



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

**Introdução à construção e testes de sensores de gás
impedimétricos baseados em óxido de nanotubos
de carbono**

João Roberto Gomes Jardim

Mauro Francisco Pinheiro da Silva

BRASÍLIA

2025



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

Introdução à construção e testes de sensores de gás impedimétricos baseados em óxido de nanotubos de carbono

Estudante: João Roberto Gomes Jardim

Orientador: Prof. Dr. Mauro Francisco Pinheiro da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora, como exigência parcial para a obtenção de título de Licenciado do Curso de Ciências Naturais, da Faculdade UnB Planaltina, sob a orientação do Prof. Dr. Mauro Francisco Pinheiro da Silva.

BRASÍLIA

2025

RESUMO

Os e-noses são compostos por sensores que respondem a diferentes gases, transformando a interação química em sinais elétricos. Os nanotubos de carbono (CNTs) são explorados por sua alta condutividade e estrutura nanométrica, que os tornam ideais para aplicações em sensores e dispositivos eletrônicos. O objetivo principal do trabalho foi a montagem e testes de sensores baseados em óxido de nanotubos de carbono, com foco na detecção dos VOC's acetona e metanol em diferentes concentrações. O trabalho demonstrou a viabilidade do uso de sensores baseados em nanotubos de carbono para a detecção de VOCs em ambientes úmidos, com potencial aplicação em áreas como monitoramento ambiental, segurança industrial e diagnóstico médico.

Palavras-chave: nariz eletrônico; e-nose; nanotubo de carbono; VOC.

LISTA DE ABREVIACÕES

GO	xido de grafeno
VOC's	Compostos Orgânicos Voláteis
MUX	Multiplexadores
UR	Umidade Relativa
MWCNT	Nanotubo de Carbono de parede múltipla
MWCNTox	Nanotubo de Carbono de parede múltipla oxidado
SWCNT	Nanotubo de Carbono de parede única
Ac	Acetona
Met	Metanol
CNT	Nanotubo de carbono
E-nose	Nariz eletrônico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte transversal da cabeça mostrando a localização do bulbo olfatório, epitélio olfatório e algumas ligações nervosas.....	1
Figura 2: Ilustração de um eletrodo, o respectivo sensor e a montagem da parte sensorial e de processamento de dados de um nariz eletrônico.....	3
Figura 3: Nanotubo de carbono de parede única.....	7
Figura 4: Nanotubo de carbono de múltiplas paredes.....	7
Figura 5: Representação ilustrativa da configuração geral do nariz eletrônico.....	11
Figura 6: Sinais dos sensores registrados e valores de impedância para acetona.....	13
Figura 7: Sinais dos sensores registrados e valores de impedância para metano.....	14
Figura 8: Gráfico comparando o Tempo de Resposta e Tempo de Recuperação dos sensores em segundos.....	16
Figura 9: Resultados do Teste de PCA para concentrações de Metanol e Acetona.....	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores em segundos do Tempo de Resposta e de recuperação dos Sensores para Acetona e Metanol em concentrações de 100 ppm.....	12
--	----

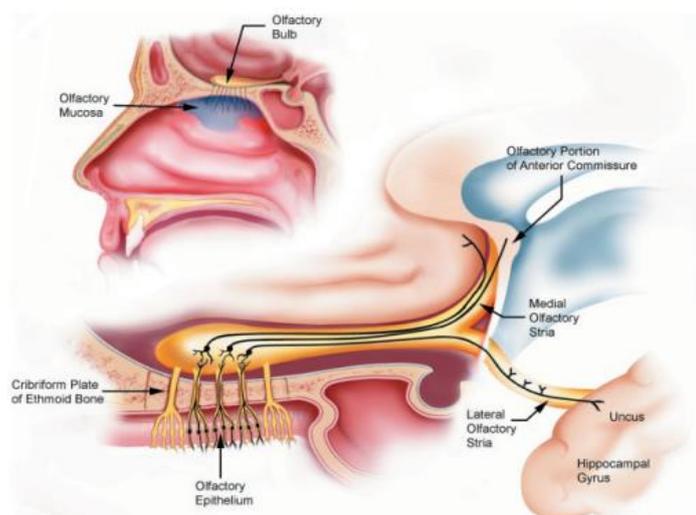
1. Introdução

1.1 Olfacção

Os seres humanos percebem os odores por meio da interação de compostos químicos voláteis, conhecidos como odorantes, com o sistema olfativo. Esse processo ocorre principalmente no bulbo olfatório, que está localizado na parte superior da cavidade nasal, em uma região chamada epitélio olfativo (Schiffman; Pierce 2003).

Os odorantes presentes no ar apresentam diferentes estruturas e classificações, passando desde álcoois, aminas até hidrocarbonetos e nitritos. Existem diversos tipos de receptores olfativos no epitélio olfativo (figura 1), e cada tipo é sensível a odorantes específicos. Quando os odorantes se ligam a esses receptores, eles geram impulsos nervosos que são transmitidos ao bulbo olfativo. No bulbo olfativo, esses sinais são processados e organizados em glomérulos, estruturas que agrupam informações de receptores semelhantes. Em seguida, os sinais são enviados ao cérebro, onde são interpretados, permitindo a percepção consciente dos cheiros. O conjunto de impulsos enviados ao cérebro e suas intensidades, juntos, são comparados à memória e a eles atribuídos uma identidade (Schiffman; Pierce 2003).

Figura 1 – Corte transversal da cabeça mostrando a localização do bulbo olfatório, epitélio olfatório e algumas ligações nervosas.



Fonte: Schiffman; Pierce, 2003.

O olfato do ser humano não precisa de grandes concentrações de substâncias para responder a estímulos do ambiente e identificar a presença de compostos no ar. Na maior parte dos casos, os odorantes chegam até a cavidade nasal como uma mistura de diversos compostos que vão resultar na sensação do odor. (Schiffman; Pierce, 2003).

