



# Medição de ozônio por fotometria UV: um protótipo de baixo custo

## Ozone measurement by UV photometry: a low-cost prototype

João Vitor Santos Anacleto<sup>1</sup>, Fernando Cardoso Castaldo<sup>2</sup>

### RESUMO

O ozônio ( $O_3$ ) é uma substância crucial à manutenção da vida na terra, pois sua presença na estratosfera terrestre age para absorver a luz ultravioleta nociva que o sol emite, antes que ela possa alcançar a superfície. Mas ele se trata de um gás tóxico aos seres vivos, e quando encontrado em ambientes habitados é considerado um poluente, cuja concentração deve ser cuidadosamente controlada. Os limites de ozônio prescritos por organizações brasileiros e internacionais são da ordem de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (equivalente a cerca de 50 partes por bilhão), e medir uma concentração tão baixa se mostra um significativo desafio tecnológico. Um dos métodos mais utilizados para esse tipo de medida é a fotometria UV, que consiste em utilizar a própria capacidade do ozônio de absorver luz ultravioleta para determinar sua concentração no ar. O objetivo deste trabalho é apresentar uma introdução a esse método de medição, e descrever as dificuldades encontradas no desenvolvimento de um equipamento baseado nesse princípio.

**PALAVRAS-CHAVE:** fotometria; ozônio; qualidade do ar.

### ABSTRACT

Ozone ( $O_3$ ) is a substance crucial to the maintenance of life on Earth, since its presence in the Earth's stratosphere acts to absorb the harmful ultraviolet light that the sun emits, before it can reach the surface. But it is a gas toxic to living beings, and when found on inhabited environments it is considered a pollutant, whose concentration should be carefully controlled. The ozone limits prescribed by Brazilian and international organizations are of the order of  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (equivalent to around 50 parts per billion), and measuring a concentration so low is a significant technological challenge. One of the most widely used methods for this type of measurement is UV photometry, which consists in utilizing ozone's own capability of absorbing ultraviolet light to determine its concentration in air. The objective of this work is presenting an introduction to said measurement method, and describing the difficulties encountered during the development of an equipment based on this principle.

**KEYWORDS:** photometry; ozone; air quality.

### INTRODUÇÃO

O ozônio ( $O_3$ ), é uma substância gasosa à temperatura ambiente, formada por três átomos de oxigênio ligados entre si. Sua presença na estratosfera terrestre é vital para a manutenção da vida na terra, pois ele é capaz de absorver a luz UV nociva emitida pelo sol. É, porém, considerado uma substância tóxica devido a sua potente ação oxidante, e classificado pela Organização Mundial da Saúde como um poluente quando encontrado perto da superfície da terra. Por esse motivo, agências

<sup>1</sup> Voluntário do Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [anacleto.jvs@gmail.com](mailto:anacleto.jvs@gmail.com). ID Lattes: 5604644520021449.

<sup>2</sup> Docente do Departamento Acadêmico de Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [castaldo@utfpr.edu.br](mailto:castaldo@utfpr.edu.br). ID Lattes: 0087025993114267.



reguladoras ao redor do mundo estabelecem limites para a concentração de ozônio em ambientes internos e externos. A OMS recomenda que o nível de ozônio no ar seja mantido abaixo de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (aproximadamente 30 partes por bilhão) (LIMA; FELIX; CARDOSO, 2021) (OMS, 2021).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio-Ambiente estabelece por meio da resolução n° 491 de 2018 o limite de  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ou aproximadamente 70 ppb) como padrão de qualidade do ar, com perspectivas para reduzi-lo para  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (50 ppb) no futuro. (CONAMA, 2018). Vigora também, para ambientes de trabalho, o limite de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (80 ppb), estabelecido em 1978 pela Norma Reguladora N° 15 (NR-15) do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE, 1978).

Observa-se, portanto, que aferir a qualidade do ar, tanto de ambientes internos quanto externos, requer um equipamento capaz de medir quantidades muito pequenas de ozônio no ar, da ordem de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (o equivalente a identificar uma molécula de ozônio para cada 100 milhões de moléculas de ar). Há poucos equipamentos no mercado capazes de realizar tal medição, e os disponíveis tendem a ter um preço elevado. E com o crescente uso de ozônio como agente de desinfecção, há uma demanda cada vez maior de equipamentos capazes de aferir a concentração de ozônio antes e depois do procedimento de desinfecção, bem como o próprio desempenho dos geradores de ozônio utilizados.

