

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE FÍSICA  
GRUPO DE ESPECTROSCOPIA DE MATERIAIS  
(GEM)

CÁSSIA EUGÊNIA BARROS

Estudo de detectores de radiação ionizante baseado em  
blendas de quitosana com nanopartículas de ouro

Uberlândia  
22 de dezembro de 2020

CÁSSIA EUGÊNIA BARROS

Estudo de detectores de radiação ionizante baseado em  
blendas de quitosana com nanopartículas de ouro

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Física da  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito para obtenção do título de Bacharel  
em Física Médica.

**Orientador: Prof. Dr. Mauricio Foschini**

Uberlândia  
22 de dezembro de 2020

**CÁSSIA EUGÊNIA BARROS**

**Estudo de detectores de radiação ionizante baseado em blendas de  
quitosana com nanopartículas de ouro**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Física da  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito para obtenção do título de Bacharel  
em Física Médica

Banca de avaliação:

---

Prof. Dr. Mauricio Foschini

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Perini

---

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

Uberlândia (MG), 22 de dezembro de 2020

*“Dar o melhor de si é mais importante  
que ser o melhor” (Mike Lerner)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado forças para chegar até aqui.

Aos meus pais, Paulo e Edileuza, que sempre me incentivaram e acreditaram que eu seria capaz de superar os obstáculos que encontrei durante esse caminho. Agradeço pelo carinho, afeto, dedicação e cuidado que meus pais me deram durante toda a minha vida, dedico esta monografia a eles. Com muito amor e gratidão.

Sou grata ao meu orientador, Prof.Dr. Maurício Foschini, pela sua atenção durante todo o projeto. Sua motivação foi essencial para conclusão deste trabalho.

Ao meu namorado, Rafael, que sempre esteve ao meu lado, me incentivando e apoiando em todas as decisões. Agradeço também pelos momentos de descontração, afinal, nem só de trabalho se vive. Tenho certeza que sem seu companheirismo eu não teria chegado até aqui.

Agradeço aos meus amigos de curso que sempre foram companheiros nessa jornada. Em especial agradeço à Mirella, Alaine, Ana Luiza, Maria e Samara que fizeram que essa caminhada fosse mais leve.

## RESUMO

Neste trabalho, 3 amostras, quitosana sem nanopartículas, quitosana dopada com nanopartículas de ouro com  $13,5 \pm 1,1$  nm de diâmetro e quitosana dopada com nanopartículas de ouro com  $15,9 \pm 1,7$  nm de diâmetro, foram analisadas para checar a influência do tamanho das nanopartículas na resposta conductométrica quando irradiadas com Raios-X de 35kV e 1mA. Os desenhos dos eletrodos interdigitados foram realizados no software Word e impressos sobre filmes de poliimida para um posterior tratamento e utilização. Das 3 amostras analisadas, 2 mostraram-se promissoras para a utilização como monitores de radiação, enquanto a outra não foi considerada adequada devido à memória adquirida quando irradiadas pela primeira vez.

## **ABSTRACT**

In this work, 3 samples, chitosan without nanoparticles, chitosan doped with gold nanoparticles with  $13.5 \pm 1.1$  nm in diameter and chitosan doped with gold nanoparticles with  $15.9 \pm 1.7$  nm in diameter, were analyzed to study the influence of the size of the nanoparticles on the conductometric response when irradiated with X-rays of 35kV and 1mA. The drawings of the interdigitated electrodes were produced using Microsoft Word and printed on polyimide films for further treatment and use. Of the 3 samples analyzed, 2 were promising for use as radiation monitors, while the other was not considered adequate due to the memory acquired when irradiated for the first time.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação esquemática do mecanismo de termoluminescência (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013). .....	24
Figura 2: Regiões de operação dos detectores a gás (DÖNMEZ, 2017; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013). .....	26
Figura 3: Representação esquemática do sistema de bandas do Isolante e do Semicondutor (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013). .....	31
Figura 4: Representação esquemática do processo de obtenção de filmes por casting (Jesus, 2009) .....	35
Figura 5: Desenho da máscara do interdigitado. ....	37
Figura 6: Exemplo da resposta de um condutor linear (Ferreira,2015).....	41
Figura 7: Exemplo da resposta de um condutor não linear (Ferreira,2015)....	41
Figura 8: Gráfico mostrando a rampa de potencial para as medidas feitas sem a aplicação de radiação sobre o eletrodo.....	43
Figura 9: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre o eletrodo. ....	44
Figura10: Gráfico da rampa de potencial comparando a Medida 3 (última medida sem aplicar Raios-x) e a Medida 4 (primeira medida com Raios-x). ....	45
Figura11: Rampa de potencial da medida realizada um minuto após ter sido irradiada (Medida 5). .....	46
Figura12: Gráfico mostrando a rampa de potencial para as medidas feitas sem a aplicação de radiação sobre a Amostra 3. ....	47

Figura 13: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 3.....	48
Figura 14: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 3.....	49
Figura 15: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 3 1 minutos após ter sido irradiada.....	50
Figura 16: Gráfico da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 sem radiação.....	52
Figura 17: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 sem radiação .....	53
Figura 18: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 com radiação .....	54
Figura 19: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 com radiação .....	55
Figura 20: Gráfico de resposta do sensor de quitosana/gelatina e nanopartículas de 71,50 nm sobre eletrodos coaxiais de ouro/cromo espaçados de 0,2 mm. O tubo foi justado para 35kV e variou-se a corrente. ....	56
Figura 22: Gráfico de resposta do sensor de quitosana/gelatina e nanopartículas de 71,50 nm sobre eletrodos coaxiais de ouro/cromo espaçados de 0,2 mm via rampa de potencial. O tubo foi justado para 35kV e variou-se a corrente. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1	DETECTORES	17
2.1.1	PROPRIEDADES DE UM DETECTOR	17
2.1.2	FATORES DETERMINANTES PARA A ESCOLHA DE UM DETECTOR	18
2.1.2.1	Tipo de radiação	18
2.1.2.2	Intervalo de tempo de interesse	18
2.1.2.3	Condições de trabalho	19
2.1.2.4	Tipo de informação desejada	19
2.1.2.5	Características operacionais e custo	19
2.1.3	EFICIÊNCIA DE UM DETECTOR	20
2.1.3.1	Eficiência intrínseca	20
2.1.3.2	Eficiência absoluta	20
2.1.4	ESPECIFICAÇÕES PARA MONITORES E DOSÍMETROS	21
2.1.4.1	Monitor de Radiação	21
2.1.4.2	Dosímetro	21
2.1.5	DETECÇÃO UTILIZANDO EMULSÕES FOTOGRÁFICAS	22
2.1.5.1	Emulsões Fotográficas	22
2.1.5.2	Interação da Radiação com as emulsões fotográficas	23
2.1.6	DETECTORES TERMOLUMINESCENTE	23
2.1.6.1	O mecanismo da termoluminescência	23
2.1.6.2	Aplicação da dosimetria com detectores termoluminescente	24
2.1.6.3	Principais materiais termoluminescente	24

2.1.7	DETECTORES A GÁS	25
2.1.7.1	Regiões de operação para detectores a gás	25
2.1.7.2	Câmara de ionização	27
2.1.8	DETECTORES PROPORCIONAIS	27
2.1.9	DETECTOR GEIGER-MÜLLER	27
2.1.9.1	Detectores à Cintilação	28
2.1.9.2	Características dos materiais cintiladores	28
2.1.9.3	Eficiência de cintilação	29
2.1.9.4	A emissão de luz nos materiais cintiladores	29
2.1.10	DETECTORES UTILIZANDO MATERIAIS SEMICONDUTORES	29
2.1.10.1	Materiais isolantes, condutores e semicondutores	29
2.1.10.2	Criação de doadores e receptores	31
2.1.10.3	Interação da radiação com detectores semicondutores	32
2.2	FILMES FINOS	33
2.2.1	TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DOS FILMES	33
2.2.1.1	Spin Coating	34
2.2.1.2	Dip Coating	34
2.2.1.3	Layer-by-Layer	34
2.2.1.4	Casting	35
3	OBJETIVOS	36
4	TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	36
4.1	PREPARAÇÃO DOS ELETRODOS INTERDIGITADO	37
4.1.1	PREPARO DAS MÁSCARAS DOS ELETRODOS	37
4.1.2	METALIZAÇÃO DOS ELETRODOS	37

4.2	PREPARO DA SOLUÇÃO E DEPOSIÇÃO DOS FILMES DE BLENDA POLIMÉRICA SOBRE OS ELETRODOS INTERDIGITADOS _____	38
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS _____	39
4.3.1	MEDIDAS CONDUCTOMÉTRICAS COM INCIDÊNCIA DOS RAIOS-X _____	39
4.3.2	DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DOS FILMES _____	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	42
5.1	MEDIDAS AMOSTRA 3 _____	46
5.2	MEDIDAS AMOSTRA 2 _____	51
5.3	AMOSTRA 4 _____	56
6	CONCLUSÃO _____	58
	REFERÊNCIAS _____	60

## 1 INTRODUÇÃO

É difícil imaginar a prática médica no século XXI sem a capacidade de visualizar vasos sanguíneos, ossos e tecidos moles em praticamente qualquer lugar do corpo. Apesar deste nível de desenvolvimento tecnológico na área de imagens médicas, a radiação ionizante só foi descoberta no final do século XX, quando Wilhelm Conrad Roentgen se deparou com Raios-X enquanto trabalhava com um tubo de raios catódicos em seu laboratório na Julius-Maximilians-University of Würzburg, na Alemanha. Um mês após sua descoberta, Raios-X já eram produzidos nos Estados Unidos e na Europa. Seis meses depois, estavam sendo usados nos campos de batalha para localizar projéteis em soldados feridos (REED, 2011).

Dentre as pessoas que contribuíram para o conhecimento que se tem sobre radiação ionizante, dois nomes se destacam: Henri Becquerel e Marie Curie. Logo após a descoberta dos Raios-X, o cientista francês Henri Becquerel encontrou outra fonte de radiação. Ele descobriu que alguns minerais são fluorescentes quando expostos ao sol e conseguiu captar essa fluorescência usando uma chapa fotográfica. Um dos primeiros minerais descobertos por ele foi o Urânio. Após guardar uma amostra numa gaveta com chapas fotográficas num dia nublado, Becquerel descobriu que as chapas pareciam ter sido expostas à Luz, o que fez com que ele deduzisse que o Urânio fosse capaz de emitir sua própria radiação. Ele continuou demonstrando que o Urânio é um elemento radioativo e por essa descoberta compartilhou o prêmio Nobel com Marie e Pierre Curie em 1903 (CORDEIRO; PEDUZZI, 2011; RADVANYI; VILLAIN, 2017).

Interessada pelo trabalho de Becquerel, Marie Curie suspeitou que haviam outros elementos radioativos na amostra de minério de Urânio. Em 1898, juntamente com seu marido, Curie descobriu outro elemento radioativo e a ele deu o nome de Polônio. O Rádium foi outro elemento descoberto por Marie Curie na mesma época. Ao longo de sua vida, Curie promoveu o uso de Rádium para aliviar dores e sofrimento e se devotou a usar isso na segunda guerra mundial, auxiliada por sua filha Irène Joliot-Curie. A importância de seu trabalho é refletida nas numerosas descobertas que o tomaram como base. Em 1911 ela recebeu seu segundo prêmio Nobel, dessa vez em química, pelas duas descobertas a respeito da radioatividade (RADVANYI; VILLAIN, 2017).

