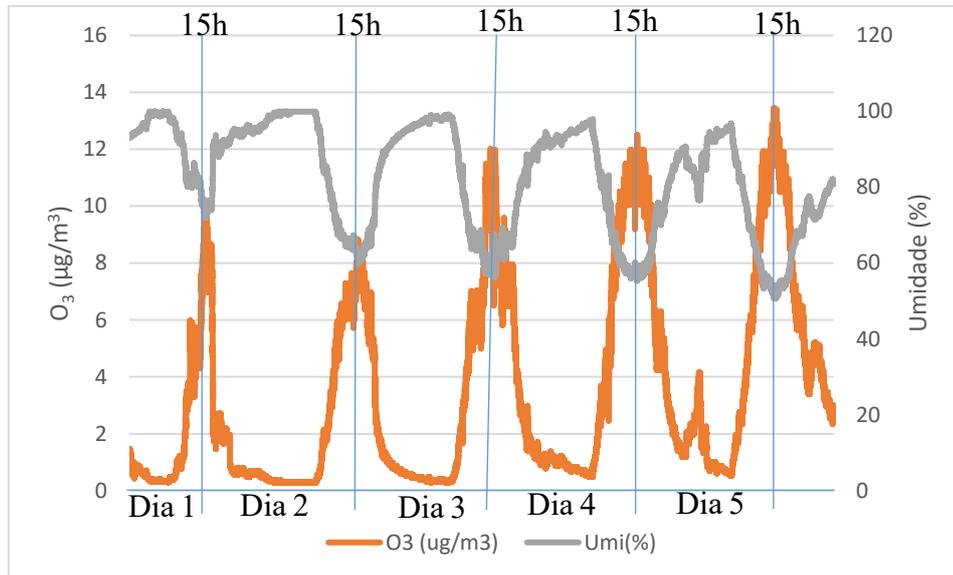


Figura 32: [O₃] e Umidade (%) - Sensor 4 - Teste 3



Com relação a umidade é possível notar que o comportamento da mesma se manteve muito similar em todos os sensores, com valores em elevação e decréscimo seguindo a mesma tendência em todos os cenários avaliados. No entanto é válido apontar que a umidade no sensor 4 também apresentou valores muito semelhante aos demais, o que indica uma certa normalidade dos dados coletados, e sugerindo que a diferença das concentrações aferidas provavelmente se deva a alguma interferência no próprio medidor de O₃, seja por um problema interno ou em função do efeito de borda já mencionado.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SENSORES DO PROTÓTIPO

Para este caso não será analisado se houve diferença significativa entre os testes 1, 2 e 3, tendo em vista que cada um dos testes foi realizado em semanas diferentes, considerando, inclusive, variações climáticas significativas como tempo nublado, dias chuvosos, dias ensolarados, assim, é esperado de antemão que houve de fato uma diferença significativa entre cada um dos testes, algo que é reforçado pelo resultado do teste ANOVA de Medições Repetidas que indica o efeito intra-sujeitos na Tabela 01. O valor $p < 0,001$ na linha “Testes” demonstra que houve de fato uma diferença significativa entre os testes realizados.

Tabela 01: Teste ANOVA de Medições Repetidas - Efeito Intra-Sujeitos

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Testes	43486	2	21743.10	12950	< .001
Testes * Sensor	5295	6	882.49	526	< .001
Residual	13512	8048	1.68		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

O fato de haver uma diferença entre os testes não tem uma implicação direta, tendo em vista que um dos objetivos é justamente identificar se os sensores são de fato capazes de atuar em diferentes condições climáticas, além do fato de que este é um parâmetro experimental que não pode ser controlado tendo em vista o caráter do desenvolvimento do estudo ao ar livre.

Por outro lado, seria esperado que os sensores tivessem um comportamento semelhante entre si, tendo em vista que todos eles foram parametrizados da mesma forma, com a utilização dos mesmos modelos de placa e sensores, no entanto, ao avaliar os resultados do teste ANOVA de Medições Repetidas que indica o efeito Inter-Sujeitos na Tabela 02, é possível identificar, pelo valor de $p < 0,001$ que também houve uma diferença estatisticamente significativa entre os valores registrados pelos equipamentos.

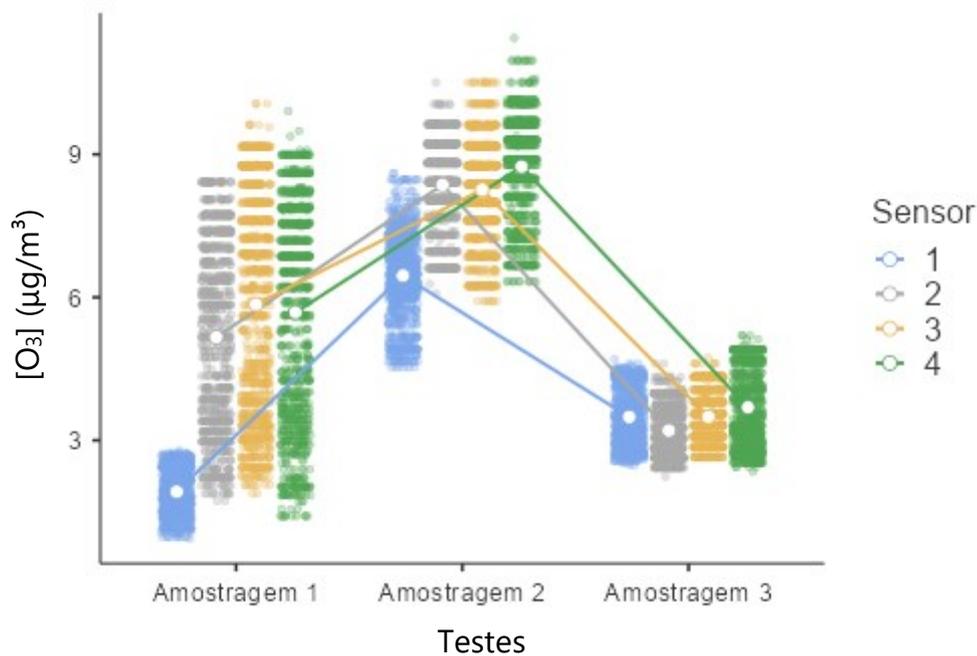
Tabela 02: Teste ANOVA de Medições Repetidas - Efeito Inter-Sujeitos

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Sensor	8281	3	2760.20	1815	< .001
Residual	6121	4024	1.52		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Esta diferença entre os amostradores pode indicar uma certa inconsistência entre os amostradores, tendo em vista que os quatro tem a mesma composição, no entanto, ao se analisar de forma gráfica se torna mais fácil de compreender o que levou a tal diferença no resultado obtido. O gráfico da Figura 29 contempla os valores das amostras coletadas de cada um dos sensores em cada um dos períodos de amostragem, e neste é possível identificar de forma direta como houve uma considerável discrepância do sensor 1 em relação aos demais sensores, algo que certamente impactou significativamente o resultado da análise de comparação.

