UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

PRODUÇÃO DE UM DISPOSITIVO ELETROLUMINESCENTE EM UMA ÚNICA ETAPA

Luiza Gualter Ramires

Prof. Dr. Giovani Gozzi

Rio Claro (SP)

2018

Luiza Gualter Ramires

PRODUÇÃO DE UM DISPOSITIVO ELETROLUMINESCENTE EM UMA ÚNICA ETAPA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel e Licenciado em Física.

Comissão Examinadora
Prof. Dr. Giovani Gozzi
Prof. Dr. Makoto Yoshida
Prof. Dr. Alexandre Mesquita

Rio Claro, 26 de Outubro de 2018.

Luiza Gualter Ramires
Assinatura da aluna

assinatura do orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Luiza Gualter Ramires

PRODUÇÃO DE UM DISPOSITIVO ELETROLUMINESCENTE EM UMA ÚNICA ETAPA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel e Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Giovani Gozzi

Rio Claro - SP

2018

R173p

Ramires, Luiza Gualter
PRODUÇÃO DE UM DISPOSITIVO ELETROLUMINESCENTE EM UMA ÚNICA ETAPA / Luiza Gualter Ramires. -- Rio Claro, 2018
31 p. : il., tabs., fotos + 1 CD-ROM

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura - Física) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Giovani Gozzi

1. Dispositivo eletroluminescente. 2. Compósito eletroluminescente. 3. Eletrônica impressa. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Agradecimentos

Agradeço à minha família, desde meus avôs, tios, tias e aos primos, que sempre me incentivaram a me focar nos estudos e se preocuparam com a educação. Especialmente agradeço a meus pais, irmã e namorado, pela paciência e carinho de sempre, sem os quais não seria possível chegar até aqui.

Aos colegas de laboratório com os quais convivi desde 2017 até 2018, agradeço pelos bons momentos e eventual apoio quando precisei de ajuda em algo. Alisson, Denis, Lucas, Guilherme, Kayo e Bruno, destacando o Flávio por gentilmente me guiar no início da minha pesquisa. Ao Matheus, Raissa e Danilo agradeço imensamente, sem os quais essa pesquisa não conseguiria ser concluída, além da amizade que não se prendeu ao ambiente de laboratório. Agradeço aos técnicos que mantém o departamento em ordem na medida em que conseguem, em especial ao André e sua frequente visita ao laboratório.

Agradeço ao professor Giovani por me orientar em iniciação científica e na produção deste trabalho, pelas conversas, e por ser um bom profissional. Além de se preocupar com o desenvolvimento da pesquisa e com a aprendizagem em sala de aula, o professor também se importou com a saúde de seus alunos, então não poderia deixar de agradecer os seus conselhos que contribuíram para que eu me esforçasse e conseguisse realizar algo.

A universidade me proporcionou amigos que me ajudaram a relaxar nos momentos em que era necessário e que me apoiaram nos momentos frágeis. Laura, Patricia, Rodrigo e Lorrayna, vocês foram de fundamental importância. Por fim agradeço aos amigos de longa data, Juliana, Eron e Picolo, por crescerem e sonharem comigo.