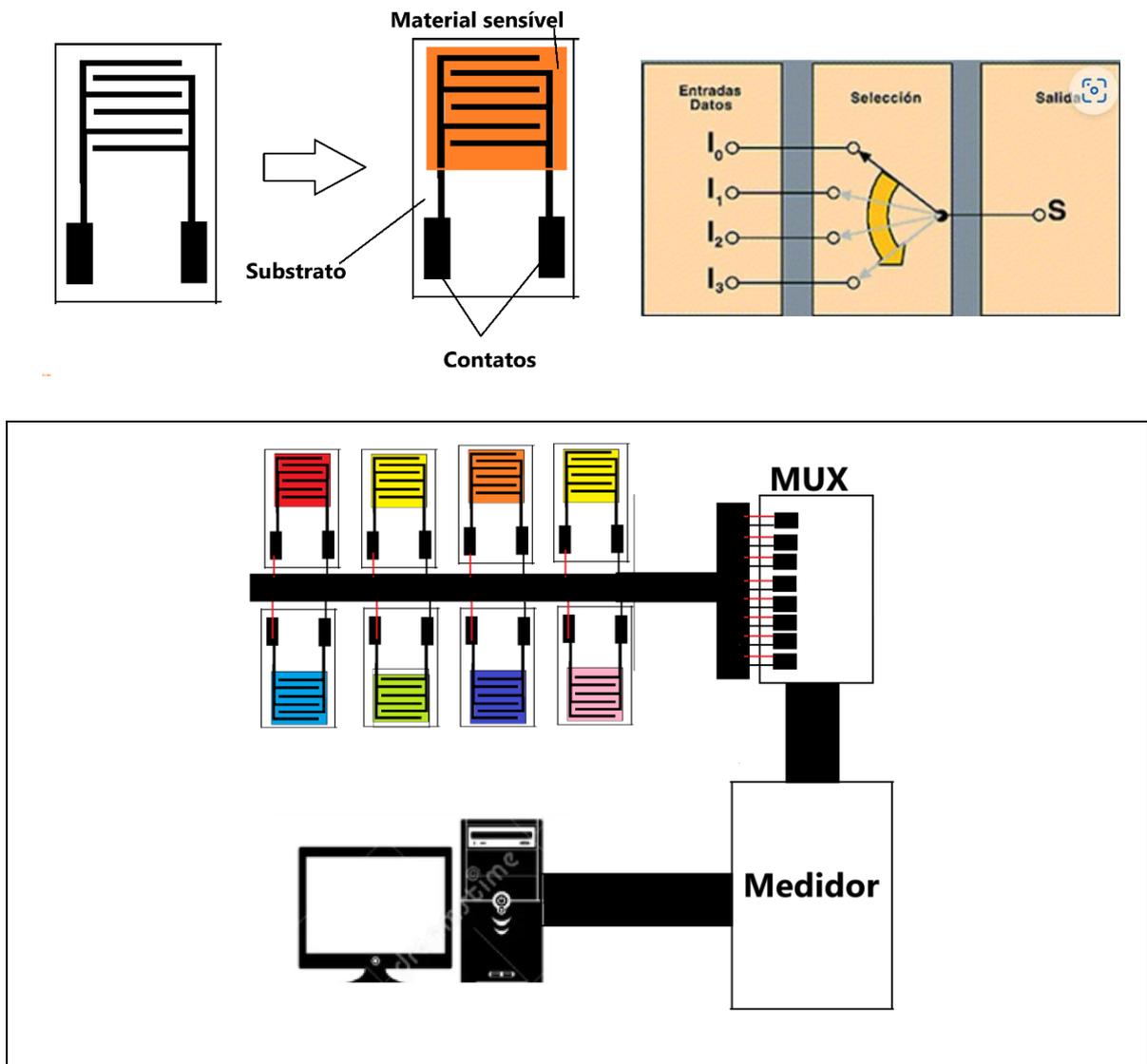
1.2 Narizes Eletrônicos (E-noses)

E-noses são dispositivos que mimetizam o olfato de mamíferos, utilizando sensores para detectar, quantificar e analisar diferentes odores. São ferramentas promissoras para a detecção e análise dos compostos orgânicos voláteis (VOC's) presentes na fase gasosa.

O componente principal dos e-noses são os sensores, constituindo a parte fundamental do nariz eletrônico. Eles são inespecíficos, respondendo a quase todos os odores. Apesar das respostas sobrepostas, elas acontecem de maneira distinta, o que configura um arranjo sensores ortogonais entre si, mimetizando o funcionamento do bulbo olfativo. Eles são os transdutores da interação dos gases e/ou vapores, pois transformam a energia de interação dos gases com os materiais sensoriais em variação de resistência, capacitância, condutividade entre outros sinais analíticos.

A depender do preço e complexidade do instrumento empregado para medir a variação de propriedade dos materiais, em função da adsorção de gases, pode-se ou não utilizar multiplexadores. Em sensores quimiorresistivos, o instrumento de medida normalmente é barato e simples, permitindo que um medidor seja dedicado a cada sensor. No entanto, em análises precisas, o instrumento pode ser bem mais custoso e o uso de multiplexadores (MUX) são necessários para que vários sensores sejam medidos por um único aparelho (figura 2). Esse é o caso de medidores de impedância cuja a instrumentação é mais custosa, evitando a utilização de mais de um equipamento. (De Melo Lisboa; Page; Guy, 2009).

Figura 2: Ilustração de um eletrodo, o respectivo sensor e a montagem da parte sensorial e de processamento de dados de um nariz eletrônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os MUX são disponíveis comercialmente, na forma de placas com um circuito integrado composto de semicondutores. Por aplicação de um potencial, utilizando uma tabela verdade para seleção de canais é possibilitada a escolha de um único canal, conectado a um sensor em um arranjo. Pode-se utilizar também um arranjo de relês, como o presente caso. Isso permite a leitura de cada sensor do arranjo, feita usualmente de maneira cíclica.

1.2.1 Tipos de sensores mais comuns utilizados em e-noses

1.2.1.1 Sensores de Óxidos Metálicos (MOS)

São os mais utilizados devido ao baixo custo, alta sensibilidade e estabilidade. O sensor é feito de um filme fino de óxido metálico semicondutor sobre um substrato cerâmico. A condutividade/resistência do material muda na presença de gases, permitindo a detecção. Estes funcionam como catalisadores da oxidação de VOC's pelo oxigênio atmosférico.

1.2.1.2 Sensores de Polímeros Condutores

Usam polímeros orgânicos que mudam de condutividade na presença de gases. São sensíveis a uma ampla gama de compostos voláteis e podem ser ajustados para detectar substâncias específicas. Estes funcionam basicamente pelo entumescimento de filmes de polímeros condutores. Com isso os portadores devem atravessar espaços maiores o que aumenta a resistência medida.

1.2.1.3. Sensores Piezoelétricos

Utilizam cristais piezoelétricos que vibram em uma frequência específica. Quando expostos a gases, a adsorção de moléculas gasosas na superfície do cristal altera sua massa efetiva, o que modifica a frequência de vibração e permite a detecção. Esses sensores são altamente sensíveis a pequenas variações na massa efetiva do cristal, mas podem ser influenciados por fatores como temperatura e umidade.

1.2.1.4. Sensores Ópticos

Medem a absorção ou emissão de luz causada pela interação dos gases com um material sensível. Podem ser muito seletivos e sensíveis, mas geralmente são mais caros que outros tipos de sensores.

1.2.1.5 Sensores de Efeito de Campo (FET):

São transistores que usam um campo elétrico para controlar o fluxo de corrente. A presença de gases altera o campo elétrico, permitindo a detecção. São muito sensíveis e podem ser miniaturizados, mas são mais complexos de fabricar.

1.2.1.6 Sensores Impedimétricos:

Medem a mudança em elementos de impedância elétrica de um material sensível quando exposto a diferentes gases. A impedância é uma medida da oposição do material ao fluxo de corrente alternada. Podem ser fabricados com diversos materiais, como polímeros condutores, filmes finos de óxidos metálicos e materiais nano-estruturados. Apresentam alta sensibilidade, boa seletividade e podem ser miniaturizados para aplicações portáteis. Além disso, a técnica provê mais sinais analíticos: $|Z|$ módulo da resistência, $|C|$ capacitância e (θ) ângulo de fase.