Antes de 1913 era difícil o uso de radiação ionizante na medicina devido à alta tensão necessária para produção dos Raios-X usados na geração das imagens, a qual resultava frequentemente na quebra do tubo de vidro usado na fonte de raio-X. Em 1913, Coolidge projetou um tubo a vácuo que servia como uma intensa e confiável fonte. Após isso, outros aparelhos foram desenvolvidos, incluindo um gerador de Raios-X de 1 milhão de volts, feito pela General Electric em 1931. Esses desenvolvimentos promoveram uma ferramenta extremamente útil para a indústria de imagens médicas (REED, 2011).(REED, 2011)

Apesar de seu uso disseminado, havia muito pouco conhecimento sobre os efeitos colaterais que poderiam aparecer com o uso da radiação. Ninguém sabia que os Raios-X poderiam ser prejudiciais, em parte por causa da lentidão para o aparecimento dos sintomas. Complicações de saúde devido ao uso de radiação foram relatadas por Pierre Curie em seu discurso no recebimento do Nobel (CORDEIRO; PEDUZZI, 2011):

"Se alguém deixa uma pequena ampola de vidro com vários centigramas

de sal de rádio no bolso por algumas horas, em um dia vai sentir absolutamente nada, mas daqui a 15 dias a vermelhidão aparecem na epiderme e, em seguida, uma ferida, que será muito difícil de curar. Uma ação mais prolongada poderia levar a paralisia e morte”

Thomas Edison, William J. Morton e Nikola Tesla estão entre os primeiros a reportar os possíveis efeitos adversos quando perceberam irritação nos olhos após experimentos com Raios-X e substâncias fluorescentes. Exposições deliberadas a essa forma de energia resultaram em perdas de órgãos e até mesmo vidas. Muita da informação coletada sobre seus danos, foi conseguida com grandes perdas pessoais. O uso generalizado e indevido da radioatividade levou a ferimentos graves e ao desenvolvimento de técnicas de dosimetria, surgindo, uma ciência denominada Física Médica (Health Physics) (REED, 2011).

Hoje a radiação está entre as fontes mais amplamente estudadas de doenças. O termo Físico Médico surgiu na corporação de engenheiros do exército dos Estados Unidos, no distrito de Manhattan. No verão de 1942 os líderes da corporação pediram ao físico cósmico Ernest O. Wollan, da Universidade de Chicago, para formar um grupo de estudos para controlar os danos causados pela radioatividade. Suas atividades incluíam principalmente o desenvolvimento de instrumentos para monitoramento de áreas, de pessoas e de material radioativo descartado. Uma ampla acumulação de dados sobre dose-resposta permitiu aos físicos médicos especificarem níveis adequados para que as atividades de médicos, cientistas e indústrias fossem realizadas de forma segura.

Desde os primórdios da Física Médica, sua preocupação é monitorar os níveis de radiação para que os perigos devido ao seu uso não sejam superiores

aos ganhos que ela traz para a sociedade. Ter consciência das doses recebidas pelos pacientes e por todos os profissionais envolvidos nos processos, continua sendo a principal preocupação da Física Médica. Isso só é possível com o uso de detectores de radiação, que passaram por grande evolução desde a descoberta dos Raios-X.

Os detectores de radiação são classificados, quanto ao seu princípio de funcionamento, em três grupos, cada qual utilizado para necessidades específicas: detectores com câmaras com gás, cintiladores e detectores de estado sólido. Cada um desses três tipos possui características que fazem com que sejam recomendados para usos específicos e, apesar do seu grande uso, também possuem grandes limitações (MILBRATH *et al.*, 2008).

Embora haja grande empenho da comunidade científica no desenvolvimento de novos detectores, ainda há necessidade de tecnologias para desenvolvimento de instrumentos mais baratos que superem algumas limitações ou baixo desempenho dos detectores atuais. Nesse contexto, tem-se dado grande atenção a novos materiais com potencial para serem usados no desenvolvimento de detectores de radiação.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Detectores

As aplicações da radiação ionizante requerem o uso de um detector de radiação, ou seja, um equipamento que seja capaz de detectar sua presença ou consiga quantificá-la (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]).

#### 2.1.1 Propriedades de um detector

Para que um dispositivo seja considerado um detector, ele precisa apresentar as seguintes características: (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

a. *Repetitividade*: nível de concordância dos resultados obtidos nas mesmas condições de medição;

b. *Reprodutibilidade*: nível de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;

c. *Estabilidade*: Capacidade do instrumento de conservar constantes suas características de medição ao longo do tempo;

d. *Exatidão*: avalia quanto a resposta do detector se aproxima do valor correto. A exatidão só pode ser avaliada por comparação com um padrão.

e. *Precisão*: nível de concordância dos resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação à média;

f. *Sensibilidade*: razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo;

g. *Eficiência*: capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos.

## **2.1.2 Fatores determinantes para a escolha de um detector**

### **2.1.2.1 Tipo de radiação**

O modo como as radiações interagem com a matéria influencia diretamente na escolha do detector. Geralmente, um detector que é eficiente na medida de um determinado tipo de radiação pode ser inadequado para medir um outro (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.2.2 Intervalo de tempo de interesse**

Em alguns casos pode-se precisar medir a radiação em um intervalo de tempo curto o suficiente para poder ser aproximado para uma medição instantânea. Nestes casos, são utilizados detectores ativos para medir a taxa de dose, como os detectores a gás, cintilômetros e os detectores semicondutores. Em outros casos, pode-se precisar medir a dose de radiação acumulada durante um período de dias ou semanas, caso em que são utilizados detectores passivos. Estes, registram a dose acumulada em um período e podem ser processados posteriormente. Detectores passivos incluem as emulsões fotográficas e os detectores termoluminescentes (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.2.3 Condições de trabalho**

Quando se trata de detectar radiação, temos que levar em consideração a sensibilidade e a resistência do detector. O detector utilizado em trabalho de campo precisa ter uma certa robustez, portabilidade e autonomia diferente dos detectores utilizados em clínicas e laboratórios. Detectores muito sensíveis a choque mecânico ou que possuem grande sensibilidade a fatores climáticos, não podem ser utilizados para medição em unidades móveis (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.2.4 Tipo de informação desejada**

Conforme a finalidade do detector, pode-se precisar apenas do número de contagens ou da energia das partículas (ou fótons) emitidas pela fonte de radiação. Em outros casos, pode ser de interesse, por exemplo, a dose absorvida ou a distribuição de energia. Para se obter a informação desejada é preciso escolher o detector mais adequado para a operação em questão (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.2.5 Características operacionais e custo**

Alguns fatores importantes na escolha do detector são: a facilidade de operação, facilidade e disponibilidade de manutenção e, finalmente, o custo do detector (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### 2.1.3 Eficiência de um detector

A eficiência é um reflexo da interação da radiação com o volume sensível do detector, se ocorrer maior interação, diretamente implica em uma maior eficiência (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]).

A eficiência de um detector pode ser definida de duas formas: eficiência intrínseca e eficiência absoluta (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

#### 2.1.3.1 Eficiência intrínseca

É a relação entre a resposta do detector e a quantidade de radiação que o atingiu (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]).

A eficiência intrínseca pode ser escrita como: (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

$$\varepsilon_{intr} = \frac{\text{Número de eventos registrados}}{\text{Número de eventos incidentes no detector}} \quad (1)$$

#### 2.1.3.2 Eficiência absoluta

A eficiência absoluta está relacionada não só com as suas características de construção, mas também com a fonte de radiação que está sendo medida, com o meio e com a geometria de medição. Pode ser escrita como (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{Número de eventos registrados}}{\text{Número de eventos emitidos pela fonte}} \quad (2)$$

#### **2.1.4 Especificações para monitores e dosímetros**

Os dispositivos utilizados para detecção de radiação podem ser classificados basicamente em dois tipos: monitor de radiação e dosímetro (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

##### **2.1.4.1 Monitor de Radiação**

É um detector utilizado para medições instantâneas e apresenta as seguintes propriedades: (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

- . Limite de detecção adequado;
- . Precisão e exatidão;
- . Reprodutibilidade e repetitividade;
- . Linearidade;
- . Estabilidade a curto e longo prazo;
- . Baixa dependência energética;
- . Baixa dependência direcional, rotacional;
- . Baixa dependência dos fatores ambientais;
- . Baixa dependência com a taxa de exposição.

##### **2.1.4.2 Dosímetro**

É um detector passivo, que registra os eventos e pode ser processado após dias ou semanas. Além das características citadas no item 2.1.4.1, o

dosímetro precisa ter as seguintes características: (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

- . Resultados em dose absorvida ou dose efetiva (ou taxa);
- . Ser construído com material tecido-equivalente;
- . Possuir fator de calibração bem estabelecido;
- . Suas leituras e calibrações são rastreadas a um laboratório nacional e à rede do BIPM;
- . Incertezas bem estabelecidas e adequadas para sua aplicação;
- . Modelo adequado para cada aplicação;
- . Modelo adequado para cada tipo e intensidade de feixe.

## **2.1.5 Detecção utilizando emulsões fotográficas**

### **2.1.5.1 Emulsões Fotográficas**

As emulsões fotográficas geralmente são compostas por cristais de haleto de prata (geralmente brometo de prata) espalhados sobre uma matriz de gelatina. Cada cristal contém, aproximadamente,  $10^{10}$  átomos de  $Ag^+$ . Após o processo de revelação, a quantidade de prata metálica que resta no filme está relacionada com a quantidade de radiação que a emulsão foi submetida (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.5.2 Interação da Radiação com as emulsões fotográficas**

Ao interagir com os elétrons dos átomos do brometo de prata, a radiação faz com que alguns grãos no átomo sejam sensibilizados, transformando os íons de  $Ag^+$  se transformem e prata metálica. Essa quantidade de íons de prata que foram transformados em prata metálica armazenam uma imagem latente da trajetória da partícula (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

A próxima etapa, que é a revelação dos filmes, consiste em passar a emulsão em uma solução que tem a capacidade de transformar todos os íons de prata em prata metálica, porém os íons que já estavam sensibilizados se transformam em prata metálica mais rápido que os demais. Assim, o processo pode ser interrompido quando todos os cristais sensibilizados forem revelados (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

Se a emulsão for revelada muito tempo após a exposição, a informação armazenada vai desaparecendo gradativamente por um processo chamado desvanecimento (*fading*). Isso ocorre devido à recombinação química que ocorre naturalmente (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.6 Detectores Termoluminescente**

#### **2.1.6.1 O mecanismo da termoluminescência**

A termoluminescência é a propriedade que um material possui de emitir luz quando aquecido. A luz que esse material emite é proporcional à dose de radiação à qual ele foi exposto. O material termoluminescente é composto por

ativadores que criam armadilhas para os elétrons do material. Quando a radiação interage com os elétrons do material, a energia da radiação é cedida e os elétrons ficam armadilhados. Quando o material é exposto ao calor, os elétrons são desarmadilhados e emitem a energia na forma de luz (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

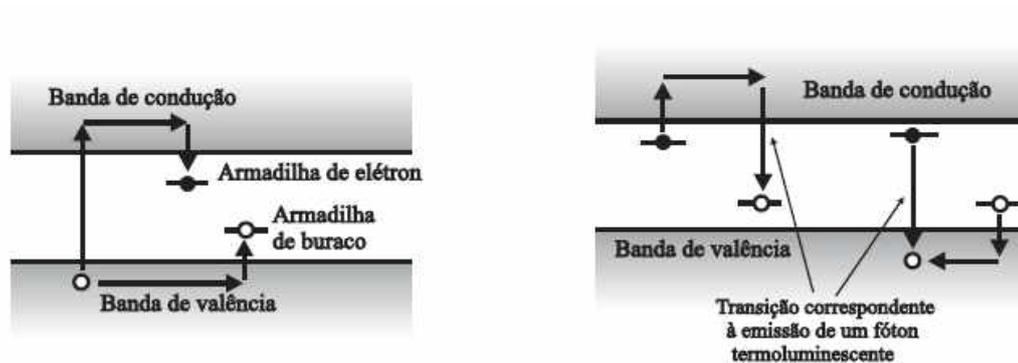


Figura 1: Representação esquemática do mecanismo de termoluminescência (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### 2.1.6.2 Aplicação da dosimetria com detectores termoluminescente