Figura 33: Comparação Gráfica dos Testes Realizados.



Com este gráfico é possível notar como foi o comportamento geral das concentrações de O_3 ao longo de cada uma das semanas de análise. Assim é notado que o primeiro teste se deu ao longo de uma semana que teve uma maior amplitude de concentrações, atingindo valores baixos durante a noite e elevados ao longo do dia. Este comportamento se deve essencialmente a uma composição mista da semana, que se iniciou de forma bem ensolarada, com temperatura elevada, mas passou para um tempo chuvoso ao longo do período, algo que pode ser até mesmo observado nos gráficos referentes ao primeiro teste.

Ao mesmo tempo, o segundo teste apresentou uma amplitude mais baixa, mas uma concentração mais elevada, o que de fato corresponde com as condições meteorológicas da semana que se mostrou mais ensolarada, com uma baixa incidência de nuvens, possibilitando uma maior formação de O_3 .

Por fim, a semana do último teste foi uma semana com maior nebulosidade, com algumas chuvas pontuais, mas que ainda assim, em decorrência da maior umidade e elevada nebulosidade, mitigaram a formação de O_3 , refletindo diretamente nos valores amostrados, que se mostraram, em média, menores do que os valores registrados nos demais testes.

Ao analisar de forma direta os valores de cada uma das amostragens é possível identificar que o sensor 1 apresentou a maior diferença se comparado aos demais sensores, tendo no primeiro teste uma menor variação nos resultados coletados e se distanciando

significativamente da média geral dos demais sensores tanto na amostragem 1 quanto na amostragem 2. Na amostragem 3 o mesmo apresentou um comportamento mais próximo dos demais, no entanto, na semana em questão houve uma maior incidência de nebulosidade, chuvas e temperaturas mais baixa, o que condicionou uma baixa variação para todos os amostradores. Com base no proposto é então válido traçar algumas possíveis causas para esta disparidade entre os amostradores.

O primeiro fator que poderia ter causado a perturbação nos valores aferidos pelo medidor 1 seria justamente algum defeito no equipamento, seja pelo sensor MQ-131, que coleta diretamente os valores da concentração de O₃ atmosférico ou até mesmo no sensor DHT-22 responsável pela coleta dos valores de temperatura e umidade, tendo em vista que estes valores têm impacto direto nas medidas de O₃ registradas. No entanto, esta hipótese não pode ser descrita como causa maior tendo em vista que os valores de temperatura e umidade do primeiro teste se mantiveram semelhantes, ao passo que os valores de O₃ registrados não acompanharam os demais, indicando uma possível falha própria do equipamento.

Outra possível interferência seria a proximidade deste sensor com a parede, tendo em vista que o espaço utilizado para o desenvolvimento dos testes era uma bancada localizada sob um local coberto e os sensores estavam dispostos de forma paralela, conforme identificado na Figura 03, o sensor 1 ficou mais próximo da parede do local, o que poderia implicar na menor circulação de ar na proximidade do sensor se comparado aos demais e conseqüentemente implicando de forma direta nos valores amostrados pelo mesmo.

Por outro lado, tendo em vista a similaridade dos valores registrados pelos demais sensores, foi realizado a troca do sensor MQ-131 utilizado nos primeiros testes e reorganizado a disposição dos sensores sobre a bancada afim de assegurar uma menor interferência do efeito da parede sobre os dados amostrados. Tendo em vista similaridade entre os demais foi realizado então o teste em paralelo com o medidor de O₃ Aeroqual 200, a fim de identificar o comportamento dos sensores em relação a um amostrador calibrado e certificado.

4.5 COMPARAÇÃO DO PROTÓTIPO COM O AEROQUAL 200

Uma vez realizados os ajustes nos sensores, foi desenvolvido o teste paralelo dos quatro amostradores juntamente com o equipamento Aeroqual 200, um equipamento de medição de O₃ certificado. O teste foi realizado em triplicata identificando como os sensores se comportariam em relação ao amostrador padronizado. Os resultados dos testes em paralelo dos equipamentos estão plotados nos gráficos das Figuras 34, 35 e 36.

Válido ressaltar que os valores da amostra coletada pelos sensores estão registrados em relação ao eixo Y esquerdo do gráfico, ao passo que os valores registrados pelo equipamento Aeroqual 200 esta registrado no eixo Y direito, tendo em vista a diferença de escala entre os valores.

Figura 34: Amostragem Sensores x Aeroqual 200 - Paralelo 1.

