

Vinícius Jessé Rodrigues de Oliveira Patzer

Estudo, Caracterização Óptica e Elétrica de Sensores em Corrente Contínua e Alternada. Uma análise qualitativa de mecanismos e Análise Estatística dos Resultados

Relatório de Pós-doutorado realizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Física, Presidente Prudente.

Supervisora: Prof. Dra. Clarissa de Almeida Olivati.

PD-III: Sem financiamento

Presidente Prudente
2025

Relatório de processo número 4847

Este relatório de pesquisa abordou os resultados obtidos e atividades realizadas durante o período vigente sem qualquer tipo de financiamento. O presente relatório está sendo enviado para a Pró reitoria de Pesquisa da UNESP (PROPE).

Resumo

Durante o período, o projeto teve como objetivo desenvolver filmes por meio das técnicas de dropcasting e Langmuir, utilizando polímeros conjugados e derivados do grafeno, como nanotubos de carbono, aplicados na fabricação de sensores de gases (ex.: amônia – NH_3). Inicialmente, foi conduzido um estudo detalhado das propriedades elétricas e morfológicas desses materiais, bem como de sua resposta em medições elétricas. Os sinais obtidos foram analisados como resposta à detecção dos vapores, permitindo a investigação de parâmetros ótimos para cada técnica, com foco na reprodutibilidade dos dispositivos. A caracterização consistiu em medições elétricas em função do tempo de exposição dos sensores aos vapores. A partir dos diferentes resultados, relacionando técnicas, processos de fabricação e gases aplicados, realizou-se uma análise estatística com o uso da Análise de Componentes Principais (PCA). Essa abordagem possibilitou identificar padrões de resposta específicos para cada vapor detectado, agrupando os dados conforme a técnica empregada, a natureza do gás e suas características individuais. Os resultados, representados por diagramas estatísticos, facilitaram a interpretação dos agrupamentos observados e apontaram caminhos para a otimização do desempenho dos sensores desenvolvidos, visando aplicações em detecção de gases em diferentes ambientes e condições.

Palavras-chave: Caracterização Elétrica, Nanotubos de Carbono, Sensores de vapores, Análise estatística PCA.

This research report presents the results obtained and the activities carried out during the period under review, without any type of funding. The present report is being submitted to the Office of the Vice Provost for Research at UNESP (PROPE).

Abstract

During the study period, the project aimed to develop thin films using drop-casting and Langmuir techniques, employing conjugated polymers and graphene derivatives, such as carbon nanotubes, applied in the fabrication of gas sensors (e.g., ammonia – NH_3). Initially, a detailed investigation of the electrical and morphological properties of these materials was conducted, as well as their response in electrical measurements. The signals obtained were analyzed as a function of vapor detection, enabling the identification of optimal parameters for each technique, with emphasis on device reproducibility. Characterization consisted of electrical measurements as a function of the sensors' exposure time to vapors. Based on the different results, relating techniques, fabrication processes, and target gases, a statistical analysis was performed using Principal Component Analysis (PCA). This approach made it possible to identify specific response patterns for each vapor detected, grouping the data according to the technique employed, the nature of the gas, and its individual characteristics. The results, represented through statistical diagrams, facilitated the interpretation of the observed groupings and indicated potential pathways for optimizing the performance of the developed sensors, aiming at applications in gas detection across different environments and conditions.

Keywords: Electrical Characterization, Carbon Nanotubes, Vapor Sensors, PCA Statistical Analysis.

Sumário

Introdução	5
1.1 Análise de Componentes Principais (PCA) – Aspectos Teóricos	6
1.2 Objetivos	7
Materiais e Métodos	8
2.1 Materiais	8
2.2 Metodologia empregada	9
2.2.1 Fabricação de filmes Langmuir e Langmuir-Schaefer (LS)	9
2.2.2 Fabricação de filmes por Dropcasting	9
2.3 Caracterização Elétrica e Sensorial	10
Resultados e Discussão	11
3.1 Isotermas de pressão superficial por área	11
3.2 Medidas Elétricas	13
3.3 Microscopia de Força Atômica	17
3.4 Agrupamento pelo método de Análise de Componentes Principais (PCA)	19
Conclusões	27
Referências	28
Atividades Realizadas no Período	29
6.1 Artigo publicado	29
6.2 Resumos expandidos publicados em anais de congressos	29
6.3 Apresentações de trabalhos.....	29
6.4 Participação em eventos, congressos, exposições e feiras	30

1.Introdução

O desenvolvimento e caracterização de sensores depende diretamente da escolha de materiais funcionais capazes de oferecer alta sensibilidade, seletividade e estabilidade. Nesse cenário, os nanotubos de carbono (NTCs) destacam-se por suas propriedades eletrônicas, estruturais e mecânicas singulares, aliadas à elevada área superficial e condutividade elétrica. Essas características tornam os NTCs excelentes candidatos para aplicações em dispositivos de detecção, especialmente de vapores e gases em concentrações distintas.

O princípio de funcionamento dos sensores baseados em nanotubos de carbono está diretamente relacionado à interação entre a superfície porosa do material adsorvendo moléculas do vapor analisado. A adsorção dessas moléculas pode alterar significativamente as propriedades eletrônicas dos nanotubos, modificando sua condutividade, resistência ou mobilidade elétrica. Essas alterações podem ser monitoradas e correlacionadas à estímulos variáveis devido à presença e concentração dos vapores, viabilizando a construção de dispositivos de resposta rápida e confiável. Além disso, a possibilidade de funcionalizar quimicamente os NTCs amplia a seletividade dos sensores, tornando-os adequados para aplicações específicas [1,2].

A incorporação dos nanotubos em filmes finos constitui uma abordagem promissora para a fabricação de sensores. Técnicas como Langmuir e dropcasting permitem controlar a organização e a morfologia dos filmes, fatores que influenciam diretamente no desempenho dos dispositivos. Nesse contexto, os sensores de vapores baseados em filmes de nanotubos de carbono vêm sendo aplicados em áreas de grande relevância, como monitoramento ambiental, detecção de gases tóxicos, controle da qualidade do ar e segurança industrial. Além da alta sensibilidade e seletividade, a integração desses materiais em dispositivos microeletrônicos possibilita o desenvolvimento de sensores portáteis e energeticamente eficientes, ampliando seu potencial de aplicação em diferentes cenários tecnológicos [3].

A caracterização elétrica de filmes finos é essencial para avaliar suas propriedades de transporte eletrônico e desempenho sensorial. As medições em corrente contínua (DC) fornecem informações fundamentais sobre a resistência elétrica e a condutividade do material, permitindo a análise do comportamento estático da rede de nanotubos. Por outro

lado, as medições em corrente alternada (AC), especialmente por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), oferecem insights sobre a resposta dinâmica do sistema, incluindo processos de adsorção e variações elétricas em função da frequência aplicada. Tais abordagens combinadas são amplamente reconhecidas na literatura como cruciais para a compreensão abrangente das propriedades elétricas de filmes finos [2,4].

O analisador de impedância Solartron 1260A é uma ferramenta amplamente utilizada para medições AC, proporcionando uma ampla faixa de frequências e alta precisão. Sua aplicação em filmes finos tem sido documentada em diversos estudos, demonstrando sua eficácia na análise da resposta elétrica frente a estímulos alternados [5]. Além disso, a combinação de medições DC e AC permite uma avaliação mais completa das propriedades elétricas, facilitando a correlação entre estrutura, morfologia e desempenho funcional dos filmes [4].

1.1 Análise de Componentes Principais (PCA) – Aspectos Teóricos

A análise de componentes principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) constitui uma ferramenta estatística multivariada amplamente utilizada para a interpretação e redução da dimensionalidade de conjuntos de dados complexos. No contexto de sensores baseados em nanotubos de carbono, a PCA possibilita identificar padrões de resposta associados a diferentes vapores ou condições experimentais variadas, agrupando resultados de acordo com similaridades estatísticas. Essa abordagem facilita a visualização das variações mais significativas nos sinais elétricos obtidos, permitindo diferenciar de forma clara a influência de parâmetros como o tipo de gás, a concentração ou a técnica de deposição utilizada na fabricação dos filmes. Além de contribuir para a compreensão dos mecanismos de detecção, a PCA fornece dados importantes para a otimização do desempenho dos sensores, tornando sua análise mais e confiável [6].

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística de redução de dimensionalidade amplamente utilizada em ciências de materiais e sensores, permitindo simplificar conjuntos de dados multivariados complexos sem perda significativa de informação relevante. A PCA transforma variáveis originais correlacionadas em um conjunto de variáveis ortogonais, denominadas componentes principais (PCs), que são ordenadas de acordo com a variância que explicam [7]. Essa

transformação é fundamental para identificar as dimensões mais informativas e reduzir redundâncias nos dados, facilitando análises exploratórias e classificações.

Para avaliação quantitativa da importância de cada componente, utiliza-se comumente o *scree plot*. Nestes gráficos, o eixo horizontal representa os PCs, enquanto o eixo vertical mostra a proporção de variância explicada por cada componente. Uma linha indica a variância individual e outra a variância acumulada. O ponto de inflexão “cotovelo” permite definir o número ideal de componentes a serem mantidos, descartando aqueles que contribuem marginalmente à explicação da variabilidade [8]. Esse tipo de representação gráfica é essencial para determinar a dimensionalidade mínima necessária para representar a maior parte da informação contida nos dados [9].

A projeção dos dados nos primeiros componentes principais é frequentemente visualizada por meio de scatter plots bidimensionais ou tridimensionais. Esses gráficos permitem observar agrupamentos, padrões e *outliers*. Em estudos de filmes sensoriais, a separação espacial entre grupos de amostras no plano $PC1 \times PC2$ indica que a maior parte da variabilidade relevante para discriminação de gases ou estímulos está concentrada nesses componentes [10]. Assim, os scatter plots não apenas confirmam a redução de dimensionalidade, mas também evidenciam a capacidade de classificação do sistema.

A integração entre *scree plots* e scatter plots oferece uma visão completa da estrutura dos dados, permitindo correlacionar variabilidade, agrupamentos e padrões funcionais dos filmes. Essa abordagem é amplamente empregada na literatura para caracterização de sensores, avaliação de respostas multivariadas e otimização de materiais funcionais, fornecendo uma base sólida para análises quantitativas e interpretação científica [11].

