



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA**

**LUAN FILLIPE SILVA MOREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES DE PANI/ZnO OBTIDOS POR  
POLIMERIZAÇÃO SUPERFICIAL PARA APLICAÇÃO COMO CÉLULAS  
SOLARES.**

**LAVRAS  
2022**

**LUAN FILLIPE SILVA MOREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES DE PANI/ZnO OBTIDOS POR  
POLIMERIZAÇÃO SUPERFICIAL PARA APLICAÇÃO COMO CÉLULAS  
SOLARES.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para obtenção do Título de Bacharel.

**PROF. DR. JÚLIO CÉSAR UGUCIONI**

**ORIENTADOR**

**LAVRAS  
2022**

## Agradecimentos

A Deus por ter me concedido a oportunidade de viver a graduação de maneira digna e proveitosa, me tornando Engenheiro de Materiais pela UFLA.

A meus familiares, pelo apoio durante todo o processo. Seja por meio de motivação ou recursos, sempre estiveram ao meu lado.

A minha tia bisavó, Terezinha, cuja é a responsável por grande parte da minha educação e moral, sendo um exemplo de vida para mim.

A meu avô, Wenceslau, o qual me ensinou a dignidade, responsabilidade e trabalho duro.

A minha avó, Maristela, a qual nunca me incentivou todos os dias e me fortaleceu como homem, conhecendo o amor incondicional.

A minha mãe, Thayná, a qual é a maior representatividade de um ser humano de luz para mim na terra. Além de me fornecer todo apoio e amor do mundo.

A minha Tia, Thatyana, a qual tenho com símbolo de fé e sempre me colocou em suas orações.

A minha irmã, Júlia, a qual se faz força motriz de todo meu empenho e luta.

A minha madrinha, Niliandra, a qual sempre ajudou meus familiares e a mim em todas as atividades.

Aos meus professores que tanto me ensinaram e me ajudaram a tornar um excelente profissional. Em especial aos professores: Júlio César Ugucioni, Juliano Elvis de Oliveira, Alfredo Rodrigues de Sena Neto e Livia Elisabeth Vasconcellos de Siqueira Brandão Vaz. Os quais são os responsáveis pelo desejo, motivação e inspiração por ciência dos materiais.

A todos os meus amigos e companheiros de graduação que contribuíram com os melhores anos da minha vida. Sem vocês, nada seria tão especial.

Meus agradecimentos a todos. Apenas com o apoio de vocês este trabalho foi possível de ser executado.

**MUITO OBRIGADO!**

## Resumo

A crescente demanda de novas soluções de geração de energia a partir de meios ambientalmente corretos, fez com que pesquisadores e cientistas do mundo todo buscassem por soluções economicamente viáveis. A partir disso, originou-se uma gama de pesquisas em células solares de baixo custo e alto desempenho, com implementação de novos materiais fotocatalíticos, fotocondutores e semicondutores. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi produzir filmes compósitos de polianilina (PANI) e óxido de zinco (ZnO), combinando a capacidade do ZnO em absorção de energia da luz solar com a condutividade elétrica da PANI em sua forma de esmeraldina como possível aplicação em células solares de 3ª geração. Foram produzidos filmes finos a partir da metodologia de síntese de polimerização *in situ* ou superficial. Além disso, as amostras foram caracterizadas por espectroscopia RAMAN, espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e técnicas de medição das propriedades elétricas. Em relação à morfologia, os filmes apresentaram bom aspecto com distribuição da PANI bastante homogênea, sendo possível encontrá-la por toda extensão do filme. Os filmes apresentaram bandas na região de  $1.305\text{ cm}^{-1}$  do infravermelho, o que indica a forma como sal de esmeraldina da PANI. Além disso, foi possível observar bandas na região de  $890\text{ cm}^{-1}$  a  $500\text{ cm}^{-1}$ , indicando a presença de ZnO no compósito. As amostras obtiveram uma razão  $R_{QB}$  de aproximadamente 1, o que indica uma boa condutividade do material. Além disso, este trabalho traz discussões sobre a condutividade em escuro dos materiais testados, espectroscopias dos filmes e materiais puros e possíveis melhorias de processos, bem como perspectivas para o sucesso de trabalhos futuros.

**Palavras-Chave:** polianilina, semicondutores, polímero condutor, célula solar

## Abstract

The growing demand for new solutions for energy generation from environmentally friendly means has led researchers and scientists around the world to search for economically viable solutions. From this, a range of research into low-cost and high-performance solar cells originated, with the implementation of new photocatalytic, photoconductive, and semiconductor materials. In this context, the objective of this work was to produce composite films of polyaniline (PANI) and zinc oxide (ZnO), combining the ability of ZnO to absorb energy from sunlight with the electrical conductivity of PANI in its emeraldine form as a possible application in 3rd generation solar cells. Thin films were produced from in situ or surface polymerization synthesis methodology. In addition, the samples were characterized by RAMAN spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and electrical properties measurement techniques. Regarding morphology, the films presented good aspect with a very homogeneous distribution of PANI, being possible to find it throughout the film extension. The films presented bands in the region of 1,305  $\text{cm}^{-1}$  of the infrared, which indicates the emeraldine salt form of PANI. In addition, bands could be observed in the region of 890  $\text{cm}^{-1}$  to 500  $\text{cm}^{-1}$ , indicating the presence of ZnO in the composite. The samples obtained an  $R_{\text{QB}}$  ratio of approximately 1, which indicates a good conductivity of the material. In addition, this work brings discussions on the dark conductivity of the tested materials, spectroscopies of the pure films and materials, and possible process improvements as well as perspectives for successful future work.

**Keywords:** polyaniline, semiconductor, conducting polymer, solar cell



## Lista de Abreviaturas

ZnO	óxido de zinco
HCl	hidrocloro
NaOH	hidróxido de Sódio
GaAs	arseneto de gálio
CdTe	telureto de cádmio
TiO <sub>2</sub>	dióxido de titânio
Nb	nióbio
N	nitrogênio
I	índio
Si	silício
Al	alumínio
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de ítrio
Ni <sup>2+</sup>	cátions de níquel
WO <sub>3</sub>	óxido de tungstênio
C	Carbono
H	Hidrogênio

## Lista de Figuras

Figura 1 - Tipos de Geração de Energia Renovável. Fonte: do autor. ....	3
Figura 2 - Mecanismo de Polimerização da Polianilina. Fonte: do autor.....	8
Figura 3 - Mero da Polianilina. Fonte: do autor. ....	8
Figura 4 - Reações de redução do nitrato de zinco em óxido de zinco pelo método de precipitação em solução. Adaptada de: (BIRON; SANTOS; BERGMANN, 2020).....	11
Figura 5 - Solução para obtenção de ZnO em agitação magnética e aquecimento. ....	13
Figura 6 - ZnO após filtragem e sacagem.....	14
Figura 7 - Filmes após polimerização da PANI. ....	16
Figura 8 - Filmes após lavagem e banho de HCl.....	16
Figura 9 - Aparato experimental para as análises de condutividade e fotocondutividade. a) ponteiras, b) multímetro e c) fonte. ....	18
Figura 10 - Micrografia óptica da amostra PANI.....	19
Figura 11 - Micrografia óptica da amostra PZ14. ....	19
Figura 12 - Micrografia óptica da amostra PZ28. ....	20
Figura 13 - Micrografia óptica da amostra PZ56. ....	20
Figura 14 - Micrografia óptica da amostra PZ28 com “raspagem” do substrato separando o filme em duas partes. ....	21
Figura 15 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PANI. ....	22
Figura 16 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PZ14.....	23
Figura 17 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PZ28.....	23
Figura 18 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PZ56.....	24
Figura 19 - Micrografia eletrônica de Varredura para as amostras a) PANI, b) PANI/ZnO 14 mg, c) PANI/ZnO 28 mg e d) PANI/ZnO 56 mg. ....	24
Figura 20 - Espessura média dos filmes produzidos. Espessura da amostra PZ28. ....	25
Figura 21 - Gráfico de Barras com a Espessura Média de cada filme produzido. ....	25
Figura 22 - Fluxo de <i>Data Analysis</i> utilizando a linguagem python para o tratamento dos dados.....	26
Figura 23 - Espectrografia na região do Infravermelho para amostras PANI e PANI/ZnO. ....	27
Figura 24 - Espectrografia da Região do Infra-vermelho para PANI e PANI/ZnO com aproximação na região de baixo comprimento de onda. ....	29



Figura 25 - Espectros Raman das amostras de ZnO produzidas em 30, 60 e 120 min em diferentes faixas: a) 250 a 1000 $\text{cm}^{-1}$ e b) 1000 a 1700 $\text{cm}^{-1}$ .....	29
Figura 26 - Espectroscopia Raman das amostras de PANI e PZ56.....	31
Figura 27 - Amostra de PZ28. A) Essa imagem mostra a varredura indicando recobrimento dos substratos b) resultado do espectro da varredura.....	32
Figura 28 - Curva tensão-corrente (VxI) para a amostra de PANI.....	33
Figura 29 - Curva tensão-corrente (VxI) para a amostra PZ14. ....	33
Figura 30 – Curva de tensão-corrente (VxI) para a amostra PZ28.....	34
Figura 31 - Curva tensão-corrente (VxI) para a amostra PZ56. ....	34
Figura 32 - Condutividade de escuro para as amostras de PANI e PANI/ZnO. a) Comparação entre as todas as amostras. b) Gráfico da dependência do tempo de produção do ZnO em função da condutividade de escuro. c) Gráfico da dependência da massa de ZnO na condutividade. ....	36

## Lista de Siglas

APS Persulfato de Potássio

DBSA Ácido dodecilbenzeno sulfônico

DSSC materiais sensibilizados por corantes

FTIR Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

IDE Integrated Development Environment

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MO Microscopia Óptica

PANI Polianilina

PSC Peroviskta

RQB Razão Quinóide Benzeno

## Lista de Símbolos

A	Ampere
cm	centímetro
eV	Eletro Volt
I	Corrente
M	Molar
mA	Miliampere
mg	miligrama
mL	mililitros
mM	milimolar
mS/m	Milisiemens por metro
nm	nanômetros
°C	Graus Celsius
R	Resistência
S	siemens
Scm <sup>-1</sup>	siemens por centímetro
V	Volt
w	espessura
μL	microlitros
Ω	ohms
π	Pí

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Nomeclatura das amostras em relação à concentração de ZnO. ....	15
Tabela 2 - Razão entre a intensidade dos picos $1.498\text{ cm}^{-1}$ e $1.583\text{ cm}^{-1}$ . ....	28
Tabela 3 - Resultados da intensidade relativa entre os picos da região de $890\text{ cm}^{-1}$ e anéis quinoides. ....	28
Tabela 4 - Raman Shift ( $\text{cm}^{-1}$ ) das amostras de ZnO. ....	30

# Sumário

1. Introdução .....	1
2. Objetivos .....	2
2.1. Objetivos Gerais .....	2
2.2. Objetivos Específicos.....	2
3. Revisão da Literatura .....	3
3.1. Fontes de Energia Renováveis.....	3
3.2. Célula Solar.....	4
3.3. Polianilina .....	6
3.4. Óxido de Zinco.....	10
4. Materiais e Métodos .....	13
4.1. Síntese e Caracterização do ZnO.....	13
4.2. Síntese da PANI e PANI/ZnO e obtenção dos filmes por polimerização superficial. ...	14
4.3. Microscopia Óptica (MO) .....	16
4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	17
4.5. Espectroscopia da Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) ...	17
4.6. Espectroscopia RAMAN.....	17
4.7. Propriedades Elétricas.....	17
5. Resultados e Discussão .....	18
5.1. Análise de Microscopia Ótica .....	18
5.2. Micrografia Eletrônica de Varredura.....	21
5.3. Análise de Espectroscopia FTIR .....	26
5.4. Análise de Espectroscopia RAMAN .....	29
5.5. Propriedades Elétricas.....	32
6. Conclusão.....	37
7. Perspectivas.....	38
8. Anexos .....	39
Referências.....	41

## 1. Introdução

A busca e estudo de novos materiais compósitos com diferentes aplicações tem sido foco das atuais pesquisas. Uma das áreas de investigação é a de conversão de energia que visa buscar materiais com propriedades específicas para serem usados como células fotovoltaicas, abrangendo a utilização e barateando o custo desse dispositivo (D'AVINO et al., 2016; YU et al., 2016). No entanto, os materiais e filmes utilizados nesses dispositivos ainda são obtidos por meio de técnicas que elevam o custo final do produto. Outro desafio está na aplicação de materiais orgânicos na conversão de energia visto que, somente materiais inorgânicos têm sido encontrados no mercado, sendo poucos os encontrados com tais materiais. O maior desafio no uso de materiais poliméricos nessa área está nos efeitos de fotodegradação, que diminuem em muito a vida útil das células fotovoltaicas (D'AVINO et al., 2016; LEE; CHO; YI, 2016).

Um material compósito é definido como um material com diferentes fases que exibe uma proporção de dois materiais distintos combinando as propriedades de ambos materiais e gerando um terceiro material com características específicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2011). Nesse trabalho, obteve-se filmes compósitos com matriz polimérica de PANI/ZnO por meio da técnica de polimerização superficial com adaptações do trabalho de Park, Jan e Kim (PARK; JANG; KIM, 2018a). A utilização da PANI nessa pesquisa está pautada em que esse polímero é considerado um dos principais polímeros semicondutores e que pode tornar-se condutor, dependendo da dopagem durante o processo de síntese (BROOMS et al., 2018; ZHU et al., 2014). O ZnO foi utilizado devido à capacidade de absorção de energia solar na região de luz visível do espectro. Sendo assim, esperou-se uma ótima combinação entre as propriedades de absorção e condução do ZnO e PANI, respectivamente. O ZnO foi sintetizado por meio do trabalho na literatura modificado do Alves e colaboradores (ALVES et al., 2011), onde os autores se utilizam do método de obtenção desse óxido em solução.

A importância do estudo de compósito PANI/ZnO se reflete no número de publicações. Em uma breve busca no site Web of Science constatou-se que somente 31 artigos com esses materiais foram publicados em 2022 (AHMAD et al., [s.d.]; ALMASOUD et al., 2022; ALTHOMALI et al., 2022; ARIFIN et al., 2022; BALAKRISHNAN et al., [s.d.]; BENABDELLAH et al., 2022a; CHEN et al., 2022; DEMIREL; BOZKURT, 2022; GELAW; SAROJINI; KODOTH, [s.d.]; GU et al., 2022;

HADIZADEH; NASIRIAN, 2022; HUANG et al., 2022; JING et al., 2022; JOSHI, [s.d.]; KARERI et al., [s.d.]; KHAN et al., [s.d.]; KYOMUHIMBO et al., 2022; LIU et al., [s.d.]; MURUGESAN et al., 2022; NARANGAMMANA et al., [s.d.]; NASIRIAN; HADIZADEH, 2022; NAZIR et al., [s.d.]; NIKNEZHAD et al., 2022; OKPARA et al., 2022; PALSANIYA; MUKHERJI, 2022; PATHAK; SINGH, [s.d.]; PRASANNA et al., 2022; REHMAN et al., 2022; WANG et al., [s.d.]; ZAFAR et al., [s.d.]; ZARE et al., 2022), sendo dentre esses trabalho somente 2 sobre o tema de células solares (BENABDELLAH et al., 2022b; ZAFAR et al., [s.d.]) reforçando a importância na busca de materiais mais adequados para essa aplicação. Além disso, poucos trabalhos abordam a obtenção desse material compósito por meio da polimerização superficial.

Nesse sentido, nesse trabalho objetivou-se a obtenção de filmes de PANI/ZnO como potencial aplicação em células solares. Para a caracterização, foram utilizadas as técnicas morfológicas: Microscopia Óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura; estruturais: RAMAN, FTIR; e, elétricas: condutividade e fotocondutividade.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivos Gerais

O objetivo principal desse trabalho foi o estudo de filmes compósitos de PANI/ZnO, sintetizados por meio da polimerização superficial, como potencial aplicação como células solares.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Obtenção do ZnO por meio da síntese de solução;
- Obtenção de filmes de PANI e PANI/ZnO por meio da técnica de polimerização superficial;
- Caracterização estrutural do ZnO por meio do RAMAN;
- Caracterização morfológica dos filmes por meio das técnicas de Microscopia óptica e MEV;
- Caracterização estrutural dos filmes por meio das técnicas de FTIR e RAMAN;
- Caracterização elétrica dos filmes por meio de testes de condutividade.

### 3. Revisão da Literatura

#### 3.1. Fontes de Energia Renováveis

Devido à necessidade de se reduzir os impactos da geração de energia por meio de combustíveis fósseis, a busca por novas formas de geração de energia é constante, principalmente atualmente, pois se preza muito por um mundo mais limpo e sustentável. Com isso, no ramo de novas soluções para geração de energia renovável há 6 grandes classes de geração de energia, conforme Figura 1 a seguir (ELLABBAN; ABU-RUB; BLAABJERG, 2014).

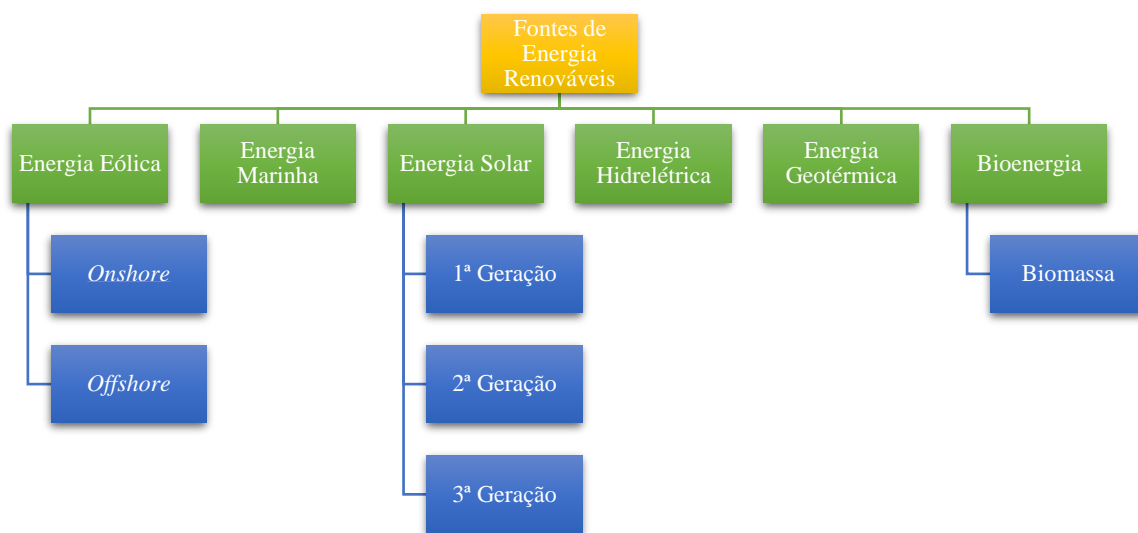


Figura 1 - Tipos de Geração de Energia Renovável.

Fonte: do autor.