RESUMO

Atualmente, existem diferentes métodos de produção de dispositivos eletroluminescentes de filmes finos, como diodos emissores de luz (LEDs), células eletroquímicas emissoras de luz (LECs) e dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos (LECELs). Estes dispositivos são produzidos com pelo menos três etapas de processamento, uma para produção da camada ativa (emissora de luz) e duas para a produção dos eletrodos. O presente estudo propõe uma metodologia para fabricação de um dispositivo LECEL em uma única etapa de processamento, visando a diminuição do custo de produção de dispositivos eletroluminescentes. A camada ativa formada a partir de uma suspensão instável da mistura do polímero condutor poli(3,4-etileno dioxitiofeno):poli(estireno sulfonado) (PEDOT:PSS), com o material sílica/orgânico 3-glicidoxipropil-trimetilsilano (GPTMS), e o silicato emissor de luz silicato de zinco dopado com manganês (Zn_2SiO_4:Mn). Após a deposição desta suspensão sobre um substrato de cobre, devido à sua instabilidade, ocorre a decantação das partículas de silicato de zinco dopado com manganês. Por este processo, sobre a camada rica em silicato eletroluminescente ocorre a formação de um filme fino do material condutor transparente PEDOT:PSS/GPTMS. Neste único processo ocorre a formação de um dispositivo eletroluminescente já que o substrato de cobre atua como eletrodo metálico, o filme fino de PEDOT:PSS/GPTMS atua como eletrodo transparente e o filme rico em silicato eletroluminescente atua como camada ativa. O dispositivo produzido teve como tensão de operação em polarização direta 15 V e luminância máxima de 10 cd/m² (195 V). O dispositivo apresentou máxima emissão em 533 nm, correspondente à cor verde com coordenadas CIE 1931, com Iluminante E x = 0,3171 e y = 0,6438 e pureza de cor de 78%. Estes resultados são bons indicadores de que o conceito de fabricação do dispositivo eletroluminescente diminuindo suas etapas de processamento é viável.

Palavras-chaves: Dispositivo eletroluminescente. Compósito eletroluminescente. Eletrônica impressa.

ABSTRACT

Currently, there are different kind of production methods involving light emitting diodes (LEDs), light emitting cells (LECs) and eletroluminescents devices produced with composites (LECELs). These devices are produced with three processing steps: one for the active layer's production (light emitting) and two steps for the electrodes production. The present work proposes a device LECEL fabrication methodology in one only processing step, aiming the device electroluminescent production's low-cost. The active layer is formed by an unstable suspension of the conductive polymer poly(3,4-ethylene dioxythiophene):poly(sulfonated styrene) (PEDOT:PSS) blend with the silic/organic material 3-glycidoxypropyltrimethylsilane (GPTMS), and the light emitting manganese doped zinc silicate (Zn_2SiO_4:Mn). After the suspension's deposition over a copper substract, due to it's instability, the manganese doped zinc silicate particles decantation ocurrs. Through this process, over the active layer rich with eletroluminescente silicate ocurrs a thin-film formation of the conductor transparent material PEDOT:PSS/GPTMS. In this single process ocurrs the eletroluminescente device formation, since the copper substract acts as a metalic eletrode, the PEDOT:PSS/GPTMS thin-film acts as a transparent and the rich eletroluminescente silicate film acts as the active layer. The produced device had an operatting voltage in direct polarization 15 V and maximum luminance of 10 cd/m² (195 V). The device showed maximum emission at 533 nm, corresponding to the green color with coordinates CIE 1931 Illuminant E x = 0,3171 and y = 0,6438 and 78% purity. These results are good indicators that the concepts of manufacturing the electroluminescent device decresing its processing steps is feasible.

Keywords: Eletroluminescent Device. Eletroluminescent Composite. Printed Eletronics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – curvas de luminância e densidade de corrente em função da tensão que caracterizam o dispositivo EL produzido por Chinaglia *et al*.....11

Figura 2 – Resultados obtidos dos dispositivos produzidos com um filme feito de PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn, colocado entre um eletrodo de ITO e um eletrodo de ouro: (a) gráfico da densidade de corrente e da luminância em função do campo elétrico; (b) gráfico da eficácia luminosa em função do campo elétrico; (c) gráfico do espectro de emissão eletroluminescente do dispositivo produzido; (d) diagrama das coordenadas
CIE.....13

Figura 3 – exemplo de caminhos percolados (representado por uma linha preta) e não percolados (representado por uma linha vermelha) em um dispositivo EL, feito com eletrodo de ITO e ouro.....14

Figura 4 – Curvas de luminância e densidade de corrente pelo campo elétrico do dispositivo EL produzido com um eletrodo semicondutor formado por PEDOT:PSS/GPTMS.....15

Figura 5 – distribuições espectrais correspondentes aos valores triestímulos em unidades arbitrárias em função do comprimento de onda.....16