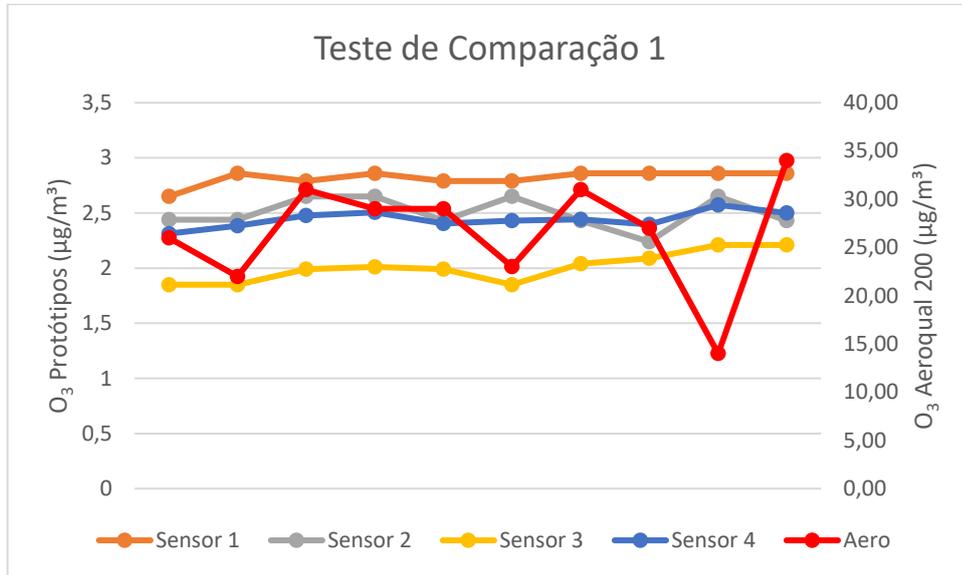


Figura 35: Amostragem Sensores x Aeroqual 200 - Paralelo 2.

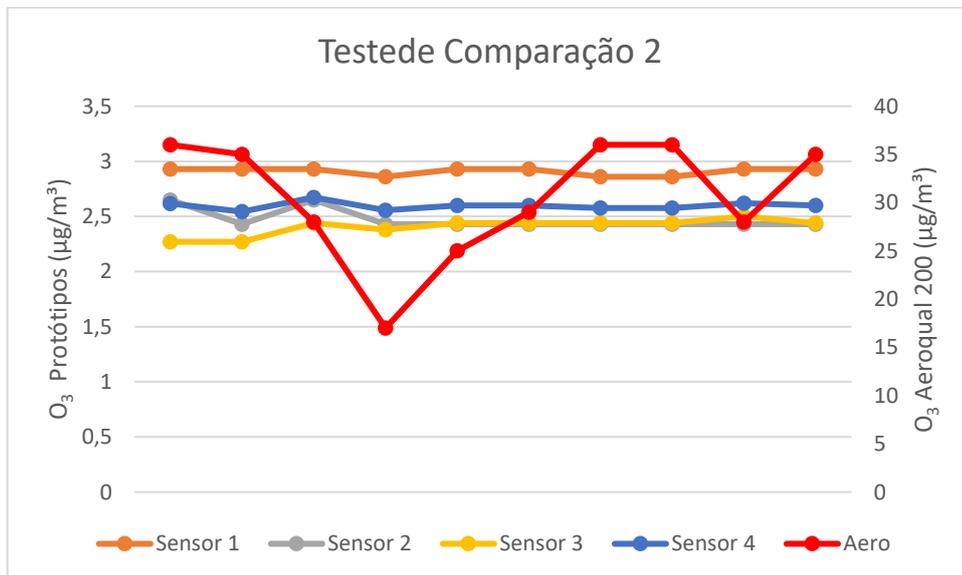
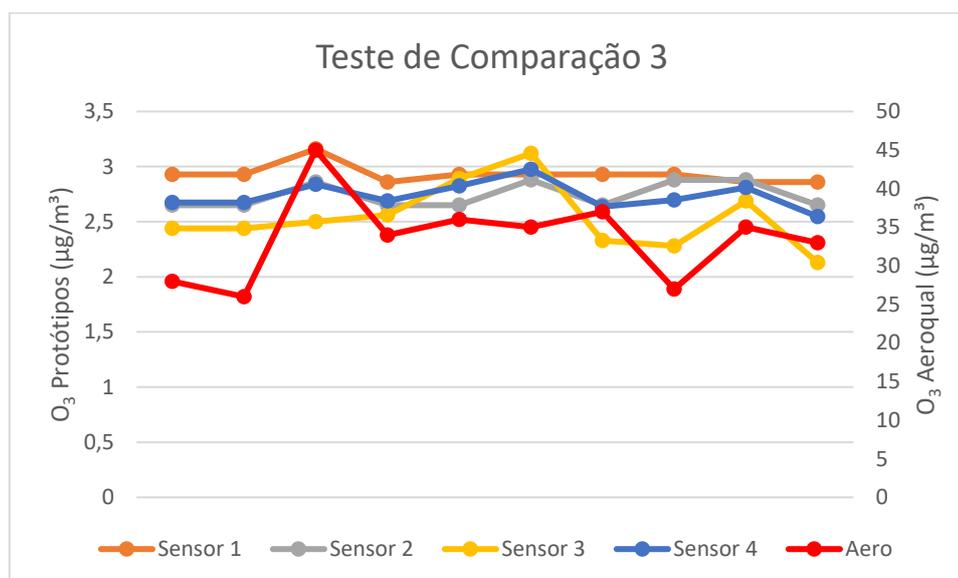


Figura 36: Amostragem Sensores x Aeroqual 200 - Paralelo 3.



Ao analisar de forma visual os gráficos gerados pelos dados de cada uma das amostras é possível identificar que por mais que o equipamento Aeroqual 200 tenha uma maior variação entre seus dados coletados, é notável que os sensores apresentaram em sua maioria um comportamento ao menos de tendencia semelhante ao registrado pelo equipamento padrão, o que é um bom indicativo para o processo de calibração.

Conforme esperado, ao utilizar o teste ANOVA de Medições Repetidas houve uma diferença estatisticamente significativa entre as amostras, o que já se seria esperado, tendo em vista a direta diferença de escala entre as amostras, que ao passo que os amostrador Aeroqual 200 registrava valores em média próximos de 40 µg/m³, os sensores registraram valores próximos de 3 µg/m³, o que causa uma discrepância direta entra as amostras, algo que é confirmado pelo valor de $p < 0,001$ do teste de efeito Inter-Sujeitos presente na Tabela 03, indicando uma nítida diferença entre os equipamentos.