## O PRINCÍPIO DA FOTOMETRIA UV

O método de medição de ozônio por fotometria UV consiste em submeter uma amostra de ar a um feixe de luz ultravioleta (especificamente com comprimento de onda de 253,7 nm), e medir a intensidade de luz que é recebida no outro lado da câmara de teste. Ao comparar essa medida à intensidade recebida usando um ar filtrado e livre de ozônio, é possível obter a concentração de ozônio da amostra a partir da lei de *Beer-Lambert* (equação 1).

$$C = \frac{1}{ad} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1)$$

Onde  $C$  é a concentração de ozônio na amostra em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $a$  é o coeficiente de absorção do ozônio a 253,7 nm (aproximadamente igual a  $1,44 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\mu\text{g}$ ),  $d$  é o comprimento do caminho que a luz percorre em metros,  $I_0$  é a intensidade da luz medida com o ar filtrado e  $I$  é a intensidade medida na amostra. (ISO, 1998)

O equipamento desenvolvido consiste então em uma câmara de teste de aproximadamente 0,5 m de comprimento, com uma fonte de luz ultravioleta de um lado (na forma de uma lâmpada de vapor de mercúrio) e um fotodiodo do outro lado para medir a intensidade de luz recebida. O sinal do fotodiodo passa por um processamento analógico (amplificação, eliminação do *offset DC* e filtragem) até ser enviado por um cabo blindado para a unidade controladora, que realiza a medição e o cálculo da concentração. É também necessário um sistema pneumático que controle a passagem de ar dentro da câmara de teste, garantindo um fluxo estável de ar na câmara e alternando entre o ar da amostra e o ar filtrado.



## CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO

### OPTOELETRÔNICA

#### Fonte de Luz

Como a medida de concentração de ozônio a nível ambiente requer uma resolução da ordem de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , verificamos pela equação 1 que é preciso detectar uma alteração muito pequena na intensidade de luz recebida, da ordem de 0,01%. Assim, oscilações pequenas na intensidade de luz na fonte podem ter um impacto significativo na resolução do equipamento, caso forem da mesma ordem de magnitude que a medida a ser feita.

Verificou-se durante o desenvolvimento do protótipo que os reatores comercialmente disponíveis para a lâmpada UV não possuíam suficiente estabilidade, pois resultavam em uma fonte de luz que, apesar de estável a olho nu, apresentava oscilações muito elevadas para a resolução desejada. Esse problema foi reduzido com a utilização de uma fonte DC regulada para alimentar o reator, ao invés da simples ponte de diodos que ele possuía originalmente.

#### Recepção da Luz

O sistema de recepção utiliza um fotodiodo, que produz uma pequena corrente quando recebe luz. Essa corrente é transformada em um sinal de tensão por um amplificador de transimpedância, com ganho de  $10^8$ . Esse sinal, por si só, já representa a intensidade da luz recebida, e já pode ser usado para medir altas concentrações de ozônio, da ordem de partes por milhão (*ppm*) ou miligramas por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

Mas para a medição de concentrações menores, da ordem de partes por bilhão (*ppb*) ou microgramas por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se mostra inconveniente trabalhar diretamente com esse sinal, pois será observada uma pequena variação em cima de um sinal DC proporcionalmente muito maior. A principal função do circuito de processamento é eliminar pelo menos uma parte desse *offset* DC, para que seja mais fácil observar a pequena variação desejada.

### PNEUMÁTICA

A parte fundamental do sistema pneumático é a bomba de vácuo, conectada à saída do sistema. Optou-se por esse modelo, com a bomba gerando uma pressão negativa que puxa o ar (ao invés de usar uma pressão positiva na entrada para empurrar o ar) para eliminar a possibilidade da bomba interagir com o ozônio antes dele alcançar a câmara de teste.