1.2 Objetivos

Desenvolver e caracterizar filmes obtidos por diferentes técnicas de deposição, aplicando-os na fabricação de sensores de gases, com ênfase na investigação estudo de suas propriedades elétricas, morfológicas e desempenho sensorial.

- Empregar materiais semicondutores derivados do grafeno, como nanotubos de carbono, na produção dos filmes.
- Avaliar as propriedades elétricas e morfológicas dos filmes.

- Investigar a resposta elétrica dos sensores em função do tempo de exposição em diferentes vapores.
- Realizar análises estatísticas, com destaque para a Análise de Componentes Principais (PCA), visando identificar padrões responsivos de cada vapor.
- Otimizar a interpretação dos resultados e indicar possibilidades de aprimoramento do desempenho dos sensores para aplicações em diferentes condições ambientais.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Os materiais empregados neste trabalho incluem nanotubos de carbono funcionalizados (NTC) e Ácido Esteárico (AE). Os NTC massa molar de 847,97 g/mol, enquanto o AE apresenta massa molar de 284,5 g/mol.

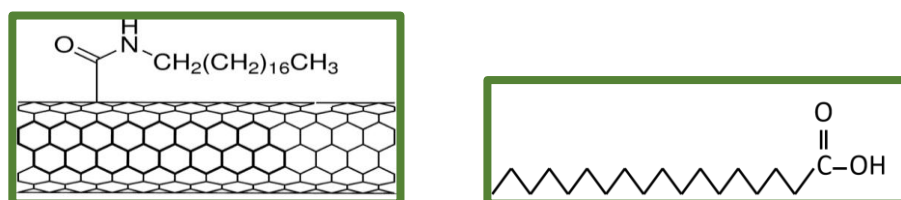


Figura 1: Estrutura dos materiais empregados: a) Nanotubo de Carbono Funcionalizado (NTC) e o Ácido Esteárico (AE)

Para a deposição e caracterização dos filmes, foram utilizados substratos sólidos de vidro e eletrodos interdigitados de ouro (IDEs – Interdigitated Electrodes), conforme ilustrado na Figura 2 a seguir. Cada IDE é composto por $N = 10$ dígitos, com altura (h) de 110 nm, comprimento (L) de 8 mm e largura (w) de 100 μm .

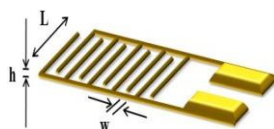


Figura 2: Representação IDE com $N = 10$ dígitos, h altura, L comprimento e w largura dos dígitos, dimensões de 110 nm de altura (h), 8 mm de comprimento (L) e 100 μm de largura (w).

Os substratos foram obtidos e produzidos no Laboratório de Microfabricação e Filmes Finos (LMF) do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), por meio de projetos de parceria. A fabricação dos eletrodos é realizada por processos de fotolitografia, garantindo precisão nas dimensões e uniformidade necessária para os estudos de caracterização elétrica.

2.2 Metodologia empregada:

2.2.1 Fabricação de filmes Langmuir e Langmuir Schafer (LS)

A metodologia da técnica de Langmuir empregada neste trabalho envolveu a utilização de uma cuba inerte de Teflon, contendo uma subfase de água ultrapura Milli-Q, garantindo a pureza necessária para a formação de monocamadas estáveis na interface ar-água. O filme monomolecular é formado devido à compressão e à organização da tensão superficial sobre a superfície da água. Nesse processo, as barreiras laterais móveis foram utilizadas para comprimir a monocamada de forma controlada, permitindo a obtenção das isotermas de pressão superficial versus área molecular média (π -A). Durante todo o procedimento, um sensor de tensão superficial monitorou a pressão superficial durante a compressão, possibilitando a identificação de fases distintas da monocamada e permitindo avaliar desde sua estabilidade até a determinação da área ocupada por cada molécula. Todo o experimento foi realizado em condições controladas à temperatura de 23 °C, garantindo maior reprodutibilidade no procedimento [12].

Após a obtenção das isotermas de pressão superficial (π -A) pela técnica de Langmuir, a monocamada foi transferida para os substratos sólidos utilizando o método Langmuir-Schaefer (LS). Nesse procedimento, o substrato previamente limpo é cuidadosamente posicionado paralelo à superfície da monocamada e, ao entrar em contato com ela, permite a deposição horizontal do filme monomolecular. Essa abordagem permite a transferência controlada do filme, preservando a organização molecular observada na interface ar-água [12].

A técnica LS é particularmente adequada para a obtenção de filmes finos homogêneos rígidos sobre substratos sólidos, como lâminas de vidro ou eletrodos interdigitados, mantendo a integridade estrutural e morfológica da monocamada formada e garantindo a reprodutibilidade necessária para as caracterizações posteriores [13].

2.2.2 Fabricação de filmes por Dropcasting

A técnica de dropcasting (Figura 3) foi empregada neste trabalho por se tratar de um método simples, de baixo custo e amplamente utilizado na preparação de filmes finos. Sua aplicação permitiu comparações diretas com os filmes obtidos pela técnica de

Langmuir, possibilitando avaliar as vantagens e limitações de cada abordagem diante das diferentes caracterizações realizadas [14].

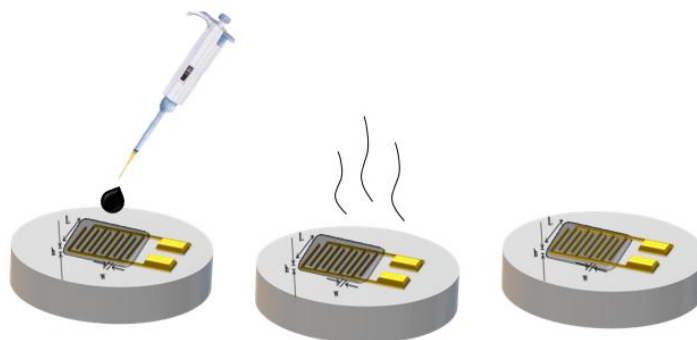


Figura 3: Técnica Dropcasting utilizada

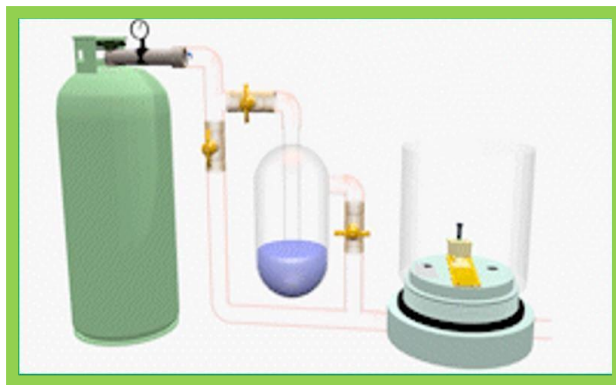
Apesar de sua simplicidade, o dropcasting é um método eficaz para a deposição controlada de materiais líquidos sobre superfícies sólidas. O processo consiste na aplicação de pequenas gotas de uma solução contendo o material de interesse sobre um substrato previamente nivelado. A evaporação do solvente resulta na formação do filme, cuja morfologia e uniformidade podem ser ajustadas a partir da escolha do solvente, de sua concentração e volatilidade, bem como temperatura ambiente [15].

No presente estudo, a metodologia seguiu as seguintes etapas: preparação de uma solução de nanotubos de carbono em clorofórmio (mesmo solvente empregado na técnica de Langmuir), na concentração de 2 mg/mL; aplicação gota a gota da solução sobre os substratos; evaporação natural do solvente durante 6 horas, à temperatura controlada de 23 °C. Ao final do processo, foram obtidos filmes depositados sobre lâminas de vidro e eletrodos interdigitados, destinados às etapas de caracterização elétrica e morfológica.

2.3 Caracterização Elétrica e Sensorial

Os materiais depositados ou transferidos sobre os eletrodos interdigitais (IDE), previamente caracterizados em corrente contínua por meio de curvas de corrente versus tensão (I vs V), foram submetidos também a análises de corrente em função do tempo (I vs t). Nesse procedimento, o dispositivo sensor foi polarizado sob tensão constante de + 5 V, sendo inicialmente exposto a um fluxo controlado de nitrogênio (60 Nl/h) por dois minutos, com o objetivo de estabilizar a amostra e estabelecer a linha de base. Em seguida, o mesmo procedimento foi repetido com a introdução de vapores

tóxicos no fluxo, simulando uma atmosfera contendo espécies químicas de interesse. A interação entre os vapores e a superfície sensorial resultou em variações de corrente elétrica detectadas pela fonte SMU Keithley 238, interpretadas como sinais elétricos de resposta do dispositivo. Esse processo foi repetido de forma sistemática, possibilitando a identificação e análise de padrões de resposta reprodutíveis e confiáveis [5,16,17]. O



procedimento com as medidas sensoriais utilizando está esquematizado na figura a seguir.

Após a realização das medidas e caracterizações elétricas, foi realizado o processo de Análise de Componentes Principais, que consiste no agrupamento/*clusterização* das respostas elétricas obtidas e coletadas. As respostas elétricas podem ser expressas na forma de corrente, condutividade ou resistência elétrica dos vapores sobre os sensores. Os diagramas gerados, juntamente com análises quantitativas de variância e do coeficiente de silhueta, serão apresentados e discutidos nos itens seguintes.

Figura 4: Sistema controlador de fluxo de vapores, constituído por um cilindro de gás inerte conectado a um reservatório contendo solvente, o qual libera vapores que podem ser conduzidos por arraste e detectados pelo dispositivo sensor.

3. Resultados e Discussão

3.1 Isotermas de pressão superficial por área

No processamento dos filmes estudados, foram utilizadas duas misturas distintas. No primeiro caso, correspondente à isoterma obtida (Figura. 5a), o filme de Langmuir foi preparado apenas com nanotubos, a uma concentração de 0,2 mg/mL, espalhando-se 1,00 mL (1000 μ L) da solução sobre a subfase aquosa, o que resultou em uma massa total depositada de 0,20 mg. A pressão superficial de deposição utilizada e que apresentou

melhor ordenação molecular foi de 30 mN/m, e a área média do monômero foi de 38 Å².