Figura 6 – diagrama colorimétrico CIE 1931.....17

Figura 7 – estrutura química do GPTMS.....18

Figura 8 – estrutura química dos polímeros PEDOT e PSS.....18

Figura 9 – representação química do Zn_2SiO_4:Mn.....19

Figura 10 – foto tirada no laboratório “Medidas Elétricas” do departamento de Física, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” unidade de Rio Claro, identificando os aparelhos utilizados para a caracterização elétrica das amostras produzidas. (A) é a câmara a vácuo onde as amostras são colocadas e onde o fotodiodo está acoplado; (B) é a fonte de tensão e corrente; (C) é o medidor de fotocorrente; (D) é o espectrômetro ligado a um cabo de fibra óptica; (E) computador ligado aos aparelhos para coleta de dados.....20

Figura 11 – foto da câmara de vácuo aberta, mostrando como o dispositivo é colocado. Quando a câmara é fechada, o dispositivo pode ser observado através de uma tampa de vidro.....20

Figura 12 – foto da disposição do sistema para hidrólise do GPTMS.....21

Figura 13 – (a) Esquema do dispositivo EL. Em azul claro fica a camada ativa, em azul escuro fica o filme semicondutor transparente; (b) foto do dispositivo EL desenvolvido.....22

Figura 14 – foto de um ispositivo EL produzido em uma única etapa de processamento, emitindo luz visível verde ao ser submetido a uma diferença de potencial.....25

Figura 15 – (a) curvas de densidade de corrente e luminância em função da tensão para o dispositivo produzido, indicando os valores para a tensão de operação em ambas as polarizações; (b) eficácia em função da corrente do mesmo dispositivo; (c) densidade de corrente e luminância em função do campo elétrico.....26

Figura 16 – espectro de emissão de luz do dispositivo EL produzido neste trabalho, onde a intensidade é medida em unidades arbitrárias.....28

Figura 17 – diagrama CIE para o dispositivo EL produzido, onde o ponto indicado na figura representa a posição colorimérica a partir das coordenadas x=0,3171 e y=0,6438.....28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....9

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....11

2.1 Dispositivos EL produzidos com compósitos (LECELs).....11

2.2 Colorimetria.....15

3 MATERIAIS UTILIZADOS.....18

3.1 Materiais Para a Fabricação do Dispositivo EL.....18

3.2 Aparelhos para Caracterização.....19

4 METODOLOGIA.....21

4.1 Processo de Fabricação.....21

4.2 Processos de Caracterização.....23

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....25

6 CONCLUSÕES.....29

REFERÊNCIAS.....30

1 INTRODUÇÃO

A articulação entre conhecimento científico e desenvolvimento tecnológico vem incentivando diversas áreas de pesquisa. Ao início no século XX houve interesse na fabricação de dispositivos elétricos emissores de luz, que funcionam com o princípio de transformar energia elétrica em luz. O primeiro dispositivo eletroluminescente (EL) foi proposto por George Destriau [1,2] na década de 1930, mostrando que materiais inorgânicos possuem eletroluminescência quando submetidos a um campo elétrico alternado intenso. Poucos anos mais tarde Inoguchi e colaboradores produziram dispositivos EL de filmes finos operados por corrente alternada, ACTFEL (sigla do nome em inglês *"alternated current thin-film electroluminescent devices*") [3].

Ainda no século XX, estudos envolvendo polímeros semicondutores [4-6] mostram que a estrutura desordenada destes materiais resulta em uma fraca interação intermolecular, e isso permite sua dissolução [7-9]. Esta característica permitiu a aplicação de polímeros orgânicos semicondutores para a fabricação de dispositivos EL. Neste caso, em função da solubilidade dos materiais eletrônicos poliméricos, é possível produzir dispositivos EL empregando-se técnicas de impressão gráfica, as quais permitem a fabricação em larga escala e com baixo custo de produção [O. Carr. Translational Materials Research].