Essa bomba, porém, dificilmente tem uma força de empuxo constante; ela tende a aumentar e diminuir de acordo com o ciclo de seu sistema mecânico interno. Observou-se que o sistema óptico, por algum mecanismo que ainda não foi identificado exatamente, apresenta uma alta sensibilidade à variações no fluxo de ar pela câmara. Para estabilizar esse fluxo do sistema, é utilizado um tanque de armazenamento entre a câmara de teste e a bomba de ar. Esse tanque age de forma similar a



um indutor em um circuito elétrico, absorvendo e fornecendo ar ao sistema de forma a se opor a variações no fluxo.

A outra parte do trabalho do sistema pneumático é controlar se a medição atual é do ar da amostra ou do ar filtrado. Esse controle é realizado com duas válvulas solenoides, que se abrem ou se fecham para permitir ou impedir o fluxo de ar por elas. A unidade controladora que define qual das válvulas será aberta em cada momento.

## UNIDADE CONTROLADORA

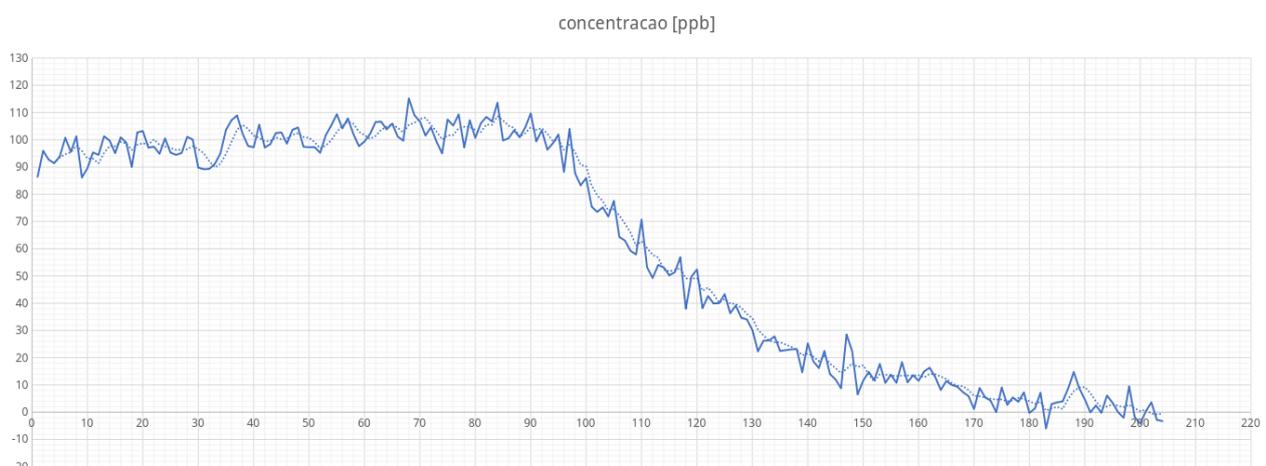
Como citado anteriormente, a unidade controladora é responsável pelos seguintes trabalhos:

- Controlar o chaveamento do sistema pneumático, definindo em que momentos será feita a medição da amostra e em que momentos se medirá o ar filtrado;
- Realizar a medição da intensidade de luz em ambos os casos;
- Usar essas medições para calcular a concentração de ozônio em microgramas por metro cúbico a partir da lei de Beer-Lambert (equação 1), e convertê-los para partes por bilhão com base em medidas de temperatura e pressão atmosférica;
- Registrar e indicar ao usuário os valores de concentração medidos.

Para esse protótipo, a unidade é baseada em um microcontrolador de 8 bits ATmega328P, o mesmo da famosa placa de desenvolvimento *Arduino*, a um clock de 12 MHz.

## MÉTODO DE MEDIDA

Figura 1 – Gráfico da medida realizada



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O ozônio é um gás extremamente volátil, com uma meia vida em ambientes internos inferior a uma hora (MUELLER; LOEB; MAPES, 1973). Assim, a manutenção de uma concentração constante



de ozônio em um ambiente, para fins de teste do equipamento de medição, requer uma geração contínua de ozônio.