Tabela 03: ANOVA Sensores X Aeroqual 200 - Efeito Inter-Sujeitos

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Equipamento	18343	4	4585.81	720	< .001
Residual	287	45	6.37		

Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Deste modo, é possível identificar que há uma diferença significativa entre os valores dos sensores com o valor de referência do equipamento Aeroqual 200 demandando assim a utilização de uma equação polinomial de padronização para realizar a calibração dos sensores com relação ao equipamento de referência. No entanto, tendo em vista que os valores registrados por cada um dos sensores não se mostraram idênticos é necessário que cada um dos sensores tenha uma equação de calibração própria, a fim de garantir que esta correção efetivamente seja capaz de regularizar os valores coletados pelo sensor de forma paralela ao valor de referência do equipamento Aeroqual 200.

4.6 EQUAÇÃO DE PADRONIZAÇÃO

Conforme observado no tópico anterior, cada equipamento requer uma equação paramétrica específica, dado que suas respostas, embora próximas entre si, foram distintas. Portanto, é crucial desenvolver uma correção individual para cada uma delas. Neste tópico será então apresentado como se deu o desenvolvimento da equação paramétrica de cada um dos sensores a fim de realizar o processo de calibração dos mesmos.

Os valores coletados nos testes de comparação foram plotados, tendo os valores no equipamento Aeroqual 200 como o eixo Y e os valores amostrados pelos sensores no eixo X, assim, foi realizado, com base na relação entre os pontos, o traçado de uma curva que representasse o comportamento relacional dos dois dados e gerado uma equação paramétrica na qual, com base na entrada do dado coletado pelo sensor, o mesmo se torne capaz de corrigir os valores de entrada para algo mais próximo do valor de referência do equipamento padronizado.

Nas Figuras 37 a 40 é possível identificar a relação entre os pontos do teste com os sensores 1, 2, 3 e 4 respectivamente, além da própria equação paramétrica de calibração gerada para cada um dos sensores.

Figura 37: Equação de Parametrização – Sensor 1.

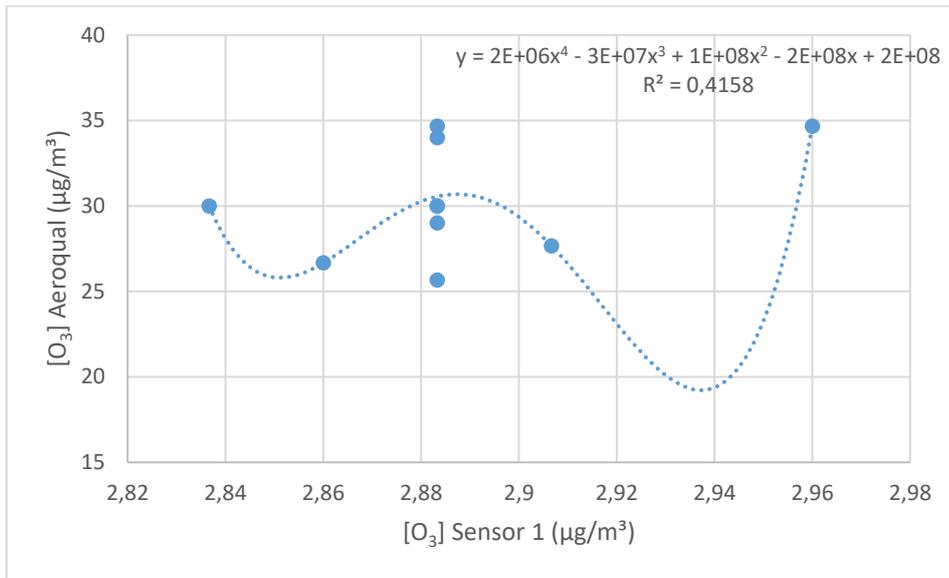


Figura 38: Equação de Parametrização – Sensor 2.

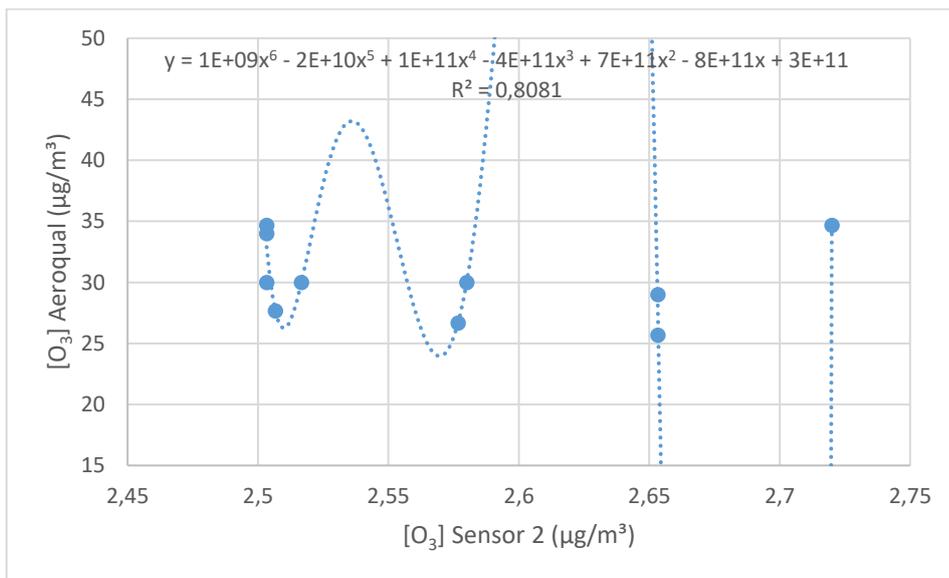


Figura 39: Equação de Parametrização – Sensor 3.