Para a segunda solução (Figura. 5b), o filme de Langmuir foi obtido a partir de uma mistura de nanotubos com a molécula anfifílica ácido esteárico, em concentração de 0,56 mg/mL, com volume espalhado de 0,25 mL (250 µL), o que gerou uma massa total depositada menor, de 0,14 mg. A pressão de deposição utilizada foi mais elevada, de 40 mN/m, enquanto a área média estimada do monômero foi de 33 Å².

Apesar da maior concentração da suspensão em (Figura 5b), a menor massa total aplicada sugere que, em (Figura 5a), havia mais material disponível na superfície, favorecendo a formação de regiões mais densas e a possibilidade de agregados ou multicamadas locais. O perfil abrupto da isoterma após a compressão confirma essa tendência, indicando que o material não apresenta uma região de expansão bem definida, sendo uma característica típica de espécies pouco solúveis com reduzida interação interfacial.

Por outro lado, a presença da molécula anfifílica em (Figura 5b) pode favorecer a dispersão lateral dos nanotubos, promovendo a formação de uma monocamada mais fina e homogênea. A pressão superficial mais alta em (Figura 5b) indica que o filme foi transferido sob maior compressão, o que normalmente resulta em maior cobertura superficial e maior densidade do filme, podendo aumentar o risco de colapso caso as moléculas não se reorganizem de forma homogênea e adequada. Além disso, a presença do ácido esteárico tende a estabilizar a organização na interface ar/água, reduzindo a agregação e suavizando transições bruscas na isoterma, com possível deslocamento da curva para áreas maiores por unidade, reduzindo a formação de agregados e contribuindo para uma curva de compressão mais suave.

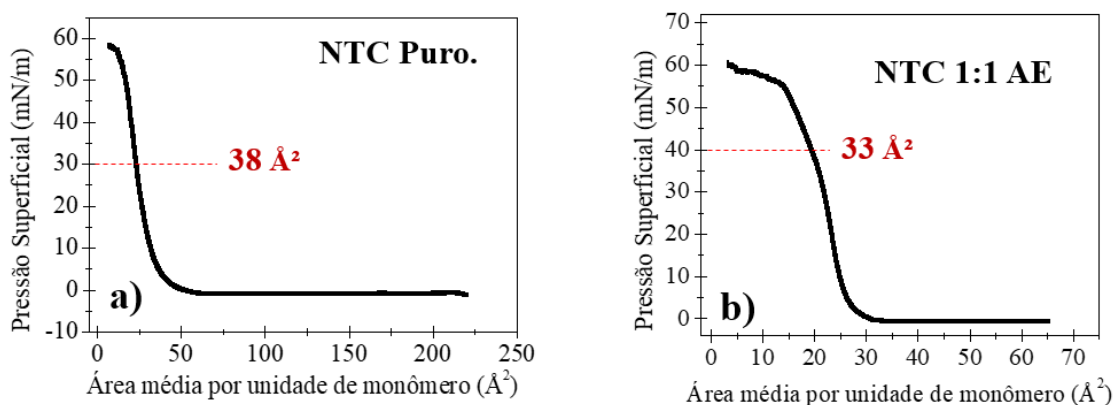


Figura 5: Isotermas (π -A) de pressão superficial em função da área molecular média: (a) nanotubos de carbono em solução pura (0,2 mg/mL) e (b) nanotubos de carbono misturados com ácido esteárico (proporção 1:1).

Os parâmetros experimentais obtidos para cada isoterma permitem compreender de que forma a concentração da solução, o volume espalhado e a presença de moléculas anfifílicas influenciam tanto a organização interfacial quanto as características finais do filme depositado.

Do ponto de vista comparativo, observa-se que a isoterma do sistema misto (Figura 5b) apresenta tanto pressão superficial de deposição mais alta quanto área média reduzida em relação ao nanotubo puro. Essa combinação é indicativa de um filme mais estável, possivelmente resultando em maior homogeneidade e melhor cobertura ao ser transferido para o substrato. Contudo, é importante destacar que a presença da molécula anfifílica também pode influenciar as propriedades finais do filme: por um lado, facilita a formação de camadas finas de nanotubos; por outro, dependendo do caráter e da quantidade de ácido esteárico (parte isolante da molécula), pode reduzir a condutividade elétrica ou aumentar a resistência elétrica detectada.

Os resultados observados reiteram a importância do estudo e da escolha da pressão de deposição, bem como da presença de moléculas auxiliares na técnica de Langmuir. Enquanto a maior massa espalhada do nanotubo puro (Figura 5a) favorece a formação de regiões densas e até mesmo agregadas, a mistura com o anfifílico (Figura 5b) demonstra que é possível obter um filme mais compacto e controlado, mesmo com menor quantidade de material. A análise comparativa das isotermas sugere, portanto, que a adição do anfifílico (AE) desempenha papel crucial na melhoria da organização interfacial, contribuindo para a obtenção de filmes mais reproduzíveis e com propriedades ajustáveis conforme a aplicação desejada.

3.2 Medidas Elétricas

A análise dos filmes depositados sobre eletrodos interdigitados (IDEs) evidenciou diferenças significativas nas propriedades elétricas, em função tanto do método de deposição quanto da composição das soluções utilizadas.

Para os filmes obtidos pela técnica Langmuir-Schaefer (LS), o filme de nanotubo puro apresentou uma condutividade de 0,13 S/m e resistência de 38,4 Ω . Já o filme LS de nanotubo misto com ácido mostrou uma leve redução da condutividade para 0,1 S/m e aumento da resistência para 47,6 Ω . Estes resultados indicam que a adição do ácido não favoreceu um aumento da condutividade no filme, possivelmente devido a alterações na

organização do material ou efeitos de dispersão sobre a rede de nanotubos, que podem aumentar a distância entre contatos elétricos (Figura 6).

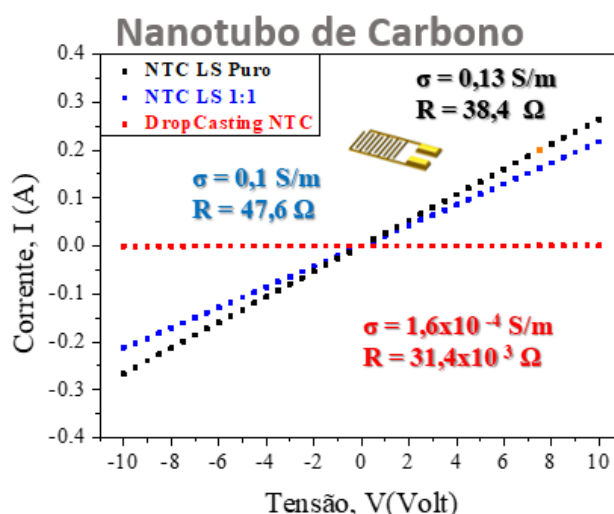


Figura 6: Medidas de corrente por tensão (I vs V) do Nanotubo de carbono por Langmuir e Dropcasting em suas variações propostas.

Em contraste, os filmes obtidos pela técnica drop casting apresentaram condutividade muito inferior, da ordem de $1,6 \times 10^{-4} \text{ S/m}$, e resistência significativamente maior, $31,4 \times 10^3 \Omega$, mesmo para os filmes de nanotubos puros. Essa diferença relevante em relação aos filmes obtidos pela técnica LS indica que a deposição por drop casting produz filmes mais irregulares e menos densos, gerando maior resistência elétrica efetiva entre os nanotubos. A técnica LS, por sua vez, ao empregar compressão controlada na interface ar/água, favorece a formação de uma rede mais organizada e contínua, refletindo-se em condutividade muito superior, mesmo em filmes relativamente finos.

Na comparação entre os filmes LS puros e mistos, observa-se que, embora a adição de ácido possa melhorar a dispersão dos nanotubos, o efeito sobre a condutividade elétrica é limitado. Isso sugere que a densidade de contatos elétricos ou a formação de possíveis barreiras resistivas na rede conjugada predominam em relação ao ganho de homogeneidade do filme. Já em comparação ao drop casting, a diferença de várias ordens de grandeza na condutividade reforça que a organização da rede de nanotubos promovida na interface LS é um fator crucial para a otimização das propriedades elétricas, especialmente em aplicações utilizando dispositivos baseados em eletrodos interdigitados.

Para as caracterizações elétricas sensoriais, apresentadas nas figuras 7, 8 e 9 a seguir, foram realizadas medidas sob fluxo controlado de vapores em intervalos de tempo

específicos, monitorando-se a variação da resistência Z' (Ω) durante a interação dos filmes tanto com o vapor analisado quanto com o nitrogênio (gás inerte). Os resultados obtidos demonstram que os sensores apresentaram resposta imediata e reprodutível à presença dos vapores testados, evidenciada pela variação da resistência elétrica monitorada.

Na **Figura 7**, os sensores de filme LS na forma pura (NTC LS) exibiram comportamento rápido e imediato frente à exposição aos vapores em fluxo, com aumento da resistência durante o contato e retorno aos valores iniciais quando submetidos à purga com nitrogênio. Esse processo foi totalmente reversível, permitindo a realização de múltiplos ciclos e indicando boa estabilidade e potencial de reutilização do sensor.