### 2.1.6.3 Principais materiais termoluminescente

Os principais materiais termoluminescente utilizados para dosimetria são:

(PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

- Sulfato de Cálcio dopado com disprósio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ )
- Sulfato de Cálcio dopado com Manganês ( $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ )
- Fluoreto de Lítio ( $\text{LiF}$ )
- Fluorita ( $\text{CaF}_2$ )

### **2.1.7 Detectores a gás**

Os detectores a gás são constituídos por um capacitor preenchido com um gás isolante elétrico. Entre os eletrodos é aplicada uma diferença de potencial com o objetivo de dirigir as cargas liberadas no gás aos eletrodos de sinal oposto ao da carga. Essas cargas liberadas podem ser provenientes da interação dos átomos ou moléculas do gás com a radiação incidente ou secundária. (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

#### **2.1.7.1 Regiões de operação para detectores a gás**

A diferença de potencial aplicada precisa ser suficiente para coletar todas as cargas produzidas antes de haver recombinação. Portanto, a diferença de potencial define o regime de trabalho do detector. (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

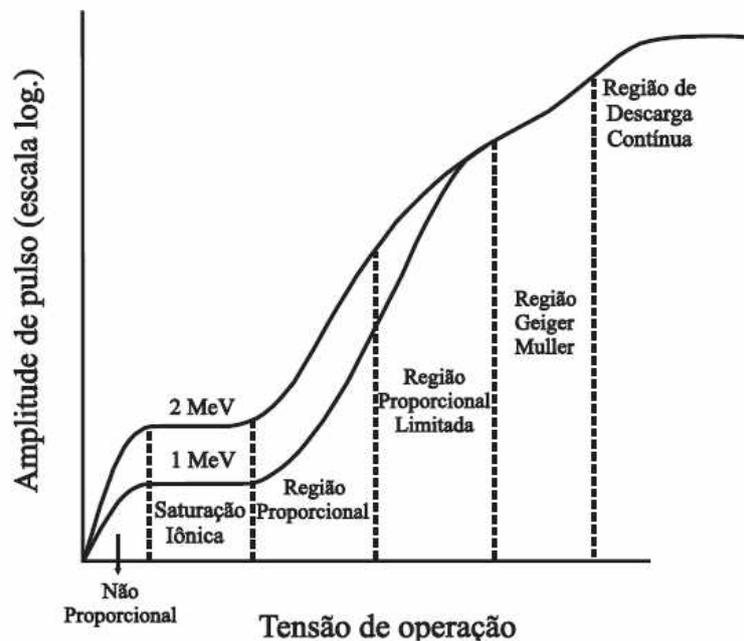


Figura 2: Regiões de operação dos detectores a gás (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

Região I: há uma forte recombinação de íons, por esse motivo nenhum detector opera nessa região.

Região II: também conhecida como região de ionização, é a região em que opera a câmara de ionização

Região III: conhecida como região de multiplicação, operam os detectores proporcionais

Região IV: nessa região há uma proporcionalidade limitada entre sinal e estímulo e não existe detector que opere nessa região

Região V: nessa região o sinal é independente da radiação e nela opera o detector Geiger-Müller

Região VI: nessa região há a formação de correntes elétricas que não possuem mais relação com o número de íons formados, portanto não existe detector que opere nessa região.

### **2.1.7.2 Câmara de ionização**

A câmara de ionização opera na região de saturação de íons e um sinal é coletado para cada par de íon gerado no volume sensível do detector. O sinal coletado é muito baixo e precisa de amplificadores para que o sinal possa ser processado. Quando se utiliza o ar como elemento gasoso, a câmara de ionização é utilizada para medir exposição. (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

### **2.1.8 Detectores Proporcionais**

Os detectores proporcionais se baseiam na multiplicação de íons no gás para amplificar o número de íons originados da radiação incidente. Como há uma multiplicação no número de íons, esse detector é utilizado quando o número de pares de íons é muito pequeno. (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

### **2.1.9 Detector Geiger-Müller**

O detector Geiger-Müller é utilizado há muito tempo devido à sua simplicidade, baixo custo, facilidade de operação e de manutenção. Esse detector funciona apenas como um contador, ou seja, não é capaz de discriminar tipo e nem energia da radiação incidente. (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

Apesar de não medir nenhuma grandeza radiológica, o detector Geiger-Müller pode ser utilizado para estimar grandezas como a dose e a exposição

utilizando instrumentação e metrologia. Nesses casos eles são calibrados para uma determinada energia e as grandezas podem ser calculadas através da fluência. (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

### **2.1.9.1 Detectores à Cintilação**

### **2.1.9.2 Características dos materiais cintiladores**

Algumas características importantes que um material cintilador deve ter são:(OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

- A luz produzida deve ser proporcional a luz depositada;
- O material deve ser transparente ao comprimento de onda da luz que emite;
- Índice de refração próximo ao do vidro (aproximadamente 1,5);
- Esteja disponível em peças suficientemente grandes para servir para construção de detectores;
- Transforme toda energia cinética da radiação incidente em luz detectável.

Apesar de ser muito difícil encontrar materiais que reúna todas essas características, existem materiais cintiladores muito bons.

### **2.1.9.3 Eficiência de cintilação**

A eficiência de cintilação pode ser definida como a fração da energia das partículas incidentes que é transformada em luz visível. (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

### **2.1.9.4 A emissão de luz nos materiais cintiladores**

Os elétrons da banda de valência são excitados pela energia da radiação incidente e, quando essa energia é suficiente, eles ocupam os níveis de energia criados pela dopagem. Ao retornarem para a banda de valência, esses elétrons emitem a energia que receberam inicialmente em forma de fótons. A eficiência da detecção dependerá da radiação e do material utilizado como cintilador. (OKUNO; YOSHIMURA, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

### **2.1.10 Detectores utilizando materiais semicondutores**

#### **2.1.10.1 Materiais isolantes, condutores e semicondutores**

Pelo princípio da exclusão de Pauli, em determinado nível energético podem existir, no máximo, dois elétrons de spins opostos. Por isso, quando se tem um sistema com  $N$  átomos, cada subnível se desdobra em  $N$  subníveis com energias diferentes, mas tão próximas que os  $N$  estados constituem uma verdadeira faixa (ou banda) energética. Da mesma forma que existe um intervalo

de energias proibidas para um elétron de um único átomo, existe uma banda proibida entre duas bandas permitidas em um sistema com muitos átomos. A condutividade elétrica de um material depende se sua banda de valência está completa e também do tamanho da banda proibida. Considere uma banda de valência (última banda permitida ocupada de um sistema): sendo  $N$  átomos, formam-se  $N$  estados energéticos nessa faixa, que admitirá  $2N$  elétrons no máximo (1 de cada spin). Os elétrons tendem a ocupar os níveis de energia mais baixos. Então, terá um preenchimento da metade inferior dos níveis da faixa eletrônica. A metade superior ficará vazia. Quando se liga um material com essa configuração aos terminais de uma fonte de tensão elétrica, alguns elétrons saltam para os estados superiores desocupados, permitindo que os elétrons se movimentem dentro da faixa e se diz que esta é uma faixa de condução. Este é um material condutor. Por outro lado, se a banda de condução estiver completamente ocupada por elétrons e a banda proibida (*gap* entre duas faixas permitidas) for grande ( $>5\text{eV}$ ), os elétrons de valência não terão possibilidade de se movimentar (uma vez que adquiririam mais energia) ao serem colocados em uma fonte de tensão, este é um material isolante. Por último, existem materiais com faixa de valência lotada, mas que, à temperatura ambiente possuem uma faixa proibida curta o suficiente para os elétrons poderem “saltar” para os níveis energéticos da próxima banda permitida ao serem submetidos a um campo elétrico, estes são os semicondutores (FELTRE, [S.d.]).

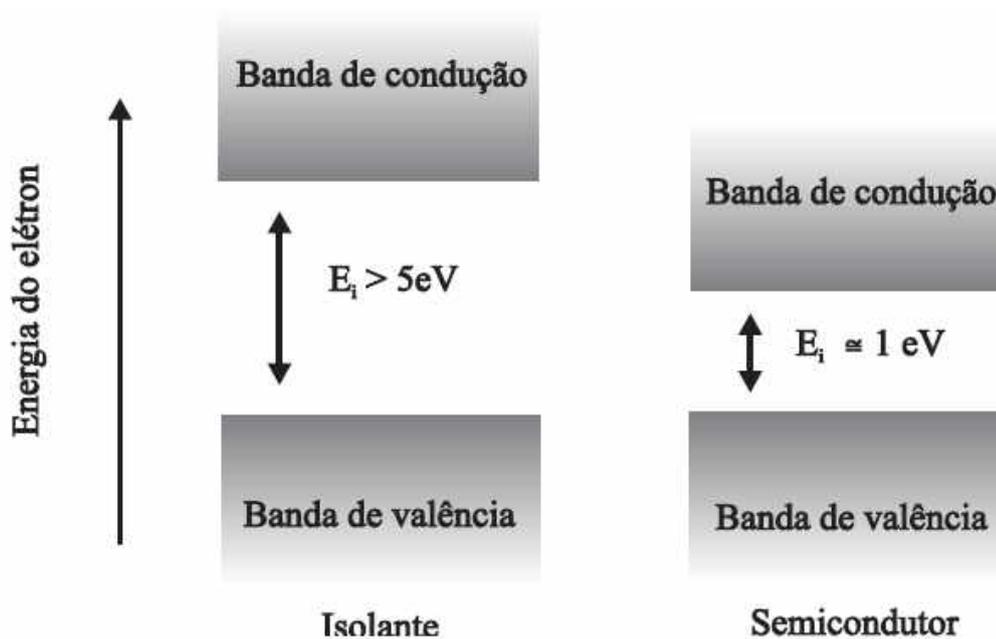


Figura 3: Representação esquemática do sistema de bandas do Isolante e do Semicondutor (PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### 2.1.10.2 Criação de doadores e receptores

A adição de pequenas quantidades de impurezas com excesso de elétrons pode alterar as condições do material. As impurezas doadoras são aquelas que possuem um elétron a mais na camada de valência que o material inicial. Quando esse tipo de dopagem é adicionado ao material, um elétron ficará sem função, tendo em vista que todas as ligações já foram ocupadas. A ligação desse elétron é muito fraca e, muitas vezes, ocupa posições dentro da banda proibida. Porém, a distância entre esses elétrons e a banda de condução é tão pequena que qualquer excitação, mesmo que pequena, pode levar esse elétron para a banda de condução. O material semicondutor dopado com esse tipo de

impureza recebe o nome de Tipo n (FELTRE, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

Da mesma forma que existe o semicondutor dopado com uma impureza com excesso de elétrons, existe a dopagem com falta de elétrons. Nesse tipo de dopagem cria-se uma falta de elétrons que pode ser chamada de “buraco”, que se assemelha a retirada de um elétron da banda de valência, porém se comporta diferente energeticamente. O material doador de buracos e o semicondutor dopado são denominados de tipo p (FELTRE, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

Existe também a junção tipo p-n que é a região onde há a junção de materiais tipo p e tipo n. Pode ser obtida adicionando impurezas do tipo n em regiões tipo p ou adicionando impurezas do tipo p em regiões tipo n. A principal vantagem da junção tipo p-n é que ele é condutor se a tensão for aplicada na direção correta e conduz pouco quando a tensão é aplicada na direção incorreta (FELTRE, [S.d.]; PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013).