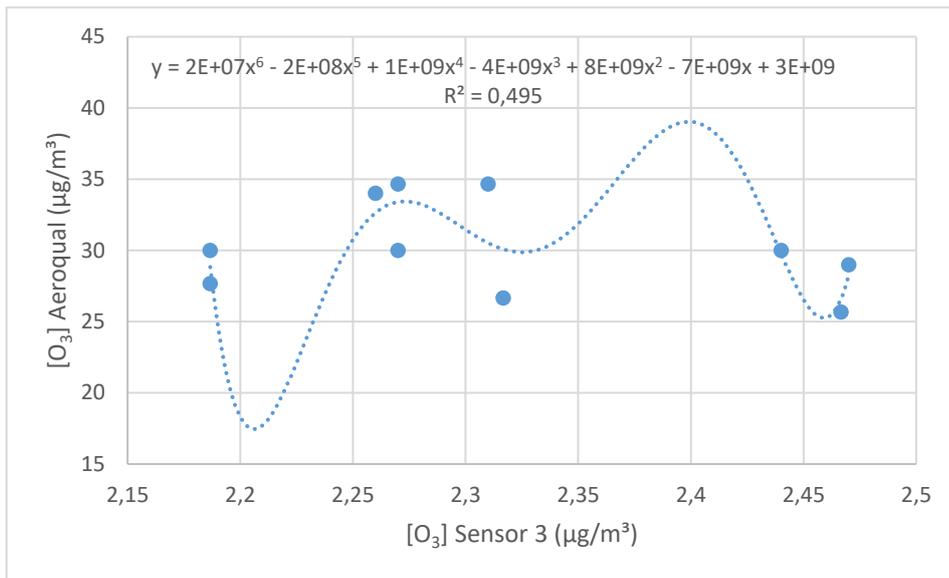
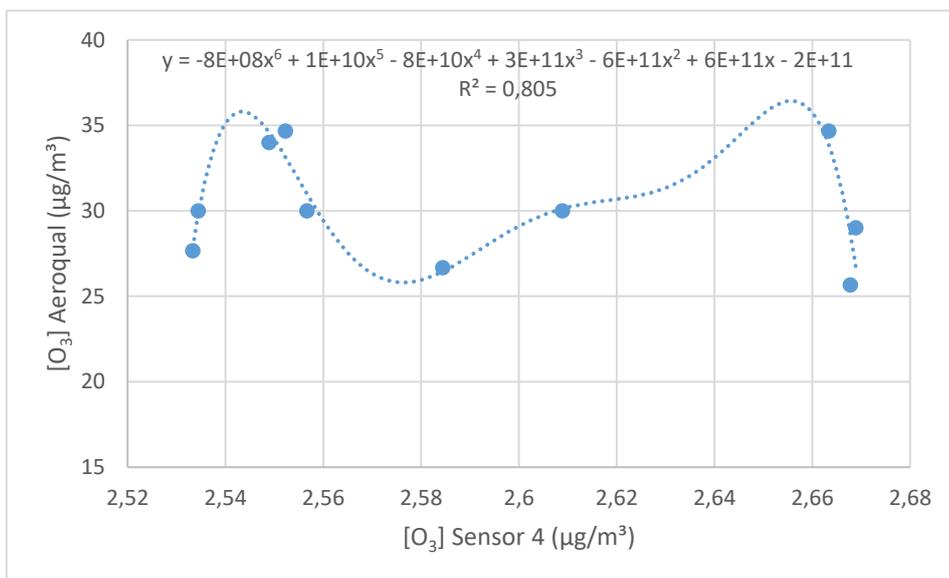


Figura 40: Equação de Parametrização – Sensor 4.



Com base nos resultados obtidos, é evidente que cada um dos equipamentos requer uma parametrização única e, além disso, essa parametrização apresenta uma tendência de correspondência distinta para cada um deles. As equações paramétricas bem como o valor de R^2 de cada uma delas está disposto na Tabela 04, sendo o valor de “n” correspondente ao número do sensor padronizado por cada equação.

Tabela 04: Equações Paramétricas de Calibração

n	Equação de Calibração	R ²
1	$y = 2E+06x^4 - 3E+07x^3 + 1E+08x^2 - 2E+08x + 2E+08$	0,4158
2	$y = 1E+09x^6 - 2E+10x^5 + 1E+11x^4 - 4E+11x^3 + 7E+11x^2 - 8E+11x + 3E+11$	0,8081
3	$y = 2E+07x^6 - 2E+08x^5 + 1E+09x^4 - 4E+09x^3 + 8E+09x^2 - 7E+09x + 3E+09$	0,495
4	$y = -8E+08x^6 + 1E+10x^5 - 8E+10x^4 + 3E+11x^3 - 6E+11x^2 + 6E+11x - 2E+11$	0,8050

É possível identificar que as equações paramétricas propostas efetivamente apresentaram um valor de correção considerado bom para os sensores 2 e 4, no entanto as equações propostas para os sensores 1 e 3, por mais que tenham suas equações de tendência positiva, apresentaram R² inferiores a 0,5 indicando uma baixa normalização, de modo que estas equações propostas não podem ser utilizadas para uma correção de calibração dos valores coletados com relação ao equipamento Aeroqual 200.

Deste modo, é válido o destaque para o fato de que os sensores propostos de fato são capazes de realizar medições que com equivalência e potencial calibração para corresponder a um equipamento certificado, assim sendo, é possível realizar este trabalho de calibração com o desenvolvimento de mais testes comparativos, e uma maior amostra para a realização da parametrização, tendo em vista que com um número relativamente baixo de amostras já foi possível realizar uma correlação que indica uma boa correspondência entre alguns dos sensores.

Observa-se que a utilização de sensores de baixo custo pode ser uma alternativa viável, desde que sua calibração seja realizada com uma referência adequada, mas é válido enfatizar que a realização deste processo de calibração com uma maior amostra de referência é capaz de refinar ainda mais esta calibração dos sensores de baixo custo, que por mais que não tenham uma sensibilidade tão grande quanto a dos sensores comerciais certificados, ainda se torna uma alternativa válida e viável para estudos preliminares onde não se demanda um controle tão fino e preciso das concentrações de O₃ no local.

4.7 COMPARAÇÃO DE CUSTOS

O equipamento comercial utilizado para a realização do processo comparativo e de calibração foi o Aeroqual 200. Este equipamento é um dos modelos mais antigos da série Aeroqual no entanto, já houve a chegada de novos equipamentos com funcionalidades otimizadas e melhor suporte por parte das empresas. Ao realizar um levantamento dos custos de compra deste equipamento apenas foram encontrados fornecedores internacionais.