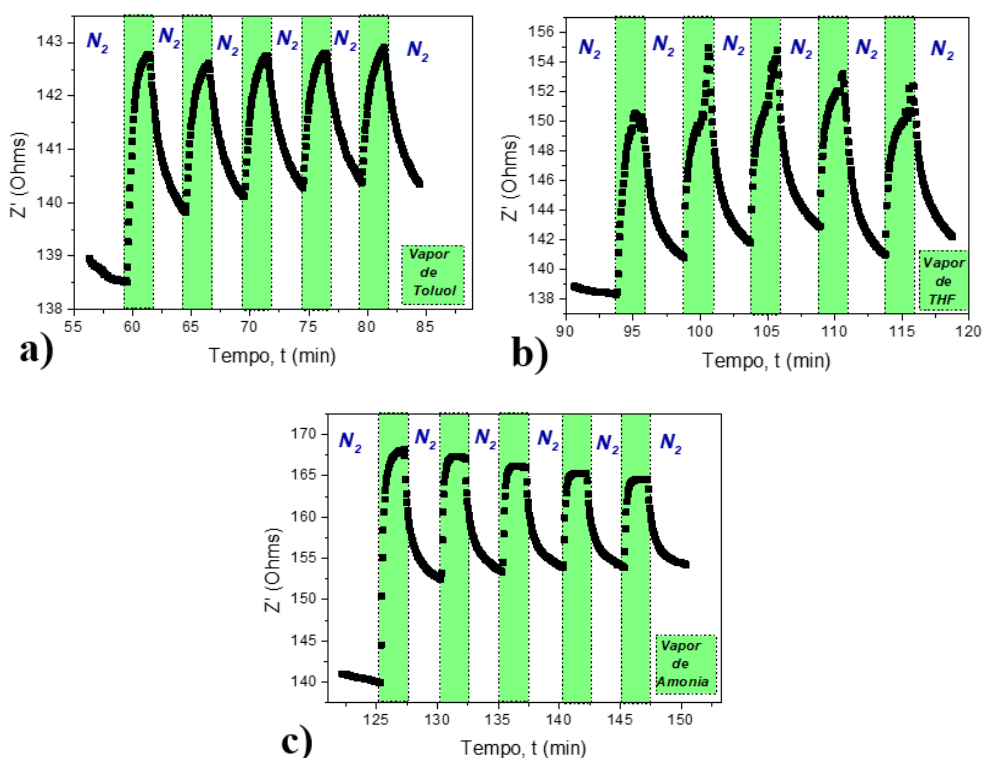


Figura 7: Filmes de Nanotubos de Carbono (NTC) puro fabricado por Langmuir Schaefer (LS) sobre eletrodo IDE de ouro, submetidos como unidade sensorial com medidas pelo tempo (i vs t) na presença dos vapores: a) Toluol, b) THF, c) Amônia.

De modo semelhante, a amostra obtida por **drop casting** (**Figura 8**) apresentou resposta consistente à presença dos vapores. Apesar da ocorrência de pequenas oscilações no sinal, o perfil geral manteve a característica de detecção clara seguida de recuperação após o nitrogênio, corroborando o desempenho do material como sensor funcional.

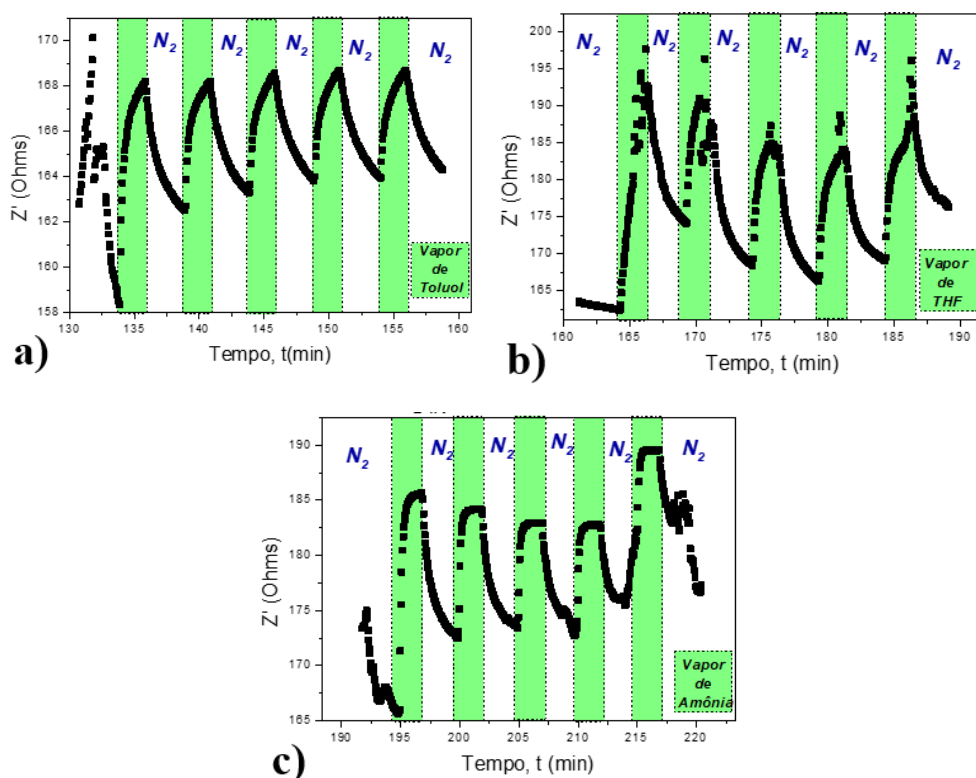


Figura 8: Filmes de Nanotubos de Carbono (NTC) puro fabricado por DropCasting sobre eletrodo IDE de ouro, submetidos como unidade sensorial com medidas pelo tempo na presença dos vapores: a) Toluol, b) THF, c) Amônia.

Na **Figura 9**, referente ao filme de LS modificado com ácido esteárico, observou-se resposta rápida e reversível na maioria das condições testadas. Contudo, destacou-se um comportamento particular frente ao vapor de tetrahydrofurano (THF): ao longo dos ciclos, verificou-se tendência de redução gradual nos valores de resistência elétrica. Esse fenômeno, embora pontual, pode indicar interação diferenciada entre o ácido esteárico presente na amostra e grupos químicos específicos do vapor de THF. Tal resultado não compromete a eficiência do sensor, mas sugere um padrão a ser aprofundado especialmente por meio de análise comparativa e agrupamento de dados.

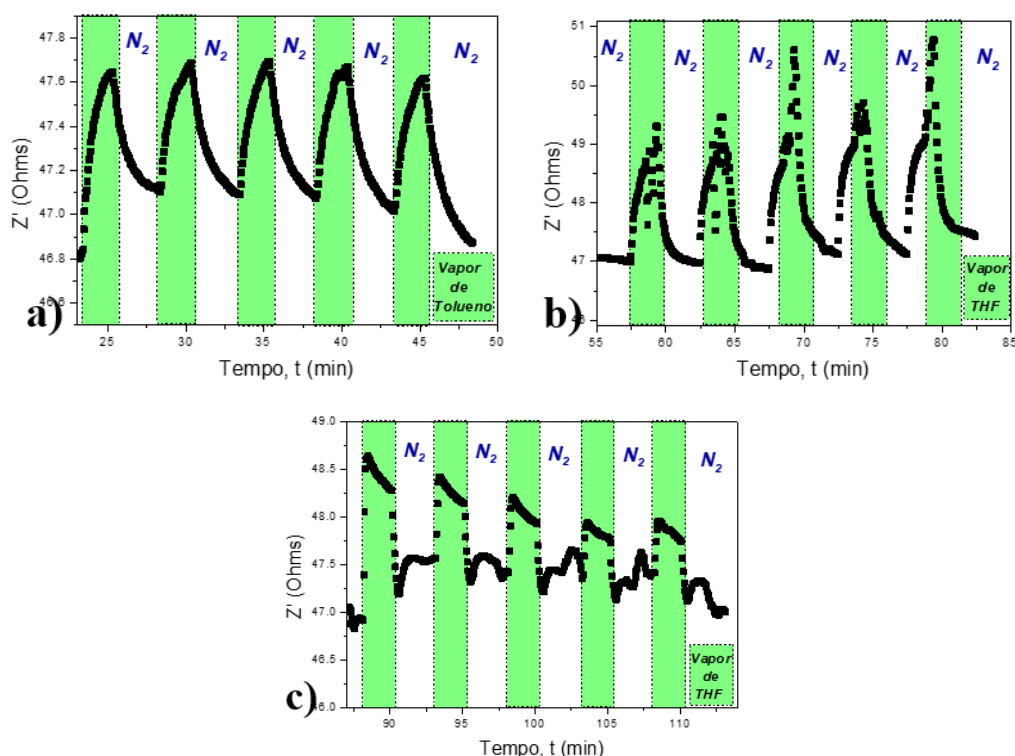


Figura 9: Filmes de Nanotubos de Carbono (NTC) e Ácido Esteárico (AE) fabricado por Langmuir Schaefer (LS) sobre eletrodo IDE de ouro, submetidos como unidade sensorial com medidas pelo tempo na presença dos vapores: a) Toluol, b) THF, c) Amônia.

De forma geral, os sensores avaliados demonstraram sensibilidade, reversibilidade e possibilidade de reutilização, características essenciais para aplicações práticas em detecção de vapores.

3.3 Microscopia de Força Atômica:

A análise por microscopia de força atômica (AFM) nas Figuras 10, 11 e 12, revelou diferenças na topografia e rugosidade dos filmes depositados por diferentes técnicas e composições. O filme de nanotubos puros obtido pela técnica Langmuir–Schaefer (LS) apresentou superfície relativamente uniforme, com valor médio de altura de 77,5 nm, altura máxima de 261,9 nm, média de 66,9 nm, rugosidade média (R_a) de 30,2 nm e rugosidade quadrática média (R_{ms}) de 40,7 nm. Esses valores indicam que o filme é homogêneo, com poucas elevações significativas e boa regularidade lateral, características compatíveis com a deposição controlada e a compressão uniforme proporcionadas pela técnica LS [18].

Quando o filme LS foi preparado com nanotubos em mistura com ácido esteárico, observou-se aumento expressivo na rugosidade e na topografia. O valor médio de altura

subiu para 367 nm, a altura máxima alcançou 1083 nm, a média foi de 321 nm, Ra de 147,2 nm e Rms de 180 nm. Esses resultados indicam superfícies muito mais irregulares e onduladas, sugerindo a formação de agregados devido à presença do ácido esteárico, que, embora possa auxiliar na dispersão lateral, também induz a formação de estruturas mais volumosas e regiões de empilhamento de nanotubos.