Os diodos poliméricos emissores de luz (PLEDs) foram os primeiros dispositivos eletroluminescentes poliméricos desenvolvidos. O desenvolvimento destes dispositivos ocorreu por volta de 1990. Alternativamente, em 1995, foram desenvolvidas as células eletroquímicas emissoras de luz (PLECs) [10,11]. Embora estes dois tipos de dispositivos utilizem materiais solúveis para a produção da camada ativa, estes necessitam de uma camada condutora transparente produzida com óxido de estanho e índio (ITO) depositado com técnicas de alto custo e baixa produtividade *RF-Sputtering*. Em muitos casos, além do eletrodo de ITO, um eletrodo metálico com baixa função trabalho (materiais altamente reativos com oxigênio e umidade) deve ser empregado para obter dispositivos de alta performance. Além disso, dispositivos com alto desempenho são obtidos com a deposição de filmes ultrafinos (com espessura de centenas de nanômetros) para obtenção da camada ativa. Estas características básicas, impedem a produção em larga escala de PLEDs e PLECs, pois demandam produção em ambiente de atmosfera inerte e em salas limpas.

Os dispositivos produzidos com compósitos (LECELs), por outro lado, apresentam melhor desempenho quando são produzidos com eletrodos não reativos, como ouro e cobre, além de serem produzidos com filmes finos (da ordem de dezenas a centenas de micrometros). Por estas razões, estes dispositivos podem ser fabricados em condições ambiente, sem necessidade de processamento em atmosfera inerte ou sala limpa. Estas condições de fabricação favorecem o processamento de baixo custo em comparação com as tecnologias PLED e PLEC,

entretanto ainda existe a necessidade de produção de um eletrodo transparente que em geral é produzido com ITO.

A presente pesquisa mostra o conceito de produção de um dispositivo EL de baixo custo, produzido em uma única etapa de processamento. Os dispositivos foram produzidos sobre folhas de cobre, as quais tiveram o papel de substrato e de eletrodo metálico. Sobre este substrato foi depositada por técnica de gotejamento uma suspensão instável de um compósito eletroluminescente, que por processo de decantação em uma única etapa de processamento, foram obtidas tanto a camada ativa como o eletrodo transparente do dispositivo.

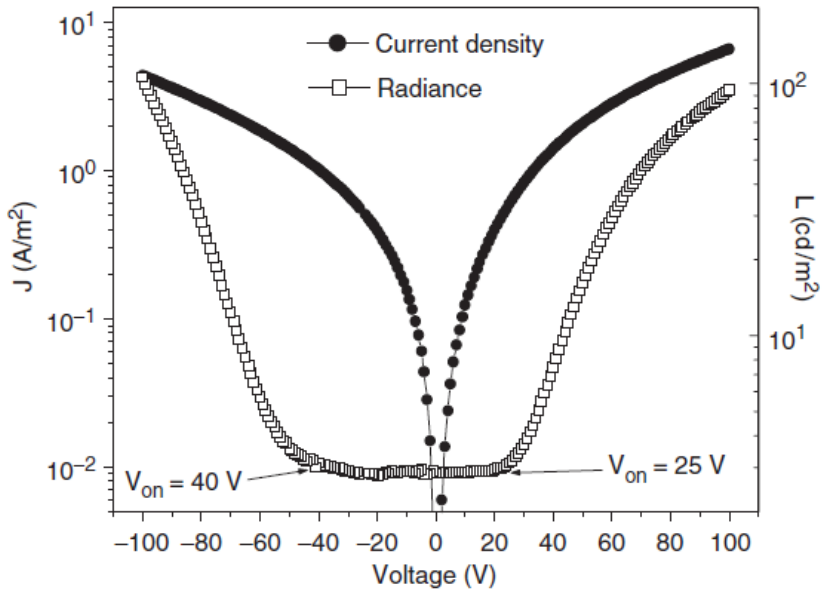
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos (LECELs), suas propriedades eletroópticas e sobre conceitos de colorimetria.