### **2.1.10.3 Interação da radiação com detectores semicondutores**

Ao passar pelo material a radiação produz uma grande quantidade de pares elétron-buraco que serão coletados pela diferença de potencial aplicada ao material. Essa grande produção de pares elétrons-buracos faz com que diminua a flutuação estatística e diminua a influência de ruídos eletrônicos havendo, assim, uma melhor relação sinal-ruído.(PRINZIO; DOSIMETRIA, 2013)

## 2.2 Filmes Finos

*Filme* é uma geometria planar com a espessura muito menor que as outras dimensões. Esses filmes podem ser classificados de acordo com sua espessura, sendo nanométricos (0,1-100nm), micrométrico (0,1-100  $\mu\text{m}$ ) e milimétrico (0,1-100 mm) (Galembeck,1998).

O *substrato* é uma superfície que vai suportar o filme. O substrato ideal é aquele que fornece um suporte mecânico adequado sem influenciar nas características do filme. Os tipos de substrato mais utilizados são vidros modificados, metais, cerâmicas policristalinas e monocristalinas, materiais de carbono, dentre outros (Galembeck, 1998; Jesus,2009).

Com relação aos filmes, o termo *deposição* refere-se ao método no qual átomos ou moléculas são adicionados à superfície do filme (Galembeck,1998).

Existem várias técnicas para preparação de um filme fino. As principais técnicas utilizadas são apresentadas a seguir.

### 2.2.1 Técnicas de obtenção dos filmes

Entre as técnicas de deposição de filmes finos pode-se citar a spin coating, dip coating, Layer-by-Layer e a casting. (Galembeck, 1998).

A seguir será realizada uma breve descrição das técnicas de preparação de filmes finos citadas anteriormente, dando uma maior ênfase à técnica de casting, a qual foi utilizada neste trabalho.

### **2.2.1.1 Spin Coating**

Essa técnica consiste em depositar gotas da solução inicial sobre o substrato que é acelerado rapidamente até a velocidade de rotação desejada. O líquido se espalha rapidamente, devido à ação da força centrífuga, e o excesso é ejetado para fora da borda do substrato. Nesta técnica, a viscosidade da solução, o tempo e a velocidade de rotação são parâmetros importantes para a deposição de um filme estável e homogêneo (hall et al,1998; Jesus, 2009)

### **2.2.1.2 Dip Coating**

Essa técnica consiste em mergulhar verticalmente um substrato dentro de uma solução que contém a substância de interesse e depois de certo tempo retirá-lo do mesmo (Jesus,2009)

Alguns parâmetros na obtenção interferem na espessura das camadas do filme, tais como a velocidade de imersão e emersão do substrato, ângulo de inclinação do substrato com relação à superfície do líquido, concentração e viscosidade da solução (ZARPELON, 2013).

### **2.2.1.3 Layer-by-Layer**

Essa técnica caracteriza-se pela formação de filmes através do depósito de materiais de cargas opostas, com a deposição de um material catiônico e outro aniônico, com etapa de lavagem entre as camadas. Esta técnica permite melhor qualidade e homogeneidade entre as técnicas citadas, porém, cada

bicamada possui poucos nanômetros, tendo uma secção de choque muito pequena para radiações com poder de penetração grande. (ZARPELON, 2013)

#### 2.2.1.4 Casting

A técnica de casting baseia-se no espalhamento da solução precursora da amostra sobre um substrato (geralmente, uma placa de vidro). Após a evaporação total do solvente utilizado, o filme é formado sobre a superfície do substrato. A evaporação do solvente pode ser acelerada por aquecimento (Jesus, 2009).

A espessura do filme pode ser controlada ajustando-se a concentração da amostra na solução.

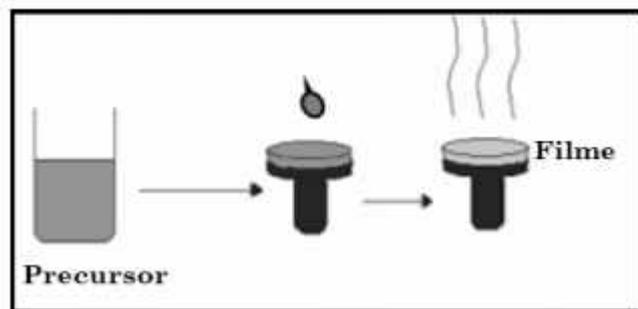


Figura 4: Representação esquemática do processo de obtenção de filmes por casting (Jesus, 2009)

Apesar desta técnica obter filmes mais heterogêneos e com alto grau de defeitos em relação as técnicas citadas, esta técnica permite obtenção de filmes mais espessos, aumentando assim a área efetiva no dispositivo, assim, possibilita obter maior resposta com a exposição à radiação (ZARPELON, 2013).

### **3 OBJETIVOS**

O objetivo geral do projeto foi estudar os efeitos da interação de Raios-X com filmes de biopolímeros e nanopartículas metálica. Assim, analisou-se a possibilidade de utilização do dispositivo como detectores de radiação ionizante.

Os objetivos específicos do projeto foram:

- obter a resposta conductométrica dos sensores;
- checar a influência do tamanho das nanopartículas na interação com a quitosana e os Raios-X;
- checar sua viabilidade de utilização como sensor de radiação ionizante de baixas energias.

### **4 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

A metodologia do trabalho é composta por técnicas de preparo dos eletrodos interdigitados para medidas conductométricas dos filmes de interesse, deposição de materiais sobre o eletrodo, resposta elétrica dos sensores em função da incidência de radiação e finalização do trabalho com o tratamento dos dados obtidos.

## 4.1 PREPARAÇÃO DOS ELETRODOS INTERDIGITADO

### 4.1.1 Preparo das máscaras dos eletrodos

Foram realizados desenhos dos eletrodos interdigitados no Software Word, com escalas e figuras sem bordas dos eletrodos. O negativo do desenho foi impresso sobre filmes de poliimida (Kapton/ 0,2 mm de espessura) utilizando uma impressora a Laser (Brother HL-1212w) na melhor resolução e contraste. O interdigitado possui trilhas de 200  $\mu\text{m}$  de espessura, separação de 200  $\mu\text{m}$ , com comprimento da região paralela do interdigitado de 7 mm, e com 20 intervalos entre eletrodos, como pode ser visualizado na figura abaixo (Figura 5).

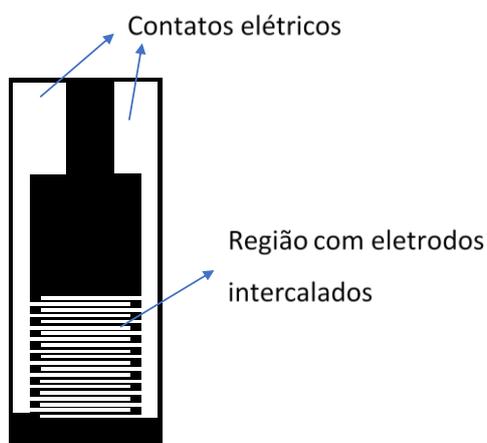


Figura 5: Desenho da máscara do interdigitado.

### 4.1.2 Metalização dos eletrodos

Os filmes de poliimida com a máscara foram limpos com álcool isopropílico, secos com Ar e inseridos em uma evaporadora para metalização do eletrodo de interesse com ouro (Au). Após a metalização, aqueceu com uma estação de retrabalho analógica Hikari, mod. HK-850 PRO, com fluxo de ar no

máximo (8 L/min) e na temperatura de 300°C. Após, solubilizou-se o toner da impressão em Acetona P.A. e passando suavemente um cotonete, restando somente os metais onde não havia tinta sobre a poliimida. Para os eletrodos de ouro e de cobre necessitaram o tratamento térmico para aumentar a aderência dos filmes metálicos. Para eletrodos de alumínio, realizou-se a lavagem sem o tratamento térmico.

#### **4.2 PREPARO DA SOLUÇÃO E DEPOSIÇÃO DOS FILMES DE BLENDAS POLIMÉRICAS SOBRE OS ELETRODOS INTERDIGITADOS**

As nanopartículas metálicas foram obtidas na cooperação com o Jeann César Rodrigues de Araújo e o Prof. Dr. Wellington Akira Iwamoto (“Síntese e caracterização microestrutural de nanopartículas de ouro nanopartículas de ouro”, 2019).

Inicialmente foram preparadas duas soluções, a Solução-A contendo 10% massa/massa de gelatina natural em meio aquoso e a Solução-B contendo quitosana 2% massa/massa em meio aquoso contendo ácido acético também a 2% volume/volume. Por fim, preparou-se soluções finais com a mistura de 5 ml da Solução-A, com 2 ml da Solução-B e com 5 ml das soluções coloidais aquosas de nanopartículas esféricas de ouro com diâmetros médios diferentes, conforme segue a tabela 1.

*Tabela 1: Nanopartículas disponibilizadas para este trabalho e as amostras obtidas com a mistura das nanopartículas com as soluções A e B.*

Código	Diâmetro médio $\pm$ dispersão (nm)	filmes de gelatina, quitosana e nanopartículas
	Sem nanopartículas	Amostra 1
Au100	$15,9 \pm 1,7$	Amostra 2
Au175	$13,5 \pm 1,1$	Amostra 3

As deposições dos filmes da Tabela 1 foram realizadas utilizando a técnica de casting espalhando 10  $\mu$ L de solução por  $\text{cm}^2$  sobre a área do interdigitado e colocado para secar a temperatura ambiente.

Além das amostras listadas na Tabela 1, utilizamos, para testes iniciais, um eletrodo coaxial de ouro/cromo espaçados de 0,2 mm com nanopartículas de ouro de 71,50 nm (Amostra 4).

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS**

#### **4.3.1 Medidas conductométricas com incidência dos Raios-X**

Nesse trabalho foi utilizada a técnica de rampa de potencial para medidas elétricas sobre o eletrodo interdigitado. A rampa de potencial consiste em variar linearmente a tensão em função do tempo e monitorar a resposta de corrente em função do potencial.

Conectou-se o eletrodo interdigitado a um eletrômetro automático (Keithley 2410-C) e colocou-o em uma fonte controlada de Raios-X (Tubo Phywe XR 4.0 X-ray, com ampola de cobre, Phywe 09057-50 Cu).

O feixe de Raios-X incide sobre o filme, induzindo mudanças intrínsecas que podem alterar a condutividade do material, as quais foram relacionadas com as medidas de corrente vs tensão.

Para variar a intensidade dos Raios-X, variou-se a corrente do tubo, e para variar a energia dos fótons, variou-se a tensão do tubo, a fim de observar como o material se comporta em relação a variação destas duas grandezas.

#### 4.3.2 Determinação da espessura dos filmes

A resistência elétrica de um dispositivo depende de sua área, do comprimento e da condutividade do material, portanto, para um interdigitado de 20 intervalos de eletrodos com o comprimento L e espessura de filmes D, temos a área efetiva de

$$A_{efet} = 20 * L * D \quad (1)$$

Sabendo que a distância entre os eletrodos é d, agora pode-se determinar a resistência do dispositivo. Lembrando da lei de Ohm (Ferreira,2015))

$$R = \frac{\Delta V}{i} \quad (2)$$

Onde,  $\Delta V$  é a diferença de potencial e  $i$  é a corrente aplicada.