Nesse sentido, para a geração de energia a fonte eólica utiliza-se dos ventos, a marinha utiliza as ondas do mar, a solar usa os raios solares, a hidrelétrica é por meio de barragens em rios, a geotérmica do próprio calor da terra e a bioenergia por meio da queima de biomassa. Dentre todas, a tecnologia que mais se destaca no Brasil é a de geração de energia por meio de hidrelétricas, devido a vasta bacia hidrográfica do país. Porém, para construção de barragens há um impacto socioambiental muito grande devido ao desvio de cursos de rios e supressão de fauna e flora nos locais onde ocorre o alagamento, prejudicando então a vida nativa daquela área. Além disso, o número de rios está se esgotando, o que reduz a construção de novas barragens. E um outro fator prejudicial é que em épocas de secas, algumas usinas têm a geração reduzida drasticamente (CASTELLO; MACEDO, 2016).



Nesse quesito, uma das fontes que se destaca é a geração de energia por meio das placas fotovoltaicas. Isso devido ao fato de que são de fácil instalação e manutenção, podem ser implementadas em casas domésticas, pátios e até mesmo tetos de carros e, não possuem regiões específicas para instalação, como por exemplo a eólica que tem melhor desempenho na região nordeste do país (condições de ventos favoráveis). Porém, essas placas ainda são de alto custo (poder aquisitivo classe A e B) e o rendimento quando comparado a hidrelétricas é relativamente baixo (RABAIA et al., 2021).

Com isso, novas pesquisas estão sendo realizadas com intuito de propor novos materiais semicondutores e fotoresistores que sejam de baixo custo e com uma melhoria no rendimento para aplicação nas células solares. Sendo assim, esse mercado poderá atender todas as classes, reduzir os impactos ambientais e promover um avanço no ramo das energias renováveis.

### 3.2. Célula Solar

No ramo das energias renováveis, as células solares uma das mais utilizadas devido à utilização de um dos maiores recursos de energia disponível (o sol), crescente capacidade de geração de energia, fácil instalação e manutenção. Tais células são dispositivos eletrônicos capazes de transformar a radiação solar em energia elétrica pelo fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico (BRITO, 2005).

O efeito fotovoltaico é quando um material semicondutor gera uma corrente elétrica ao ser excitado pelos fótons da radiação solar. Essa energia oriunda dos raios solares é maior que a energia de *bandgap* desses materiais, sendo capaz de excitar os elétrons da banda de valência, promovendo o salto para a banda de condução. A célula é formada por uma camada de contato metálico, uma camada de semicondutor tipo *n* e uma tipo *p* e um contato substrato que pode ser de material polimérico. Na junção *pn*, cujo nome dado é região de depleção, há de difusão de cargas do lado *n* para o lado *p*, gerando no lado *p* uma pequena camada com cargas negativas e no lado *n*, uma pequena camada de cargas positivas. Nessa região, ocorre o efeito fotovoltaico na presença de fótons, que excitam cargas gerando pares elétron-lacuna. (MOREIRA, 2017).

Nesse sentido, as células solares são subdivididas em três gerações. A primeira geração são as células a base de silício, mono ou policristalino; as de segunda são conhecidas como células de filmes finos que são a base o silício amorfo, arseneto de gálio (GaAs), telureto de cádmio (CdTe) etc; e, as de terceira geração que têm sido

utilizado materiais sensibilizados por corantes (DSSC), *Peroviskta* (PSC) e pontos quânticos (*quantum dots*) (RABAIA et al., 2021). O material desse trabalho é de terceira geração.

Para as células de 1ª geração, as que são feitas com silício policristalino são mais acessíveis, porém menos eficazes (em torno de 15%). Ao passo que, as que são feitas com silício monocristalino são mais caras e mais eficientes (em torno de 16 a 22% em escala comercial) (MUTERI et al., 2020). Em relação às de 2ª geração que também utilizam silício, porém amorfo, possuem uma queda de cerca de 8% a 14% de eficiência, quando comparadas com as de 1ª geração (MUTERI et al., 2020). Porém, as que possuem GaAs podem chegar a 29% (em escala laboratorial), mas possuem o custo de produção mais elevado (GREEN et al., 2018). Por fim, as células de 3ª geração feitas com PSC possuem uma boa eficiência e custo de produção menor, quando comparadas às de silício, porém podem degradar facilmente quando expostas a muito calor ou muito frio (MUTERI et al., 2020). Já as feitas de DSSC possuem a vantagem de serem flexíveis, não poluentes e recicláveis. Além de conseguirem trabalhar bem com baixa luminosidade. Porém, por ser fabricada de solventes orgânicos, é necessária uma boa vedação para que evite problemas na fonte de alimentação (GREEN et al., 2018). Com relação às fabricadas de pontos quânticos por sua vez possuem uma fácil produção, porém, baixa eficiência (GUL; KOTAK; MUNEEER, 2016).

Nesse mercado, diversas pesquisas estão sendo realizadas com intuito de aprimorar as células solares e reduzir o custo dos materiais. Baktash e colaboradores (BAKTASH; AMIRI; SAADAT, 2020) estudaram o efeito da concentração de nióbio (Nb) na camada de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) em células solares de *peroviskta*. Além disso analisaram também a espessura do filme e da temperatura operacional. Concluíram que as células em que o TiO<sub>2</sub> fora dopado com Nb apresentaram maior estabilidade e eficiência a temperaturas mais altas em relação ao TiO<sub>2</sub> puro, devido à combinação das propriedades dos materiais. Parcham e Miandoab (PARCHAM; MIANDOAB, 2020) analisaram filmes finos de células solares de pontos quânticos coloidais propondo padrões nanoestruturais com intuito de melhorar o desempenho dos filmes. Observaram que houve um aumento de 15,95% na densidade de corrente de curto-circuito, favorecendo o melhor desempenho dos filmes. Isso pode ter ocorrido devido à maior interação com a radiação dos pontos quânticos e das células nanoestruturadas. LV e colaboradores (LV et al., 2020) realizaram um estudo de células solares de filmes finos de TiO<sub>2</sub> co-dopados

com nitrogênio (N), iodo (I) e nitrogênio-iodo (N-I) que atuam como bloqueadores de elétrons. Observaram que, com a dopagem, a eficiência de conversão das células aumentou em 17,67% e com aprimoramento significativo na densidade de corrente curto-circuito e fotovoltagem (para os filmes com dopagem N-I). Essa melhoria pode ter sido devido os dopantes aprimorarem o processo de recombinação elétron-lacuna. Shakir e colaboradores (SHAKIR et al., 2020) estudaram os efeitos de deposição eletroforética de várias etapas (EPD) melhorando a morfologia de filmes finos de  $\text{TiO}_2$ , produzindo filmes de alta qualidade. Além disso, fora depositado estanho (Sn) na superfície com intuito de melhorar a absorbância dos filmes. Observou-se que a EPD produziu filmes de alta qualidade. Além disso, o Sn aumentou a foto-absorção e dobrou eficiência das células solares.

Zhao e colaboradores (ZHAO et al., 2022) realizaram um estudo da eficiência teórica de filmes finos de heterojunção de silício cristalino e óxido de zinco (c-Si/ZnO) aprimorado por ressonância plasmônica de superfície. Como resultado obtiveram uma absorção média em todo espectro (300 – 1400 nm) de 93,16%. O ZnO possui forte influência neste incremento devido aos seus modos fotônicos. Além disso, encontraram uma densidade de corrente de  $41,94 \text{ mA cm}^{-2}$  e uma eficiência de 18,97% de conversão de energia. Tal trabalho vai de encontro às células solares de 1ª geração e demonstrou resultados de eficiência próximos aos citados anteriormente para esta classe. Gultepe e Atay (GULTEPE; ATAY, 2022) realizaram um estudo de melhoria das propriedades elétricas e fotocatalíticas do ZnO, com incorporação de alumínio (Al). Observaram um *Band gap* médio de aproximadamente 3,30 eV e concluíram que o incremento do Al não favorece mudanças no *Band Gap* do ZnO. Isso pode estar relacionado a incapacidade do defeito criado de deslocar a nuvem eletrônica do ZnO. Observaram também que o incremento de Al fez com que a condutividade aumentasse  $10^4$  vezes, levando a resistividade do material de  $3,57 \times 10^2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  para  $5,08 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ . Isso pode estar relacionado ao aumento de transportadores causado pelo incremento de defeitos, aumentando o número de recombinações e conseqüentemente, a condutividade.

### 3.3. Polianilina

A busca por novos materiais semicondutores de baixo custo é incessante. Neste contexto, a polianilina (PANI) é o polímero condutor mais comum e amplamente utilizado devido à sua capacidade de condução, fácil obtenção e síntese, baixo custo, alta

estabilidade térmica, estabilidade ambiental e facilmente dopada por alguns ácidos (KAUSAR, 2020; KUMARI JANGID; JADOUN; KAUR, 2020a; LANZALACO; MOLINA, 2020; NAZIR, 2020).

A PANI pode ser obtida por diversas rotas de sínteses: química, eletroquímica, interfacial, *in situ* (superficial), entre outras (KAUSAR, 2020; KUMARI JANGID; JADOUN; KAUR, 2020a). Para síntese química é preciso a utilização da anilina (monômero), de um agente iniciador (persulfato de amônio – APS) e um agente dopante, que normalmente é um ácido (ácido clorídrico - HCl) (GUSAIN; NAGARAJAN; SINGH, 2019; KUMARI JANGID; JADOUN; KAUR, 2020a). Para a formação de filmes finos, a síntese eletroquímica é a mais utilizada pois pretende-se ter filmes com boa qualidade morfológica e com grande área superficial (ALDISSI, 2013; BOROLE et al., 2003). O processo ocorre pela deposição eletroquímica da PANI em um eletrodo e possui vantagens em relação ao químico por ser uma forma mais econômica, por não precisar de um iniciador, por obter filmes finos homogêneos e de maior qualidade (GUSAIN; NAGARAJAN; SINGH, 2019; KUMARI JANGID; JADOUN; KAUR, 2020a). A polimerização interfacial acontece a partir do contato de uma fase aquosa (HCl e APS) e uma fase orgânica (Anilina e Tolueno) com razão molar monômero (anilina) iniciador (APS) 1:1, para que ocorra a maior eficiência de polimerização. A partir do contato na interface, a anilina começa a polimerizar e migrar para fase aquosa formando micelas ou até mesmo nanofibras (LI et al., 2013; WANG, 2018; WU et al., 2019; XIONG et al., 2019). A polimerização *in situ* (superficial) pode ser realizada com a utilização de um agente surfactante que também atuará como dopante (ácido dodecilbenzeno sulfônico - DBSA). Prepara-se duas soluções: uma com anilina e DBSA; outra com HCl e APS. Em um substrato devidamente lavado, deposita-se uma alíquota das duas soluções e o APS inicia a polimerização da anilina, que se deposita no substrato após 15 minutos de reação (ALVES et al., 2011; WANG, 2018).

O mecanismo de polimerização que acontece durante a síntese da PANI é de polimerização em cadeia (catiônica), de forma que a anilina é o reagente limitante. A etapa de óxido-redução da polimerização oxidativa da anilina, envolve a formação do cátion radical anilínio via transferência de elétrons de valência do nitrogênio anilínico, em meio ácido (ĆIRIĆ-MARJANOVIĆ, 2013). Após o aparecimento do cátion anilínio, segue-se então, a formação de dímero. Com estes cátions formados podem ocorrer à desprotonação, isomerização ou a recombinação. A formação de dímeros depende das

condições para acoplamento. Em condições levemente ácidas, o acoplamento é cabeça-cauda, a estrutura é denominada de p-aminodifenilamina (ADPA) (LIAO; LI; XU, 2019). Em meio fortemente ácido, a estrutura é a benzidina, onde o acoplamento é cauda-cauda. Após a formação dos dímeros ocorre nova oxidação e origina novo cátion radical. Desse modo, o próximo passo, é o da reação com a molécula de anilina para produzir trímeros, para desencadear a polimerização da PANI (KUMARI JANGID; JADOUN; KAUR, 2020b). A figura 2 a seguir ilustra este mecanismo em suas 3 etapas: Iniciação, Ataque ao 1º Monômero e Propagação, ao passo que a figura 3 ilustra o mero da PANI.

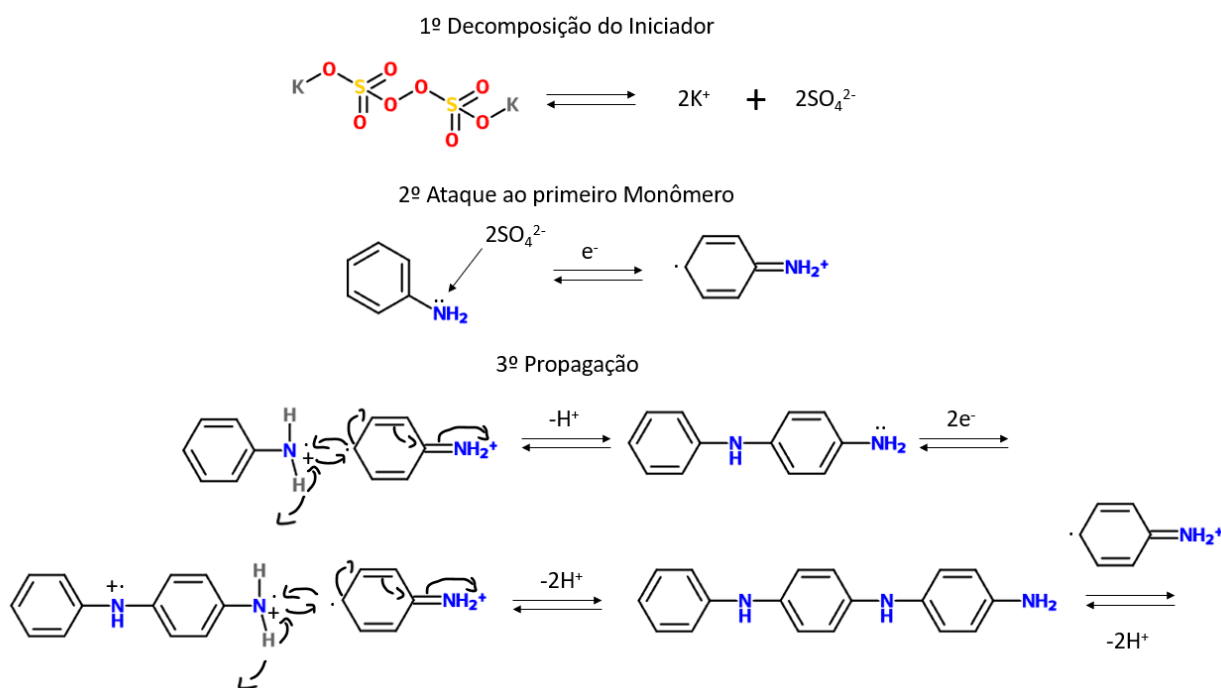


Figura 2 - Mecanismo de Polimerização da Polianilina.

Fonte: do autor.

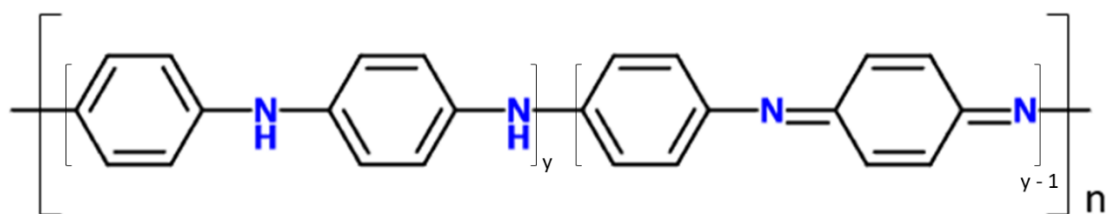


Figura 3 - Mero da Polianilina.

Fonte: do autor.

Diversos estudos vêm sendo utilizados com a implementação da PANI como sensores. Zhang e colaboradores, (ZHANG et al., 2020) desenvolveram um sensor filme flexível, para detectar amônia, de polianilina e estrôncio, germânio, oxigênio ( $\text{SrGe}_4\text{O}_9$  - PSN) pelo método de polimerização *in situ*. Observaram que os filmes de PSN obtiveram uma resposta duas vezes maior e três vezes mais rápida que os de PANI. Os resultados obtidos foram oriundos da a estrutura exclusiva do filme de PSN e a formação de uma heterojunção *p-n*. Chethan e colaboradores, (CHETHAN et al., 2020) desenvolveram um sensor de umidade a partir de um compósito de PANI e Óxido de Ítrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) por polimerização *in situ* e com agitação mecânica. As amostras com maior concentração de  $\text{Y}_2\text{O}_3$  mostraram melhor desempenho em detectar a umidade. O trabalho mostrou que a mistura mecânica simples (sem temperatura e pressão) pode ser benéfica para melhores resultados de detecção. Isso pode ser oriundo de uma boa mistura dos componentes. Yang e colaboradores, (YANG et al., 2020) desenvolveram um sensor de amônia em temperatura ambiente a partir de filmes de polianilina e fluoreto de polivinilideno (PANI/PVDF) por polimerização *in situ*. O filme mostrou uma estrutura porosa o que melhorou a sensibilidade à amônia, além de ter apresentado boa flexibilidade. Mostrou-se um potencial para monitoramento ambiental em tempo real. O método de produção dos filmes mostrou que é simples e eficiente na obtenção de filmes compósitos de PANI.

Além de sensores, a PANI possui forte potencial para aplicação em fabricação de novas células solares. Babaei e colaboradores, (BABAEI et al., 2020) desenvolveram uma camada de revestimento feita de PANI e nanopartículas de ouro (Au) e prata (Ag). As amostras mostraram resistência elétrica e transparência. Além disso, a eficiência de conversão fora aumentada em 74% em relação a outros dispositivos. Este aumento está relacionado com a capacidade de maior absorção de energia luminosa, geração de estados excitados e maior condutividade por parte da implementação das nanopartículas metálicas. Bayram e colaboradores, (BAYRAM et al., 2020) desenvolveram filmes finos compósitos de Grafeno/PANI para aplicação de contra eletrodos e avaliaram o efeito fotovoltaico em células solares sensibilizadas por corante (DSSC). As amostras mostraram maior eficiência em transferência de carga. Esses resultados mostram que o compósito é um ótimo substituto para os eletrodos de platinas (utilizados atualmente). Bu e colaboradores, (BU et al., 2020) desenvolveram um filme compósito de cobre, alumínio, oxigênio e polianilina ( $\text{CuAlO}_2$ /PANI) pelo método de eletropulverização em células solares de peroviskta. A combinação de  $\text{CuAlO}_2$  e PANI mostrou uma melhora

na formação de lacunas, formação de uma camada fina de transporte entre lacunas/peroviskta (região de depleção), aumentando a eficiência de 80% na conversão de energia. O material obtido se mostrou com grande potencial para aplicação em formadores de lacunas (dopantes tipo *p*) em células solares. Utami e colaboradores, (UTAMI et al., 2020) desenvolveram PANI nanoestruturadas pela polimerização interfacial utilizando um surfactante não iônico. Os resultados mostram que valores entre 2% a 6%p de surfactante alcança maior eficiência de conversão de energia. As nanoestruturas formadas são de sal esmeraldina que possui boa condutividade, porém não é a forma mais estável. Forneceu uma eficiência de conversão de 1,7% devido a sua morfologia que proporciona melhor interação com a luz.

Farzin e colaboradores (FARZIN et al., 2018) realizaram um trabalho com a obtenção de um compósito de PANI/ZnO para aplicação em células solares híbridas. Observaram que ao aumentar a porcentagem de nanopartículas de ZnO no compósito, houve um aumento significativo na densidade de corrente e tensão. Isso pode ter ocorrido devido à boa absorção luminosa dos componentes e uma boa dispersão do ZnO na matriz.