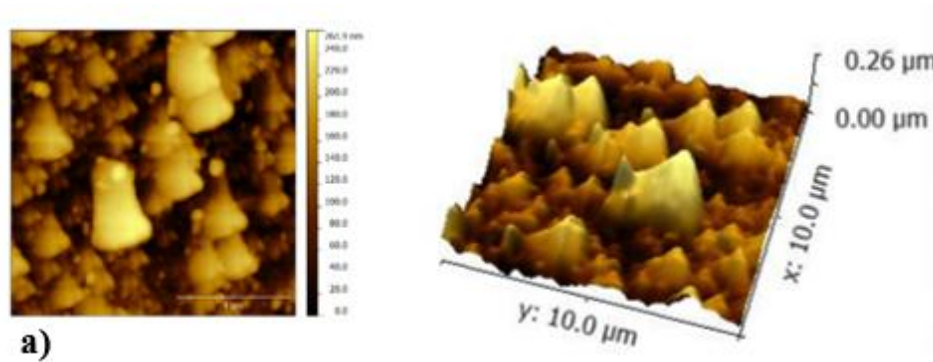


Figura 10: Imagem AFM do filme de nanotubo puro depositado por Langmuir-Schaefer (LS). A superfície apresenta topografia relativamente uniforme, com altura média de 77,5 nm, máxima de 261,9 nm, rugosidade média (Ra) de 30,2 nm e Rms de 40,7 nm, indicando boa homogeneidade lateral e ausência de grandes agregados.

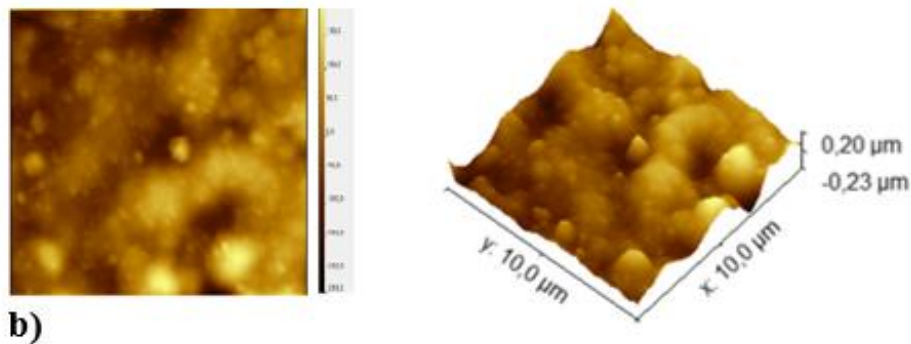


Figura 11: Imagem AFM do filme de nanotubo misto com ácido esteárico depositado por LS. A superfície mostra alta irregularidade e formação de agregados, com altura média de 367 nm, máxima de 1083 nm, Ra de 147,2 nm e Rms de 180 nm, evidenciando aumento expressivo da rugosidade em relação ao filme puro.

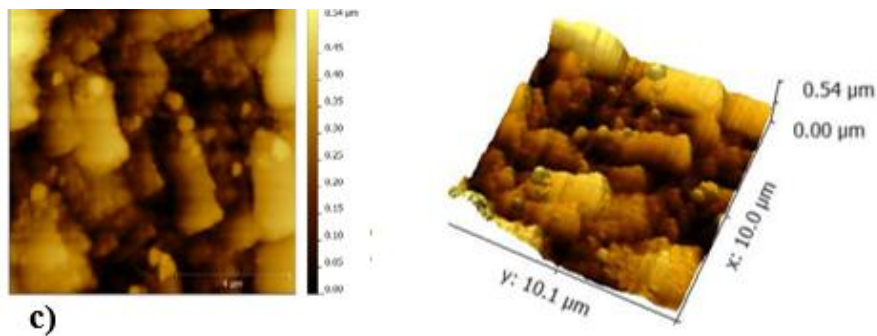


Figura 12: Imagem AFM do filme de nanotubo puro obtido por drop casting. A superfície apresenta rugosidade intermediária, com altura média de 120,5 nm, máxima de 536,9 nm, Ra de 51,8 nm e Rms de 71,3 nm, refletindo deposição menos controlada e maior heterogeneidade lateral em comparação à técnica LS.

Portanto, o filme obtido por drop casting a partir de nanotubos puros apresentou valores intermediários: altura média de 120,5 nm, altura máxima de 536,9 nm, média de 101,9 nm, rugosidade média (Ra) de 51,8 nm e rugosidade quadrática média (Rms) de 71,3 nm. Esses resultados indicam uma superfície mais irregular e menos controlada em comparação ao filme LS puro, porém menos extrema do que a mistura LS com ácido. A deposição por drop casting tende a gerar filmes mais espessos e heterogêneos em razão da evaporação natural do solvente, resultando em variações locais de altura e menor uniformidade lateral [19].

Dessa forma, a técnica LS com nanotubos puros proporciona a superfície mais uniforme, favorecendo a formação de filmes contínuos e com menor rugosidade. A adição do ácido na LS aumenta a rugosidade, sugerindo a formação de agregados, enquanto o drop casting gera superfícies irregulares de forma intermediária, refletindo o caráter menos controlado em nível molecular quando comparado à técnica de Langmuir. Esses resultados demonstram que tanto a técnica de deposição quanto a composição da solução influenciam fortemente a morfologia em escala nanométrica, impactando potencialmente as propriedades elétricas e ópticas dos filmes.

3.4 Agrupamento pelo método de Análise de componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais sendo uma técnica estatística utilizada para reduzir a dimensionalidade de conjuntos de dados complexos, preserva a maior parte da variabilidade original. Transformando as variáveis originais em novos componentes ortogonais, chamados componentes principais, que permitem identificar padrões, tendências e agrupamentos nos dados, além de facilitar a visualização em duas ou três dimensões. Essa abordagem é especialmente útil em estudos que envolvem múltiplas variáveis simultaneamente, como em análises de sensores ou caracterização de materiais [20]. Para este sistema de agrupamento supervisionado, foram utilizadas tabelas contendo os dados referentes à discriminação dos gases (amônia, THF e tolueno) para as três diferentes preparações de filmes: Langmuir–Schaefer (LS) puro, Langmuir–Schaefer (LS) com ácido esteárico e *drop casting* [21].

Nos valores utilizados para o agrupamento, foram selecionados os dados referentes à resposta dos vapores durante a liberação, considerando 30 pontos dentro de cada ciclo de resposta elétrica. Ressalta-se que foram utilizados apenas os dados dos 2º,

3º e 4º ciclos; o 1º e o último ciclo foram desconsiderados para evitar outliers nas medidas, garantindo padrões de resposta coerentes com as médias centrais dos ciclos obtidos.

A PCA foi aplicada aos dados obtidos a partir da resposta do sensor baseado em nanotubos de carbono, considerando diferentes técnicas de deposição e os picos de resposta dos gases monitorados (amônia, THF e tolueno). O objetivo foi reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados, preservando a variabilidade essencial e avaliando a capacidade de discriminação dos diferentes gases. No gráfico de dispersão ($PC1 \times PC2$) apresentados a seguir, observa-se um agrupamento nítido e bem definido dos três gases quando são utilizadas todas as combinações de técnicas e gases em fluxo sobre as amostras [21].

A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) ao conjunto de dados, composto por 92 variáveis explanatórias e 9 instâncias, mostrou que três componentes principais foram suficientes para explicar aproximadamente 98% da variância total, evidenciando a forte correlação entre as variáveis originais e confirmando a eficiência do PCA em reduzir a dimensionalidade do espaço de atributos sem perda substancial de informação. A projeção tridimensional das instâncias apresentada na Figura 13 revelou uma separabilidade parcial das classes da variável escolhida, composta por três categorias distintas. Embora não se observe uma perfeita separação entre todos os grupos, nota-se uma organização estrutural que sugere potencial discriminativo: a amônia forma um cluster consistente na região inferior esquerda do gráfico, o THF agrupa-se na parte superior central e o tolueno aparece isolado na região direita. Essa separação indica que as variáveis medidas, baseadas na resistência alternada nos pontos de maior resposta do sensor, carregam informação suficiente para separar cada gás de maneira eficiente [7,21].

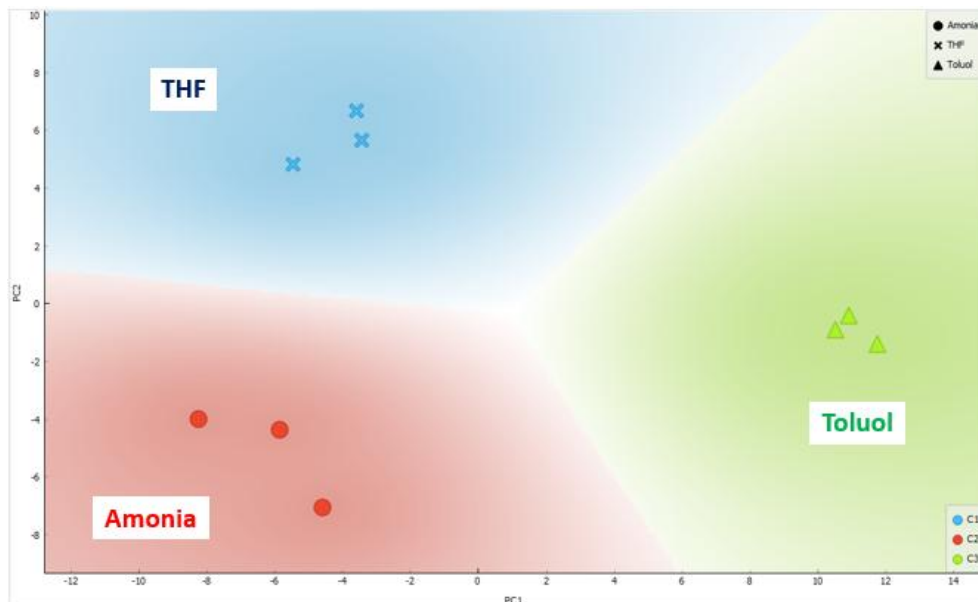
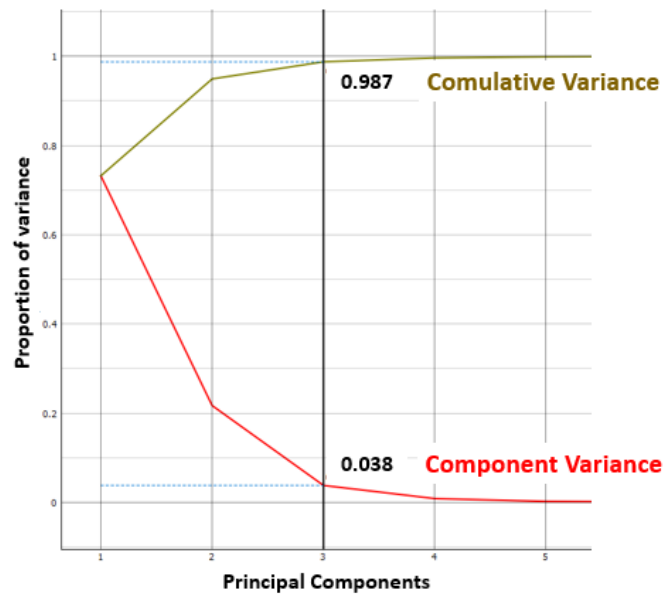


Figura 13: Todos os dados da Variância Cumulativa e Componente da Variância referentes às três técnicas: Langmuir–Schaefer (LS) filme puro, Langmuir–Schaefer (LS) filme misto com ácido esteárico e drop casting —, bem como às exposições aos gases tolueno, THF e amônia em fluxo sobre as amostras.