O condutor pode ser linear ou não linear. Os condutores lineares respeitam a lei de ohm e o gráfico V vs i se comporta linearmente. Nesse caso, a resistência do material pode ser calculada pelo coeficiente angular ( $\alpha$ ) do gráfico.

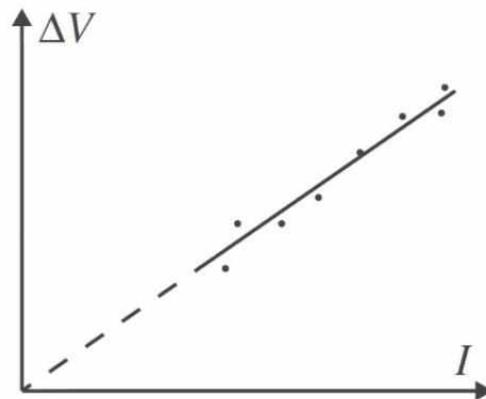


Figura 6: Exemplo da resposta de um condutor linear (Ferreira,2015).

Os condutores não lineares não obedecem a lei de Ohm e o gráfico não se comporta linearmente. Nesse caso, o valor da resistência é obtido através do declive da reta tangente ao gráfico  $i$  vs  $V$ , isso quer dizer que se deve determinar suas componentes instantâneas com a  $i$  vs  $\frac{dV}{di}$  (Ferreira,2015).

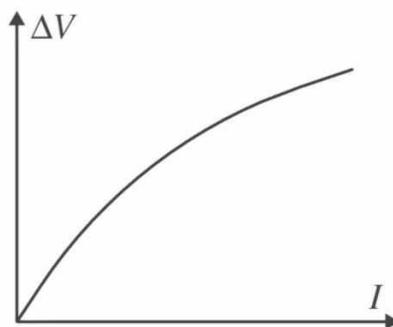


Figura 7: Exemplo da resposta de um condutor não linear (Ferreira,2015).

Para determinar a condutividade dos filmes, é necessário ter as dimensões dos eletrodos interdigitado e a espessura do filme, infelizmente, a medida de espessura não pode ser reproduzida neste trabalho. Assim, será determinado somente a resistência elétrica dos dispositivos, dificultando as interpretações comparativas entre os filmes devido a variação das espessuras obtidas por casting.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medidas realizadas neste trabalho foram obtidas antes da pandemia da COVID-19 e antes de iniciar o semestre de execução do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). As medidas apresentadas neste trabalho foram frutos de adiantamento das tarefas que deveriam ser executadas no trabalho proposto, portanto, diversas caracterizações ficaram prejudicadas por não poderem ser executadas durante o período de realização do TCC.

### 1. Medidas Amostra 1

Primeiramente foram feitas medidas com o filme de quitosana sem nanopartículas. Foi aplicada a rampa de potencial sem radiação para verificar que o sistema é estável. Foram realizadas 3 medidas consecutivas. Foi aplicada uma diferença de potencial entre os eletrodos interdigitados variando com uma rampa de potencial de -20 a 20 volts e mediu-se a variação da corrente (Medida 1). Logo após a medida 1, foi realizada a medida 2 sob as mesmas condições anteriores. Depois, esperou-se aproximadamente 1 minuto e realizou uma terceira medida (Medida 3) sob as mesmas condições anteriores. Essas medidas estão apresentadas na Figura 8.

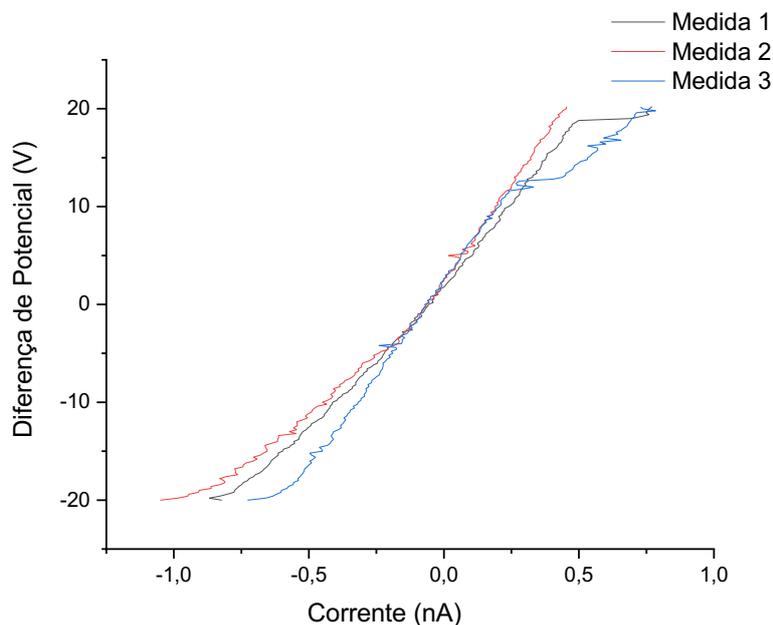


Figura 8: Gráfico mostrando a rampa de potencial para as medidas feitas sem a aplicação de radiação sobre o eletrodo.

Pode-se observar na figura 8 que ocorre uma variação entre as medidas em sequência, e que o filme apresenta um pouco de memória, não retornando para potenciais positivos próximo de zero. Esta pequena variação será comparada com as demais amostras com a presença de nanopartículas, podendo mascarar ou não os resultados dos sensores.

Como temos um gráfico da resposta de corrente em função da tensão aplicada no eletrodo, podemos calcular o coeficiente angular e, de acordo com o que foi descrito no item 3.3.2, a nossa resistência elétrica será obtida diretamente do coeficiente angular, se a diferença de potencial for colocada na ordenada e a corrente na abcissa. Tendo o valor da resistência elétrica do dispositivo, poderemos comparar, futuramente, se há alguma mudança nessa resistência após a incidência da radiação no material, mas devemos lembrar de que, idealmente, deveríamos obter a resistividade do material, portanto, seria

mais preciso para discutir sobre as mudanças nas propriedades intrínsecas destes materiais, mas como mencionado, não foi possível executar as medidas de espessura dos filmes devido a pandemia da COVID-19.

Não se pode afirmar que o detector é ôhmico em toda faixa de tensão utilizada, por esse motivo foi feita uma suavização da curva e escolhida, no gráfico, as regiões das medidas que se aproximam de lineares, que foram entre o intervalo de potencial de -13 a 10,8 V, e foi feito o ajuste somente desses pontos.

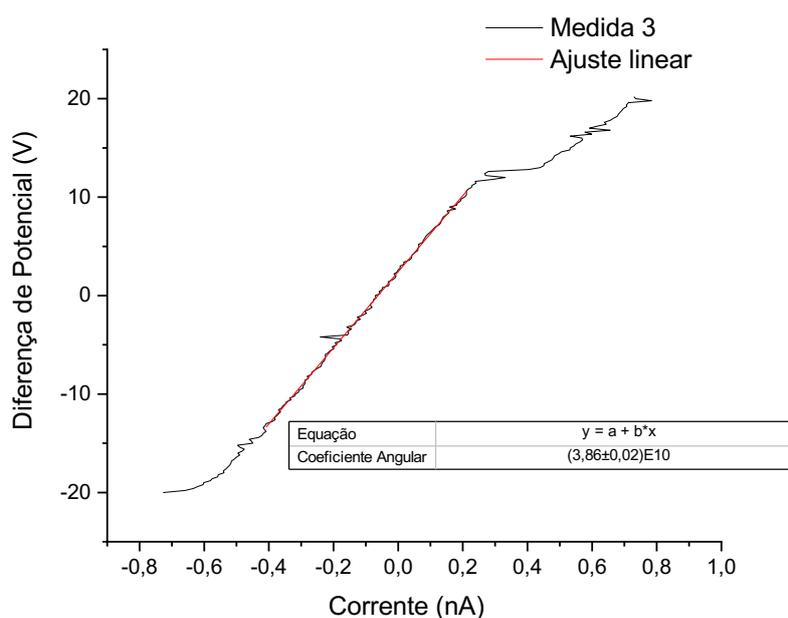


Figura 9: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre o eletrodo.

Com o coeficiente angular pode-se calcular a resistência do eletrodo.

$$R = \alpha$$

$$R = (3,86 \pm 0,02) \times 10^{10} \Omega$$

Na medida 4 sobre a amostra 1, o eletrodo foi irradiado com um feixe de Raios-X com 1mA e 35kV, obtendo-se a curva apresentada na Figura 10.

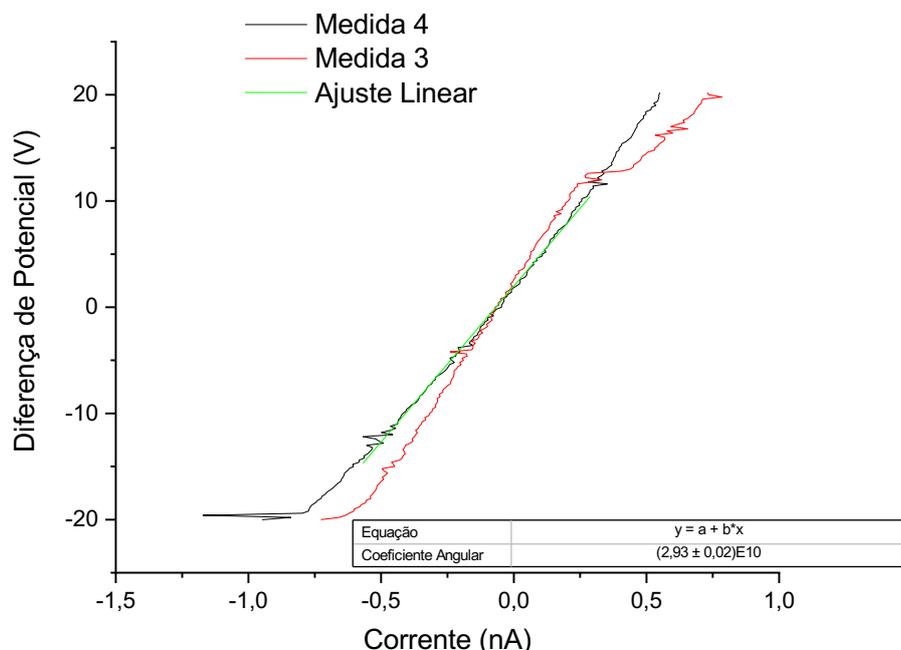


Figura10: Gráfico da rampa de potencial comparando a Medida 3 (última medida sem aplicar Raios-x) e a Medida 4 (primeira medida com Raios-x).

Percebe-se que a inclinação da reta diminuiu após aplicação dos Raios-X (ver Figura 10).

$$R = \alpha$$

$$R = (2,93 \pm 0,02) \times 10^{10} \Omega$$

Como a inclinação da reta mudou, a resistência do material mudou. Isso pode estar ocorrendo devido a excitação elétrica que faz com que mais elétrons adquiram energia suficiente para passar para a banda de condução, aumentando a corrente elétrica.

Esperou-se um minuto e aplicou a rampa de potencial novamente sem a presença de Raios-x (medida 5).