2.1 Dispositivos EL produzidos com compósitos (LECELs)

Os dispositivos EL possuem atualmente uma vasta aplicação tecnológica na fabricação de *displays* eletrônicos, com disponibilidade de emissão de diferentes cores do espectro visível. Os diferentes tipos de dispositivos EL produzidos têm sua emissão de luz dependente das características do material utilizado na camada ativa, responsável pela emissão de luz. O Zn_2SiO_4:Mn (silicato de zinco dopado com manganês), por exemplo, emite luz na faixa do verde do espectro visível, em 520 nm. Chinaglia e colaboradores [12] utilizaram uma mistura de pó micro-particulado deste silicato eletroluminescentes com o polímero semicondutor poli(*o*-metoxianilina) (POMA) dopado com o copolímero isolante poli(fluoreto de vinilideno-trifluoretileno) (PVDF-TrFE), para a produção de um compósito eletroluminescente. Este material foi empregado para a produção da camada ativa de um dispositivo EL, a qual foi depositada entre um eletrodo de alumínio evaporado a vácuo e um substrato contendo um eletrodo de ITO previamente depositado sobre vidro. Neste estudo, o dispositivo fabricado apresentou tensão de operação de 25 V em polarização direta com a luminância da ordem de 100 cd/m² como apresentado na Figura 1. A luz emitida pelo dispositivo apresentou comprimento de onda dominante em torno de 541 nm, correspondente a cor verde do espectro visível com pureza de 90,4%.

Figura 1 – Curvas de luminância e densidade de corrente em função da tensão, que caracterizam o dispositivo EL produzido por Chinaglia *et al*.



Fonte: Figura obtida da referência [12].

Em outro estudo, foi demonstrado que que eletrodos com alta função trabalho, aqueles fracamente reativos a componentes atmosféricos, formam barreiras de potencial menos intensas nas interfaces camada ativa/eletrodos [13]. Na Tabela 1 seguem valores para a intensidade das barreiras de potencial de interfaces formadas com diferentes tipos de metais.

Tabela 1 – Magnitudes das barreiras de potencial de interface formadas entre o compósito EL proposto por Chinaglia com diferentes metais utilizados como eletrodos.

Barreira de Potencial Δ (eV)	Eletrodo metálico
0,97	Al
0,37	Cu
~0,03	Au

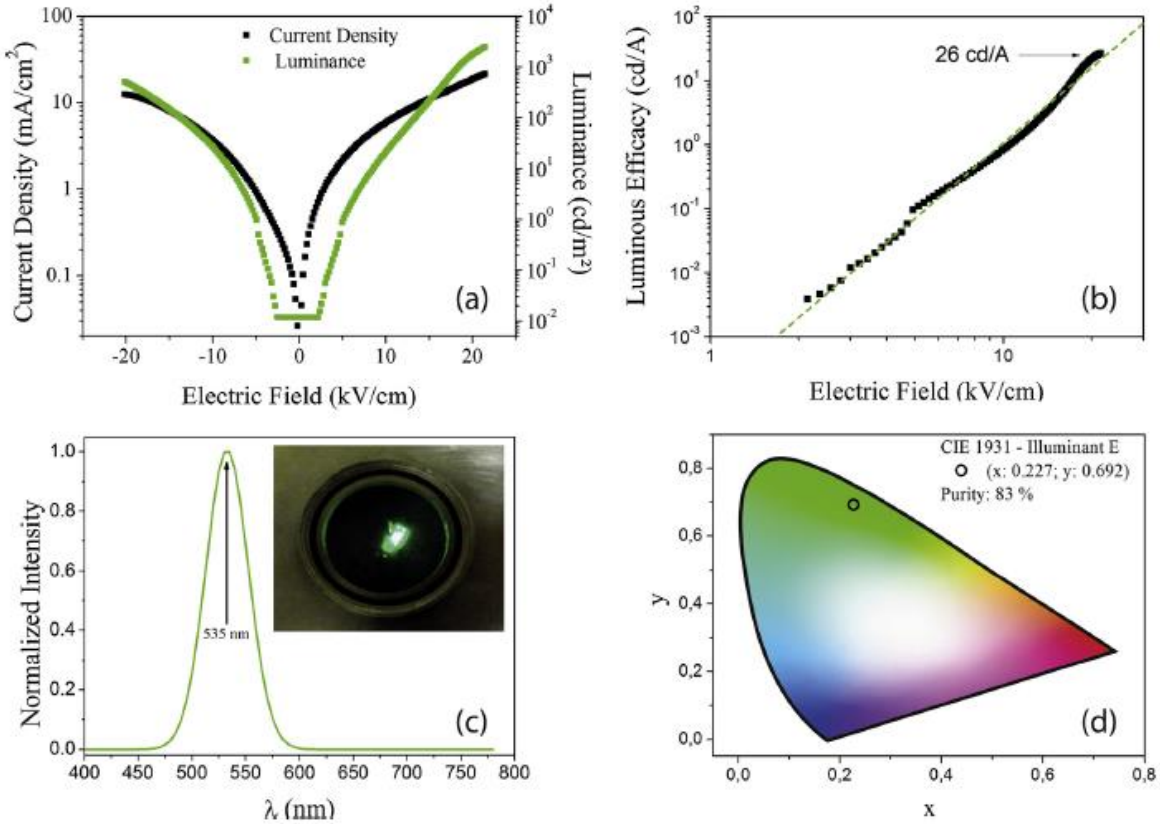
Fonte: dados obtidos de um gráfico da referência [13].