### 3.4. Óxido de Zinco

O óxido de zinco é um composto inorgânico que faz parte da classe dos cerâmicos. É um material pouco solúvel em água, porém, solúvel em ácidos. Possui propriedades antifúngicas e é um semicondutor do tipo n com *bandgap* 3,37 eV. Possui alto ponto isoelétrico e fotocatalise à temperatura ambiente formando pares de elétrons (-) e lacunas (+) (CHAYA et al., 2014; KIM; KIM; SUNG, 2012; POLITI et al., 2015; VITER et al., 2014, 2015; ZHAO et al., 2013). É um material que se cristaliza no sistema cúbico da blenda de zinco ou com estrutura hexagonal (*wurtzite*) (MARGUERON et al., 2016a; NIMBALKAR; PATIL, 2017). Além disso, detém de uma alta densidade (5,6 g/cm<sup>3</sup>) e alto ponto de fusão (~1790°C).

Para a obtenção de ZnO, há diversas metodologias que já foram estudadas e ainda continuam sendo, tais como: precipitação em solução aquosa (JITIANU; GOIA, 2007), sol-gel (SPANHEL, 2006), hidrotermal (HU; CHEN, 2008), *spray pyrolysis* (MOHAMMAD; HASHIM; AL-MAAMORY, 2006) e precipitação *double-jet* (ZHONG; MATIJEVIĆ, 1996).

O método de obtenção por precipitação em solução se baseia na formação de fase sólida (corpo precipitado) a partir da reação de uma solução super-saturada de algum

acetato, nitrato ou cloreto de zinco com a ação do agente de precipitação, como: hidróxidos ou derivados. Alves e colaboradores, (ALVES et al., 2011) utilizaram uma solução de nitrato hexahidratado de zinco ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  – 0,5 M) e uma solução de hidróxido de sódio (NaOH - 1,0 M) sob agitação e aquecimento (80 °C) por 2h. Depois, o precipitado fora filtrado a vácuo e lavado com água destilada e etanol. O precipitado fora seco em 60 °C por 48h. Com isso, o produto gerado foi nanopartículas de ZnO, segundo os resultados dos autores.

Biron, Santos e Bergmann, (BIRON; SANTOS; BERGMANN, 2020) sintetizaram o ZnO por precipitação em solução utilizando  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ , etileno glicol como solvente, poli(acetado de vinila) (PVA) como dispersante e NaOH como agente de precipitação. Misturaram os reagentes e aqueceram a 140 °C por 4h com intuito de degradar o etileno glicol juntamente com a utilização de uma coluna de fluxo. O resultado foi aquecido a 80 °C sob agitação por 24h, depois filtrado e caracterizado. Os autores propuseram o seguinte mecanismo reacional, ilustrado pela Figura 4 a seguir:

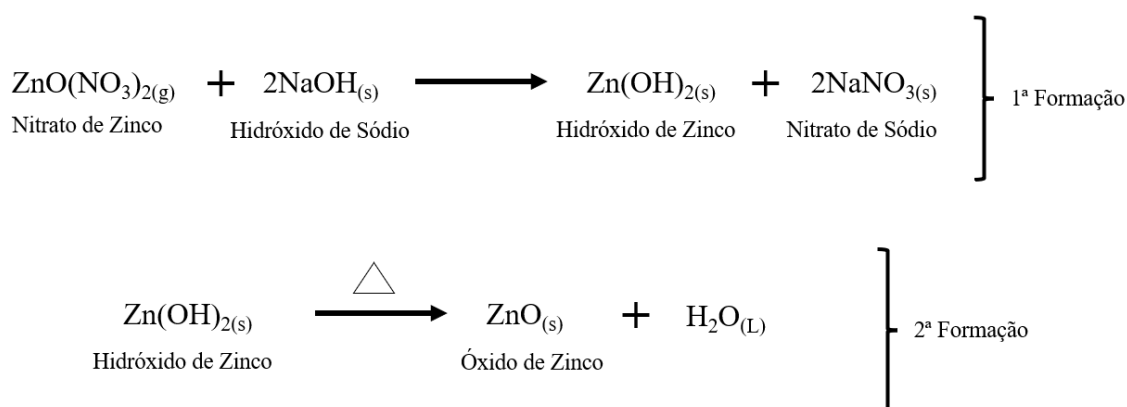


Figura 4 - Reações de redução do nitrato de zinco em óxido de zinco pelo método de precipitação em solução.

Adaptada de: (BIRON; SANTOS; BERGMANN, 2020).

Devido à vasta gama de propriedades e fácil obtenção, o ZnO vem sendo utilizado em diversas aplicações, como: sensores, dispositivos eletrônicos, dispositivos biomédicos, entre outras. Thambidurai e colaboradores, (THAMBIDURAI et al., 2020) avaliaram o desempenho antibactericida de nanocompósitos de óxido de níquel e óxido de zinco (NiO/ZnO) obtidos por precipitação em solução, com diferentes concentrações de íons de níquel ( $Ni^{2+}$ ). Observaram que a energia de *bandgap* diminui devido a deformação na rede cristalina. Os resultados de fotoluminescência mostraram que altas



concentrações de  $\text{Ni}^{2+}$  melhora os centros de distorção e diminuem a influência dos defeitos. A atividade antibacteriana foi aprimorada devido ao aumento da área superficial e maior geração de compostos reativos após a implementação dos íons de níquel.

Karthikeyan e colaboradores, (KARTHIKEYAN et al., 2020) realizaram um estudo de revisão sobre os principais óxidos fotocatalíticos com potencial de atender à demanda de não toxicidade, fotoatividade, inércia química, entre outros. Dentre os óxidos estudados está o ZnO. Chegaram à conclusão de que os óxidos estudados são promissores para aplicação em conversores de energia solar e proteção ambiental. Observaram que os fatores-chave que influenciam a fotocatalise desses materiais são: energia de *bandgap*, morfologia, estrutura cristalina e composição química. No estudo apresentam o ZnO como promissor em células solares devido sua capacidade fotoresistiva. Meroni e colaboradores, (MERONI et al., 2020) estudaram a influência do precursor de zinco (nitrato, cloreto, acetato) em condições de sonicação (amplitude e pulso) e tratamento térmico (acima de 500 °C) pelo processo de síntese assistida por ultrassom. A sonicação implementada trabalhou a morfologia e aumentou em 20 vezes a área superficial das amostras, em relação à síntese convencional. O aumento da temperatura provocou defeitos na rede aumentando então a reatividade do material. Implementaram óxido de tungstênio ( $\text{WO}_3$ ) na superfície formando um composto com boa interação com a luz visível e com fotodegradação menor que 95%.

Neelgund e Oki, (NEELGUND; OKI, 2020) desenvolveram e estudaram um composto de nanotrapezóides de ZnO depositados em nanopartículas de grafeno para aplicação em fotocatalisadores. O composto foi capaz de degradar completamente os corantes amplamente usados pela indústria. A excelente capacidade fotocatalítica foi oriunda da heterojunção formada pela boa aderência entre o grafeno e o ZnO. Mostrou-se um excelente candidato para aplicação em fotocatalisadores robustos. Li e colaboradores, (LI et al., 2020) desenvolveram um composto entre o ZnO e casca de arroz celulósica pela síntese hidrotermal. O material foi aplicado como anodo em baterias de íons de lítio e apresentou excelentes características eletroquímicas e estabilidade durante os ciclos de carga e descarga. Essa capacidade pode estar ligada à microestrutura especial – de ZnO envolvida por esferas de carbono. O material apresentou bom desempenho para aplicação em anodos de baterias de íons de lítio de alto desempenho.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1. Síntese e Caracterização do ZnO.

A síntese do ZnO foi realizada por meio da rota em solução conforme adaptação da metodologia descrita por Alves e colaboradores (ALVES et al., 2011). Foram utilizados: nitrato de zinco hexahidratado ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) e hidróxido de sódio (NaOH). Nessa síntese, preparou-se duas soluções aquosas de  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  na concentração de 1,0 M e de NaOH na concentração de 1,0 M. Depois, as duas soluções foram misturadas e colocadas sob aquecimento e agitação. Aqueceu-se essa solução até temperaturas próximas de  $80^\circ\text{C}$  e sob agitação moderada, cujo aparato é mostrado na Figura 5. Com o objetivo de avaliar o efeito do tempo de agitação e aquecimento da solução nas características do ZnO obtido, realizou-se as sínteses por 30, 60 e 120 minutos.

O resultado da síntese foi filtrado a vácuo com filtro de papel, guardado em uma placa de petri e aguardou-se o tempo necessário para a secagem da amostra em temperatura ambiente cujo resultado é mostrado na Figura 6. Após secagem, o material fora macerado obtendo um pó fino e branco, em que sua estrutura foi analisada pela técnica de espectroscopia Raman, usando o espectrômetro LabRAM HR Evolution - Raman Spectrometer (Horiba Scientific, Japan) com laser de excitação de 532 nm. A faixa espectral analisada foi de 200 a  $2000\text{ cm}^{-1}$ .



Figura 5 - Solução para obtenção de ZnO em agitação magnética e aquecimento.

Fonte: do autor (2022).



Figura 6 - ZnO após filtragem e sacagem.

Fonte: do autor (2022).

#### 4.2. Síntese da PANI e PANI/ZnO e obtenção dos filmes por polimerização superficial.

Para a síntese da PANI foram utilizados: anilina (monômero - VETEC com 99% de pureza), persulfato de amônio (APS - Dinâmica com 98%), ácido dodecilbenzenosulfônico (DBSA - Azul Química sem especificações de pureza), ácido clorídrico (Sigma-Aldrich com teor de 37%) e o ZnO sintetizado.

Preparou-se uma solução de 1M de HCl, em uma alíquota (25 mL) dissolveu-se a anilina na concentração 1,4 M e o DBSA na concentração de 19 mM. E, em outra alíquota (25 mL), dissolveu-se o APS na concentração de 0,9 M. A síntese foi baseada no artigo de Park, Jang e Kim (PARK; JANG; KIM, 2018a) com modificações, devido ao intuito de otimizar a obtenção da polianilina. Essa síntese foi utilizada para os filmes controle (PANI) e para os filmes com ZnO (PANI/ZnO). Para os filmes PANI/ZnO variou-se a concentração de ZnO de 6,9 mM, 13,8 mM e 27,6 mM, baseado em estudos realizados anteriormente pelo grupo com dióxido de titânio. Para facilitar as referências das análises, foi desenvolvido a tabela 1 a seguir com a nomenclatura de cada amostra;

Tabela 1 - Nomeclatura das amostras em relação à concentração de ZnO.

<b>Amostra</b>	<b>[ZnO] mM</b>
PANI	-
PZ14	6,9
PZ28	13,8
PZ56	27,6

O ZnO foi inserido na solução de anilina e DBSA sob agitação até que totalmente dissolvido. Posteriormente, para a obtenção dos filmes, sobre substratos de vidro (pequenas lâminas) previamente limpos (limpeza executada com água e detergente, etanol e acetona), colocou-se uma alíquota da ordem de 100  $\mu$ L da solução (anilina, DBSA – controle e anilina, DBSA e ZnO). Sobre essa solução colocou-se outra alíquota, também da ordem de 100  $\mu$ L da solução de oxidante (APS) e misturou-se as duas soluções sobre o substrato com uma espátula de plástico. Aguardou-se 15 minutos para a polimerização ocorrer completamente. Após isso, lavou-se o substrato e o filme de polímero em acetona e água destilada, respectivamente, para remoção dos materiais que não reagiram. Após isso, realizou-se um banho em uma solução de HCl 1 M, com intuito de protonar a PANI, sendo esse banho executado pela primeira vez neste trabalho.

Em relação aos filmes de PANI e PANI/ZnO, são apresentadas as imagens dos filmes e como foram produzidos. A Figura 7 apresenta a etapa final da polimerização superficial antes da lavagem dos filmes. Como é visto, os substratos eram totalmente recobertos com a solução, sendo vários testes foram executados para garantir a quantidade correta para as dimensões dos filmes usados nesse estudo. Após a lavagem e banho de HCl, os filmes ficaram conforme a figura 8.

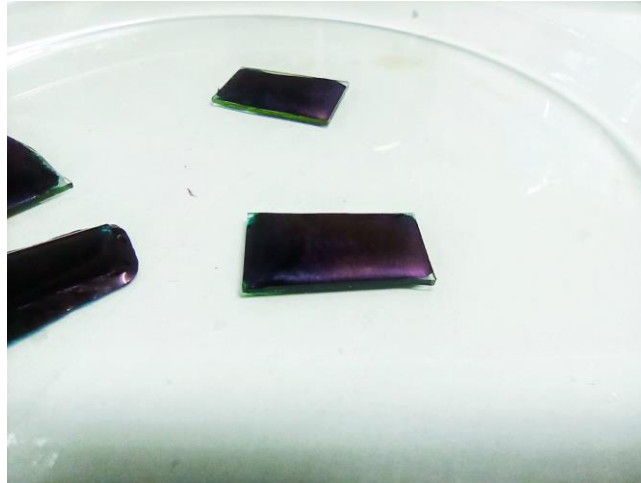


Figura 7 - Filmes após polimerização da PANI.

Fonte: do autor (2022).

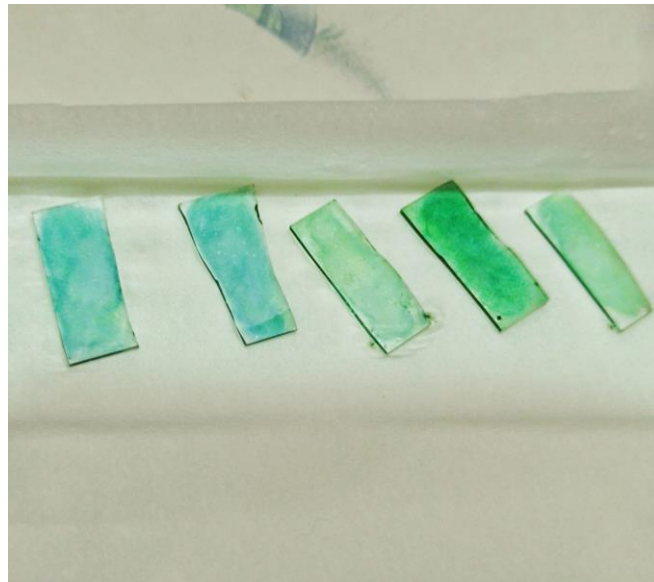


Figura 8 - Filmes após lavagem e banho de HCl.

Fonte: do autor (2022).

#### 4.3. Microscopia Óptica (MO)

Com intuito de avaliar a morfologia dos filmes produzidos, foi realizado a análise de Microscopia Óptica. O Microscópio utilizado foi Microscópio biológico binocular 1600 X BIO-10, objetiva de 10X, com luz de halogênio, acoplado com camera CCD, localizado no Laboratório de Síntese de Materiais e Física de Polímeros da UFLA.

#### 4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com o intuito de analisar a morfologia dos filmes com mais detalhes, bem como a espessura, realizou-se a técnica de caracterização de Microscopia Eletrônica de Varredura. As micrografias foram criadas pelo Microscópio modelo *EVO® 40XVP* (*Leo Electron Microscopy Ltd., Carl Zeiss, Cambridge, UK*) no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME), localizado no Departamento de Fitopatologia da UFLA. As amostras foram preparadas em *stubs* de alumínio e metalizadas com ouro (*Brüker MultiRam, Billerica, MA, US*).

#### 4.5. Espectroscopia da Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Para a análise dos grupos funcionais e identificação dos componentes utilizados nos filmes, foi utilizado a técnica de FTIR. A análise foi realizada pelo Microscópio eletrônico *Shimadzu spectrometer (IR Affinity-1 FTIR8400S, Kyoto, Japan)* com Transformada de Fourier no Laboratório de Espectroscopia na Região do Infravermelho – FTIR localizado no CAPQ da UFLA. O espectro foi gravado com ATR, varrendo de 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  ao passo de 64 *scans* e uma resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

#### 4.6. Espectroscopia RAMAN

A espectroscopia Raman revela informações complementares ao FTIR para polímeros em geral apresentando informações sobre a presença de grupos funcionais inativos no FTIR. Essa técnica também foi empregada com intuito de análise da presença de ZnO nos filmes. Para isso, foi utilizado o espectroscópio Raman da marca Horiba, modelo *LabRAM HR Evolution*, excitado com um laser verde ( $\lambda = 532\text{nm}$ ) do Laboratório de Energias Renováveis e Materiais Avançados (LABERMA).

Para o óxido foi realizada uma única varredura, no entanto, para os filmes foram feitas medidas em função de diferentes pontos da superfície dos filmes. Para isso, utilizou-se o modulo de varredura em XY que o equipamento possui, sendo que foram analisadas distâncias de 40  $\mu\text{m}$  em X e Y.

#### 4.7. Propriedades Elétricas

Para as medidas elétricas foi utilizado o aparato apresentado na Figura 9 localizado na Oficina de Eletrônica do Departamento de Física (DFI) da UFLA. Nessa

figura é mostrado os portas amostras, com três contatos (Figura 9 a), o multímetro da Minipa modelo 8156A, da Politerm modelo POL-16B de 0 a 32V e 0 a 3A.

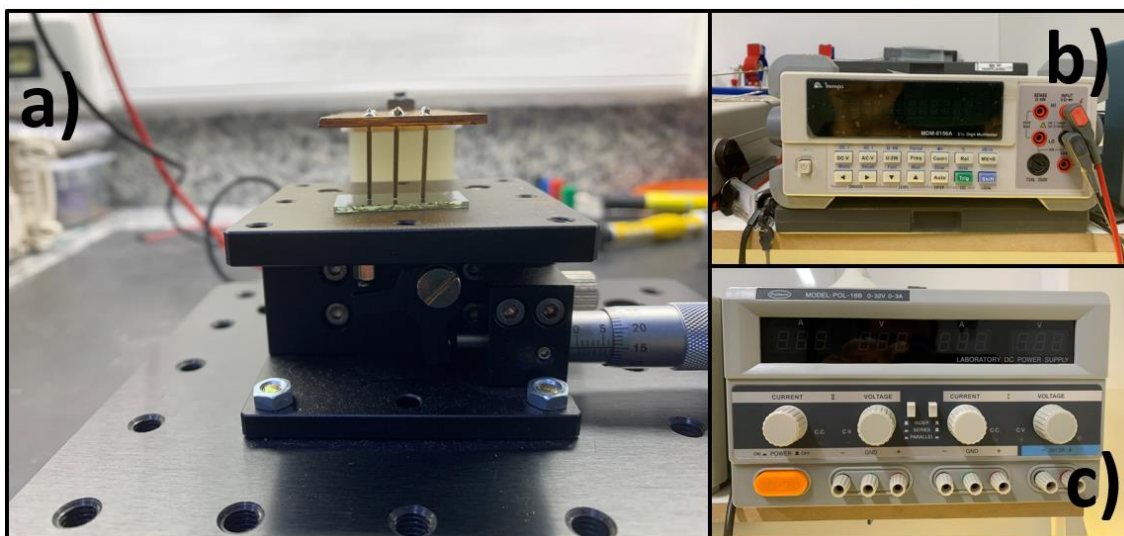


Figura 9 - Aparato experimental para as análises de condutividade e fotocondutividade.

a) ponteiras, b) multímetro e c) fonte.