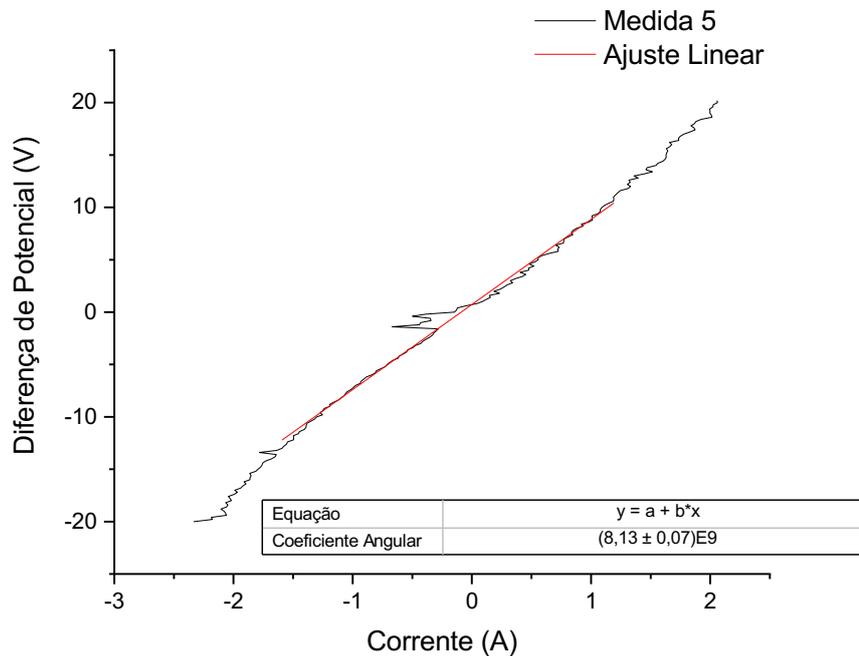


Figura11: Rampa de potencial da medida realizada um minuto após ter sido irradiada (Medida 5).

Calculando a resistência para a medida 5, obteve-se que

$$R = (8,13 \pm 0,07) \times 10^9 \Omega$$

A resistência ainda está bem distante da resistência inicial (medida 3). Isso significa que o eletrodo possui memória, o que não é bom para um detector monitor de radiação em tempo real.

### 5.1 Medidas Amostra 3

As medidas que foram feitas a seguir possuem nanopartículas de ouro de  $13,5 \pm 1,1 \text{ nm}$ , com essa amostra seguiu-se o padrão das medidas realizadas anteriormente. Primeiramente realizamos 3 medidas consecutivas sem radiação

para verificar que o sistema é estável. Essas medidas estão dispostas na Figura 12.

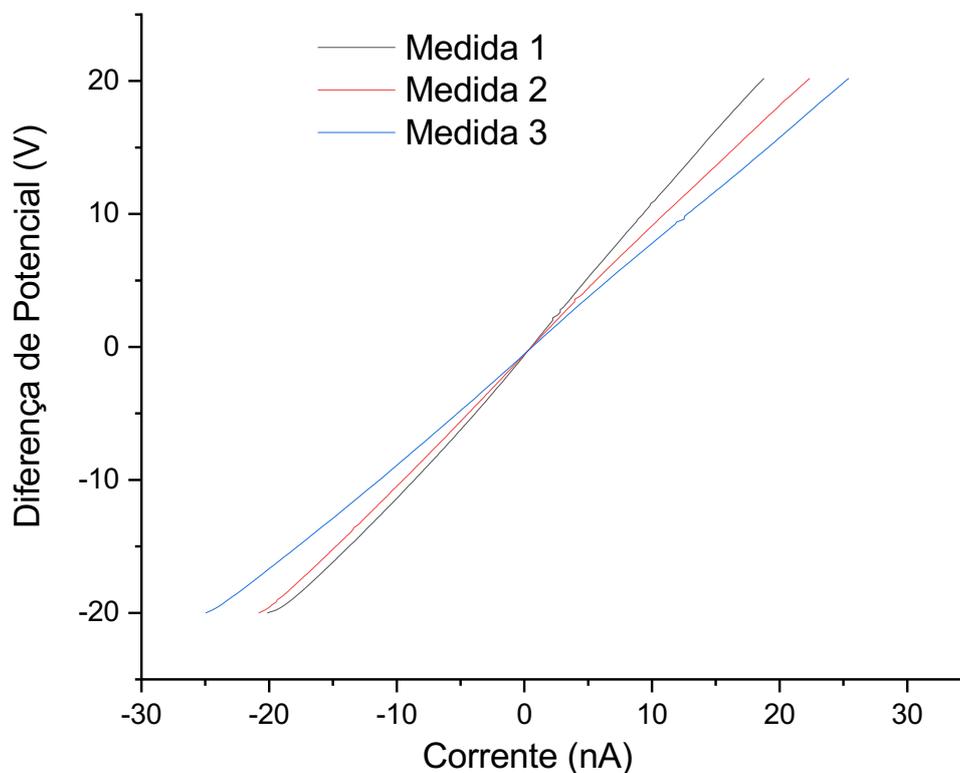


Figura12: Gráfico mostrando a rampa de potencial para as medidas feitas sem a aplicação de radiação sobre a Amostra 3.

Percebe-se que a amostra não retorna à medida inicial, o que sugere que o sistema não é estável. Porém essa medida será comparada com as medidas de eletrodos com diferentes tamanhos de nanopartículas, assim será observado se essa resposta mudará de acordo com o tamanho das nanopartículas.

De forma comparativa, pode-se observar que a corrente do filme com nanopartículas teve no mínimo, uma ordem de grandeza maior que a sem nanopartícula, portanto, a pequena variação no filme sem nanopartículas já não

terá tanta influência na qualidade do dispositivo, mas sim, efeitos das propriedades intrínsecas desta mistura com nanopartículas.

A Figura 13 mostra o ajuste linear que foi feito para a terceira medida realizada sem a aplicação de radiação. Para seguir o padrão utilizado para análise da Amostra 1, selecionou-se a região de -13 a 10,8 V que também tem uma resposta linear na Amostra 3.

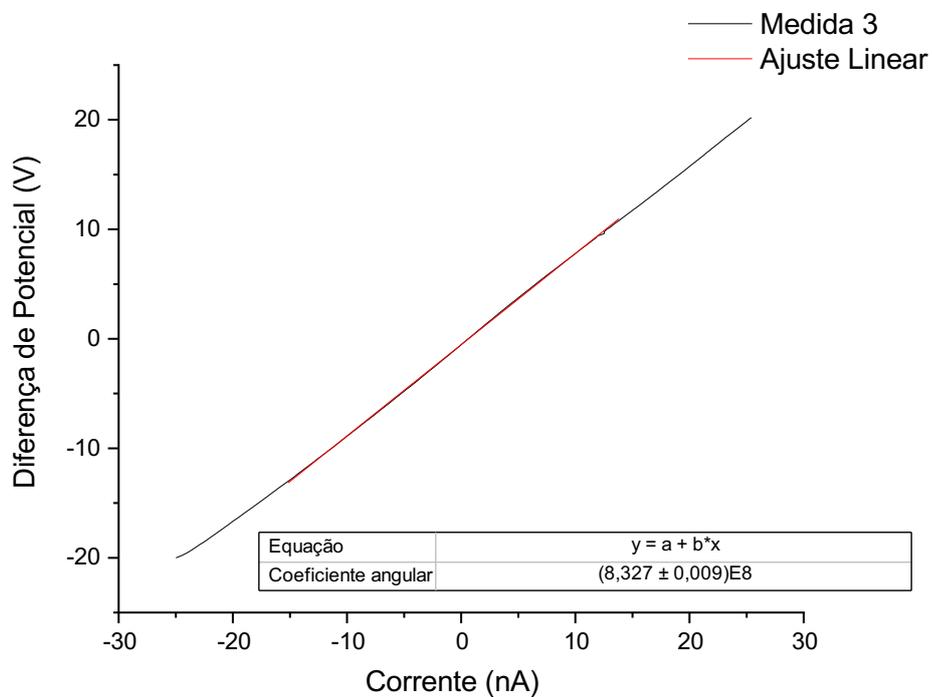


Figura 13: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 3.

Como mostra o ajuste linear na Figura 13, a resistência elétrica do material

é:

$$R = \alpha$$

$$R = (8,327 \pm 0,009) \times 10^8 \Omega$$

Depois a amostra foi irradiada com Raios-X de 1mA e 35kV. A Figura 13 mostra a comparação da medida sem aplicar radiação (medida 3) e a medida aplicando radiação (medida 4). Também foi feito o ajuste linear da curva no intervalo de -13 a 10,8V.

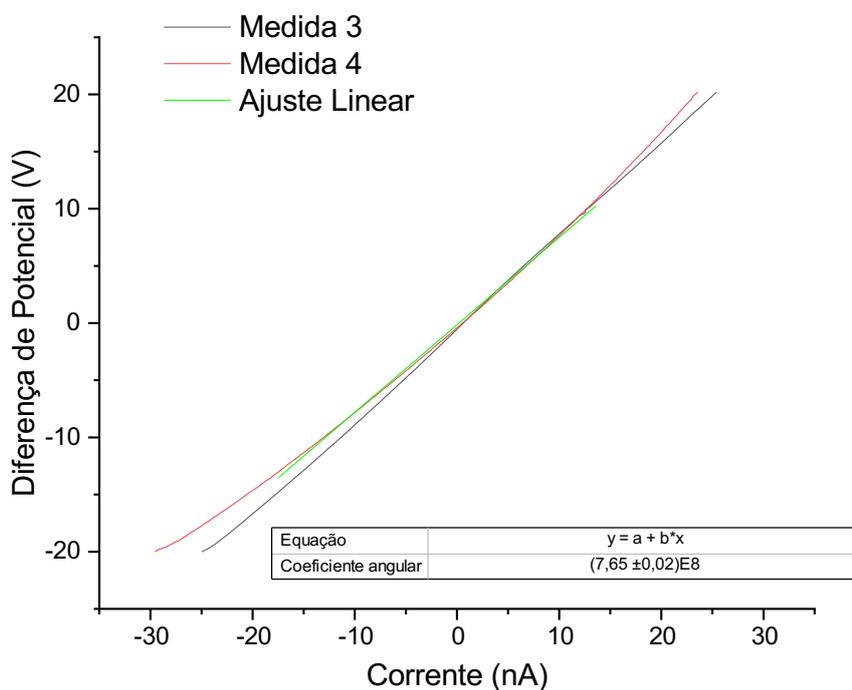


Figura 14: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 3.

A partir da Figura 14 é possível calcular a resistência elétrica da amostra após ser irradiada.

$$R = \alpha$$

$$R = (7,65 \pm 0,02) \times 10^8 \Omega$$

Comparando com a resistência elétrica do material antes de ser irradiado, é nítido que a resistência diminuiu. Essa diminuição da resistência é decorrente da excitação elétrica que ocorre quando a amostra é irradiada. Quando aplicamos radiação sobre o eletrodo, estamos fornecendo energia aos elétrons da camada de valência do material para que eles possam passar para a banda de condução fazendo com que o material seja menos “resistente” à passagem de corrente elétrica.

Por último, esperou-se aproximadamente 1 minuto para repetir a medida sem a aplicação de radiação. A Figura 15 mostra a rampa de potencial dessa medida e o ajuste linear da curva no mesmo intervalo utilizado anteriormente.