1.2.1.7 Os sensores condutores de prótons

Um material condutor de prótons funciona como um suporte para íons H^+ , permitindo que eles se movimentem através de sua estrutura. Essa condução pode ocorrer por diferentes mecanismos, dependendo do material. Em alguns casos, os prótons se ligam a grupos específicos na estrutura do material e saltam de um sítio para outro, como se estivessem pulando entre "pedras" em um rio. Em outros casos, os prótons se movem através de canais formados por moléculas de água ou outros solventes presentes no material. A facilidade com que os prótons se movem determina a condutividade protônica do material. Essa condutividade pode ser influenciada por fatores como temperatura, presença de água e a estrutura química.

1.3. Alótropos de carbono

1.3.1 Grafeno

Um dos primeiros relatos sobre o grafeno foi feito pelo pesquisador britânico BC Brodie em 1859 que durante seus estudos sobre a estrutura e reatividade do grafite. Ele realizou uma reação com cloreto de potássio adicionado a uma pasta de grafite em ácido nítrico, o resultante

foi um material composto em carbono, hidrogênio e oxigênio que possuía características únicas chamado por Brodie de “*graphon*” (Dreyer *et al.*, 2010).

Segundo os autores Camargos, Semmer e Silva (2017), grafeno consiste em ligações sp^2 de átomos de carbono formando uma folha plana. Os átomos se ligam uns aos outros consistindo em hexágonos. O material apresenta excelente condutividade térmica, química e eletroquímica o que torna o grafeno um material promissor para o desenvolvimento de novas tecnologias como o uso em sensores (Vieira *et al.*, 2023).

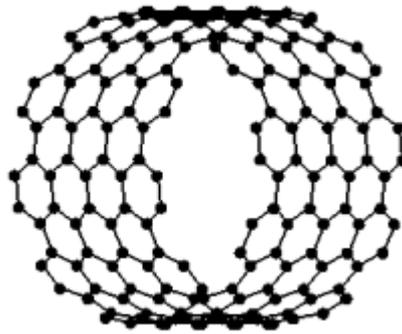
O grafeno na forma de monocamada, foi isolado pela primeira vez em 2004 por Geim e Novoselov que foram agraciados com o prêmio Nobel em 2010 por este feito. Devido suas propriedades eletrônicas, o grafeno é definido como um material semicondutor de *gap* nulo, devido a característica do material de conseguir conduzir elétrons livremente, algo que pode ser um limitador ao pensarmos o uso em dispositivos eletrônicos, mas podem ser feitas modificações para produzir variações em suas propriedades físicas (Vieira *et al.*, 2023).

As pesquisas sobre o grafeno têm aumentado, a intenção é entender como esse material pode ser usado para o desenvolvimento de novas tecnologias, como fabricação de sensores, condutores, transdutores o que torna o grafeno um dos principais focos em pesquisas na área de engenharia de materiais (Camargos; Semmer; Silva, 2017).

1.3.2 Nanotubo de Carbono

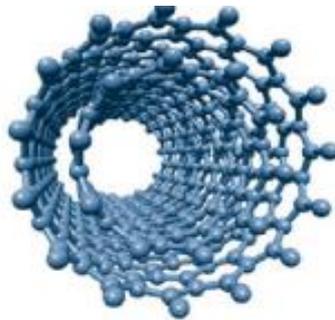
O primeiro trabalho versando sobre nanotubos reconhecido pela comunidade científica data de 1991 onde Iijima descreveu o material e fez um estudo sobre a estrutura do nanotubo de carbono (Zarbin; Oliveira, 2013). O nanotubo de carbono é uma folha cilíndrica composta por uma única folha de grafeno, quando apenas uma camada é verificada a estrutura recebe o nome de nanotubo de parede única (SWCNT) (figura 3). Além dessa estrutura, existe o nanotubo de carbono multicamada formado por várias folhas de grafeno que se enrolam de forma concêntrica como um tubo – MWCNT (figura 4) (Zarbin; Oliveira, 2013). Uma importante característica é o padrão hexagonal que se repete, isso faz com que cada átomo seja ligado a três átomos vizinhos, isso ocorre principalmente devido ao processo de hibridização sp^2 , onde um orbital *s* se liga a dois orbitais *p*, uma ligação extremamente forte que justifica as diversas propriedades mecânicas dos CNT's, ele pode ser de parede única (SWCNT) ou ter múltiplas paredes – MWNTC - (Ruoff; Qian; Liu, 2003).

Figura 3: Nanotubo de carbono de parede única.



Fonte: Ruoff, Qian, Liu (2003).

Figura 4: Nanotubo de carbono de múltiplas paredes



Fonte: Zarbin, Oliveira (2013).

Os nanotubos de carbono têm características ideais para aplicações em superfícies planas. O seu tamanho, estrutura e alta condutividade faz com que o material atraia bastante interesse da comunidade científica, uma vez que o material pode ser usado para a confecção de transistores, sensores e outros dispositivos eletrônicos (Popov, 2004).

Similarmente ao grafite, os nanotubos de carbono podem ser oxidados por oxidantes forte, tais quais KClO_3 , KMnO_4 entre outros tratamentos. Como consequência, grupos funcionais de oxigênio são ancorados à folha de carbono, causando prejuízo às propriedades elétricas originais. No entanto, esses mesmos grupos de oxigênio adicionam aos nanotubos melhor processabilidade, tais como: a solubilidade em água e a ancoragem de grupos orgânicos, cerâmicos, entre outros.

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é a montagem e testes de sensores a base de óxidos de nanotubo dopados com óxido de cério e óxidos de cério/praseodímio para detecção e quantificação de VOC's em ambientes úmidos, a temperatura ambiente. O trabalho representa uma atividade de familiarização com os métodos de preparo, testes e caracterização sensorial.

3. Materiais e métodos

3.1 Síntese do óxido de nanotubo multicamadas

Para a realização da síntese de nanotubo de carbono, (MWCNT) foi escolhido o método utilizado por Mallakpour, Abdolmaleki e Borandeh (2014). Essa metodologia foi escolhida em função da disponibilidade dos materiais necessários para a realização da síntese no laboratório e também pelo fato de ser métodos mais simples para obtenção do material.