No entanto, devido ao número extremamente reduzido de instâncias, os resultados devem ser interpretados com cautela, reforçando seu caráter exploratório. Dessa forma, a Figura 13 evidencia que a PCA é capaz de reduzir a complexidade do conjunto de dados e destacar padrões relevantes na resposta dos sensores, mostrando que mesmo com um número limitado de amostras é possível identificar tendências de agrupamento consistentes com os diferentes gases analisados.

A análise de componentes principais (PCA) apresentada na Figura 14 mostrou que os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) explicam aproximadamente 95% da variância total, indicando que praticamente toda a informação relevante do sistema pode ser representada em apenas duas dimensões. Observa-se que o PC1 concentra a maior parte da variação e diferencia principalmente o Toluol dos demais gases, enquanto o PC2 permite a separação entre Amônia e THF, possibilitando a separação entre os três gases.

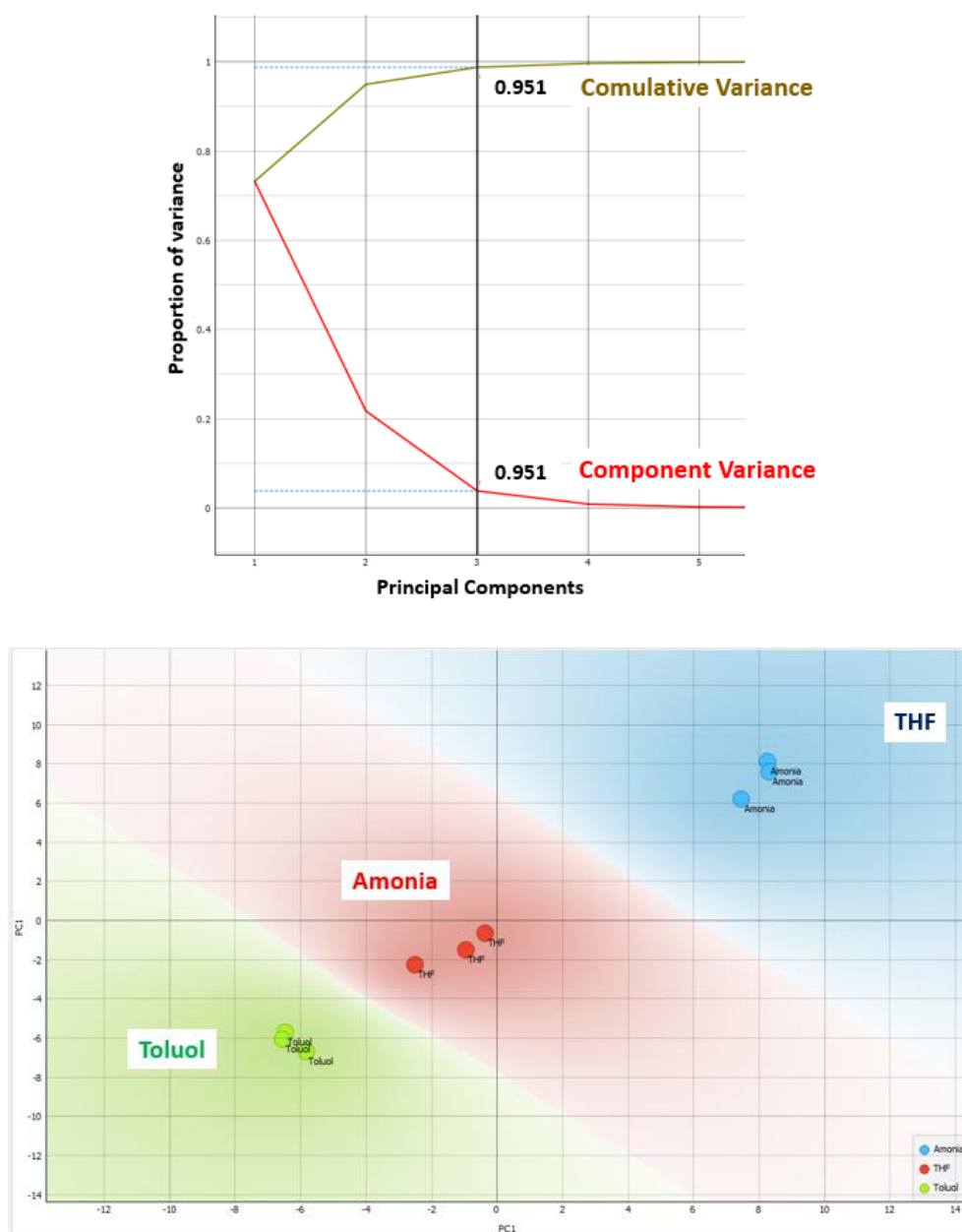


Figura 14: Dados da Variância Cumulativa e Componente da Variância dos filmes Langmuir–Schaefer (LS) puro, sob exposição aos gases tolueno, THF e amônia em fluxo.

Destaca-se na Figura 14 ainda que, a componente analisada corresponde ao filme LS de nanotubos puros, evidenciando que esta preparação proporciona respostas

consistentes e padronizadas do sensor. No gráfico, o Toluol aparece no canto inferior esquerdo, o THF no centro e a Amônia no canto superior direito, formando clusters bem definidos sem sobreposição significativa, o que sugere alta seletividade mesmo utilizando medidas baseadas em resistência alternada. Esses resultados indicam que os sinais elétricos extraídos do sensor com LS nanotubo puro são capazes de gerar padrões distintos e reproduzíveis para cada gás, demonstrando o potencial do sistema para aplicações práticas em análise de gases, combinando simplicidade de medida com capacidade de separação multivariada.

A análise de componentes principais (PCA) apresentada na Figura 15, referente ao filme LS misto com ácido esteárico, mostrou que uma única componente principal é capaz de explicar aproximadamente 83% da variância total, indicando que grande parte da informação do sistema pode ser representada em apenas uma dimensão. Apesar desse resultado favorável, a interpretação deve ser feita com cautela devido ao número reduzido de instâncias, que compromete a robustez estatística e aumenta a possibilidade de que os padrões observados sejam específicos da amostra.

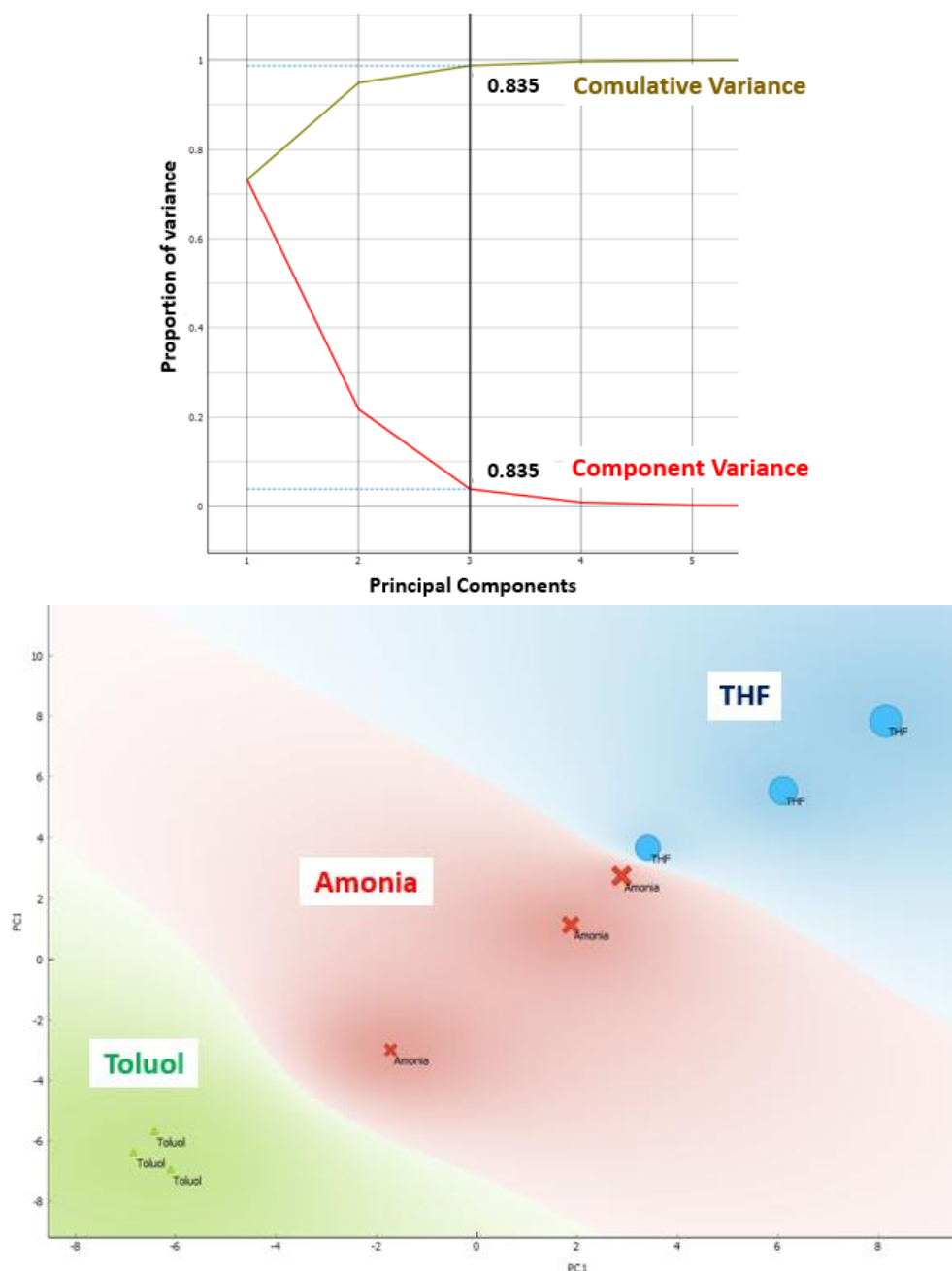


Figura 15: Dados da Variância Cumulativa e Componente da Variância dos filmes Langmuir–Schaefer (LS), mistos com ácido esteárico, sob exposição aos gases tolueno, THF e amônia em fluxo.