Foram encontrados apenas dois fornecedores, sendo estes ainda de origem estrangeira, tendo em vista que o mercado deste tipo de equipamento em território nacional ainda é pouco desenvolvido. O equipamento Aeroqual 200, conforme indicado é um dos primeiros equipamentos do modelo Aeroqual lançado, e já houveram atualizações e lançamentos de novas versões com algumas funcionalidades a mais, dentre estas funcionalidades implementadas está a própria capacidade de realizar o armazenamento interno de dados para o posterior descarregamento, capacidade que veio com o modelo Aeroqual 500.

Importante ressaltar aqui que por mais que haja modelos mais recentes e otimizados da linha Aeroqual, a utilização do equipamento Aeroqual 200 para o desenvolvimento dos testes realizados se deu em virtude da limitação financeira para o desenvolvimento do trabalho, que impossibilitava a aquisição do modelo mais recente em virtude do seu elevado custo.

O equipamento Aeroqual 500 é o último modelo lançado e tem diversas funcionalidades que não haviam nas versões anteriores. No entanto, tal qual o esperado, o mesmo também tem um valor bem mais elevado se comparada a suas versões anteriores. A Tabela 05 dispõe dos valores encontrados para cada um dos equipamentos citados com base nas fontes de pesquisa, os valores encontrados estavam em dólares. Na Tabela 05 é possível identificar ainda o valor de conversão direta para reais considerando a cotação atual dia 14 de junho de 2024 do ano de 2024 na paridade de 1 (\$) para 5,36 (R\$).

Tabela 05: Comparação de Custo Médio – Sensores Comerciais.

	Aeroqual 200		Aeroqual 500		
	Fonte A	Fonte B	Fonte A	Fonte B	Fonte C
Dólares (\$)	149,99	219,00	1.230,00	1.234,00	1.234,00
Reais (R\$)	803,95	1.173,84	6.592,80	6.614,24	6614,24
Média (R\$)	988,89		6.607,09		

Na Tabela 05 é mostrado o custo médio estimado para a aquisição destes equipamentos. Ressalta que o valor apresentado não inclui valores de fretagem do produto e possíveis taxas de importação, que podem ser aplicadas em virtude do valor da compra. Deste modo, foi realizado um orçamento prévio para o desenvolvimento do protótipo, com consultas em fontes nacionais, no intuito de identificar qual seria o custo médio gasto para a composição física do equipamento. A Tabela 06 identifica os custos estimados de cada um dos componentes e o valor total médio estimado para o equipamento em sua íntegra.

Tabela 06: Orçamento – Custos do Protótipo.

Equipamento	Protótipo			
	Fonte A (R\$)	Fonte B (R\$)	Fonte C (R\$)	Média (R\$)
Arduino Uno	87,90	92,00	89,90	89,93
Shild Data Log	42,00	32,90	37,99	37,63
Display Oled	39,90	39,90	23,50	34,43
Cabos - Jumper	10,90	13,99	8,40	11,10
Temperatura e Umidade	54,90	64,90	36,90	52,23
O ₃	232,90	219,50	189,90	214,10
Impressão 3D	100,00	120,00	120,00	113,33
			Total Médio	552,76

Com base nos orçamentos realizados é possível notar que o custo médio para a aquisição de todos os componentes para a construção do equipamento fica em média R\$ 552,76, o que por si só já é uma vantagem, tendo em vista que o equipamento comercial Aeroqual 200 tem um custo médio de R\$ 988,89, sendo capaz de realizar apenas medições em intervalos de minuto a minuto e demanda a realização de amostragem assistida na qual alguém tem de registrar os valores coletados de forma manual.

Por outro lado, o protótipo proposto além de conseguir realizar medições em intervalos de tempo muito menores, possibilitando um volume de amostras muito mais robusto, custa quase que metade do valor do equipamento comercial. Esta vantagem econômica reflete ainda mais quando comparado ao equipamento que executa a mesma função de armazenamento, tendo em vista que este tem um custo médio de R\$ 6.607,09, ou seja, custando quase 12 vezes mais do que o custo de confecção do protótipo proposto.

Finalmente, com o custo de adquirir um único equipamento comercial capaz de realizar o processo de armazenamento, seria possível confeccionar 12 protótipos, o que permitiria o monitoramento das concentrações de O₃ em diversos pontos da cidade de forma simultânea e que, por mais que possa ter uma sensibilidade um pouco menor que o equipamento comercial, o mesmo tem um baixo custo de manutenção e ainda permitiria ao menos uma estimativa da qualidade do ar em uma malha espacial muito mais abrangente.

4.8 VANTAGESN E DESVANTAGENS

Por mais que o custo associado a confecção do protótipo tenha se mostrado uma alternativa viável tendo em vista seu custo geral de confecção e manutenção, é importante

ressaltar alguns aspectos do equipamento gerado. A fim de compreender de fato, quais são as vantagens e desvantagens da utilização deste protótipo no desempenho da atividade de monitoramento ambiental.

O primeiro ponto notável e de destaque para o desenvolvimento do projeto é o baixo custo associado a confecção do equipamento. Conforme já destacado ao longo do trabalho, o equipamento tem um custo cerca de 12 vezes menor do que o equipamento comercial que detém as mesmas funcionalidades principais de coleta e armazenamento de dados em memória interna. Isto que por sua vez é uma grande vantagem, tendo em vista a capacidade de confeccionar diversos protótipos ao custo que conseguiria adquirir apenas um equipamento comercial.

Outro ponto de destaque está no peso e tamanho final do protótipo. O modelo final do protótipo tem dimensões de 10,5cmX9,5cmX7,5cm e pesa cerca de 200g, o que é muito útil para a alocação do equipamento em locais diversos, além da facilidade de levantar o equipamento com o uso de drones para o levantamento em gradiente vertical, que seria o intuito inicial para o desenvolvimento do protótipo.

No entanto é importante notar que há alguns problemas associados ao protótipo proposto, que se deve atender quanto a aplicação deste para o levantamento de dados. Um destes problemas é a garantia de um fornecimento de energia constante para o equipamento, tendo em vista que, mesmo os testes sendo realizados em uma fonte de alimentação constante, a oscilação no abastecimento que ocorreu em alguns momentos levou a algumas inconsistências.