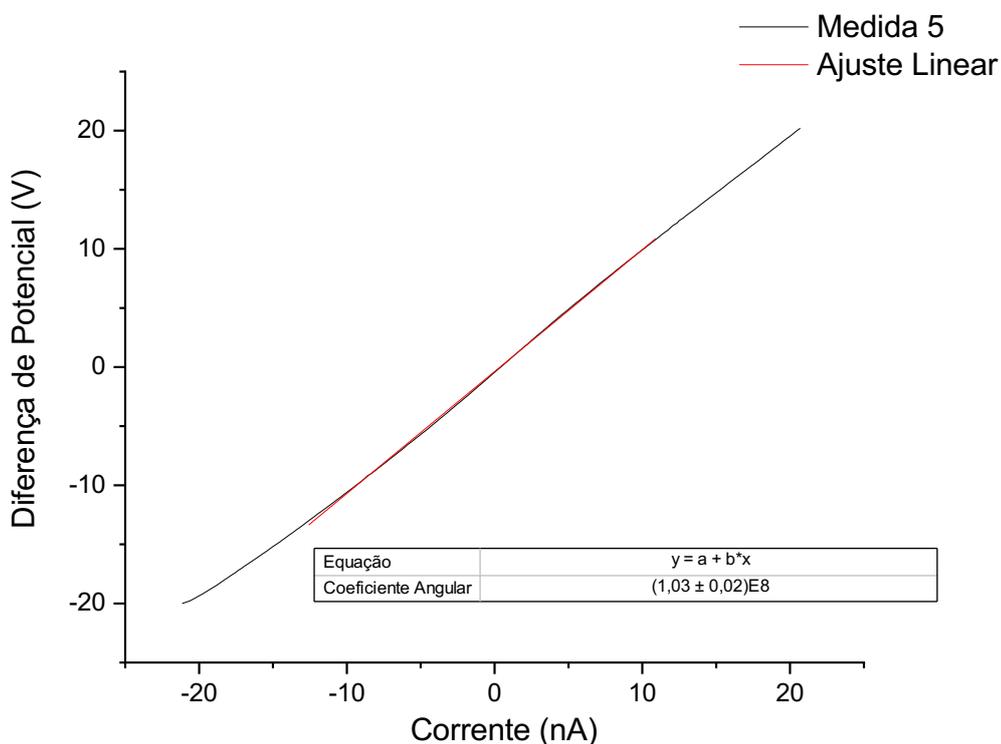


Figura 15: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 3 1 minutos após ter sido irradiada.

A partir da Figura 15 é possível calcular a resistência elétrica da amostra 1 minuto após ser irradiada.

$$R = \alpha$$

$$R = (1,03 \pm 0,02) \times 10^8 \Omega$$

A resistência da amostra diminuiu significativamente após ser irradiada, isso pode ter sido decorrente de uma danificação da amostra, ou seja, além de ionização, pode ter ocorrido quebra de ligação que influenciaram na sua condutividade. Para verificar isso seria necessário repetir o experimento para um feixe de radiação com menor energia e menor intensidade. Com isso, não se pode afirmar com certeza que essa amostra não seria eficiente como um detector, pois apresentou uma resposta e pode ser que ela detecte radiação com menor energia e ainda possua estabilidade para menor energia.

## **5.2 Medidas Amostra 2**

Como anteriormente, foram feitas 3 medidas consecutivas sem aplicação de radiação e esta amostra possui nanopartículas de  $15,9 \pm 1,7$  nm de diâmetro. Essas medidas estão dispostas na Figura 16.

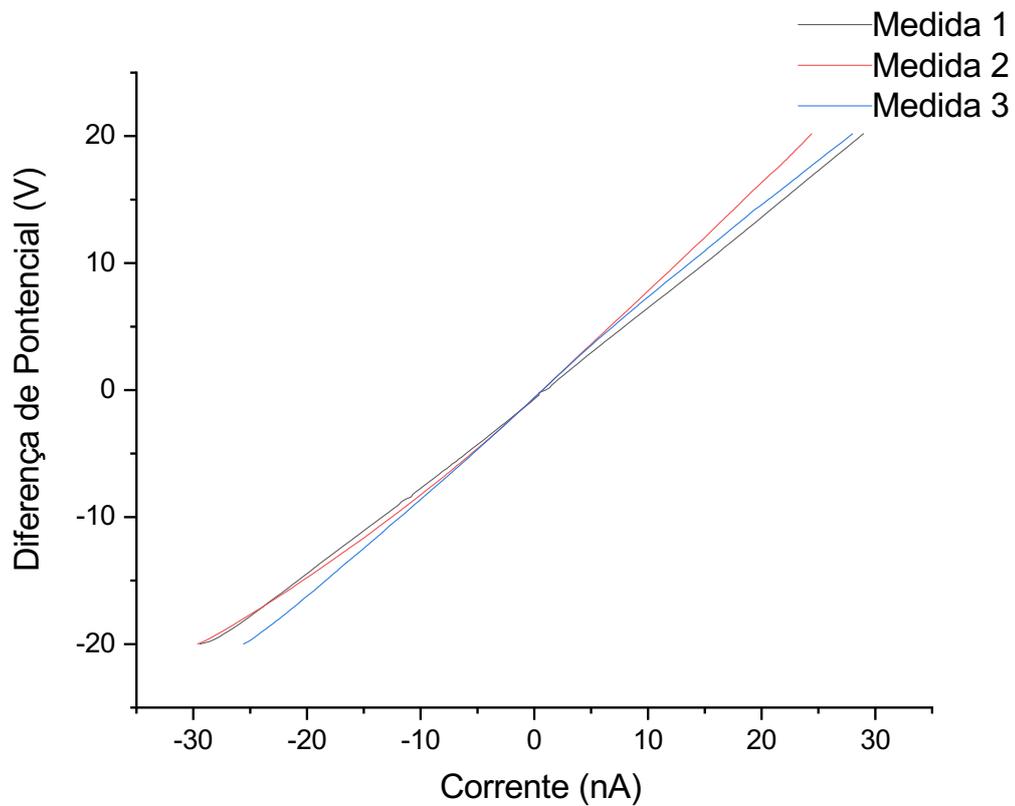


Figura 16: Gráfico da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 sem radiação.

Como ocorreu com as amostras anteriores, a primeira medida não coincidiu com a última medida. Porém, mesmo assim, as medidas seguintes foram feitas para uma futura comparação entre elas. Então, a Figura 17 mostra o ajuste linear da curva no intervalo que foi tomado como padrão, de -13 a 10,8V.

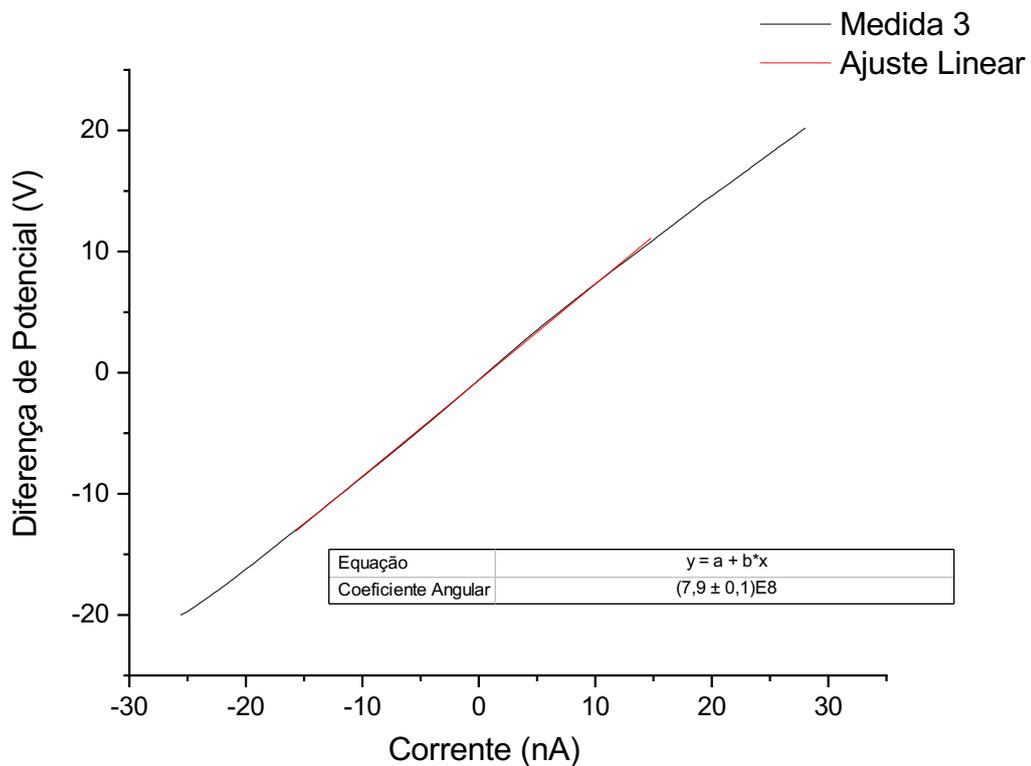


Figura 17: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 sem radiação

A partir do gráfico da Figura 17 calculou-se a resistência do material antes de aplicar a radiação.

$$R = \alpha$$

$$R = (7,9 \pm 0,1) \times 10^8 \Omega$$

Depois a amostra foi irradiada com Raios-X de 1mA e 35kV. A Figura 18 mostra a comparação da medida sem aplicar radiação (medida 3) e a medida aplicando radiação (medida 4). Também foi feito o ajuste linear da curva no intervalo de -13 a 10,8V.

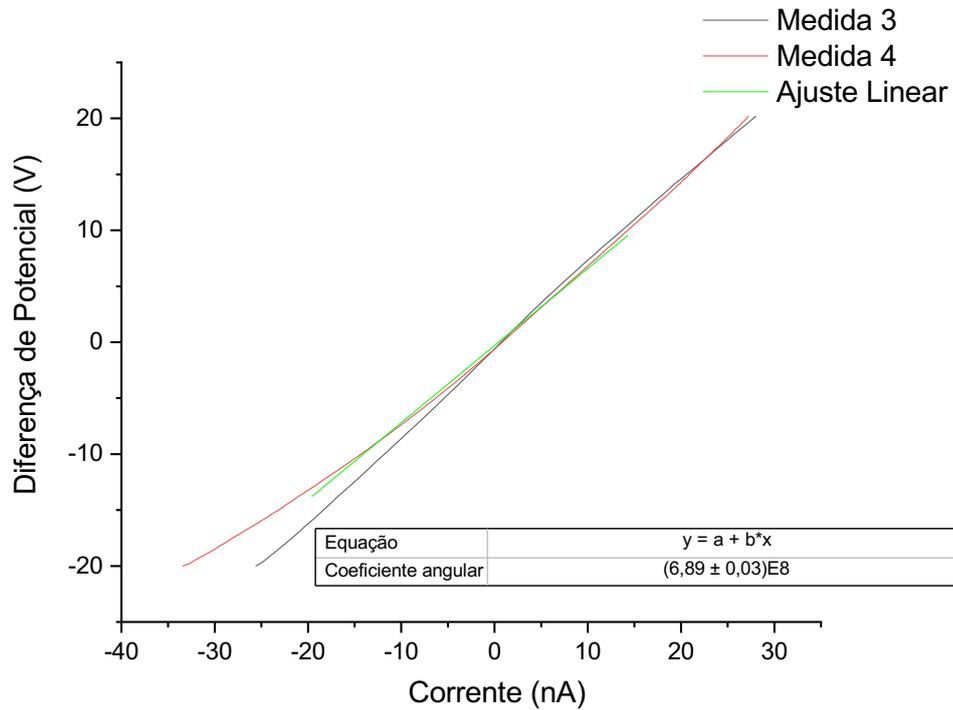


Figura 18: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 com radiação

Com o gráfico da Figura 18, obtém-se a resistência do material após ter sido irradiado.

$$R = \alpha$$

$$R = (6,89 \pm 0,03) \times 10^8 \Omega$$

A resistência variou muito pouco em relação a resistência do material sem ter sido irradiado. Isso pode indicar que essa amostra só é eficaz a partir de uma energia.