Fonte: do autor (2022).

Na figura do porta amostra (Figura 9 a), observa-se que a amostra fica em contato com três pontas de prova, sendo que para esse estudo foi utilizado somente as pontas do centro e do lado direito da imagem, sendo essa medida de duas pontas. Nas medidas, varia-se a tensão (V) na amostra e mede-se a corrente (I) de resposta dos filmes.

Para as análises de condutividade, utilizou-se o trabalho de Girotto e Santos (GIROTTI; SANTOS, 2002), com adaptações para duas pontas. O valor da condutividade foi obtido usando a seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{\ln 2}{R\pi w}$$

Onde:  $\ln 2/\pi$  são as dimensões e correções, R a resistência do filme e w a espessura. As espessuras foram medidas usando MEV.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Análise de Microscopia Ótica

Com intuito de observar a morfologia do filme, foi realizado a caracterização por microscopia ótica. As imagens a seguir ilustram como ficou a distribuição de PANI no filme, bem como sua geometria.

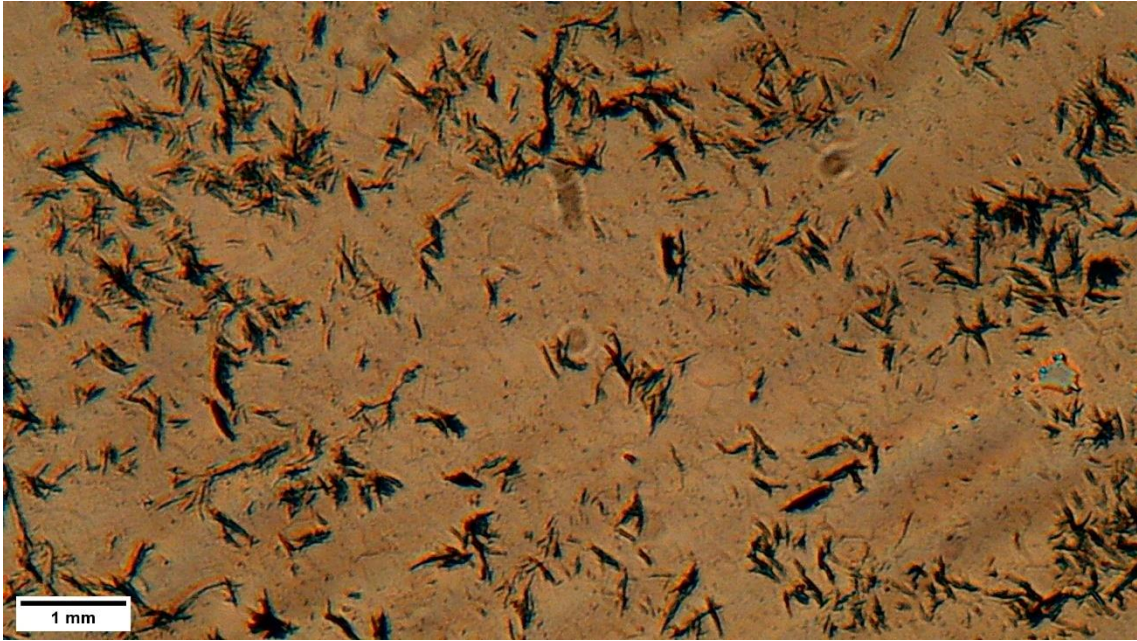


Figura 10 - Micrografia óptica da amostra PANI.

Fonte: do autor (2022).

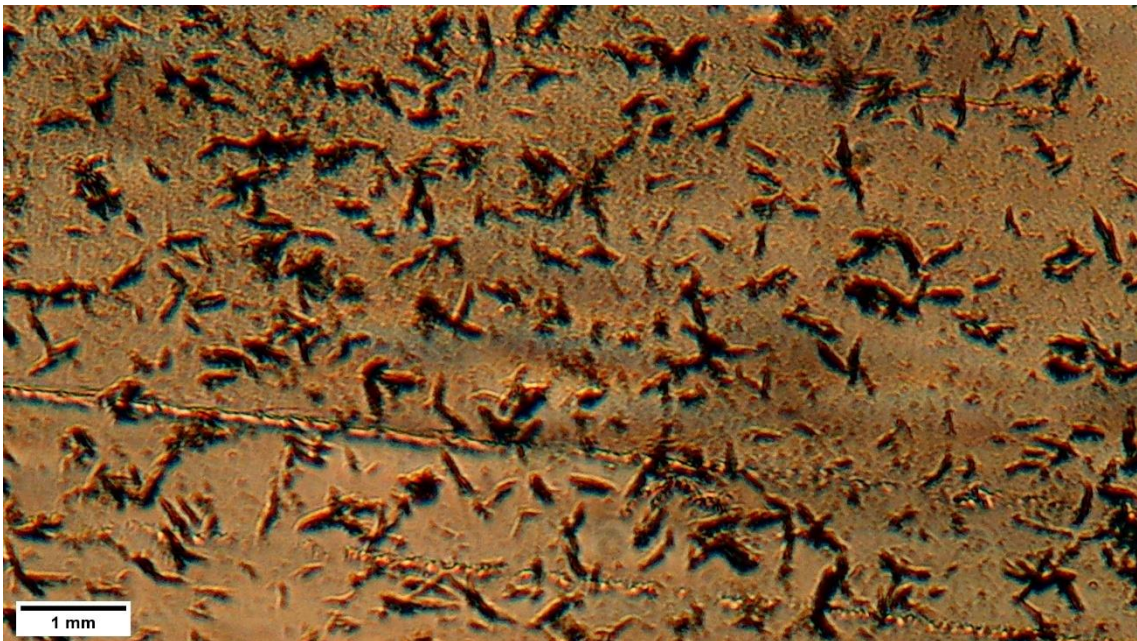


Figura 11 - Micrografia óptica da amostra PZ14.

Fonte: do autor (2022).





Figura 12 - Micrografia óptica da amostra PZ28.

Fonte: do autor (2022).

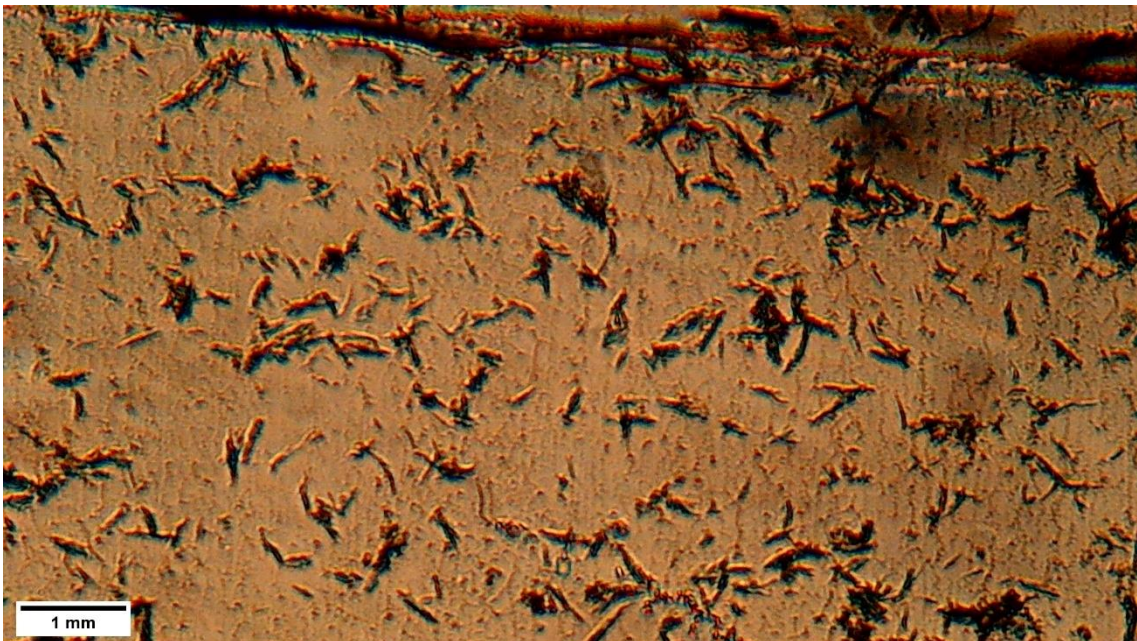


Figura 13 - Micrografia óptica da amostra PZ56.

Fonte: do autor (2022).

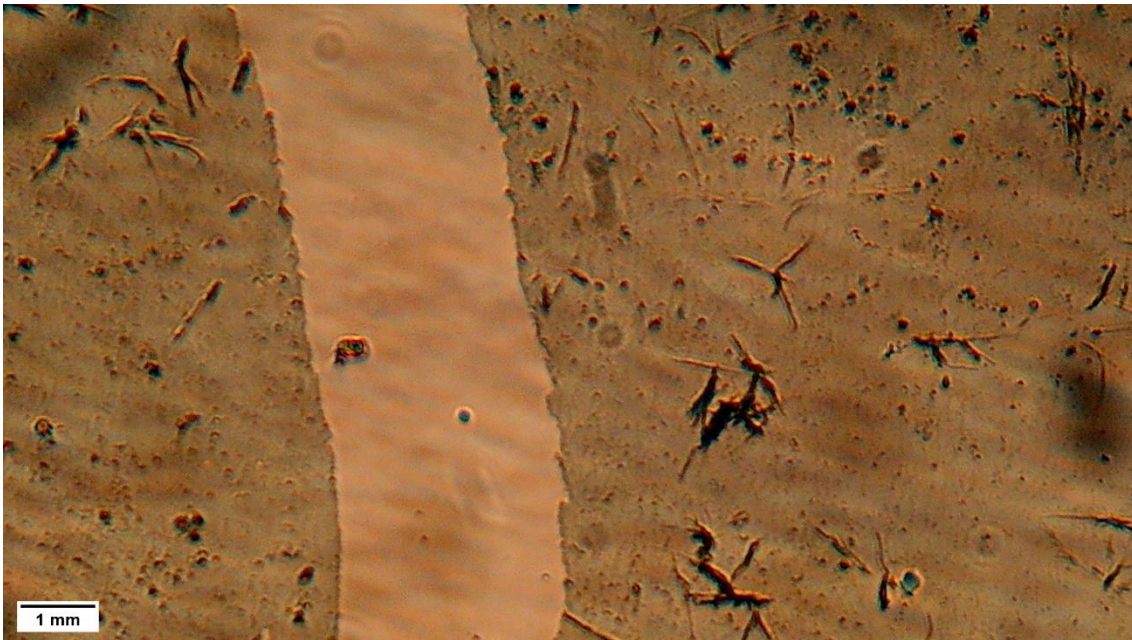


Figura 14 - Micrografia óptica da amostra PZ28 com “raspagem” do substrato separando o filme em duas partes.

Fonte: do autor (2022).

É possível observar em todas as amostras um padrão geométrico dos aglomerados da PANI em forma de agulhas. Esse acúmulo de material polimérico pode estar relacionado com um excesso de PANI. Analisando a figura 14 e comparando com as demais figuras, é possível observar que a rota de síntese utilizada fez com que a região da micrografia ficasse totalmente recoberta com os filmes. Não houve variações significativas entre amostras, sendo que todas possuem o mesmo aspecto morfológico.

Não é possível observar a presença de ZnO. Isso é um indicativo de que o óxido possa ter solubilizado em toda a extensão do filme, sem formar aglomerados visíveis. Com isso, é esperado que o compósito tenha uma boa absorção de energia solar e, como a PANI está espalhada, uma boa condutividade em todo o filme. Além disso, o incremento de ZnO nas amostras não fez com que houvesse uma diferença na morfologia dos filmes.

## 5.2. Micrografia Eletrônica de Varredura

Com intuito de entender mais sobre a morfologia dos filmes, foi realizado a caracterização de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Com isso, obteve-se as seguintes micrografias:

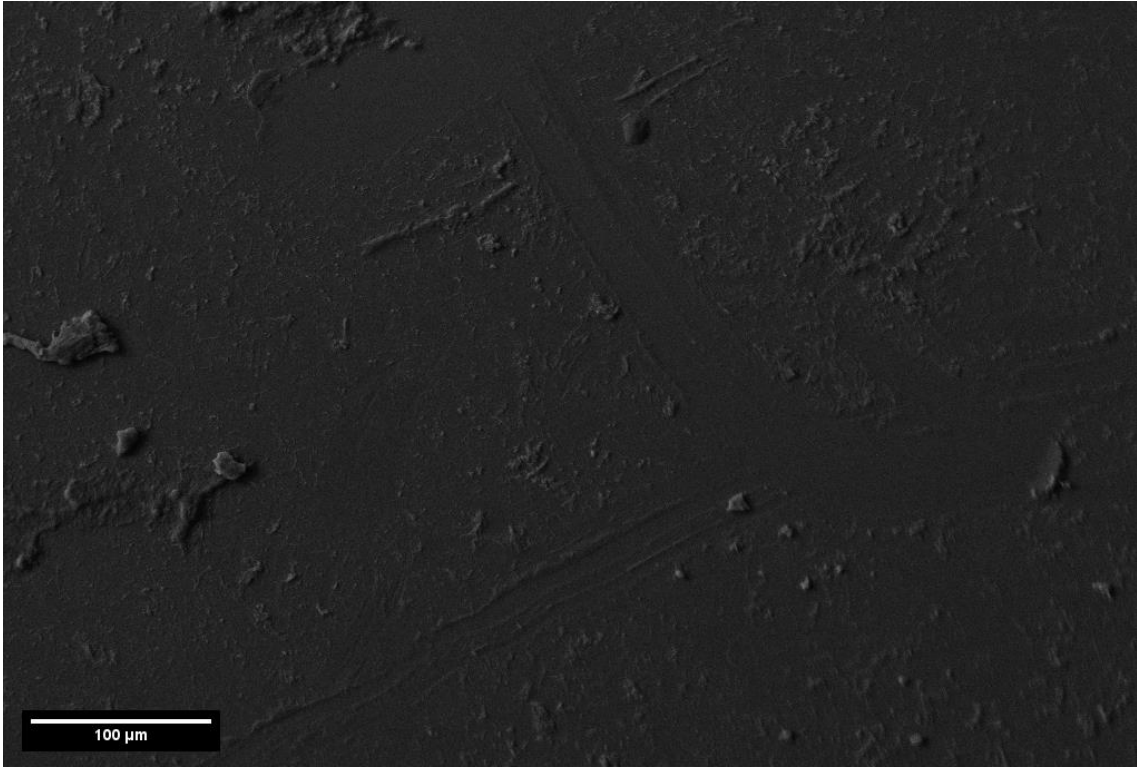


Figura 15 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PANI.

Fonte: do autor (2022).

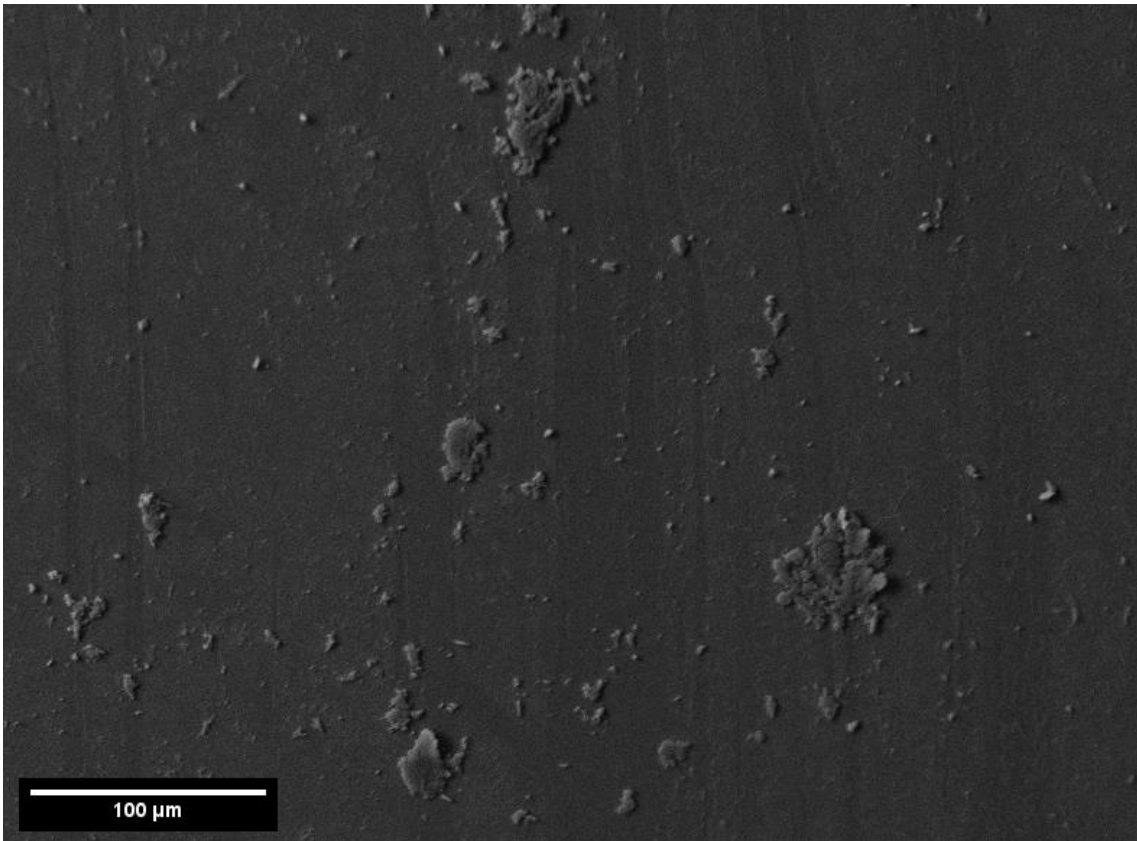


Figura 16 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PZ14.

Fonte: do autor (2022).

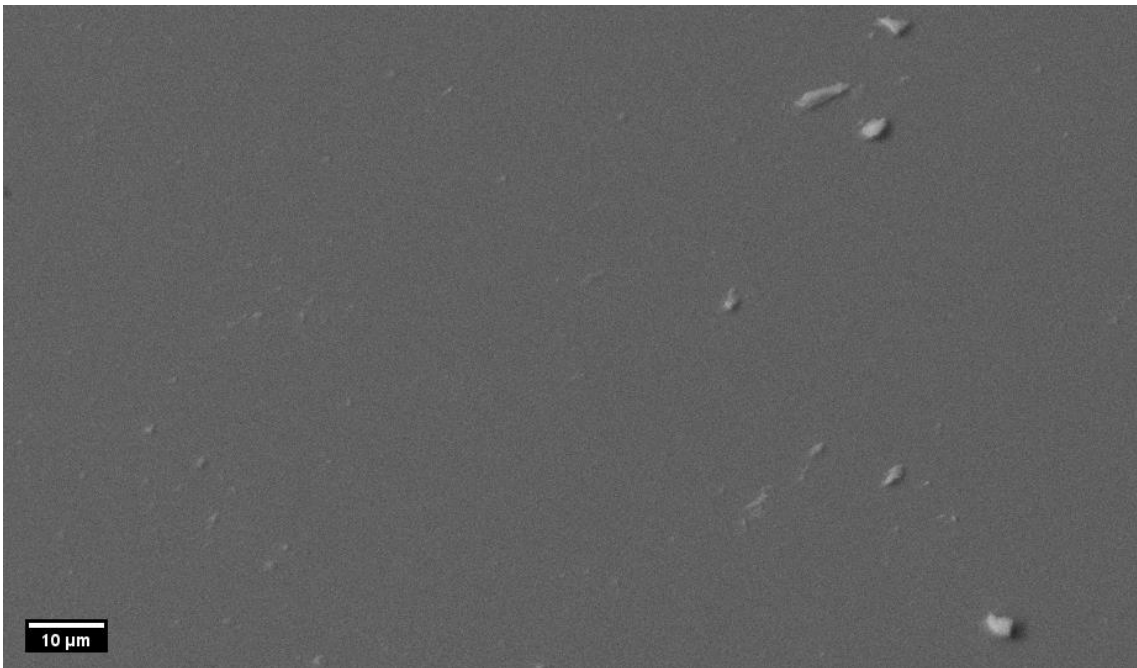


Figura 17 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PZ28.