Na Tabela 1 verifica-se que o metal menos reativo (Au) é aquele que forma barreira de potencial menos intensa na interface com o compósito eletroluminescente. Este efeito ocorre por o material EL ser composto por um semicondutor do tipo-p dopado, havendo melhor casamento entre os níveis da banda de valência do semicondutor com o nível de Fermi do metal. Este resultado indica que a injeção dos portadores de carga ocorre na matriz condutora do material ativo.

Em estudo mais recente [14] foi proposto o uso de um material ORMOSIL (*Organic Modified Silicate*) para a produção da matriz condutora de um compósito eletroluminescente. Este material confere melhor estabilidade química do filme da camada ativa que o material proposto incialmente por Chinaglia. No caso, o ORMOSIL utilizado foi o 3-glicidoxipropil-trimetilsilano (GPTMS) e o polímero semicondutor utilizado foi o poli(3,4-etileno dioxitiofeno):poli(estireno sulfonado) (PEDOT:PSS).

Na Figura 2 são mostrados resultados obtidos de dispositivos produzidos com o compósito contendo PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn na proporção 0,5% de PEDOT:PSS, 4,5% de GPTMS e 95% de Zn_2SiO_4:Mn. A camada ativa foi depositada sobre eletrodo de ITO e foi utilizado ouro como eletrodo metálico. Obteve-se tensão de operação em torno de 30-36 V, correspondente ao campo elétrico de operação da ordem de 5 kV/cm em ambas as polarizações. A luminância máxima obtida foi de 2500 cd/m² e eficácia luminosa máxima de 26 cd/A. As coordenadas do Iluminante E 1931 CIE foram x = 0.227 e y = 0.692, com pureza de 83%, indicando dessa forma a emissão de luz verde no comprimento de onda 535 nm.

Figura 2 – Resultados obtidos dos dispositivos produzidos com um filme feito de PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn, colocado entre um eletrodo de ITO e um eletrodo de ouro: (a) gráfico da densidade de corrente e da luminância em função do campo elétrico; (b) gráfico da eficácia luminosa em função do campo elétrico; (c) gráfico do espectro de emissão eletroluminescente do dispositivo produzido; (d) diagrama das coordenadas CIE.



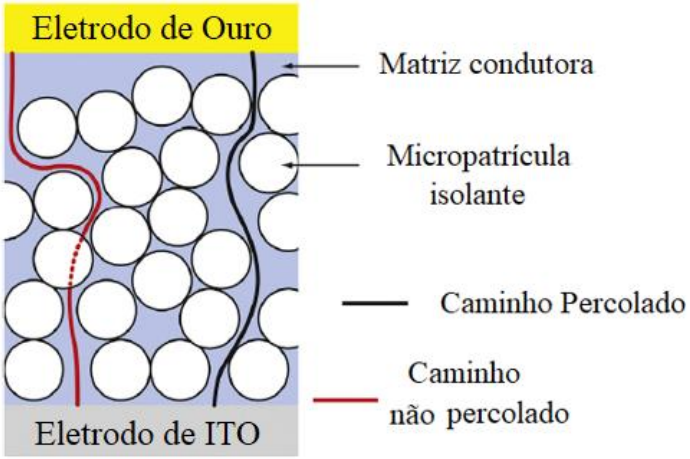
Fonte: os resultados trazidos foram obtidos da referência [14].