Considere uma câmara fechada de volume  $V$ , sujeita à entrada de um gás com um decaimento exponencial ( $m(t) = m_0 \cdot 2^{-t/t_m}$ , onde  $t_m$  é o tempo de meia-vida), sendo que essa entrada se dá a uma taxa constante  $K_G$  (em massa por unidade de tempo). Nessas condições, a medida que o tempo passa, a concentração de gás dentro da cabine tende a se estabilizar em um valor, dado pela equação 2 (a prova dessa afirmação foge do escopo do trabalho, mas vem da discretização da massa do gás em  $n$  pacotes, cuja soma leva a uma série convergente para valores grandes de  $n$ ).

$$C_f = \frac{K_G \cdot t_m}{V \cdot \ln(2)} \quad (2)$$

Como gerador de ozônio, foi utilizado um filamento de 21 cm de comprimento, em configuração coaxial no interior de um cilindro de 5 cm de raio. O gerador então foi sujeito a uma alta tensão, de modo a manter uma corrente de 200  $\mu A$  pelo filamento. Segundo o modelo matemático desenvolvido por Chen e Davidson (2002), esse sistema deveria levar a uma taxa de geração de ozônio de aproximadamente 0,74  $\mu g/s$ .

Foram feitos ensaios em uma cabine de cerca de 0,86  $m^3$ , feita de filme plástico transparente sobre uma armação de PVC. Dentro dessa cabine foram inseridos o gerador e um sistema de ventilação, para homogeneizar o ar dentro do ambiente de teste.

O resultado de um dos testes realizados está ilustrado na figura 1. Observou-se que a concentração de ozônio estabilizou em cerca de 105  $ppb$  (ou aproximadamente 185  $\mu g/m^3$ ). Após o gerador ser desligado, a concentração caiu exponencialmente, com uma meia-vida de cerca de 211 s (a unidade de tempo da figura 1 está em ciclos de medida, e cada ciclo tem 10s de duração). Com base no modelo matemático do gerador, esperaríamos uma concentração máxima de 152  $ppb$  na cabine, uma diferença de 30% em relação ao medido.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de serem necessários estudos mais aprofundados para ajustar o instrumento de modo a fornecer uma medida precisa e exata (no decorrer dos quais seria imprescindível o acesso a um medidor de ozônio de referência, o que não foi possível no desenvolvimento deste trabalho), o fato de a concentração medida estar na mesma ordem de magnitude do esperado significa que pelo menos o aparelho cumpre sua função como protótipo inicial e prova de conceito.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Agradeço também ao Laboratório de Fabricação Eletrônica, pelo suporte no projeto e construção do protótipo.



## Disponibilidade de Código

O código da unidade controladora está disponível na plataforma GitHub ([https://github.com/digitalphoton/sicite-o3\\_uv](https://github.com/digitalphoton/sicite-o3_uv)).

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n° 491 de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade de ar. **Diário Oficial da União: Seção 1**, Brasília, DF, ano 155, n. 223, p. 155–156, 21 nov. 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO. NR 15 - Anexo 11. Agentes químicos cuja insalubridade é caracterizada por limite de tolerância e inspeção no local de trabalho. **Diário Oficial da União: Seção 1**, Brasília, DF, ano 116, n. 127 (suplemento), p. 55–57, 06 jul. 1978.
- CHEN, J; DAVIDSON, J H. Ozone production in the positive DC corona discharge: Model and comparison to experiments. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 22, n. 4, 2002.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13964**: Determination of ozone in ambient air - Ultraviolet photometric method. Geneva (Suíça), 1998.
- LIMA, M J A; FELIX, E P; CARDOSO, A A. Aplicações e Implicações do Ozônio na Indústria, Ambiente e Saúde. **Química Nova**, São Paulo, SP, v. 44, n. 9, p. 1151–1158, 28 abr. 2021.
- MUELLER, F X; LOEB, L; MAPES, W H. Decomposition Rates of Ozone in Living Areas. **Environmental Science and Technology**, Washington, DC (Estados Unidos), v. 7, n. 4, abr. 1973.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **WHO global air quality guidelines**. Genebra, Suíça: OMS, 2021.