Fonte: do autor (2022).

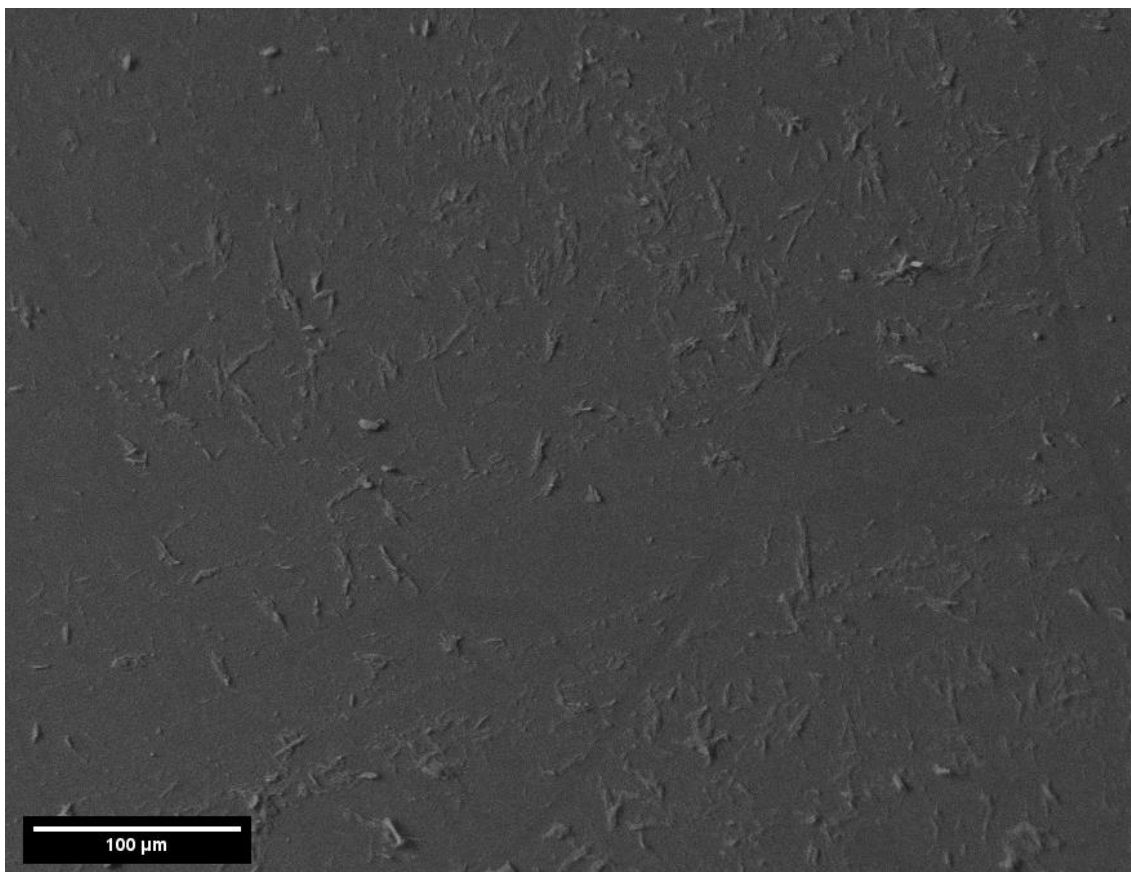


Figura 18 - Micrografia Eletrônica de Varredura para amostra PZ56.

Fonte: do autor (2022).

Figura 19 - Micrografia eletrônica de Varredura para as amostras a) PANI, b) PANI/ZnO 14 mg, c) PANI/ZnO 28 mg e d) PANI/ZnO 56 mg.

É possível observar a presença da PANI em aglomerados assim como na micrografia óptica, em destaque para a região capturada pelo MEV da amostra PZ56 (Figura 18). As regiões de aglomerados podem ser oriundo de excesso de PANI ou, uma polimerização heterogênea causa ou por impurezas ou pela presença de ZnO (VIJAYALAKSHMI et al., 2021a). Além disso, nota-se a presença de pontos claros que possuem certo relevo, conforme observado para amostra PZ14 (Figura 16). Isso pode ser um indicativo da presença de ZnO.

Outra análise realizada foi quanto a espessura do filme produzido, para meios de avaliar sua qualidade como um possível recobrimento de células solares. A figura 20 a seguir ilustra a espessura de um dos filmes produzidos além da aderência com o substrato.

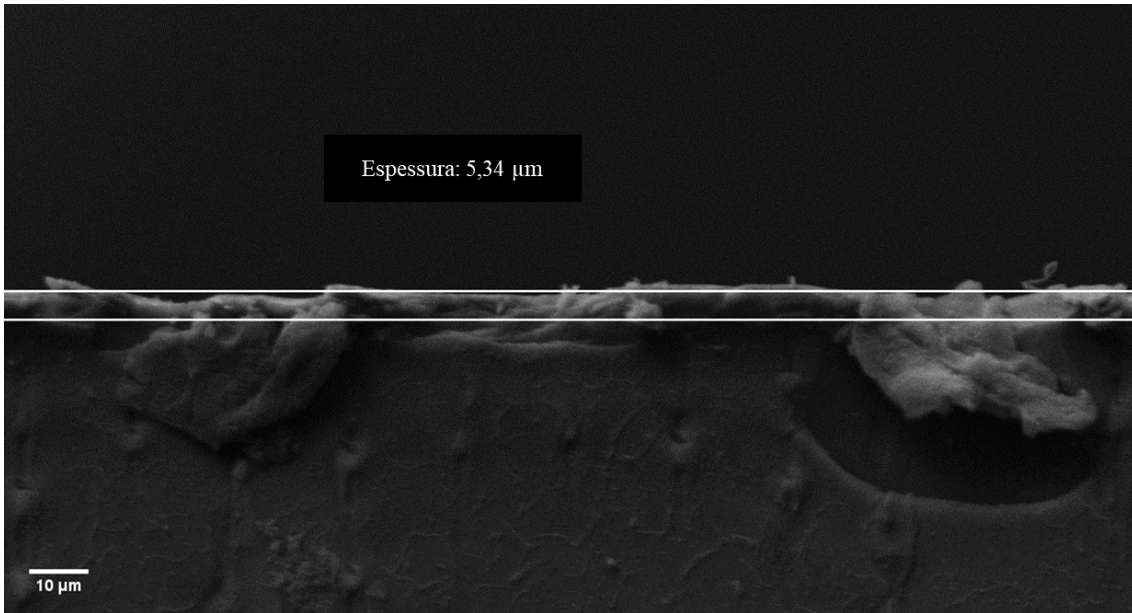


Figura 20 - Espessura média dos filmes produzidos. Espessura da amostra PZ28.

Fonte: do autor (2022).

Os filmes possuíram em média 5,34  $\mu\text{m}$  de espessura. Isso é um bom indicativo para a aplicação revestimento das células, pois, a fina espessura faz com que o filme consiga uma ótima interação com a luz solar. A Figura 21 a seguir ilustra a variação da espessura dos filmes. Nota-se que não houve variação para as amostras em decorrência da inserção de ZnO.

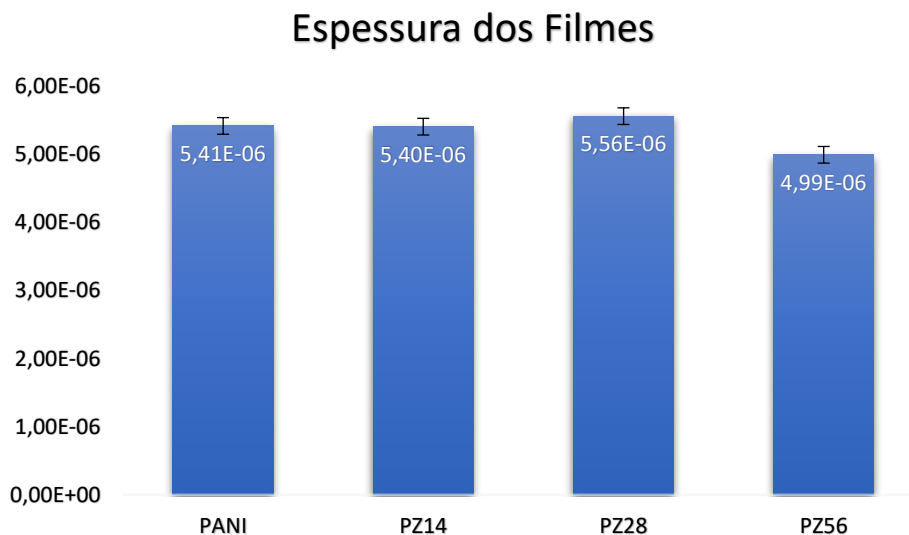


Figura 21 - Gráfico de Barras com a Espessura Média de cada filme produzido.

Fonte: do autor (2022).

### 5.3. Análise de Espectroscopia FTIR

Os resultados de espectroscopia FTIR para os filmes de PANI e PANI/ZnO, sintetizados neste projeto, foram tratados pela linguagem de programação Python, utilizando o IDE (*Integrated Development Environment*) da Microsoft: Visual Studio Code (*open source*). Foi necessário a importação das bibliotecas *pandas*, para tratamento dos dados e construção do *Data Frame*; *plotly*, para a plotagem dos gráficos interativos, sendo possível uma análise mais minuciosa devido às funcionalidades do gráfico; e, a *numpy* para os tratamentos estatísticos. A Figura 22 a seguir ilustra o fluxograma do projeto de análise de dados utilizado. O código pode ser consultado no Anexo I.

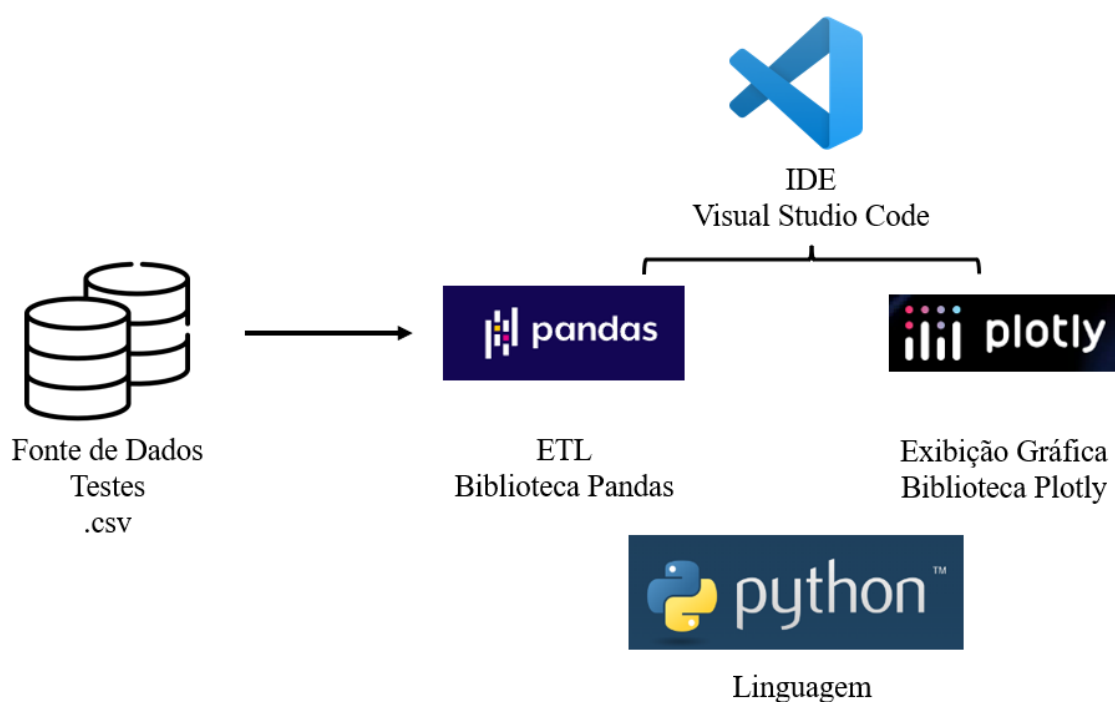


Figura 22 - Fluxo de *Data Analysis* utilizando a linguagem python para o tratamento dos dados.

Fonte: do autor (2022).

Com isso, foi possível realizar a plotagem das curvas referentes às amostras PZ14, PZ28 e PZ56. Além da PANI para observar qual o comportamento do espectro ao adicionar o ZnO. É possível observar na figura 23 a seguir as curvas de FTIR para as amostras:

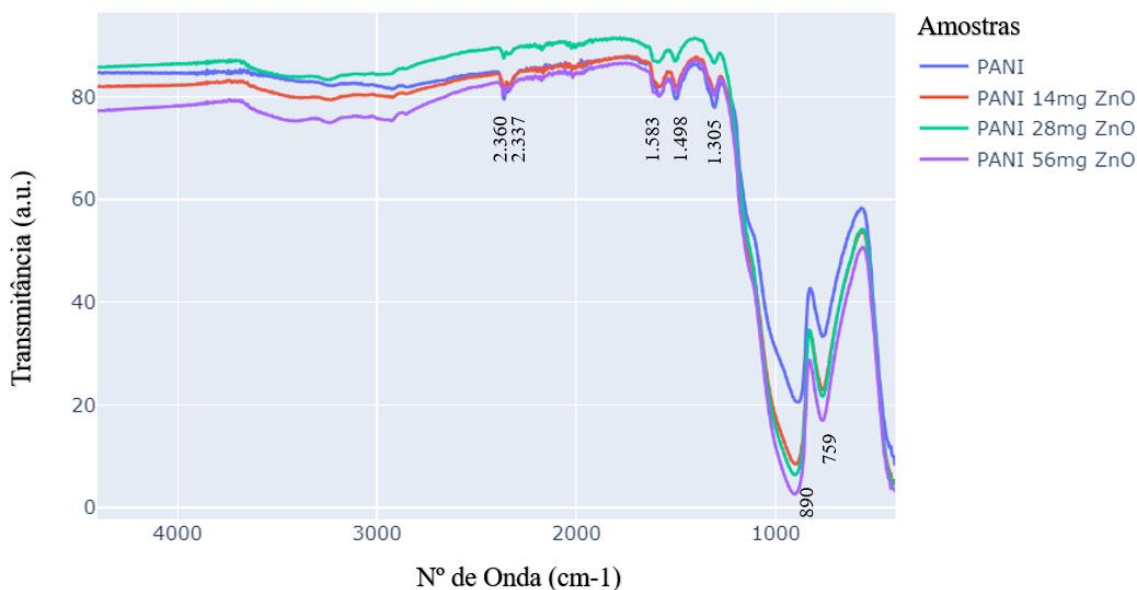


Figura 23 - Espectrografia na região do Infravermelho para amostras PANI e PANI/ZnO.

Fonte: do autor (2022).

O comportamento das amostras foram muito semelhantes conforme observado na figura 23. As vibrações na região do espectro de aproximadamente  $2.360\text{ cm}^{-1}$  e  $2.337\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas à vibração do grupo funcional da anilina, com a ligação de carbonos e nitrogênio (PAWAR et al., 2010). A região de  $1.583\text{ cm}^{-1}$  apresenta uma banda com baixa intensidade que é característico da vibração dos Quinoides derivados de oxidação da PANI. As vibrações por volta de  $1.498\text{ cm}^{-1}$  são características de vibração dos benzenos (AFIFY et al., 2018; DE SOUZA; DA FROTA; SANCHES, 2018; DESHMUKH et al., 2018; HASOON; ABDUL-HADI, 2018; PAIK et al., 2014; PARK; JANG; KIM, 2018b). Já as vibrações na região de  $1.305\text{ cm}^{-1}$ , são características de estiramentos da ligação C-N da amina aromática, evidenciando que a PANI está em seu estado de esmeraldina (DESHMUKH et al., 2018; PARK; JANG; KIM, 2018b; TRCHOVÁ; STEJSKAL, 2011). Regiões com menor comprimento de onda como  $890\text{ cm}^{-1}$  a  $500\text{ cm}^{-1}$  são de hidrocarbonetos e anéis aromáticos com a ligação C-H alongada indicando um deslocamento de elétrons. É nesta região onde outros trabalhos da literatura puderam evidenciar a presença de ZnO na amostra, pois, trata-se de uma região característica de ligações O-Zn-O e Zn-O (LIU et al., 2013; VIJAYALAKSHMI et al., 2021a).



Por meio da razão  $R(Q/B)$  entre a intensidade do pico dos anéis quinoides em relação aos anéis benzênicos, é possível estimar o quão condutora são as amostras. Isso pois, quando o valor da razão se aproxima de 1, significa que há a mesma quantidade de quinóides e benzênos, o que é característicos da PANI em estado de esmeraldina (BOAVENTURA, 2009; PAIVA, 2018).

Com isso, a Tabela 2 a seguir ilustra o cálculo para cada amostra. Os resultados não demonstram variações significativas, porém, como estão próximos ao valor 1, indicam que as amostras estão com alta condutividade, conforme descrito anteriormente (BOAVENTURA, 2009; PAIVA, 2018).

Tabela 2 - Razão entre a intensidade dos picos  $1.498\text{ cm}^{-1}$  e  $1.583\text{ cm}^{-1}$ .

<b>Amostra</b>	<b>R (Q/B)</b>
PANI	0,99172
PZ14	1,00075
PZ28	1,00215
PZ56	1,01046

Para comprimento de ondas mais baixos, conforme evidenciado em outros trabalhos da literatura, pode indicar a presença do ZnO na PANI (CHAMROUKHI et al., 2018; TONPE et al., 2019; VIJAYALAKSHMI et al., 2021a). Como visualmente os espectros são muito semelhantes, avaliou-se a intensidade relativa das amostras comparando os picos da região de  $890\text{ cm}^{-1}$  (Figura 24) com os picos dos anéis quinoides (Figura 23). A tabela 3 a seguir ilustra os valores obtidos com a análise.

Tabela 3 - Resultados da intensidade relativa entre os picos da região de  $890\text{ cm}^{-1}$  e anéis quinoides.

<b>Amostra</b>	<b>Intensidade Relativa</b>
PANI	0,23648
PZ14	0,10389
PZ28	0,08018
PZ56	0,03347

Pois, é possível verificar que conforme há o aumento do %p de ZnO na amostra, maior é a intensidade da banda nesta região, conforme ilustra a Tabela 3.