Após um minuto realizou-se outra medida sem a aplicação de radiação, que pode ser visto na Figura 19. Também foi feito o ajuste linear dessa curva.

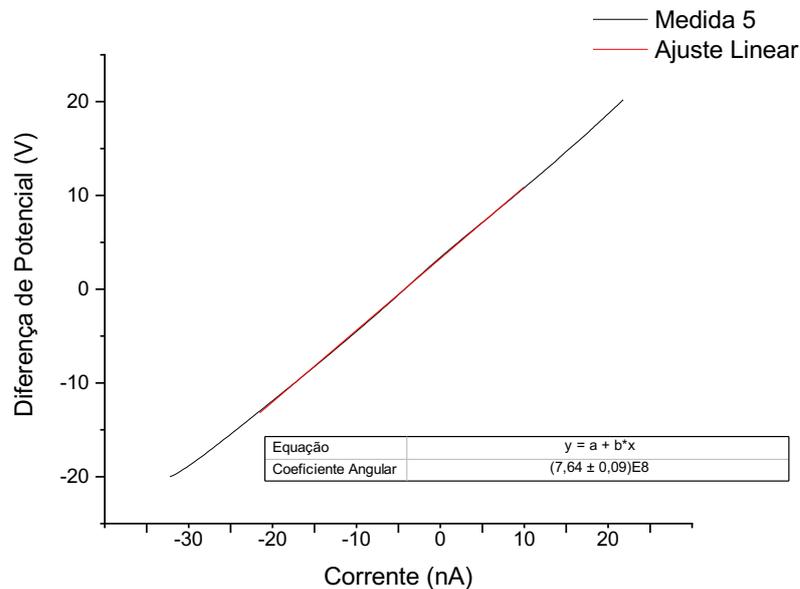


Figura 19: Gráfico do ajuste linear da rampa de potencial aplicada sobre a Amostra 2 com radiação

A partir da Figura 19 calculou-se a resistência do material após ter sido irradiado.

$$R = \alpha$$

$$R = (7,64 \pm 0,09) \times 10^8 \Omega$$

A resistência não retornou à resistência inicial do eletrodo, o que significa que o material possui uma memória. Comparando os três resultados para Amostra 2, observa-se que apesar de não retornar para o valor inicial, o erro das três medidas sugere a possibilidade de utilização como sensor, porém deve-se fazer um estudo mais aprofundado de estabilidade variando a energia do raio X. A primeira e terceira medida sem radiação, apresentam um valor maior da resistência elétrica em comparação a medida com a incidência do raio X, e seus erros mostram diferenças entre os valores, o que mostra que o sensor funciona, mas sugere que esta energia pode realizar quebras de ligação e instabilidade no sensor.

Para os demais tamanhos de nanopartículas não foram realizadas estas medidas comparativas como mencionado anteriormente.

### 5.3 Amostra 4

Foi variado a intensidade dos raios X variando a corrente do tubo e aplicou-se uma rampa de potencial de 0 até 20V, obtendo a Figura 20.

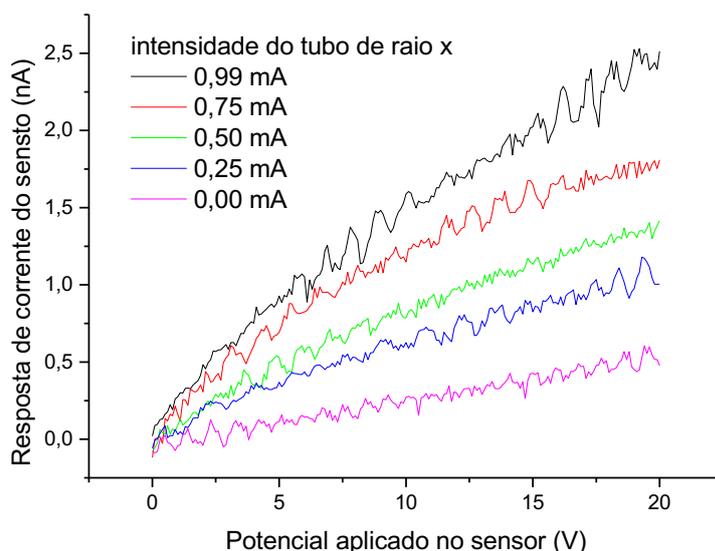
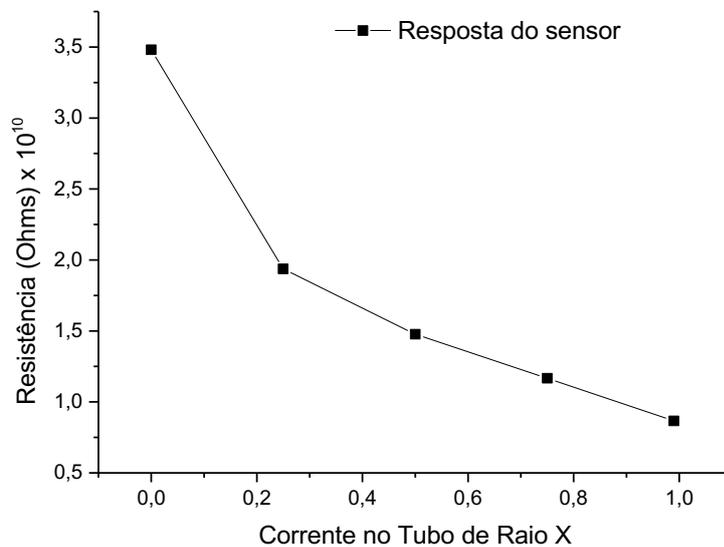


Figura 20: Gráfico de resposta da Amostra 4 para diferentes correntes aplicadas no tubo de Raios-x.

Podemos observar na figura 20 que o teste de resposta da amostra obteve uma variação significativa com a variação da intensidade do raio X, de mesma maneira, pode obter os coeficientes angulares em uma região mais próxima de linear acima dos 5V aplicados nos terminais da amostra, obtendo os valores das resistências elétricas e assim a figura 21.



*Figura 21: Gráfico de resposta do sensor de quitosana/gelatina e nanopartículas de 71,50 nm sobre eletrodos coaxiais de ouro/cromo espaçados de 0,2 mm via rampa de potencial. O tubo foi justado para 35kV e variou-se a corrente.*

Observa-se na figura 21 que a amostra não teve uma resposta linear com a variação da intensidade do tubo. Na figura 21, o início da resposta do sensor quando o raio X ainda possuía baixa intensidade teve uma grande variação, ao comparar com a Figura 20, observa-se que a resposta do filme foi linear para a baixa intensidade dos raios X, sugere uma possibilidade de utilização deste filme para sensores de baixa intensidade de raios X. A mesma sensibilidade foi observada medindo via cronoamperometria, mantendo um potencial fixo no eletrodo de 80V e observando a resposta de corrente elétrica em função da variação da intensidade de corrente no tubo de raio X (Figura 22).

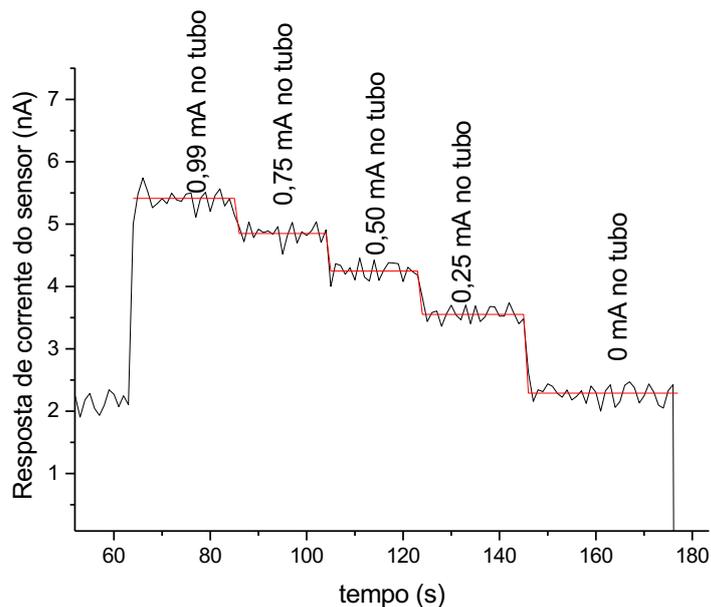


Figura 22: Gráfico de resposta do sensor de quitosana/gelatina e nanopartículas de 71,50 nm sobre eletrodos coaxiais de ouro/cromo espaçados de 0,2 mm via cronoamperometria. O tubo foi ajustado para 35kV e variou-se a corrente

Observa-se na figura 22 que para baixas intensidade de raios X, o sensor apresentou um maior salto na resposta, podendo chegar em uma saturação se aumentar muito esta intensidade.

## 6 CONCLUSÃO

A análise dos resultados permite concluir que a amostra de quitosana sem nanopartículas (Amostra 1) não é promissora para a utilização como um detector monitor, devido à memória do material quando irradiado a primeira vez, provocando possíveis erros em medições futuras. Por outro lado, a amostra com nanopartículas de  $13,5 \pm 1,1$  nm (Amostra 3) tem grande potencial para futura utilização na monitoração de radiação com baixas energias, sendo necessários

mais alguns estudos e caracterizações até poder ser efetivamente utilizada. Assim como a Amostra 3, a Amostra 2 deve ser continuar sendo estudada, uma vez que este estudo mostrou seu futuro promissor na detecção de radiações com baixas energias.

Este trabalho mostra o futuro promissor destes materiais para uma possível utilização como monitores de radiação. Estudos subsequentes são necessários, principalmente para avaliar as regiões de energia e os tipos de radiações que podem ser detectados pelo material. Assim, a determinação da espessura do filme, o controle de umidade para medidas dos filmes, checar melhor a influência do tamanho das nanopartículas e suas concentrações entre outros parâmetros. Espera-se que este estudo abra caminho para muitas outras pesquisas nesta área.

## REFERÊNCIAS

CORDEIRO, Marinês Domingues; PEDUZZI, Luiz Orlando de Quadro. As Conferências Nobel de Marie e Pierre Curie: a gênese da radioatividade no ensino doi: 10.5007/2175-7941.2010v27n3p473. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 27, n. 3, p. 473–514, 2011.

FELTRE, Ricardo. <http://groups-beta.google.com/group/digitalsource>. [S.d.].

LAGANÁ, Caio. Decaimentos nucleares em uma câmara de nuvens. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 3, p. 1–6, 2013.

MILBRATH, Brian D. *et al.* Radiation detector materials: An overview. *Journal of Materials Research*, v. 23, n. 10, p. 2561–2581, 2008.

OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth. *Física-da-Radiações--Okuno-e-Yoshimura[Sou Exatas]*. . [S.l: s.n.]. , [S.d.]

PRINZIO, Antonieta R Di; DOSIMETRIA, Instituto D E Radioproteção E. RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA : 2013.

RADVANYI, Pierre; VILLAIN, Jacques. La découverte de la radioactivité. *Comptes Rendus Physique*, v. 18, n. 9–10, p. 544–550, 2017.

REED, Amy B. The history of radiation use in medicine. *Journal of Vascular Surgery*, v. 53, n. 1 SUPPL., p. 3S-5S, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2010.07.024>>.

Síntese e caracterização microestrutural de nanopartículas de ouro nanopartículas de ouro. 2019.

ZARPELON, Fabiana. Preparação, caracterização e aplicação de filmes finos de PAH/PAA com nanopartículas de prata no tratamento microbiológico de

efluentes industriais para reuso. p. 0–81, 2013.

(LAGANÁ, 2013)