Outro ponto que vale destaque é o fato de que a integração do equipamento com memória SD pode ser um problema em alguns casos, pois caso haja mal contato entre o cartão e a placa, o mesmo além de não receber corretamente os dados, pode ainda ficar corrompido, impossibilitando a leitura dos dados amostrados, o que seria um problema, especialmente em campanhas mais longas de amostragem. Por este motivo, o próximo passo de integração desta coleta de dados com o armazenamento em nuvem se torna tão importante.

É notado também que o processo de calibração exige uma maior gama de amostras para efetivamente padronizar o funcionamento do equipamento com os valores reais. Mas ainda assim, é possível identificar o protótipo como sendo algo viável, em virtude do baixo custo associado para seu desenvolvimento, além do fato de que este é, a depender dos cuidados com o equipamento, capaz de atuar por um período contínuo estimado de 2 anos, sendo uma alternativa muito mais barata e versátil se comparado ao Aeroqual 200, que além de custar um valor significativo, não realiza o armazenamento de dados de memória interna, demandando um registro manual.

Por fim, é importante ressaltar que, por mais que haja alguns problemas associados ao protótipo, o mesmo ainda se mostra como sendo uma alternativa muito válida para o levantamento de dados das concentrações de O₃ e monitoramento da qualidade do ar. O modelo proposto ainda é adaptável para a utilização de outros sensores que podem realizar o levantamento de outros poluentes, claro, realizando as adaptações necessárias e o processo de calibração demandado para cada sensor em específico. Importante ressaltar ainda que será realizado um trabalho no sentido de resolver estas complicações identificadas, buscando alternativas para deixar o protótipo mais estável e minimizar os erros associados a suas coletas de dados, se mostrando um novo passo na expansão dos estudos de qualidade do ar em território nacional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo se mostrou muito promissor, conforme foi possível identificar, o mesmo de fato se mostrou capaz de realizar medições por um tempo prolongado, ao passo que não apresentou muitas inconsistências nos dados apresentados, assim facilitando de forma significativa o processo de calibração necessário para a implementação deste em um monitoramento continuado.

É válido ressaltar que seria esperado um maior erro associado as medições do sensor tendo em vista que ainda se trata de um protótipo, no entanto, ao avaliar o comportamento do sensor é notado que o mesmo desempenha um comportamento de leitura muito semelhante ao descrito pelo equipamento comercial. No entanto, para uma maior avaliação deste erro associado será necessário o desenvolvimento de testes em laboratório para a calibração em concentrações controladas com o intuito de aferir este erro associado.

Em função desta não verificação em ambiente controlado não é possível afirmar qual é o erro real associado a coleta de dados realizada pelo sensor, processo este que será desenvolvido em testes para futuras atualizações do sensor de baixo custo.

É notado ainda como é importante a realização do processo de calibração de forma individual para cada sensor, tendo em vista que cada um pode ter uma relação de amostragem que, por mais que se comporte de forma muito semelhante, pode ter uma diferença de sensibilidade que se deriva da própria composição física do equipamento.

No entanto, o sensor ainda se mostrou esta alternativa válida de aplicação em testes de campo, tendo em vista que, uma vez calibrado ele é capaz de apresentar dados consistentes que

levam em consideração as condições meteorológicas para retornar valores muito próximos do esperado para as condições de concentração real esperada para o dia avaliado.

Por fim, o ponto de destaque é o custo do equipamento que chega a ser de quase 12 vezes mais barato que o equipamento comercial equivalente, sendo um grande atrativo para o desenvolvimento de um monitoramento, mesmo que de dados preliminares, das concentrações de O₃ em diferentes pontos da cidade, possibilitando assim uma melhor compreensão dos pontos de risco e possibilitando uma tomada de decisões estratégicas sobre a qualidade do ar melhor embasadas e fundamentadas, mitigando assim potenciais danos da elevada concentração do poluente na população.

REFERÊNCIAS

AEROQUAL. **Series 200 – Portable Air Quality Monitor**. Disponível em: <https://www.aeroqual.com/products/s-series-portable-air-monitors/series-200-portable-air-pollution-monitor>. Acesso em: 26 fev. 2022.

AMBIAPAR, Grupo “**A origem das preocupações ambientais: ações de prevenção**”. Ambipar Group - VG | Verde Ghaia, 11 de dezembro de 2018, <https://www.verdeghaia.com.br/preocupacoes-ambientais/>. Acesso em: 26 fev. 2022.

Anenberg SC, Horowitz LW, Tong DQ, West JJ. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environ Health Perspect.* (2010) 118:1189–95. doi: 10.1289/ehp.0901220

BRAGA, A. et al. **Poluição atmosférica e saúde humana**. Revista USP, São Paulo, n.5, p.58-71, set./nov. 2001.

CAGNA, Camila P.; GUEDES FILHO, Osvaldo; SILVA, Alexandre R. C.; TORMENA, Cássio A. **Automation of the measurement of time record in determining the hydraulic conductivity of saturated soil**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 149-155, fev. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n2p149-155>.

CARBONE, S. (2008). **Modelagem De Ozônio Troposférico Em Regiões Urbanas - Aperfeiçoamento Do Módulo Químico No Modelo Cit**. 112.

CLEAN AIR. **THERMO 49 I OZONE ANALYZER**. Disponível em: <https://www.cleanair.com/product/thermo-49i/>. Acesso em: 28 set. 2022.

CHIQUELTO, J.B.; SILVA, M.E.S.; CABRAL-MIRANDA, W.; RIBEIRO, F.N.D.; IBARRA-ESPINOSA, S.A. et al. **Air quality standards and extreme ozone events in the São Paulo megacity**. Sustainability, v. 11, n. 13, p. 3725, 2019.

CID, A. S.; CORREA, T. V. **Análise da variação de pressão em um tubo de Venturi utilizando Arduino e sensor de pressão**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.41, p.1-7, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0333>
» <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0333>

DELFINO, J, V, S. **PROPOSTA DE UM PROTÓTIPO DE SENSOR DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE O3**. (2022) Projeto de Iniciação Científica. CAPES. CNPQ.