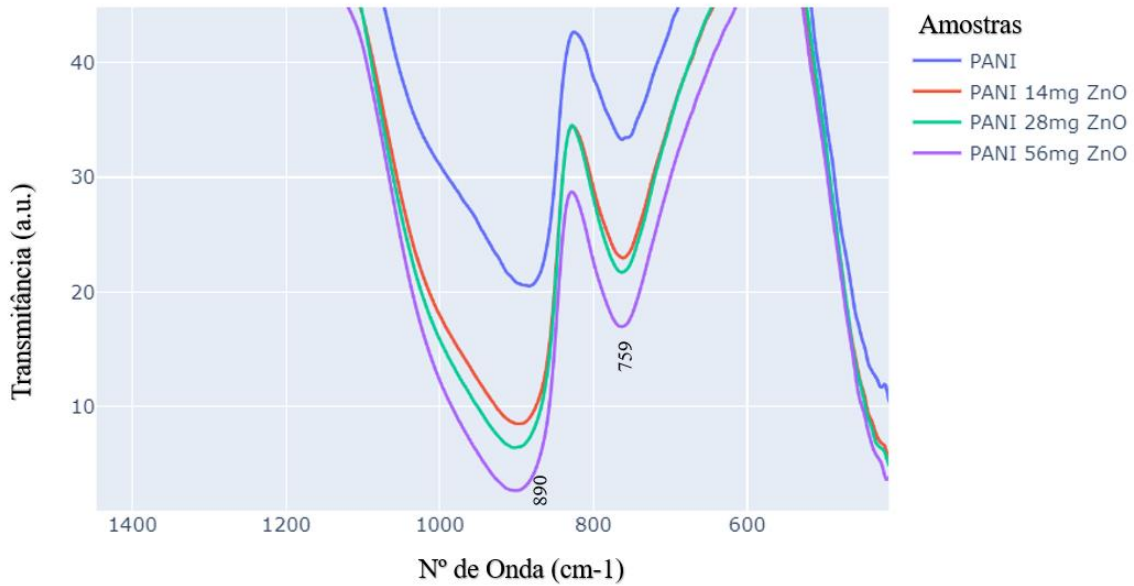


Figura 24 - Espectrografia da Região do Infra-vermelho para PANI e PANI/ZnO com aproximação na região de baixo comprimento de onda.

Fonte: do autor (2022).

#### 5.4. Análise de Espectroscopia RAMAN

Os espectros de Raman do ZnO são apresentados na Figura 25 a) apresentam os espectros das amostras produzidas a 30, 60 e 120 min na faixa de 250 a 1000  $\text{cm}^{-1}$ . Na Figura 25 b) são apresentados os espectros na faixa de 1000 a 1700  $\text{cm}^{-1}$ .

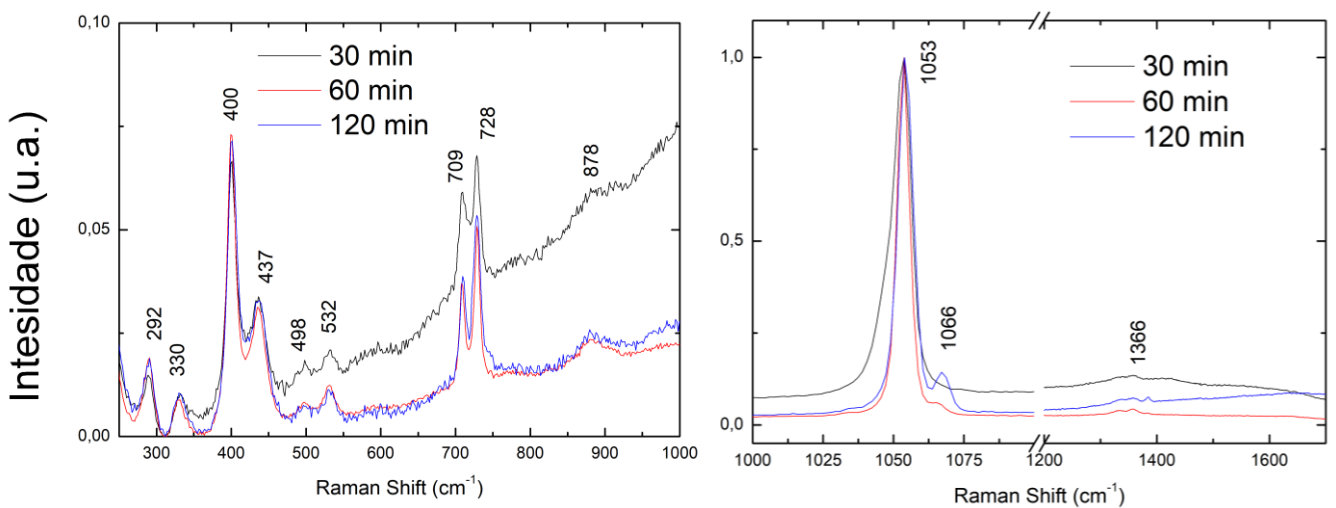


Figura 25 - Espectros Raman das amostras de ZnO produzidas em 30, 60 e 120 min em diferentes faixas: a) 250 a 1000  $\text{cm}^{-1}$  e b) 1000 a 1700  $\text{cm}^{-1}$ .

Fonte: do autor (2022).

Para facilitar a análise esses picos foram apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Raman Shift ( $\text{cm}^{-1}$ ) das amostras de ZnO.

<b>30 min</b>	<b>60 min</b>	<b>120 min</b>
286,37	289,91	286,37
326,71	329,54	323,17
394,64	403,84	394,64
440,63	443,46	443,46
-	538,99	533,33
705,99	708,82	708,82
730,05	-	727,21
-	890,67	-
1054,13	1056,96	1054,13

Os valores de aproximadamente  $330 \text{ cm}^{-1}$  são referentes ao modo de vibração  $E_{2\text{low}}$  associados ao átomo de zinco. Os valores abaixo desse, são fônons espalhados (ecos) desse modo vibracional  $E_{2\text{low}}$  (MARGUERON et al., 2016b; NOMOTO et al., 2016). Os valores entre  $394 \text{ cm}^{-1}$  a  $403 \text{ cm}^{-1}$  são referentes ao modo vibracional  $A_1$  (TO). Este modo é referente ao vibracional do ZnO (NOMOTO et al., 2016). Os valores de aproximadamente  $440 \text{ cm}^{-1}$  são referentes ao modo vibracional  $E_{2\text{High}}$ . Esses são representantes dos átomos de oxigênio que estão presentes o material e da estrutura *wurtzita* hexagonal do ZnO (DU et al., 2003; KOLEVA et al., 2015; MARGUERON et al., 2016b; NIMBALKAR; PATIL, 2017; NOMOTO et al., 2016; YOUN et al., 2004). Os demais picos adiante são espalhamentos de multifonons e vibrações de segunda ordem (NOMOTO et al., 2016).

Realizou-se a espectroscopia RAMAN para a PANI e PZ56 e o resultado está demonstrado na Figura 26. Ao passo que a Figura 27 a), ilustra a varredura utilizada durante a caracterização para a amostra PZ28 e a Figura 27 b) o espectro obtido.

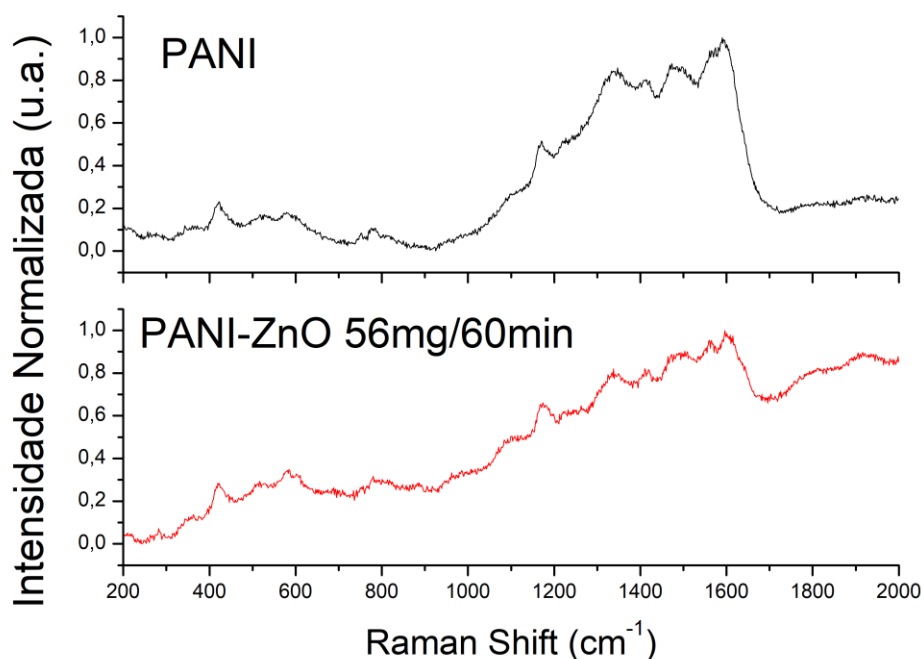


Figura 26 - Espectroscopia Raman das amostras de PANI e PZ56.

Fonte: do autor (2022).

Nota-se que os espectros apresentam modos normais de vibração da PANI, não sendo observado os modos normais do ZnO. Acredita-se que esses modos foram suprimidos pelo espectro da PANI. As bandas em  $418\text{ cm}^{-1}$  são dos anéis no plano e fora do plano, característicos da esmeraldina protonada (MORÁVKOVÁ; BOBER, 2018; ROHOM et al., 2014). As bandas  $520$  e  $582\text{ cm}^{-1}$  são referentes a deformação do grupo amina no plano e deformação do anel, respectivamente (MAŽEIKIENĖ; NIAURA; MALINAUSKAS, 2018; NEKRASOV et al., 2017). A banda a  $806\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao alongamento das ligações C-N-C (MAŽEIKIENĖ; NIAURA; MALINAUSKAS, 2018). A banda  $1.167\text{ cm}^{-1}$  se refere a curvatura da ligação C-H do estado de oxidação esmeraldina (MAŽEIKIENĖ; NIAURA; MALINAUSKAS, 2018; NEKRASOV et al., 2017). As bandas  $1.330$ ,  $1.489$  e  $1.606\text{ cm}^{-1}$  são referentes às ligações C-N<sup>+</sup> forma polarônica (polarons); C=N na base esmeraldina e C-C do benzeno, respectivamente (MAŽEIKIENĖ; NIAURA; MALINAUSKAS, 2018; MORÁVKOVÁ; BOBER, 2018; NEKRASOV et al., 2017; ROHOM et al., 2014; SHAKOOR; RIZVI, 2010).

Um ponto interessante observado no resultado da Figura b) é que confirma o recobrimento com PANI em toda a extensão da área analisada (assim como visto na microscopia óptica). Isso pois, se o ponto observado não fosse recoberto pelo filme, o

modo vibracional obtido seria do substrato, que neste caso é o vidro. Como não foi o caso, é possível confirmar o recobrimento com o material.

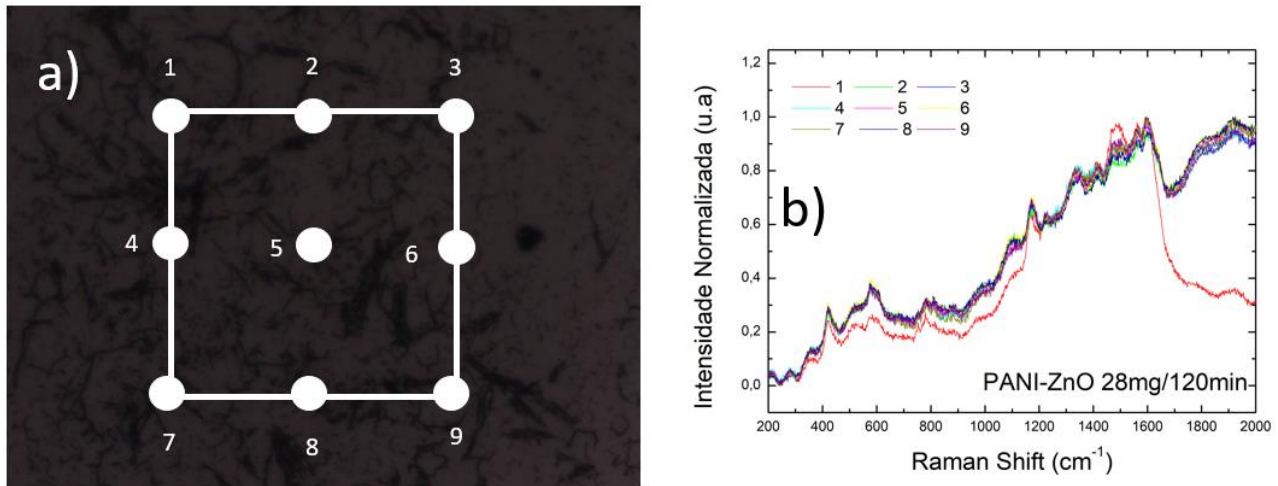


Figura 27 - Amostra de PZ28. A) Essa imagem mostra a varredura indicando recobrimento dos substratos b) resultado do espectro da varredura.

Fonte: do autor (2022).

## 5.5. Propriedades Elétricas

A análise de condutividade de escuro foi feita baseada no método de duas pontas, segundo aparato experimental descrito anteriormente. Por meio do coeficiente angular foi possível obter o valor da condutividade dos filmes, segundo modelo anteriormente descrito. Todos os filmes com ZnO apresentaram comportamento ôhmico como observado pelas figuras 28, 29, 30 e 31. Esse resultado mostra que os filmes apresentam comportamento ôhmico devido a sua linearidade.

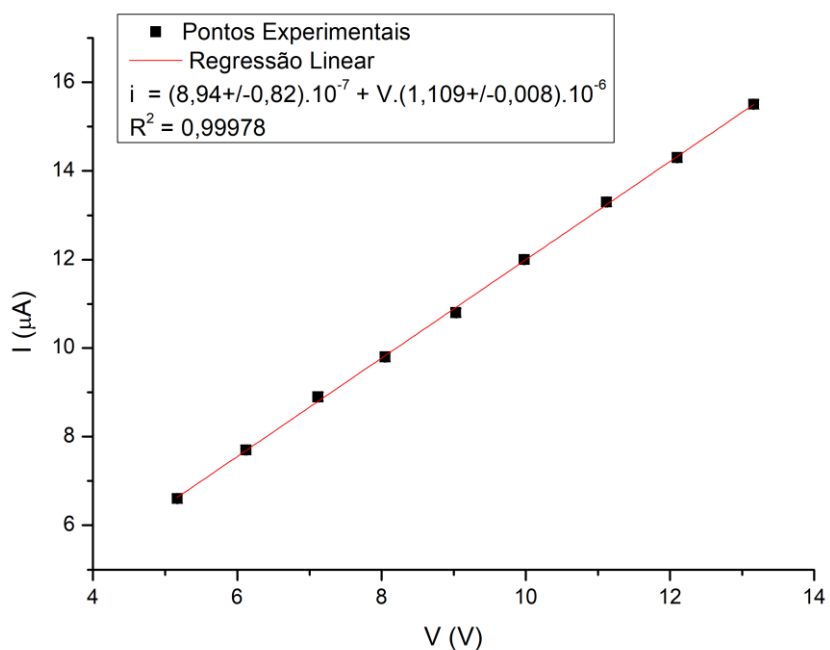


Figura 28 - Curva tensão-corrente (VxI) para a amostra de PANI.

Fonte: do autor (2022)

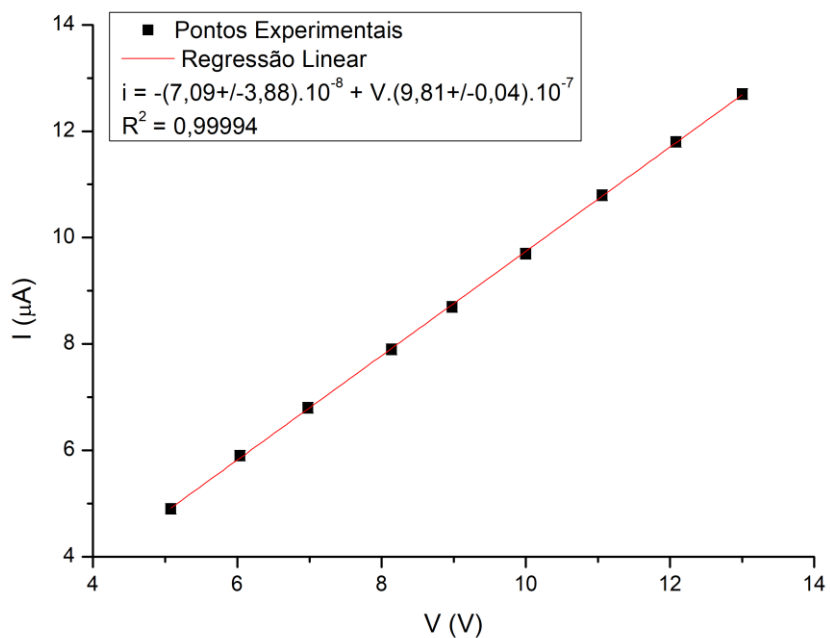


Figura 29 - Curva tensão-corrente (VxI) para a amostra PZ14.

Fonte: do autor (2022).

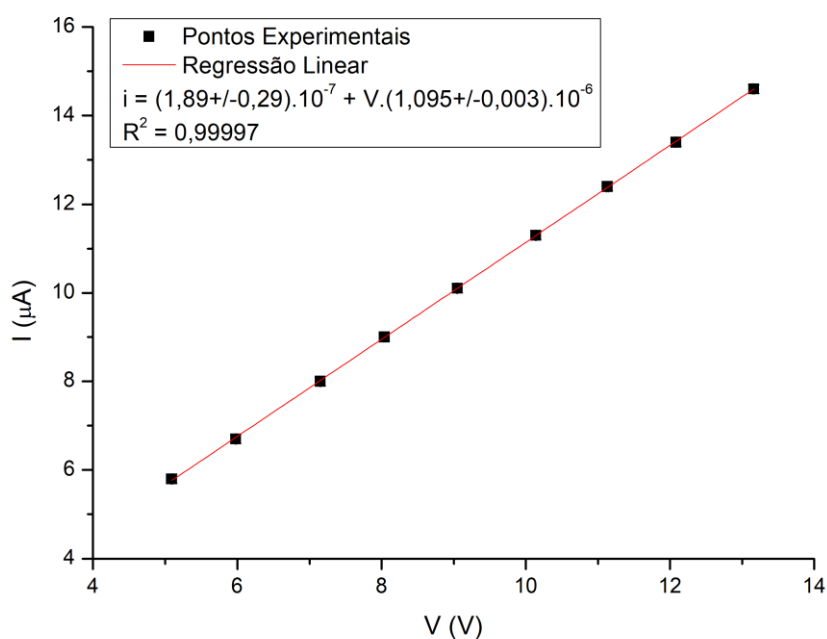


Figura 30 – Curva de tensão-corrente (VxI) para a amostra PZ28.

Fonte: do autor (2022).