No gráfico correspondente (Figura 15), o Toluol aparece no canto inferior esquerdo, o THF no canto superior direito e a Amônia na região central, embora haja alguma sobreposição parcial entre os clusters, refletindo incertezas centrais que invadem levemente os grupos de Toluol e THF. Esses resultados sugerem que, mesmo com limitações na amostragem e maior variabilidade, o sensor baseado no filme LS com ácido mantém capacidade de separação entre os gases, embora com menor precisão e

seletividade em comparação ao filme LS de nanotubos puros. A presença de apenas uma componente explicativa reforça que as variáveis medidas apresentam forte redundância e que a resposta do sensor pode ser eficientemente resumida, mas com potencial perda na separação dos gases devido à sobreposição observada.

A análise de componentes principais (PCA) apresentada na Figura 16, referente ao filme obtido por drop casting puro, mostrou que uma única componente principal explica aproximadamente 98% da variância total, indicando que grande parte da informação do sistema pode ser representada em uma dimensão.

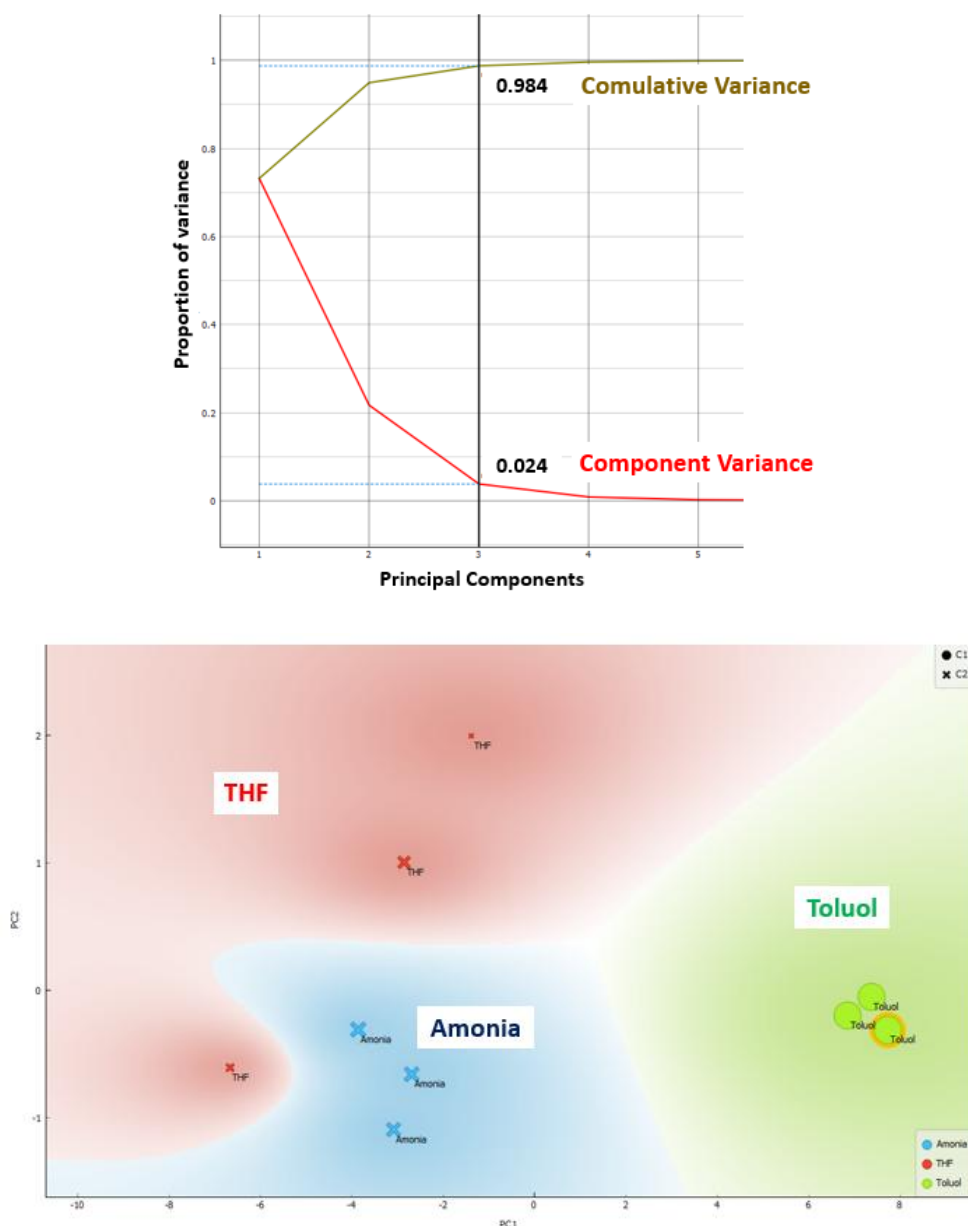


Figura 16: Dados da Variância Cumulativa e Componente da Variância dos filmes obtidos por drop casting sob exposição aos gases tolueno, THF e amônia em fluxo.

Apesar desse elevado valor de variância explicada, observa-se dificuldade na separação dos gases, refletida pela sobreposição do cluster correspondente ao THF, localizado na região inferior esquerda, com o centro da Amônia, evidenciando que a resposta do sensor não permite separação clara entre esses dois gases. Apenas o Toluol apresenta isolamento mais evidente, ocupando o canto superior direito do gráfico. Esses resultados sugerem que, embora a variância seja alta, a deposição por drop casting puro gera filmes menos organizados, resultando em menor seletividade e maior dispersão na resposta elétrica, aproximando regiões do THF e da Amônia em comparação aos filmes obtidos pela técnica LS.

Portanto, a análise de componentes principais (PCA) aplicada aos diferentes filmes e gases permite observar claramente o efeito da técnica de deposição na variabilidade dos dados e na capacidade de separação dos gases. Na Figura 13, referente aos filmes LS de nanotubos puros, três componentes principais explicam aproximadamente 98% da variância, e a projeção tridimensional revela clusters bem definidos: o Toluol no canto inferior esquerdo, o THF no centro e a Amônia no canto superior direito, indicando alta seletividade e respostas reproduzíveis. Já na Figura 14, considerando novamente os filmes LS puros, os dois primeiros componentes explicam cerca de 95% da variância, mostrando que praticamente toda a informação relevante pode ser representada em duas dimensões; o PC1 separa principalmente o Toluol, enquanto o PC2 distingue Amônia e THF, reforçando a eficiência da técnica LS na geração de padrões claros e discriminativos.

Para o filme LS misto com ácido esteárico, apresentado na Figura 15, apenas uma componente explica 83% da variância, indicando forte redundância nas variáveis medidas. Apesar da capacidade de separação ainda estar presente, observa-se maior sobreposição entre os clusters, com Toluol no canto inferior esquerdo, THF no canto superior direito e Amônia na região central, refletindo maior variabilidade e menor seletividade em comparação ao filme LS puro. Finalmente, para o filme obtido por drop casting puro, mostrado na Figura 16, uma única componente explica 98% da variância; contudo, os clusters apresentam sobreposição significativa, com THF invadindo a região central da Amônia e apenas o Toluol permanecendo parcialmente isolado no canto superior direito. Esses resultados evidenciam que, embora a variância explicada seja

elevada, a deposição por drop casting gera filmes menos organizados, comprometendo o agrupamento ideal dos gases.

4. Conclusões

A análise comparativa das diferentes técnicas de deposição apresenta evidências que a escolha do método exerce influência determinante sobre a organização estrutural e as propriedades funcionais dos filmes de nanotubos. Os resultados obtidos por PCA e AFM demonstraram que a técnica Langmuir-Schaefer (LS), aplicada a nanotubos puros, promovem maior uniformidade, menor rugosidade e melhor separabilidade nos agrupamentos de gases, refletindo a formação de uma rede mais organizada e contínua, com maior variância explicada e clareza na distinção entre os agrupamentos (clusters).

A inserção do ácido esteárico na deposição LS apresentou efeitos diferentes. Embora tenha favorecido a compactação e a estabilidade do filme, também resultou em aumento da rugosidade e em leve redução da condutividade elétrica, além de maior sobreposição entre clusters no PCA, possivelmente devido a formação de barreiras resistivas. Tais resultados indicam que a utilização de moléculas auxiliares deve ser cuidadosamente processada, de modo a equilibrar os benefícios estruturais e as limitações elétricas. Por sua vez, a deposição por drop casting, apesar da simplicidade de execução, resultou em filmes mais espessos. A baixa condutividade elétrica e a reduzida capacidade de separação observada no PCA confirmam a limitação desta técnica para aplicações que requerem controle morfológico e estabilidade funcional.

Portanto, os resultados obtidos permitem concluir que a técnica LS com nanotubos puros apresenta desempenho superior, ao se considerar organização estrutural, propriedades elétricas aprimoradas e maior capacidade de discriminação multivariada dos gases. Dessa forma, a otimização dos parâmetros de deposição pela técnica LS se mostra fundamental para o desenvolvimento de filmes funcionais aplicáveis em sensores e dispositivos eletrônicos.