A síntese do óxido de MWCNT foi feita a partir de 0,5 g de nanotubo de carbono de paredes múltiplas que foram adicionados à 12 ml de solução de H_2SO_4 e $NaNO_3$ (0,25 g) $0^\circ C$. A esta solução foram adicionados 1,5 g de $KMnO_4$. É importante a manutenção da temperatura abaixo de $20^\circ C$, evitando reações violentas de oxidação. Após esses procedimentos, eleva-se a temperatura a $35^\circ C$ e a mistura é deixada em agitação constante por 30 minutos. Em seguida adiciona-se 25 ml de água destilada e eleva-se a temperatura a $98^\circ C$ por 15 minutos. Adiciona-se então água destilada (70 ml) e em seguida 2 mL de peróxido de hidrogênio 30% (H_2O_2). A mistura foi filtrada e lavada com água destilada e ácido clorídrico a 10% para remoção de íons metálicos residuais. O produto, em meio aquoso, é colocado na centrifuga a 3000 rpm por 1 hora. O resultado é de aproximadamente 1,0 g de óxido de nanotubo.

3.2 Síntese de óxido com Cério e Praseodímio

Sensor 1 CNT CE – Em 0,02 gramas de MWCNTox foi adicionado 600 μL de uma solução de $CeCl_3$, H_2O [$0,54 \text{ mol L}^{-1}$] e 2ml de NH_4OH concentrado. O precipitado formado ficou no banho de ultrassom 60 W por 10 minutos, lavado por 2 vezes em uma centrífuga.

Sensor 2 CNT Pr – Depois em 0,027 gramas de Nanotubo de carbono oxidado foi adicionado 600 μL de uma solução de $Pr(NO_3)_3$ [$0,46 \text{ mol L}^{-1}$] e 2ml de NH_4OH concentrado.

O precipitado formado ficou no banho de ultrassom potência 100 por 10 minutos, lavado por 2 vezes em uma centrífuga.

Sensor 3 CNTCePr5 – Em seguida 0,025 gramas de Nanotubo de carbono oxidado foi adicionado 570 μL de uma solução de CeCl_3 , H_2O [$0,54 \text{ mol L}^{-1}$] e 30 μL de uma solução de $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ [$0,46 \text{ mol L}^{-1}$] e 2ml de NH_4OH concentrado. O precipitado formado ficou no banho de ultrassom potência 100 por 10 minutos, lavado por 2 vezes em uma centrífuga.

Sensor 4 CNTCePr10 – Em 0,022 gramas de Nanotubo de carbono oxidado foi adicionado 540 μL de uma solução de CeCl_3 H_2O [$0,54 \text{ mol L}^{-1}$] e 60 μL de uma solução de $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ [$0,46 \text{ mol L}^{-1}$] e 2ml de NH_4OH concentrado. O precipitado formado ficou no banho de ultrassom potência 100 por 10 minutos, lavado por 2 vezes em uma centrífuga.

Sensor 5 CNTCePr20 – Em 0,022 gramas de Nanotubo de carbono oxidado foi adicionado 480 μL de uma solução de CeCl_3 , H_2O [$0,54 \text{ mol L}^{-1}$] e 120 μL de uma solução de $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ [$0,46 \text{ mol L}^{-1}$] e 2ml de NH_4OH concentrado. O precipitado formado ficou no banho de ultrassom potência 100 por 10 minutos, lavado por 2 vezes em uma centrífuga.

3.3 Construção de Eletrodos e Sensores

De acordo com a metodologia acima descrita, foram sintetizados compósitos entre Nanotubo de parede múltipla (MWCNT) e óxidos de cério puro e dopado com praseodímio. Apesar da síntese ser conduzida a partir de sais dos metais lantanídeos como reagentes, os produtos são compósitos entre MWCNT e óxidos de cério puro e dopado com praseodímio nas concentrações descritas.

Os materiais sintetizados foram depositados sobre eletrodos de ouro assim com descritos na figura 5, configurando 5 sensores. Os sensores foram então conectados a um multiplexador o que permitiu a realização de medidas de 5 sensores simultaneamente utilizando apenas um medidor de LCR. Os eletrodos consistiam em dois soquetes SOP banhados a ouro adaptados, cada um com 4 conjuntos de eletrodos com 16 iterdigitações, com uma separação entre eletrodos de 0,5 mm. Um total de 5 sensores foram montados, deixando um conjunto para verificação da flutuação do sinal.

3.4 Configuração e Metodologia da Análise Olfativa

As medições olfativas foram realizadas em um nariz eletrônico impedimétrico feito em laboratório. Para as medições de impedância, foi utilizado um medidor LCR (Tonghui, modelo 2816A) acoplado a um multiplexador analógico. O conjunto de sensores consistia de sete sensores que foram interrogados com uma sonda de sinal de 10 kHz, 1 V p-p durante três segundos, a uma taxa de 10 pontos.s⁻¹, para cada ciclo do multiplexador. Para a amostragem de VOC's, fluxos de ar foram percolados através de solventes líquidos (figura 5).

Foram realizadas medições gravimétricas das concentrações de VOC's no fluxo em triplicata. Antes e após 30 minutos de fluxo, o recipiente com o solvente foi pesado. A diferença entre a massa inicial e final representa a quantidade de VOC's presente para o fluxo de ar. O procedimento foi conduzido para fluxos na faixa de 1-100 mL.min⁻¹ para acetona, etanol, metanol e álcool isopropanol. Dois controladores de fluxo de massa (MFC's) Aalborg, modelo GFC17A-VAL6-E0-3AB-04-SS foram usados para o controle preciso do fluxo. A concentração de VOC's aumenta linearmente com a intensidade do fluxo de ar, mostrando que a saturação do espaço livre nos recipientes foi mantida para todos os fluxos. (Figura 5)

A amostragem experimental do nariz eletrônico compreende dois fluxos de ar umidificado, 80% de umidade relativa (UR), mantendo um fluxo constante de 200 mL.min⁻¹. O primeiro representa a amostragem dos VOC's, o segundo; para diluição de vapores. As medições sensoriais foram realizadas usando quatro concentrações de VOC's: 20, 100, 500 e 1000 ppm. (Figura 5)

A magnitude da impedância ($|Z|$) foi registrada para cada sensor após a estabilização do sinal. Os dados foram normalizados para ar a 80% de UR, como condição de referência, usando a abordagem fracional (S_n) (Equação 1). Onde:

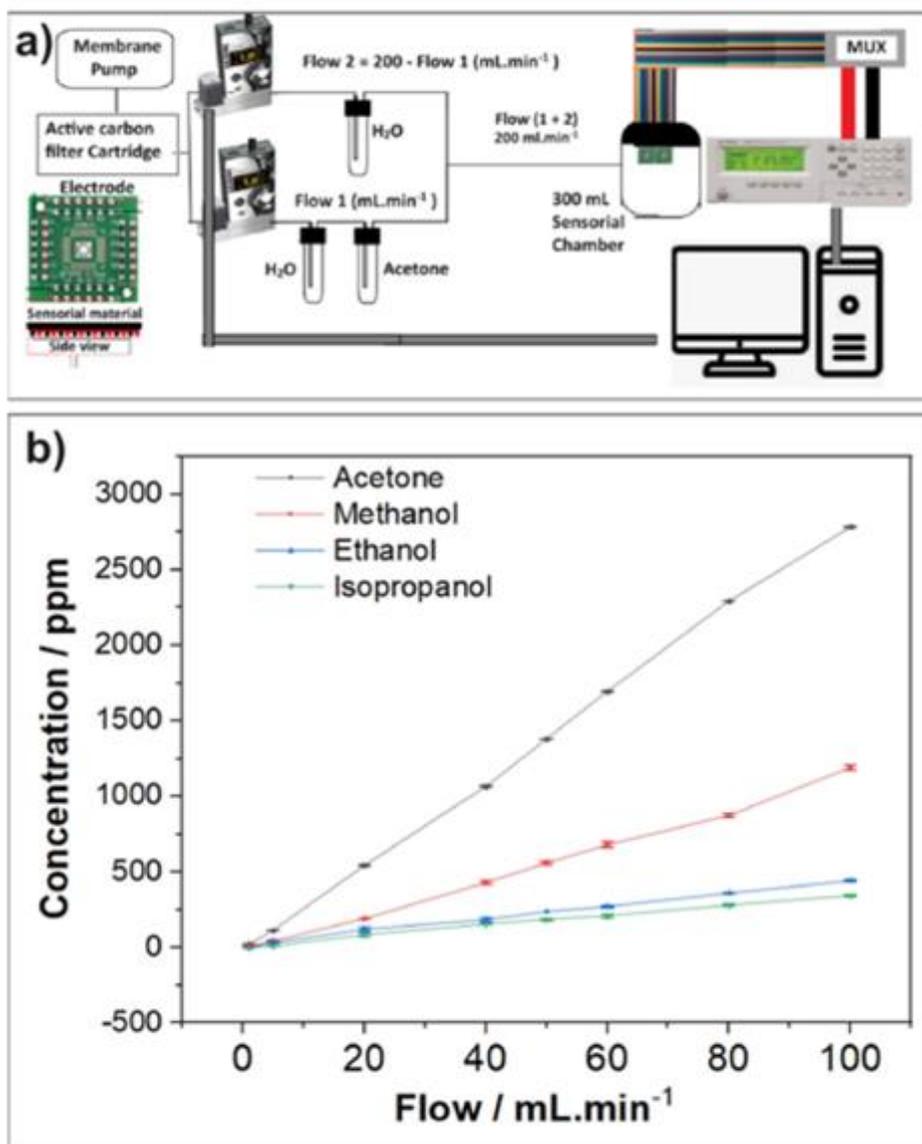
$$S_n = \frac{R_1 - R_0}{R_0} \quad (1).$$

S_n é a resposta do sensor

R_1 é o sinal do sensor para VOC's no ar com 80% de UR.

R_0 é o sinal de referência do ar com 80% de UR.

Figura 5: a) Representação ilustrativa da configuração geral do nariz eletrônico, com dois controladores de fluxo de massa e eletrodos adaptados de soquete SOP banhados a ouro com os respectivos contatos; b) Resultados para a determinação gravimétrica da concentração de VOC's na corrente de ar de $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, em função do fluxo 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4. Resultados

O procedimento para teste dos sensores consistiu na exposição alternada entre água e os solventes em concentrações crescentes como descrito em materiais e métodos. Com os

resultados permitiu-se a verificação do comportamento dinâmico dos sensores, além da certificação da estabilidade dos mesmos, ao longo das medidas.

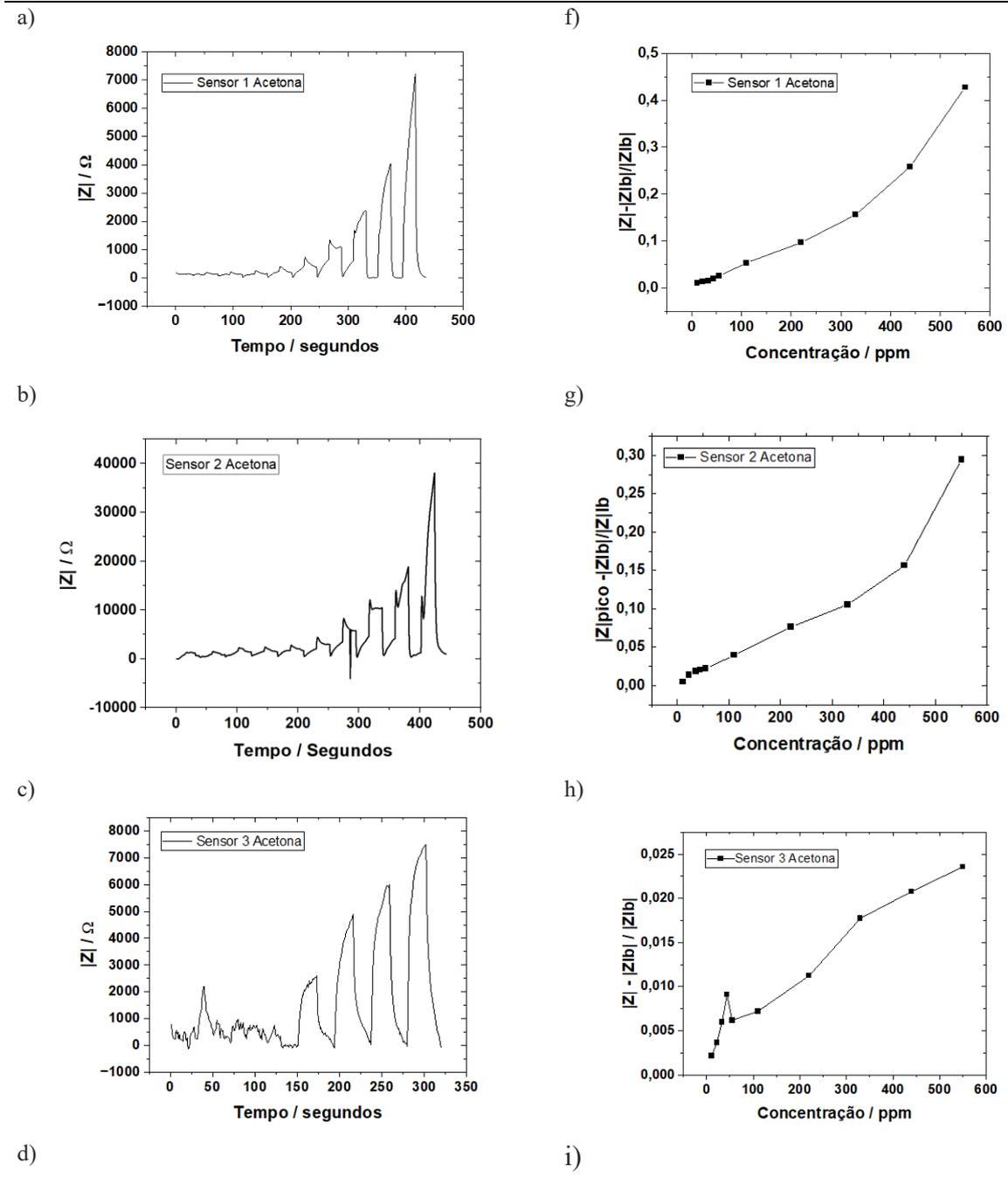
Assim como mostram as figuras 6 e 7 (a-e) os sensores mostraram comportamentos estáveis e reprodutíveis. Esses resultados, então puderam ser tomados como curvas de calibração para cada sensor, por exposição a cada solvente. De acordo com os dados os sensores exibiram satisfatórios tempos de resposta e recuperação, mostrados na tabela 1 e figura 8. Os tempos de resposta e recuperação às concentrações de 100 ppm variaram dentro do período de tempo de algumas centenas de segundos.