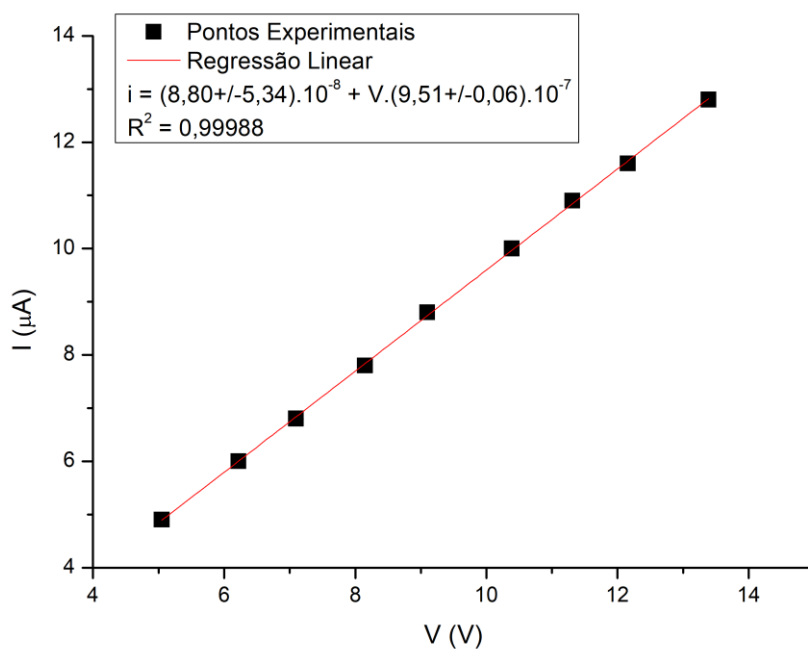


Figura 31 - Curva tensão-corrente (VxI) para a amostra PZ56.

Fonte: do autor (2022).

Como é possível observar na figura do gráfico de barras (Figura 32 a), as condutividades variaram de aproximadamente  $0,3 \text{ mS.cm}^{-1}$  a valores próximos a  $0,6 \text{ mS.cm}^{-1}$ . Os valores de condutividade são influenciados pela técnica de obtenção e pela inserção de outros materiais na estrutura do filme.

A Figura 32 b) apresenta a condutividade em função do tempo de obtenção do ZnO. As amostras PZ14 apresentaram pouca variação da condutividade. Com o aumento da massa na PZ28, houve um acréscimo nos valores da condutividade de escuro com um aumento do tempo. Por fim, para PZ56, a maior condutividade ocorreu para amostra de 60 min, ao passo que a para a amostra de 120 min a condutividade sofreu uma diminuição.

Já a figura 32 c), as amostras obtidas com obtidas com ZnO 30 min e 60 min tiveram um acréscimo nos valores devido ao aumento da massa da PZ14 para PZ56. Para o tempo de 120 min., foi observado um máximo para a amostra PZ28.

Esse comportamento na condutividade de escuro foi muito inferior ao encontrado na literatura conforme o trabalho de Vijayalakshmi e colaboradores, (VIJAYALAKSHMI et al., 2021b) em que encontraram uma condutividade para o compósito de  $4,35 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ , utilizando 10%p de ZnO na matriz de PANI. Daikh e colaboradores (DAIKH et al., 2018) obtiveram um resultado de  $8,10 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$  utilizando HCl-ZnCl<sub>2</sub> como dopante do compósito. Alam e colaboradores (ALAM et al., 2013) conseguiram uma condutividade de  $3,00 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$  para amostras de PANI e nanopartículas de ZnO.

No entanto, para a técnica empregada tanto na síntese do ZnO quanto na obtenção dos filmes, é de esperar um comportamento diferente na condutividade. Comparando entre as amostras, observou-se que as amostras tiveram pouca variação da condutividade, mas acredita-se que as diferenças entre elas sejam devido à erros.

A técnica de polimerização emprega o preparo de filmes por meio de soluções. Uma parte do ZnO presente nas soluções precursoras pode não ter se dissolvido completamente na solução ácida, se precipitando após o processo de preparo dessa. Isso levaria a formação de filmes com escassez desse óxido, o que pode ser medido por meio de uma análise termogravimétrica (TG) como sugestão futura, em que se obterá o percentual de massa de ZnO após degradação da PANI. Além disso, o emprego da “lavagem” dos filmes no final do processo pode ter arrastado uma parte de ZnO presente



nos filmes. Por fim, o tratamento com ácido também poderia atuar removendo ZnO dos filmes devido a sua propriedade de dissolução em ácidos.

Diante de tais resultados, não é possível afirmar a presença de ZnO no compósito. Com isso, as propriedades fotocondutoras dos filmes não puderam ser observadas nos estudos de fotocondutividade e dessa forma não puderam ser apresentadas nesse trabalho.

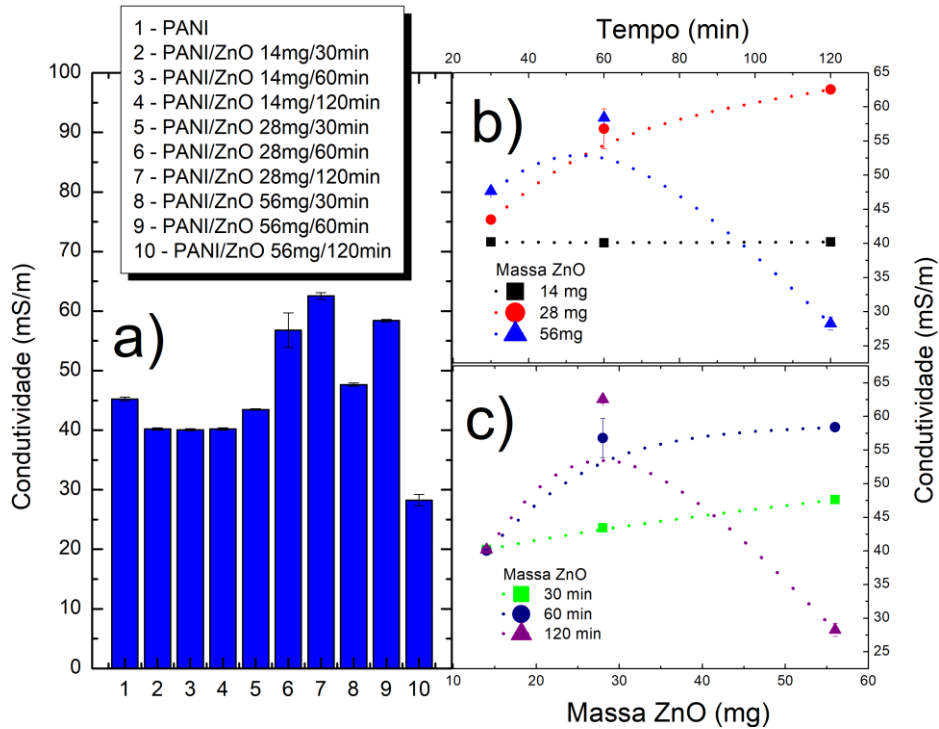


Figura 32 - Condutividade de escuro para as amostras de PANI e PANI/ZnO. a) Comparação entre as todas as amostras. b) Gráfico da dependência do tempo de produção do ZnO em função da condutividade de escuro. c) Gráfico da dependência da massa de ZnO na condutividade.

## 6. Conclusão

Foram obtidos o ZnO pela síntese de Alves et al. modificada. Os espectros de Raman apresentaram picos característicos do ZnO o que mostra que o material apresenta a estrutura wurtzita hexagonal do ZnO. Não foram encontrados picos relacionados a vacâncias de oxigênio, o que poderia sugerir uma desorganização estrutural provocada pela falta desse elemento, indicando que o ZnO obtido estaria na estequiometria adequada.

Os filmes de PANI e PANI/ZnO foram obtidos pela técnica de polimerização superficial e demonstraram necessidade de ajustes no processo da síntese para melhoria dos resultados. Os picos dos filmes obtidos pelo RAMAN não mostraram uma variação quando incorporado o ZnO na matriz de PANI. Esta ausência pode estar relacionada com dois fatores: primeiro, a razão de massa do ZnO em relação à PANI foi muito inferior o que fez com que os picos do polímero escondessem o do óxido; segundo, durante a lavagem das amostras, no processo de síntese, pode ter retirado ZnO do compósito em questão.

Em relação às micrografias, notou-se um bom recobrimento do filme em toda a parte do substrato analisado, o que mostra que o filme foi produzido de maneira eficaz e com boa qualidade. Foi possível notar a presença de pontos em relevo no MEV, o que levantou a hipótese que pode ser o ZnO. No entanto, não foi possível confirmar devido os resultados do RAMAN.

Em contrapartida ao RAMAN, na análise de FTIR com o comparativo de intensidade relativa, foi possível observar que conforme há o incremento na matriz do polímero, mais a intensidade relativa diminui. O que pode indicar a presença do ZnO conforme literatura. As amostras demonstraram bandas na região de  $1.305\text{ cm}^{-1}$ , o que indica que a PANI estava em seu estado de sal de esmeraldina (condutora). Além disso, a razão entre as bandas de anéis quinóides e anéis benzênicos ( $R_{QB}$ ), ficaram bem próximas a 1. O que indica que o material está em seu estado de maior condutividade.

No entanto, ao se realizar os testes de condutividade, as amostras não demonstram condutividade significativa, ficando bem abaixo dos trabalhos encontrados na literatura. Essa baixa condutividade pode estar relacionada a diversos fatores, por exemplo: baixa concentração de ZnO, falhas no aparato de medição e dopagem insuficiente. Além disso, o material não apresentou comportamento fotocondutor, o que está atrelado a falta de

ZnO e conseqüentemente, reduz a capacidade de formação da região de depleção e, logo, capacidade de conduzir corrente.

## 7. Perspectivas

Os filmes em relação ao aspecto morfológico e de grupamentos funcionais se mostraram bem promissores. Uma ação futura a ser empregada seria o aumento da concentração de ZnO nos filmes, avaliando principalmente as massas entre 28 mg e 56 mg, devido ao melhor comportamento condutor nessa faixa.

Além disso, controlar bem a síntese perante a lavagem, para que não ocorra a perda significativa do óxido. Outro fator importante para avaliação é o teste de dopantes diferenciados como: DBSA, HCl, HCl-ZnCl<sub>2</sub>, entre outros.

Outro ponto é a caracterização completa do ZnO obtido, como: morfologia e estrutura. Avaliar a influência do banho de HCl realizado nas características da PANI.

Por fim, é notável que o trabalho se faz promissor para uma nova solução de geração de energia elétrica e principalmente como mais uma opção a agregar na classe de células solares de 3ª geração. Sendo assim, fica evidente a intenção do autor e colaboradores deste trabalho em prosseguir com as melhorias e correções de processos, para que possa obter a tecnologia contribuindo com a evolução da ciência e sociedade.

## 8. Anexos

### 8.1. Anexo I

```
9. # Importando as bibliotecas
10. import pandas as pd
11. import plotly.express as px
12. import numpy as np
13. from sqlalchemy import false
14.
15. # Criando o grupo de arquivos
16.
17. PZ14 = ['PZ1430', 'PZ14120', 'PZ14240']
18. PZ28 = ['PZ2830', 'PZ28120', 'PZ28240']
19. PZ56 = ['PZ5630', 'PZ56120', 'PZ56240']
20.
21. # Loop para obter o Data Frame PZ14
22.
23. df_PZ14 = pd.DataFrame()
24.
25. for i in PZ14:
26.     df1 = pd.read_csv(i + '.csv')
27.     df_PZ14 = pd.concat([df_PZ14, df1])
28.
29. # Loop para obter o Data Frame PZ28
30.
31. df_PZ28 = pd.DataFrame()
32.
33. for i in PZ28:
34.     df2 = pd.read_csv(i + '.csv')
35.     df_PZ28 = pd.concat([df_PZ28, df2])
36.
37. # Loop para obter o Data Frame PZ56
38.
39. df_PZ56 = pd.DataFrame()
40.
41. for i in PZ56:
42.     df3 = pd.read_csv(i + '.csv')
43.     df_PZ56 = pd.concat([df_PZ56, df3])
44.
45. # Data Frame PANI pura
46.
47. PZ = pd.read_csv('PANI.csv')
48. PZ['amostra'] = 'PANI'
49.
50. # Media das amostras de 14mg
51.
52. df_PZ14 = df_PZ14.groupby('XLabel').mean()
```

```

53.df_PZ14.reset_index(inplace=True)
54.df_PZ14['amostra'] = 'PANI 14mg ZnO'
55.
56.# Media das amostras de 28mg
57.
58.df_PZ28 = df_PZ28.groupby('XLabel').mean()
59.df_PZ28.reset_index(inplace=True)
60.df_PZ28['amostra'] = 'PANI 28mg ZnO'
61.
62.# Media das amostras de 56mg
63.
64.df_PZ56 = df_PZ56.groupby('XLabel').mean()
65.df_PZ56.reset_index(inplace=True)
66.df_PZ56['amostra'] = 'PANI 56mg ZnO'
67.
68.# Agrupando os Data Frames
69.
70.df_geral = PZ
71.df_geral = df_geral.append([df_PZ14, df_PZ28, df_PZ56])
72.
73.# Plotando os gráficos
74.
75.fig = px.line(df_geral, x = 'XLabel', y = 'Wavenumber', color =
    'amostra',
76.                labels = {
77.                    'XLabel': 'Comprimento de Onda (cm-1)',
78.                    'Wavenumber': 'Transmitância (%)'
79.                })
80.fig['layout']['xaxis']['autorange'] = 'reversed'
81.fig.show()

```

## Referências

AFIFY, T. et al. Efficient in situ synthetic routes of polyaniline/poly (vinyl alcohol)/TiO<sub>2</sub> nanocomposites using gamma irradiation. **Journal of Molecular Structure**, v. 1153, p. 128–134, 2018.

AHMAD, A. A. et al. Optical, structural and morphological properties of synthesized PANI-CSA-PEO-based GaN nanocomposite films for optoelectronic applications. **POLYMER BULLETIN**, [s.d.].

ALAM, M. et al. Optical and Electrical Studies of Polyaniline/ZnO Nanocomposite. **JOURNAL OF NANOMATERIALS**, v. 2013, 2013.

ALDISSI, M. **Intrinsically conducting polymers: an emerging technology**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013. v. 246

AL-MASOUD, M. A. et al. Computational, kinetic, and electrochemical studies of polyaniline functionalized ZnO and ZnO-SiO<sub>2</sub> nanoparticles as corrosion protection films on carbon steel in acidic sodium chloride solutions. **JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY**, v. 112, p. 398–422, 25 ago. 2022.

ALTHOMALI, R. H. et al. Hybrid PANI@di-aldehyde carboxymethyl cellulose/ZnO nanocomposite modified glassy carbon electrode as a highly sensitive electrochemical sensor. **DIAMOND AND RELATED MATERIALS**, v. 122, fev. 2022.

ALVES, K. G. B. et al. Characterization of ZnO/Polyaniline Nanocomposites Prepared by Using Surfactant Solutions as Polymerization Media. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 116, n. 5, p. 2658–2667, 2011.

ARIFIN, A. et al. Low-Cost High-Sensitive Plastic Optical Fiber-Based Sensor for Detection of CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> Urea. **JOURNAL OF SENSORS**, v. 2022, 7 mar. 2022.

BABAEI, Z. et al. In situ synthesis of gold/silver nanoparticles and polyaniline as buffer layer in polymer solar cells. **Materials Chemistry and Physics**, v. 248, n. February, p. 122879, 2020.

BAKTASH, A.; AMIRI, O.; SAADAT, M. High Efficient Perovskite Solar Cells Base on Niobium Doped TiO<sub>2</sub> as a Buffer Layer. **JOURNAL OF NANOSTRUCTURES**, v. 10, n. 1, p. 119–127, 2020.

BALAKRISHNAN, D. et al. Molecular Docking and In Vitro Inhibitory Effect of Polyaniline (PANI)/ZnO Nanocomposite on the Growth of Struvite Crystal: a Step Towards Control of UTI. **APPLIED BIOCHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY**, [s.d.].

BAYRAM, O. et al. Graphene/polyaniline nanocomposite as platinum-free counter electrode material for dye-sensitized solar cell: its fabrication and photovoltaic performance. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS**, 2020.

BENABDELLAH, A. et al. Investigation Photoluminescence Property of ZnO / PANI Nanocomposite Synthesized in [EtOHMIM<sup>+</sup>] [HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>] Ionic Liquid and CTAB

Surfactant. **JOURNAL OF NEW MATERIALS FOR ELECTROCHEMICAL SYSTEMS**, v. 25, n. 1, p. 38–45, jan. 2022a.

BENABDELLAH, A. et al. Investigation Photoluminescence Property of ZnO / PANI Nanocomposite Synthesized in [EtOHMIM<sup>+</sup>] [HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>] Ionic Liquid and CTAB Surfactant. **JOURNAL OF NEW MATERIALS FOR ELECTROCHEMICAL SYSTEMS**, v. 25, n. 1, p. 38–45, jan. 2022b.

BIRON, D. DA S.; SANTOS, V. DOS; BERGMANN, C. P. Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Obtained by Combining Zinc Nitrate with Sodium Hydroxide in Polyol Medium. **Materials Research**, v. 23, n. 2, p. 1–6, 2020.

BOAVENTURA, R. F. DA S. Estudo da síntese de polianilina e sua industrialização. 2009.

BOROLE, D. D. et al. Synthesis and characterization of conducting homopolymers and copolymers of o-anisidine and o-toluidine in inorganic and organic supporting electrolytes. **Journal of applied polymer science**, v. 90, n. 10, p. 2634–2642, 2003.

BRITO, M. C. Células solares para a produção de energia eléctrica †. v. 28, n. 1949, p. 04, 2005.

BROOMS, T. J. et al. Photocatalytic degradation of P-Cresol using TiO<sub>2</sub>/ZnO hybrid surface capped with polyaniline. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 53, n. 2, p. 99–107, 2018.

BU, I. Y.-Y. et al. Novel CuAlO<sub>2</sub>/polyaniline hole transport layer for industrial production of perovskite solar cells. **Optik**, v. 210, p. 164505, 2020.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering**. [s.l.] John wiley & sons NY, 2011. v. 5

CASTELLO, L.; MACEDO, M. N. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. **Global Change Biology**, v. 22, n. 3, p. 990–1007, 2016.

CHAAAYA, A. A. et al. Tuning optical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO nanolaminates synthesized by atomic layer deposition. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 7, p. 3811–3819, 2014.

CHAMROUKHI, H. et al. Optical and structural properties enhancement of hybrid nanocomposites thin films based on polyaniline doped with Zinc Oxide embedded in bimodal mesoporous silica (ZnO@SiOX) nanoparticles. **Optical Materials**, v. 84, p. 703–713, 1 out. 2018.

CHEN, Y. et al. Switch type PANI/ZnO core-shell microwire heterojunction for UV photodetection. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 105, p. 259–265, 10 abr. 2022.

CHETHAN, B. et al. Humidity sensing performance of hybrid nanorods of polyaniline-Yttrium oxide composite prepared by mechanical mixing method. **Talanta**, v. 215, p. 120906, 2020.

ĆIRIĆ-MARJANOVIĆ, G. Recent advances in polyaniline research: Polymerization mechanisms, structural aspects, properties and applications. **Synthetic Metals**, v. 177, p. 1–47, 1 ago. 2013.

DAIKH, S. et al. Chemical polymerization, characterization and electrochemical studies of PANI/ZnO doped with hydrochloric acid and/or zinc chloride: Differences between the synthesized nanocomposites. **JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS**, v. 121, p. 78–84, out. 2018.