5. Referências

- [1] P.A. NWOFE, A, Deposition and Characterisation of SnS Thin Films for Application in Photovoltaic Solar Cell Devices, 2013.
- [2] D.H. Vieira, N. Alves, Projeto de doutorado campo com eletrólito no gate para fotodetectores UV, (2020).
- [3] S. Malik, C.C. Tripathi, Thin Film Deposition by Langmuir Blodgett Technique for Gas Sensing Applications, *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 3 (2013) 235–241.
- [4] F. Schipani, D.R. Miller, M.A. Ponce, C.M. Aldao, S.A. Akbar, P.A. Morris, Electrical Characterization of Semiconductor Oxide-Based Gas Sensors Using Impedance Spectroscopy: A Review, *Rev. Adv. Sci. Eng.* 5 (2016) 86–105. doi:10.1166/rase.2016.1109.
- [5] J. Yu, C.C. Liu, Microfabricated thin film impedance sensor & AC impedance measurements, *Sensors*. 10 (2010) 5845–5858. doi:10.3390/s100605847.
- [6] T.A. Akbar, A. Javed, S. Ullah, W. Ullah, A. Pervez, R.A. Akbar, M.F. Javed, A. Mohamed, A.M. Mohamed, Principal Component Analysis (PCA)–Geographic Information System (GIS) Modeling for Groundwater and Associated Health Risks in Abbottabad, Pakistan, *Sustainability*. 14 (2022) 14572. doi:10.3390/su142114572.
- [7] J. Kang, A.K. Patterson, Principal component analysis of mRNA levels of genes related to inflammation and fibrosis in rats treated with TNBS or glutamine, *Inflamm. Bowel Dis.* 17 (2011) 1630–1631. doi:10.1002/ibd.21544.
- [8] S. Lima, R. Agosto, Métodos Multivariados Aplicados para Classificação de Azeite de Oliva Extra Virgem Métodos Multivariados Aplicados para Classificação de Azeite de Oliva Extra Virgem, (2017).
- [9] M.S.O. prakash, G. S, Principal Component Analysis - A Survey, *Ijarce*. 7 (2018) 63–66. doi:10.17148/ijarce.2018.7814.
- [10] M.R. Cavallari, J.E.E. Izquierdo, G.S. Braga, E.A.T. Dirani, M.A. Pereira-da-silva, E.F.G. Rodríguez, F.J. Fonseca, Enhanced Sensitivity of Gas Sensor Based on Poly(3-hexylthiophene) Thin-Film Transistors for Disease Diagnosis and Environment Monitoring, *Sensors* 2015, 15, 9592–9609, *Sensors*. 15 (2015) 1–9.
- [11] D. Volpati, Filmes nanoestruturados aplicados ao sistema de língua eletrônica : um estudo de interfaces eletrônica : um estudo de interfaces, impedância. 3. Filmes finos. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- [12] L.V. de L. Citolino, ; Edilene Assunção da Silva. Clarissa de Almeida Olivati., Hybrid and pristine polyalkylthiophene Langmuir-Schaefer films: Relationships of electrical impedance spectroscopy measurements, barrier properties and polymer nanostructure., *Mater. Sci. Semicond. Process.* 96 (2018) 296–305. doi:10.1016/j.mssp.2018.11.031.
- [13] V.J. Rodrigues de Oliveira, E. Assunção da Silva, M.L. Braunger, H. Awada, H. de Santana, R.C. Hiorns, C. Lartigau-Dagron, C. de Almeida Olivati, Molecular organization relationship of low-bandgap polymers at the air-water interface and in solid films, *J. Mol. Liq.* 268 (2018) 114–121. doi:10.1016/j.molliq.2018.07.018.
- [14] A. Pavinatto, A.C. Soares, B.B.M. Torres, Filmes Drop-Casting e Dip-Coating, in: *Nanotecnologia Apl. a Polímeros*, 2022: pp. 303–326. doi:10.5151/9786555502527-09.
- [15] V.J.R. de Oliveira, M.S. Borro, L. Rubim do Monte Jesus, M.L. Braunger, C. de A. Olivati, Using Langmuir-Schaefer deposition technique to improve the gas sensing performance of regiorandom polythiophene films, *Sensors and Actuators Reports*. 4 (2022) 0–5. doi:10.1016/j.snr.2022.100094.
- [16] W. Olthuis, W. Streekstra, P. Bergveld, Theoretical and experimental determination of cell constants of planar-interdigitated electrolyte conductivity sensors., *Sensors Actuators B*. 25 (1995) 252–256.
- [17] G. Cho, S. Azzouzi, G. Zucchi, B. Lebental, Electrical and electrochemical sensors based on carbon

- nanotubes for the monitoring of chemicals in water—a review, *Sensors*. 22 (2022). doi:10.3390/s22010218.
- [18] V. Müller, A. Hinaut, M. Moradi, M. Baljovic, T.A. Jung, P. Shahgaldian, H. Möhwald, G. Hofer, M. Kröger, B.T. King, E. Meyer, T. Glatzel, A.D. Schlüter, A Two-Dimensional Polymer Synthesized at the Air/Water Interface, *Angew. Chemie*. 130 (2018) 10744–10748. doi:10.1002/ange.201804937.
- [19] K. Przykaza, K. Woźniak, M. Jurak, A.E. Wiącek, R. Mroczka, Properties of the Langmuir and Langmuir–Blodgett monolayers of cholesterol-cyclosporine A on water and polymer support, *Adsorption*. 25 (2019) 923–936. doi:10.1007/s10450-019-00117-2.
- [20] H.C. Su, T.T. Tran, W. Bosze, N. V. Myung, Chemiresistive sensor arrays for detection of air pollutants based on carbon nanotubes functionalized with porphyrin and phthalocyanine derivatives, *Sensors and Actuators Reports*. 2 (2020) 100011. doi:10.1016/j.snr.2020.100011.
- [21] J. Kroutil, A. Laposa, A. Ahmad, J. Voves, V. Povolny, L. Klimsa, M. Davydova, M. Husak, A chemiresistive sensor array based on polyaniline nanocomposites and machine learning classification, *Beilstein J. Nanotechnol*. 13 (2022) 411–423. doi:10.3762/bjnano.13.34.

6. Atividades Realizadas no Período

6.1. Artigo publicado

- RODRIGUES, JÉSSICA S.; DE S. M. DE FREITAS, AMANDA; DE LIMA, LUCAS F.; LOPES, HENRIQUE S. M.; MACIEL, CRISTIANE C.; FRÉ, LUCAS V. B. V.; PIRES, ARIANE A. F.; DE LIMA, VITOR H.; OLIVEIRA, VINICIUS J. R.; DE A. OLIVATI, CLARISSA; FERREIRA, MARYSTELA; RIUL, ANTONIO; BOTARO, VAGNER R. *Synthesis of lignin-based carbon/graphene oxide foam and its application as sensors for ammonia gas detection*. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 268, p. 131883, 2024. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.131883.

6.2. Resumos expandidos publicados em anais de congressos

1. OLIVEIRA, VINICIUS J. R.; OLIVATI, C. A. *Nanotubos de carbono na forma de filmes finos para sensores de vapores*. Mostra Científica, Cultural e Tecnológica 2024 – IFSP, Presidente Epitácio, 2024.

6.3. Apresentações de trabalhos

1. OLIVEIRA, V. J. R.; PATZER, V. J. R. O.; ALVES, N.; OLIVATI, C. A. *Characterization of Carbon Nanotube Films for Applications in Electronic Device Interfaces*. 2025. (Conferência/Palestra).
2. OLIVEIRA, V. J. R.; BORRO, M. S.; OLIVATI, C. A. *Carbon nano surfaces and tubules applied as a gas sensor*. 2024. (Conferência/Palestra).
3. OLIVEIRA, V. J. R.; PATZER, V. J. R. O.; OLIVATI, C. A. *Nanotubos de carbono na forma de filmes finos para sensores de vapores*. 2024. (Simpósio).
4. SILVA, V. G. R. L.; OLIVATI, C. A.; RIGA JUNIOR, L. A.; PATZER, V. J. R. O.; OLIVEIRA, V. J. R. *Fabricação e caracterização de filmes de poli(2,5-dihexiloxi-1,4-fenilenovinileno) – (PPV)*. 2024. (Congresso).

5. MARTINS, M. H. A.; OLIVEIRA, V. J. R.; PATZER, V. J. R. O.; OLIVATI, C. A. *Filmes finos derivados de politiofenos para aplicação em dispositivos*. 2024. (Congresso).
 6. OLIVEIRA, V. J. R.; BORRO, M. S.; OLIVATI, C. A. *The organic electronics of carbon nanotubes aimed at electronic noses*. 2024. (Congresso).
 7. BORRO, M. S.; OLIVEIRA, V. J. R.; BRAUNGER, M. L.; LARTIGAU, C. D.; HIORNS, R. C.; OLIVATI, C. A. *Characterizations of Langmuir-Schaefer films of low-bandgap polymers*. 2023. (Congresso).
-

6.4. Participação em eventos, congressos, exposições e feiras

1. 12^a Mostra Científica 2024 – *Nanotubos de carbono na forma de filmes finos para sensores de vapores*. 2024.
2. E-MRS Spring Meeting 2024 – *The organic electronics of carbon nanotubes aimed at electronic noses*. 2024.
3. XXXVI Congresso de Iniciação Científica da Unesp – *Filmes finos derivados de politiofenos para aplicação em dispositivos*. 2024.
4. Workshop Instituto Nacional de Eletrônica Orgânica (INEO). 2024.
5. XXXVI Congresso de Iniciação Científica da Unesp – *Fabricação e caracterização de filmes de PPV*. 2024.
6. XXXVI Congresso de Iniciação Científica da Unesp – Avaliador. 2024.
7. Workshop INEO – *Carbon nano surfaces and tubules applied as a gas sensor*. 2023.
8. XXXV Congresso de Iniciação Científica da Unesp – Avaliador. 2023..