A dependência da performance de dispositivos produzidos com este compósito em função da concentração de micropartículas e da espessura da camada ativa demonstrou que os dispositivos com alta performance foram aqueles produzidos com concentração de silicato eletroluminescente e espessuras que garantiram condutância elétrica do dispositivos na faixa de 10^{-4} S à 10^{-5} S [15]. Neste estudo também foram utilizados eletrodos de ITO e ouro, os quais formam contatos ôhmicos com o material ativo, indicando que a performance dos dispositivos está relacionada com o transporte de cargas no compósito EL.

O transporte de cargas no compósito eletroluminescente foi interpretado, em outro estudo, em termos da formação de canais não-percolados onde as partículas eletroluminescentes, que são isolantes, impedem a passagem dos portadores de cargas injetados na matriz condutora do material ativo. Além dos canais não-percolados, considera-se a formação de canais percolados, por onde o transporte de carga de um eletrodo a outro pode ocorrer sem a interrupção causada pelas partículas eletroluminescentes. O exemplo da Figura 3 mostra que há uma quantidade de micropartículas isolantes limitando o transporte de carga através do

dispositivo, indicada pelo caminho não-percolado, as quais não impedem completamente o transporte de cargas, ocorrendo, deste modo, a formação de canais percolados [15-17].

Figura 3 – Exemplo de caminhos percolados (representado por uma linha preta) e não percolados (representado por uma linha vermelha) em um dispositivo EL.

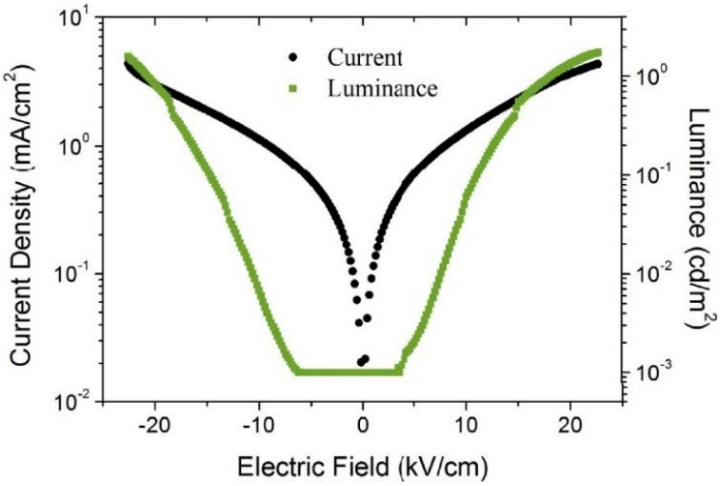


Fonte: imagem retirada da fonte [16] e editada, com tradução nossa. A imagem continha indicado "*Conductive Matrix", "Insulating microparticle", "Percolated Channel", "Non-Percolated Channel".* Na parte superior amarela estava "*Gold Electrode"*, e na parte inferior estava "*ITO Electrode"*.

Nos caminhos não percolados, portadores de cargas acumulam-se na vizinhança das partículas isolantes, e através de um campo elétrico suficientemente alto ocorre a injeção de carga nessas partículas, causando a eletroluminescência. Neste estudo, propõe-se também que a densidade de caminhos percolados por unidade de área do dispositivo EL diminui com o aumento da densidade de partículas isolantes naquela mesma área, e analogamente, espera-se um aumento da resistividade do compósito EL. Dessa forma, não somente a injeção de cargas no filme da camada ativa afeta a luminescência do dispositivo, como também a concentração de micropartículas inorgânicas e a espessura da camada ativa.