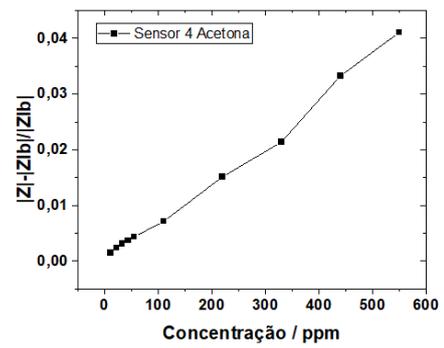
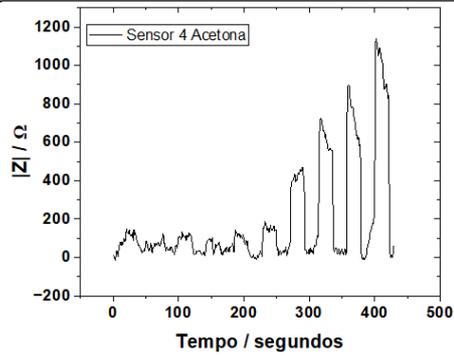
Tabela 1: Valores em segundos do Tempo de Resposta e de recuperação dos Sensores para Acetona e Metanol em concentrações de 100 ppm.

Sensor	Tempo de resposta	Tempo de recuperação
Sensor 1 Acetona	182	196
Sensor 2 Acetona	231	245
Sensor 3 Acetona	122	129
Sensor 4 Acetona	229	252
Sensor 5 Acetona	152	176
Sensor 1 Metanol	331	382
Sensor 2 Metanol	376	399
Sensor 3 Metanol	288	337
Sensor 4 Metanol	408	456
Sensor 5 Metanol	338	387

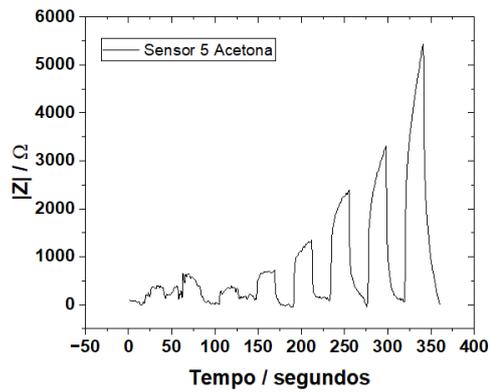
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 6.: a) – e) Sinais dos sensores registrados, em função da exposição a acetona em concentrações 20, 100, 500 e 1000 ppm. f) – j) Valores de impedância nos picos dos sinais em relação a linha de base: $S_n = (Z_p - Z_{lb})/Z_{lb}$.

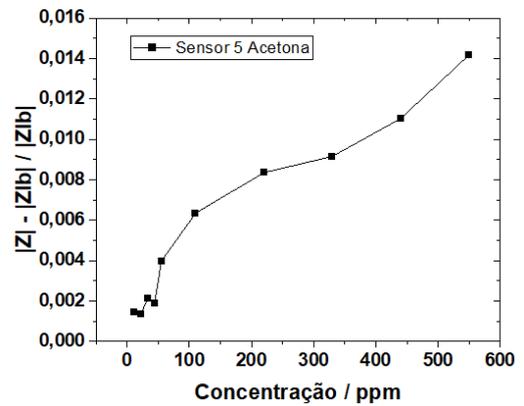




e)



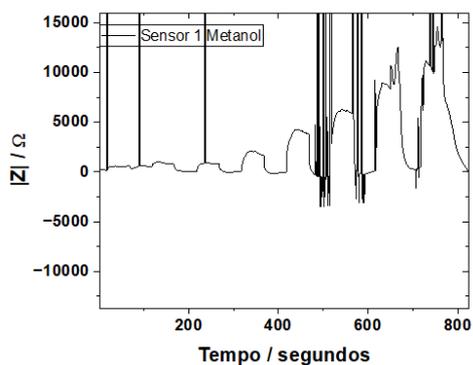
j)



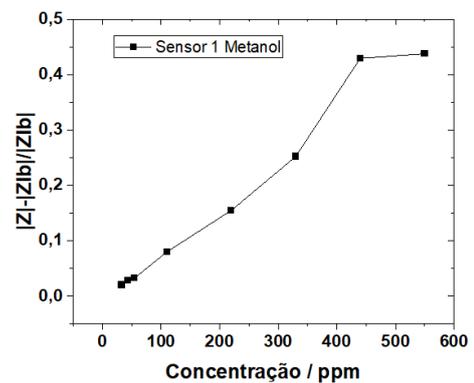
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 7: a) – e) Sinais dos sensores registrados, em função da exposição a metanol em concentrações 20, 100, 500 e 1000 ppm. f) – j) Valores de impedância nos picos dos sinais em relação a linha de base: $S_n = (Z_p - Z_{lb}) / Z_{lb}$.

a)

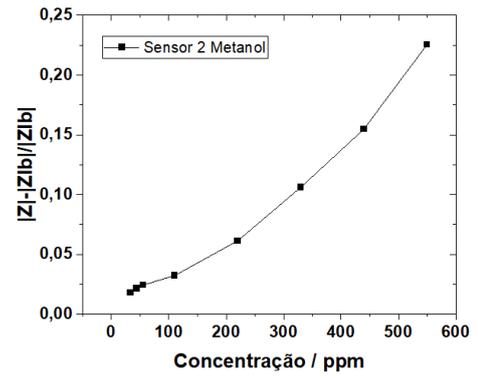
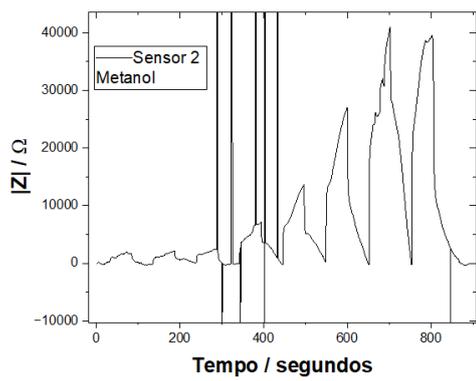


f)

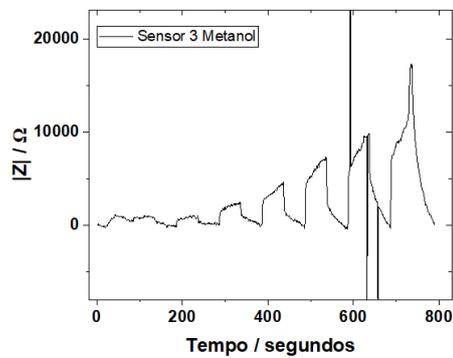


b)