DI, Q.; DAI, L.; WANG, Y.; ZANOBETTI, A.; CHOIRAT, C.; SCHWARTZ, J. D. Association of short-term exposure to air pollution with mortality in older adults. *JAMA.* (2017) 318:2446–56. doi: 10.1001/jama.2017.17923

DICIO. Dicionário Online de Português: “**Poluição**”. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/poluicao/>. Acesso em: 28 de mar. de 2021.

DIPOVA, N. **Design of low cost and innovative data acquisition in soil mechanics Testing using open source hardware.** The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics, v.1, p.104-110, 2017.

DONGARRÀ, G.; MANNO, E.; VARRICA, D.; LOMBARDO, M.; VULTAGGIO, M. **Study on ambient concentrations of PM₁₀, PM_{10-2,5}, PM_{2,5}, and gaseous pollutants.** Trace elements and chemical speciation of atmospheric particulates. *Atmospheric Environment* 44, p. 5244-5257, 2010.

FEHSENFELD, F.; CALVERT, J.; FALL, R.; GOLDAN, P.; GUENTHER, A. B.; HEWITT, C. N. "Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry." **Glob Biogeochem Cycles.** (1992) 6:389–430. doi: 10.1029/92GB02125

GUENTHER, A. B., JIANG, X., HEALD, C. L., SAKULYANONTVITTAYA, T., DUHL, T., EMMONS, L. K., AND WANG, X. **The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1):** an extended and updated framework for modeling biogenic emissions, *Geosci. Model Dev.*, 5

JASINSKI, R.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A.L.F. **Poluição atmosférica e internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças e adolescentes em Cubatão,** São Paulo, Brasil, entre 1997 e 2004. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v.27, n.11, p.2242-52, 2011.

LACAIVA, C. I. V. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR.** In: EMISSÕES Atmosféricas. [S.I]: Indd, 2003. Cap. 2. p. 131-177.

Li, K., Jacob, D. J., Shen, L., Lu, X., De Smedt, I., Liao, H. **Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019:** anthropogenic and meteorological influences, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11423–11433, <https://doi.org/10.5194/acp-20-11423-2020>, 2020.

Li, K., Jacob, D. J., Liao, H., Zhu, J., Shah, V., Shen, L., Bates, K. H., Zhang, Q., Zhai, S.: **A Two-Pollutant Strategy for Improving Ozone and Particulate Air Quality in China,** *Nat. Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11423–11433, 2020

Lima, M. J. A., Felix, E. P., & Cardoso, A. A. **APLICAÇÕES E IMPLICAÇÕES DO OZÔNIO NA INDÚSTRIA, AMBIENTE E SAÚDE.** 2021. *Química Nova*, 44(9), 1151–1158. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170759>

LIN, M.; CHEN, Y.; VILLENEUVE, P. J.; BURNETT, R. T.; LEMYRE, L.; HERTZMAN, C. **Gaseous air pollutants and asthma hospitalization of children with low household income in Vancouver, British Columbia, Canada.** *Am J Epidemiol.* (2004) 159:294–303. doi: 10.1093/aje/kwh043

MCDONALD B. C., DE GOUW J. A., GILMAN J. B., JATHAR S. H., AKHERATI A., CAPPALÀ C. D. "Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions." *Science.* (2018) 359:760–4. doi: 10.1126/science.aaq0524

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental. MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 248, de 23 de novembro de 2023. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar para o

Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário do Executivo "Minas Gerais", 08 dez. 2023.

NARDOCCI, A. C. et al. **Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil.** Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v.29, n.9, p.1867-76, 2013.

OMS – Organização Mundial da Saúde. Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: Partículas inaláveis (MP2,5 e MP10), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono. Organização Mundial da Saúde. Disponível em: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf?sequence=1. Acesso em: 11 jun. 2024

ORLANDO, J. P., ALVIM, D. S., YAMAZAKI, A., CORRÊA, S. M., & GATTI, L. V. (2010). **Ozone precursors for the São Paulo Metropolitan Area.** Science of the Total Environment, 408(7), 1612–1620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.060>

OSHA, Occupational Safety and Health Administration's regulations for ozone. | **Occupational Safety and Health Administration.** <https://www.osha.gov/laws-regs/standardinterpretations/1994-09-29-0>. Acessado 28 de março de 2021.

PAES, J. L.; RAMOS, V. A.; OLIVEIRA, M. V. M.; PINTO, M. F.; LOVISI, T. A. P.; SOUZA, W. D. **Automation of monitoring of drying parameters in hybrid solar-electric dryer for agricultural products.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 283-291, abr. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p283-291>.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 491/2018 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>. Acessado 24 de março de 2021.

RODRIGUES, L. B. **Estudo da concentração de ozônio troposférico na cidade de Uberlândia-MG.** 2019. 40 f. TCC - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SANCHES, Arthur C.; ALVES, Christopher de O.; JESUS, Fernanda L. F. de; THEODORO, Fagner L.; CRUZ, Thiago A. C. da; GOMES, Eder P.. **Low-cost and high-efficiency automated tensiometer for real-time irrigation monitoring.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 390-395, maio 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p390-395>.

SÃO PAULO. CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do Ar.** 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>. Acesso em: 18 mar. 2021.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **ATMOSPHERIC From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION.** 2006.

SHARKEY, T.D.; LORETO, F. **Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves.** Oecologia, v. 95, n. 3, p. 328-333, 1993.

YIN, P.; CHEN, R.; WANG, L.; MENG, X.; LIU, C.; NIU, Y. **Ambient ozone pollution and daily mortality**: a nationwide study in 272 Chinese cities. *Environ Health Perspect.* (2017) 125:117006. doi: 10.1289/EHP1849

Zhang JJ, Wei Y, Fang Z. **Ozone Pollution**: A Major Health Hazard Worldwide. *Front Immunol.* 2019 Oct 31;10:2518. doi: 10.3389/fimmu.2019.02518. PMID: 31736954; PMCID: PMC6834528.

Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., and Zhang, Q.: **Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions**, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14095–14111, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>, 2018, 2018.