D'AVINO, G. et al. Electrostatic phenomena in organic semiconductors: fundamentals and implications for photovoltaics. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 28, n. 43, p. 433002, 2016.

DE SOUZA, V. S.; DA FROTA, H. O.; SANCHES, E. A. Polyaniline-CuO hybrid nanocomposite with enhanced electrical conductivity. **Journal of Molecular Structure**, v. 1153, p. 20–27, 2018.

DEMIREL, S.; BOZKURT, B. Coating of PANI/SnO<sub>2</sub>, PANI/ZnO Polymeric Nanocomposite on 304 L Stainless Steel by Galvanostatic Method and Investigation of Corrosion Behavior. **PROTECTION OF METALS AND PHYSICAL CHEMISTRY OF SURFACES**, v. 58, n. 1, p. 53–64, fev. 2022.

DESHMUKH, M. A. et al. EDA modified PANI/SWNTs nanocomposite for determination of Ni (II) metal ions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 537, p. 303–309, 2018.

DU, Y. et al. Structural and optical properties of nanophase zinc oxide. **Applied Physics A**, v. 76, n. 2, p. 171–176, 2003.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 748–764, 1 nov. 2014.

FARZIN, B. Z. et al. ZnO nanoparticles and polyaniline blend as an active layer for bulk heterojunction solar cell applications. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 21, p. 18128–18135, 2018.

GELAW, T. B.; SAROJINI, B. K.; KODOTH, A. K. Chitosan/Hydroxyethyl Cellulose Gel Immobilized Polyaniline/CuO/ZnO Adsorptive-Photocatalytic Hybrid Nanocomposite for Congo Red Removal. **JOURNAL OF POLYMERS AND THE ENVIRONMENT**, [s.d.].

GIROTTO, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuálas corretamente. **Química Nova**, v. 25, n. 4, jul. 2002.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 51). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 26, n. 1, p. 3–12, 2018.

GU, W. et al. Study on the design of ZnO/PANI composites and the mechanism of enhanced humidity sensing properties. **CURRENT APPLIED PHYSICS**, v. 34, p. 112–121, fev. 2022.



- GUL, M.; KOTAK, Y.; MUNEER, T. Review on recent trend of solar photovoltaic technology. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 34, n. 4, p. 485–526, 2016.
- GULTEPE, O.; ATAY, F. The effect of Al element on structural, optical, electrical, surface and photocatalytic properties of Sol-gel derived ZnO films. **APPLIED PHYSICS A-MATERIALS SCIENCE & PROCESSING**, v. 128, n. 1, jan. 2022.
- GUSAIN, M.; NAGARAJAN, R.; SINGH, S. K. Highly ordered polyaniline: synthesis, characterization and electrochemical properties. **Polymer Bulletin**, p. 1–10, 2019.
- HADIZADEH, F.; NASIRIAN, S. Utilizing zinc oxide nanorods/polyaniline heterojunction as a flexible self-powered ultraviolet photodetector. **OPTICAL MATERIALS**, v. 123, jan. 2022.
- HASOON, S. A.; ABDUL-HADI, S. A. Optical, structural and electrical properties of electrochemical synthesis of thin film of polyaniline. **Baghdad Science Journal**, v. 15, n. 1, 2018.
- HU, Y.; CHEN, H.-J. Preparation and characterization of nanocrystalline ZnO particles from a hydrothermal process. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 10, n. 3, p. 401–407, 2008.
- HUANG, R. et al. Characterization and tribology performance of polyaniline-coated nanodiamond lubricant additives. **NANOTECHNOLOGY REVIEWS**, v. 11, n. 1, p. 2190–2201, 16 jun. 2022.
- JING, Y. et al. The Adsorption Performance of Polyaniline/ZnO Synthesized through a Two-Step Method. **CRYSTALS**, v. 12, n. 1, jan. 2022.
- JITIANU, M.; GOIA, D. V. Zinc oxide colloids with controlled size, shape, and structure. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 309, n. 1, p. 78–85, 2007.
- JOSHI, N. C. Synthesis of r-GO/PANI/ZnO based material and its application in the treatment of wastewater containing Cd<sup>2+</sup> and Cr<sup>6+</sup> ions. **SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY**, [s.d.].
- KARERI, T. et al. A flexible fiber-shaped hybrid cell with a photoactive gel electrolyte for concurrent solar energy harvesting and charge storage. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH**, [s.d.].
- KARTHIKEYAN, C. et al. Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 828, p. 154281, 2020.
- KAUSAR, A. Polyaniline and quantum dot-based nanostructures: Developments and perspectives. **JOURNAL OF PLASTIC FILM & SHEETING**, 2020.
- KHAN, F. et al. Degradation of persistent organic pollutant using Ag-doped ZnO-ZnS-polyaniline composite as photocatalyst. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY**, [s.d.].

KIM, K.-E.; KIM, T. G.; SUNG, Y.-M. Enzyme-conjugated ZnO nanocrystals for collisional quenching-based glucose sensing. **CrystEngComm**, v. 14, n. 8, p. 2859–2865, 2012.

KOLEVA, M. E. et al. **Optical properties of Ag-ZnO nanostructures**. 18th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications. **Anais...International Society for Optics and Photonics**, 2015.

KUMARI JANGID, N.; JADOUN, S.; KAUR, N. A review on high-throughput synthesis, deposition of thin films and properties of polyaniline. **European Polymer Journal**, v. 125, p. 109485, 2020a.

KUMARI JANGID, N.; JADOUN, S.; KAUR, N. A review on high-throughput synthesis, deposition of thin films and properties of polyaniline. **European Polymer Journal**, v. 125, p. 109485, 15 fev. 2020b.

KYOMUHIMBO, H. D. et al. Electroconductive Polyaniline-Ag-ZnO Green Nanocomposite Material. **PROCESSES**, v. 10, n. 3, mar. 2022.

LANZALACO, S.; MOLINA, B. G. Polymers and Plastics Modified Electrodes for Biosensors: A Review. **MOLECULES**, v. 25, n. 10, 2020.

LEE, H.; CHO, S. W.; YI, Y. Interfacial electronic structure for high performance organic devices. **Current Applied Physics**, v. 16, n. 12, p. 1533–1549, 2016.

LI, R. et al. Effective synthesis to control the growth of polyaniline nanofibers by interfacial polymerization. **Synthetic Metals**, v. 171, p. 39–44, 2013.

LI, Y. et al. Simple synthesis of rice husk hollow carbon-coated flower ZnO for the anode in a high performance lithium-ion battery. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 145, p. 109540, 2020.

LIAO, G.; LI, Q.; XU, Z. The chemical modification of polyaniline with enhanced properties: A review. **Progress in Organic Coatings**, v. 126, p. 35–43, 1 jan. 2019.

LIU, H. et al. Morphological evolution of ZnO microspheres from Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>Ac<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O by ultrasonic irradiation method. **CrystEngComm**, v. 15, n. 18, p. 3615–3622, 2013.

LIU, S. et al. Preparation of spunlaced viscose/PANI-ZnO/GO fiber membrane and its performance of photocatalytic decolorization. **JOURNAL OF INDUSTRIAL TEXTILES**, [s.d.].

LV, F. et al. N -I co -doped TiO<sub>2</sub> compact film as a highly effective n -type electron blocking layer for solar cells. **JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS**, v. 837, 2020.

MARGUERON, S. et al. Optical and vibrational properties of (ZnO)<sub>k</sub>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> natural superlattice nanostructures. **Journal of Applied Physics**, v. 119, n. 19, p. 1–10, 2016a.

MARGUERON, S. et al. Optical and vibrational properties of (ZnO)<sub>k</sub>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> natural superlattice nanostructures. **Journal of Applied Physics**, v. 119, n. 19, p. 195103, 2016b.

MAŽEIKIENĖ, R.; NIAURA, G.; MALINAUSKAS, A. Raman spectroelectrochemical study of polyaniline at UV, blue, and green laser line excitation in solutions of different pH. **Synthetic Metals**, v. 243, p. 97–106, 2018.

MERONI, D. et al. Ultrasound-assisted synthesis of ZnO photocatalysts for gas phase pollutant remediation: Role of the synthetic parameters and of promotion with WO<sub>3</sub>. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 66, p. 105119, 2020.

MOHAMMAD, M. T.; HASHIM, A. A.; AL-MAAMORY, M. H. Highly conductive and transparent ZnO thin films prepared by spray pyrolysis technique. **Materials Chemistry and Physics**, v. 99, n. 2–3, p. 382–387, 2006.

MORÁVKOVÁ, Z.; BOBER, P. Writing in a polyaniline film with laser beam and stability of the record: A Raman spectroscopy study. **International Journal of Polymer Science**, v. 2018, 2018.

MOREIRA, S. R. J. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. **Rio de Janeiro: LTC**, 2017.

MURUGESAN, T. et al. Interlinked Polyaniline/ZnO Nanorod Composite for Selective NO<sub>2</sub> Gas Sensing at Room Temperature. **ACS APPLIED NANO MATERIALS**, v. 5, n. 4, p. 4921–4930, 22 abr. 2022.

MUTERI, V. et al. Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. **Energies**, v. 13, n. 1, 2020.

NARANGAMMANA, L. K. et al. Organic-Inorganic Hybrid Thermocouple Intended for Thermoelectric Generators Using Low-Cost Nontoxic Materials. **JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS**, [s.d.].

NASIRIAN, S.; HADIZADEH, F. A cheap self-powered UV-photodetector based on layer-by-layer arrangement of polyaniline and ZnO. **POLYMER**, v. 245, 6 abr. 2022.

NAZIR, A. A review of polyvinylidene fluoride (PVDF), polyurethane (PU), and polyaniline (PANI) composites-based materials for electromagnetic interference shielding. **JOURNAL OF THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS**, 2020.

NAZIR, A. et al. Adsorption kinetics for the removal of toxic Congo red dye by polyaniline and citrus leaves as effective adsorbents. **ZEITSCHRIFT FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE-INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH IN PHYSICAL CHEMISTRY & CHEMICAL PHYSICS**, [s.d.].

NEELGUND, G. M.; OKI, A. ZnO conjugated graphene: An efficient sunlight driven photocatalyst for degradation of organic dyes. **Materials Research Bulletin**, v. 129, p. 110911, 2020.

NEKRASOV, A. A. et al. Raman spectroelectrochemical study of electrodeposited polyaniline doped with polymeric sulfonic acids of different structures. **Chemical Papers**, v. 71, n. 2, p. 449–458, 2017.

NIKNEZHAD, A. et al. PANI-ZnO/Pt-Ru electrocatalyst for methanol oxidation: Synthesis, characterization, electrocatalytic performance and artificial neural network

modeling. **CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN**, v. 180, p. 123–133, abr. 2022.

NIMBALKAR, A. R.; PATIL, M. G. Synthesis of ZnO thin film by sol-gel spin coating technique for H<sub>2</sub>S gas sensing application. **Physica B: Condensed Matter**, v. 527, p. 7–15, 2017.

NOMOTO, J. et al. Highly (0001)-oriented Al-doped ZnO polycrystalline films on amorphous glass substrates. **Journal of Applied Physics**, v. 120, n. 12, p. 125302, 2016.

OKPARA, E. C. et al. Electrochemical evaluation of Cd<sup>2+</sup> and Hg<sup>2+</sup> ions in water using ZnO/Cu(2)ONPs/PANI modified SPCE electrode. **SENSING AND BIO-SENSING RESEARCH**, v. 35, fev. 2022.

PAIK, P. et al. Polyaniline nanotubes with rectangular-hollow-core and its self-assembled surface decoration: High conductivity and dielectric properties. **RSC Advances**, v. 4, n. 24, p. 12342–12352, 2014.

PAIVA, A. B. D. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES DE POLIANILINA COM DIÓXIDO DE ESTANHO. p. 52, 2018.

PALSANIYA, S.; MUKHERJI, S. Enhanced dielectric and electrostatic energy density of electronic conductive organic-metal oxide frameworks at ultra-high frequency. **CARBON**, v. 196, p. 749–762, 30 ago. 2022.

PARCHAM, E.; MIANDOAB, S. A. Introducing nanostructure patterns for performance enhancement in PbS colloidal quantum dot solar cells. **INTERNATIONAL JOURNAL OF NANO DIMENSION**, v. 11, n. 1, p. 18–25, 2020.

PARK, C. H.; JANG, S. K.; KIM, F. S. Conductivity enhancement of surface-polymerized polyaniline films via control of processing conditions. **Applied Surface Science**, v. 429, p. 121–127, 2018a.

PARK, C. H.; JANG, S. K.; KIM, F. S. Conductivity enhancement of surface-polymerized polyaniline films via control of processing conditions. **Applied Surface Science**, v. 429, p. 121–127, 2018b.

PATHAK, J.; SINGH, P. Synthesis and characterization of ternary layered double hydroxide containing zinc/copper/nickel and its PANI composite. **POLYMER COMPOSITES**, [s.d.].

PAWAR, S. et al. Synthesis and characterization of polyaniline: TiO<sub>2</sub> nanocomposites. **International Journal of Polymeric Materials**, v. 59, n. 10, p. 777–785, 2010.

POLITI, J. et al. **Photoluminescence characterization of ZnO nanowires functionalization**. Optical Sensors 2015. **Anais...International Society for Optics and Photonics**, 2015.

PRASANNA, A. E. P. et al. Investigation on zinc oxide nanoparticle incorporated polyaniline nano composites for solar cell applications. **MATERIALS TODAY-PROCEEDINGS**, v. 48, n. 2, SI, p. 245–252, 2022.

- RABAIA, M. K. H. et al. Environmental impacts of solar energy systems: A review. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 141989, 2021.
- REHMAN, M. N. UR et al. Facile synthesis of novel PANI covered Y2O3-ZnO nanocomposite: A promising electrode material for supercapacitor. **SOLID STATE SCIENCES**, v. 128, jun. 2022.
- ROHOM, A. B. et al. Electropolymerization of polyaniline thin films. **High Performance Polymers**, v. 26, n. 6, p. 641–646, 2014.
- SHAKIR, S. et al. Multistep electrophoretic deposition of TiO2 film and its surface modification for dye sensitized solar cells. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 837, p. 155579, 2020.
- SHAKOOR, A.; RIZVI, T. Z. Raman spectroscopy of conducting poly (methyl methacrylate)/polyaniline dodecylbenzenesulfonate blends. **Journal of Raman Spectroscopy: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering**, v. 41, n. 2, p. 237–240, 2010.
- SPANHEL, L. Colloidal ZnO nanostructures and functional coatings: A survey. **Journal of sol-gel science and technology**, v. 39, n. 1, p. 7–24, 2006.
- THAMBIDURAI, S. et al. Enhanced bactericidal performance of nickel oxide-zinc oxide nanocomposites synthesized by facile chemical co-precipitation method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 830, p. 154642, 2020.
- TONPE, D. A. et al. Development of organic/inorganic PANI/ZnO 1D nanostructured hybrid thin film solar cell by soft chemical route. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, n. 17, p. 16056–16064, set. 2019.
- TRCHOVÁ, M.; STEJSKAL, J. Polyaniline: The infrared spectroscopy of conducting polymer nanotubes (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 83, n. 10, p. 1803–1817, 2011.
- UTAMI, A. N. et al. Reverse micelle facilitated synthesis of nanostructured polyaniline as the counter electrode materials in dye-sensitized solar cells. **POLYMER-PLASTICS TECHNOLOGY AND MATERIALS**, 2020.
- VIJAYALAKSHMI, S. et al. Structural, electrical, and photocatalytic investigations of PANI/ZnO nanocomposites. **Ionics**, v. 27, n. 7, p. 2967–2977, jul. 2021a.
- VIJAYALAKSHMI, S. et al. Structural, electrical, and photocatalytic investigations of PANI/ZnO nanocomposites. **IONICS**, v. 27, n. 7, p. 2967–2977, jul. 2021b.
- VITER, R. et al. Application of Room Temperature Photoluminescence From ZnO Nanorods for Salmonella Detection. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, n. 6, p. 2028–2034, 2014.
- VITER, R. et al. The influence of localized plasmons on the optical properties of Au/ZnO nanostructures. **J. Mater. Chem. C**, v. 3, n. 26, p. 6815–6821, 2015.

WANG, C. et al. Interface Growth of PANI-ZnO Nanohybrids on a Self-Formed Grapefruit Peel Aerogel to Construct a Quick Self-Restored Gas Sensor. **ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING**, [s.d.].

WANG, Y. Preparation and application of polyaniline nanofibers: an overview. **POLYMER INTERNATIONAL**, v. 67, n. 6, p. 650–669, jun. 2018.

WU, Y. et al. Some Important Issues of the Commercial Production of 1-D Nano-PANI. **POLYMERS**, v. 11, n. 4, 2019.

XIONG, S. et al. Simultaneous Preparation of Polyaniline Nanofibers/Manganese Dioxide Composites at the Interface of Oil/Water for Supercapacitive Application. **JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS**, v. 48, n. 10, SI, p. 6666–6674, 2019.

YANG, P. et al. Porous flexible polyaniline/polyvinylidene fluoride composite film for trace-level NH<sub>3</sub> detection at room temperature. **Materials Letters**, v. 271, p. 127798, 2020.

YOUN, C. J. et al. Optical properties of Zn-terminated ZnO bulk. **Journal of Crystal Growth**, v. 261, n. 4, p. 526–532, 2004.

YU, P. et al. Design and fabrication of silicon nanowires towards efficient solar cells. **Nano Today**, v. 11, n. 6, p. 704–737, 2016.

ZAFAR, M. et al. Synergistic effects of polyaniline/poly(methyl methacrylate)/carbon nanotubes in nanocomposite polymer substrate electrodes for solar energy applications. **MOLECULAR CRYSTALS AND LIQUID CRYSTALS**, [s.d.].

ZAFAR, M. et al. Synergistic effects of polyaniline/poly(methyl methacrylate)/carbon nanotubes in nanocomposite polymer substrate electrodes for solar energy applications. **MOLECULAR CRYSTALS AND LIQUID CRYSTALS**, [s.d.].

ZARE, N. et al. Ultrasonic-assisted synthesis of highly effective visible light Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZnO/PANI nanocomposite: Thoroughly kinetics and thermodynamic investigations on the Congo red dye decomposition. **JOURNAL OF MOLECULAR STRUCTURE**, v. 1250, n. 3, 15 fev. 2022.

ZHANG, Y. et al. Ultrasensitive flexible NH<sub>3</sub> gas sensor based on polyaniline/SrGe<sub>4</sub>O<sub>9</sub> nanocomposite with ppt-level detection ability at room temperature. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 319, p. 128293, 2020.

ZHAO, D. et al. Luminescent ZnO quantum dots for sensitive and selective detection of dopamine. **Talanta**, v. 107, p. 133–139, 2013.

ZHAO, F. et al. Realization of 18.97% theoretical efficiency of 0.9  $\mu$ m thick c-Si/ZnO heterojunction ultrathin-film solar cells via surface plasmon resonance enhancement. **PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS**, v. 24, n. 8, p. 4871–4880, 23 fev. 2022.

ZHONG, Q.; MATIJEVIĆ, E. Preparation of uniform zinc oxide colloids by controlled double-jet precipitation. **Journal of Materials Chemistry**, v. 6, n. 3, p. 443–447, 1996.

ZHU, F.-R. et al. Preparation and thermal properties of palmitic acid/polyaniline/copper nanowires form-stable phase change materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, n. 2, p. 1133–1141, 2014.