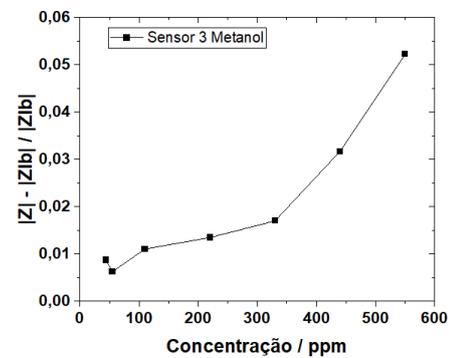
g)



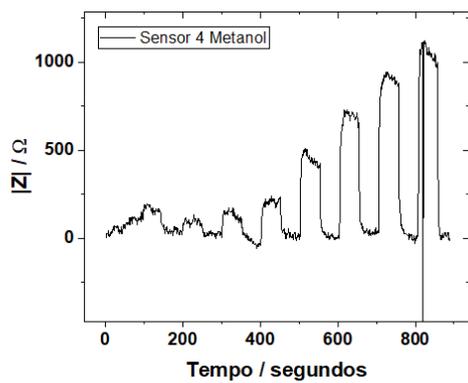
c)



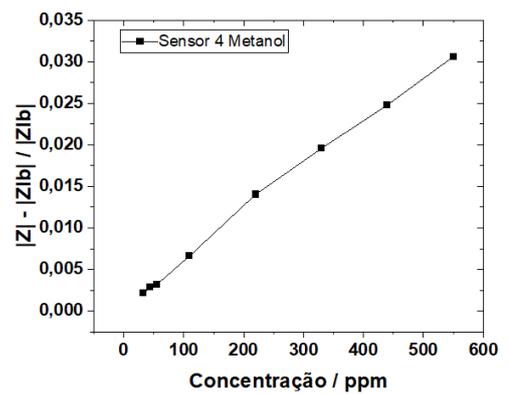
h)



d)

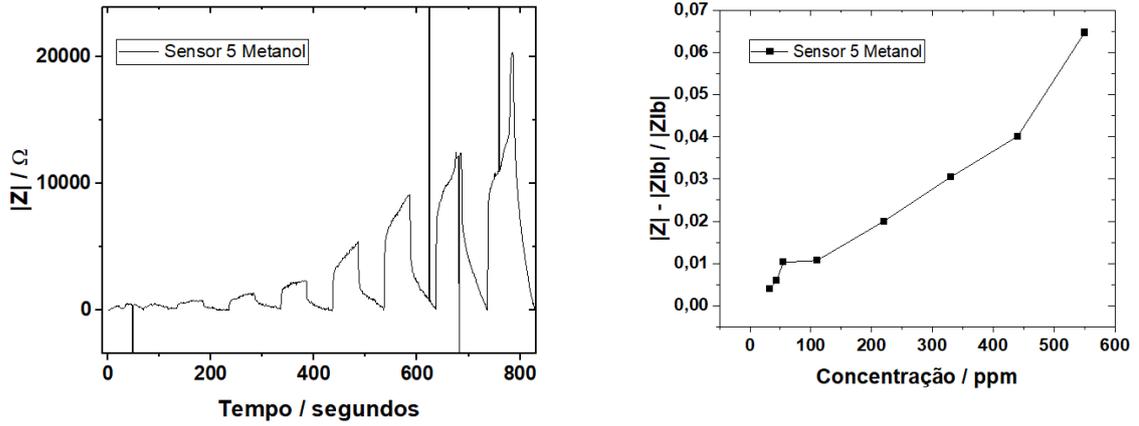


i)



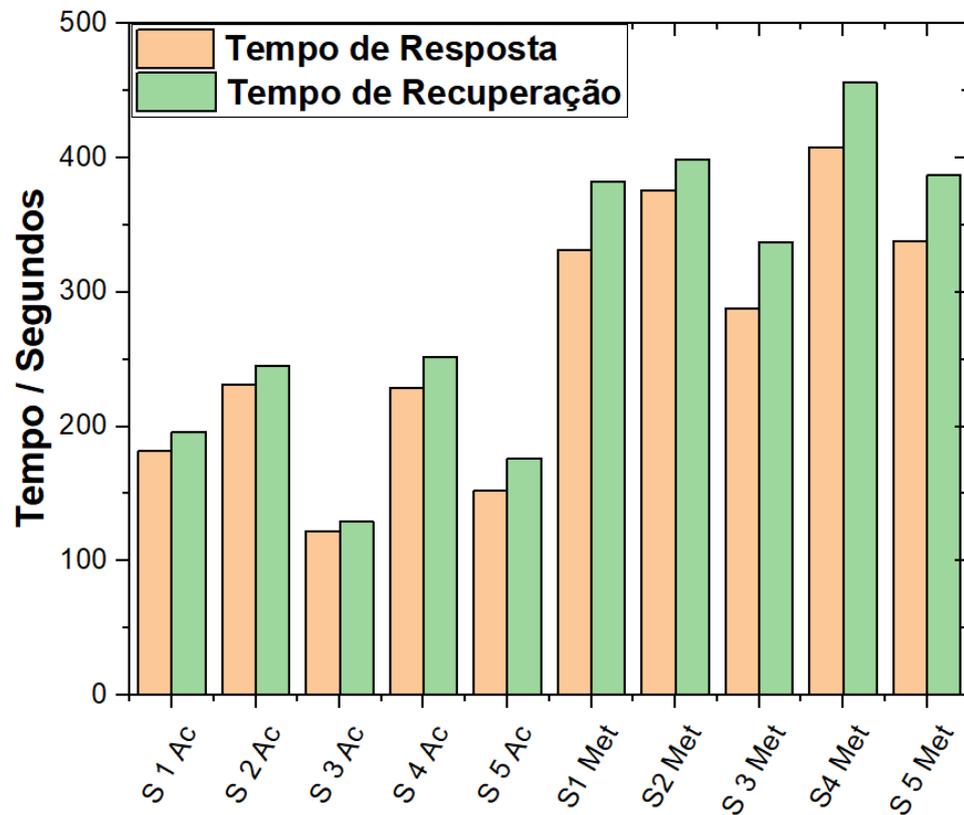
e)

j)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 8: Gráfico comparando o Tempo de Resposta e Tempo de Recuperação dos sensores em segundos



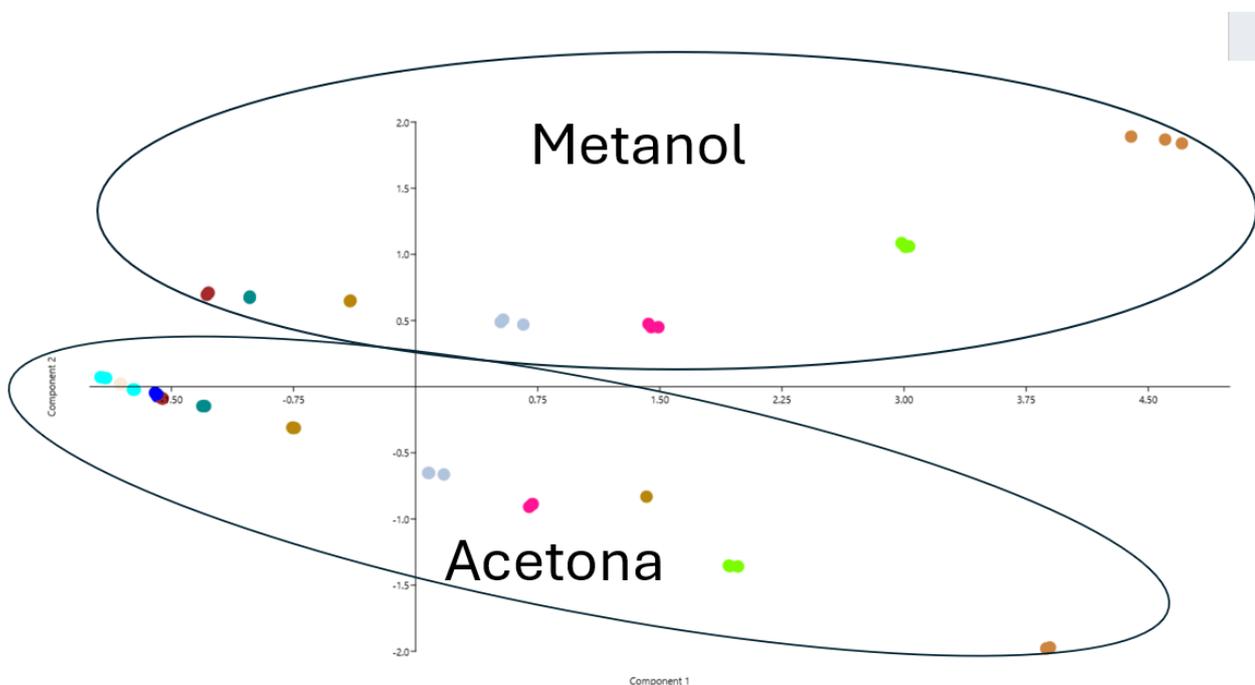
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As figuras 6 e 7 (f-j), mostram os gráficos da valores de impedância de pico de impedância, em função da exposição aos vapores dos solvente nas concentrações descritas, comparados ao sinal por exposição aos vapores de água de acordo com a relação: $S_n = (Z_p - Z_{lb})/Z_{lb}$. Os gráficos mostram relações aproximadamente lineares entre os valores de pico e as concentrações a que foram expostos, o que permite a utilização como curvas de calibração para futuros trabalhos.

Com medidas em triplicata, os valores de pico de impedância foram utilizados para confecção de uma tabela com os valores dos picos de impedância para cada sensor em uma concentração para cada linha. Com essa tabela foram conduzida a análise de componentes principais (PCA) de todos os dados: acetona e metanol e concentrações 20, 100, 500, 1000 ppm. Os resultados da redução de dimensionalidade são expressos na figura 9.

É possível observar um eficiente agrupamento das medidas para cada solvente, mostrando uma discriminação completa entre acetona e metanol, atestando a eficiência do conjunto de sensores para dois solventes conhecidos pela tradicional dificuldade de discriminação.

Figura 9: Resultados do Teste de PCA para concentrações de Metanol e Acetona



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, como consequência do comportamento aproximadamente linear dos sensores, quando expostos a concentrações crescentes de solventes, cada concentração de cada solvente pôde também ser agrupada dentro da região do gráfico correspondente a cada solvente. Os resultados mostram ainda um limite de detecção de 8 ppm de cada solvente, o que é notável na literatura.

5. Considerações finais

O trabalho é uma introdução a técnica de detecção de gases, através dos procedimentos adotados foi possível fazer a síntese e a construção de sensores com MWCNTox. A metodologia utilizada se mostrou rápida e eficiente com fácil aplicação e reprodução.

Os sensores demonstram ser uma alternativa viável para medição de VOC's, os tempos de resposta e recuperação satisfatórios, assim como a linearidade apresentada em relação às diferentes concentrações de VOC's são características essenciais para aplicações práticas onde a identificação precisa de gases é fundamental.

O uso de sensores baseados em MWCNTox apresenta ser extremamente promissor, mas há espaços para melhorias e investigações adicionais, como a otimização da síntese e aplicações práticas. A pesquisa será continuada no mestrado explorando outros compostos para observar a resposta eletrônica, técnicas de caracterização como raman, microscopia e xps também serão feitas, assim como o uso de novos equipamentos para coleta de dados, tornado os dados mais precisos e permitindo análises mais aprofundadas.

6. Referências

CAMARGOS, J. S. F.; SEMMER, A. O.; SILVA, S. N. Características e Aplicações do Grafeno e do Óxido de Grafeno e as Principais Rotas para Síntese. **The Journal of Engineering and Exact Sciences - JCEC**, v. 3, n. 3, p. 1118-1130, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18548/jcec.v3i3.1118-1130>

DREYER, Daniel R.; PARK, Sungjin; BIELAWSKI, Christopher W.; RUOFF, Rpdmeu S. The chemistry of graphene oxide. **Chemical Society Reviews**, volume 39, p. 228-240, 2010.

LISBOA, H. de M.; PAGE, T.; GUY, C. Gestão de odores: fundamentos do Nariz Eletrônico. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 14, n. 1, p. 9-18, jan./mar. 2009.

MALLAKPOUR, Shadpour; ABDOLMALEKI, Amir; BORANDEH, Sedigheh. Covalently functionalized graphene sheet with biocompatible natural amino acids. **Applied Surface Science**, volume 307, p. 533-542, 2014.

POPOV, V. N. Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering R*, v. 41, p. 61-102, 2004. DOI: 10.1016/j.mser.2003.10.001

RUOFF, R. S.; QIAN, D.; LIU, W. K. Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions and experimental measurements. *C. R. Physique*, v. 4, p. 993-1000, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2003.08.001>

SCHIFFMAN, S. S.; PEARCE, T. C. Introduction to Olfaction: Perception, Anatomy, Physiology, and Molecular Biology. In: PEARCE, T.C.; SCHIFFMAN, S.S.; NAGLE, H.T.; GARDNER, J.W. (Eds.). *Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. ISBN: 3-527-30358-8. p. 1-18.

SUN, L. Structure and synthesis of graphene oxide. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.05.011>

VIEIRA, A. G.; MORAES, R. M.; VASCONCELOS, F. M.; MAIA, D. W. Investigação das propriedades eletrônicas de nanofitas de Grafeno e de Nitreto de Boro utilizando o modelo Tight-Binding. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, e20230148, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0148>

Zarbin, A. J. G. & Oliveira, M. M. (2013). Nanotubos de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis? *Química Nova*, 36(10), 1533-1539