Do ponto de vista tecnológico, foi proposto um dispositivo LECEL onde o eletrodo transparente condutor foi produzido com uma mistura de PEDOT:PSS/GPTMS com proporção de 50% em massa, depositado pela técnica de spray sobre substratos de vidros limpos. Neste caso, a camada ativa foi obtida com o compósito PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn na proporção 0,5%, 4,5%, 95% respectivamente. Sobre estas camadas foram depositados eletrodos de ouro pela técnica de evaporação térmica a vácuo. Como mostra a Figura 4 este dispositivo apresentou campo elétrico de operação da ordem de 5 kV/cm em ambas polarizações e o dispositivo alcançou luminância máxima de 2 cd/m².

Figura 4 – Curvas de luminância e densidade de corrente pelo campo elétrico do dispositivo EL produzido com um eletrodo condutor formado por PEDOT:PSS/GPTMS.



Fonte: gráfico obtido da referência [14].

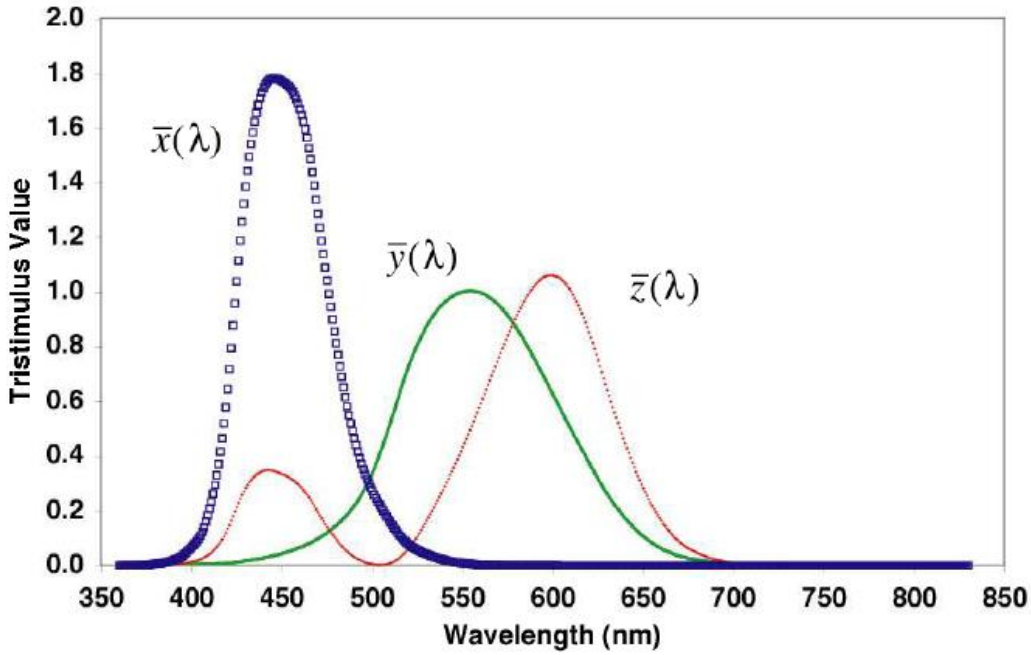
2.2 Colorimetria

A luz visível apresenta comprimento de onda no espectro eletromagnético entre 380 nm a 740 nm . Porém, a resposta do olho humano não é igual para todo o espectro visível, tendo sua máxima sensibilidade em torno do comprimento de onda 555 nm, correspondente ao verde [16]. A sensibilidade do olho humano à radiação é classificada em três intervalos: alta (intervalo fotóptico, correspondente ao que se enxerga de dia), média (intervalo mesópico) e baixa (intervalo escotópico, basicamente correspondente à luminosidade noturna). Para interpretar estes intervalos são necessários três parâmetros independentes conhecidos por valores triestímulos. Como a percepção das cores varia de pessoa para pessoa, a Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Eclairage* - CIE) criou um padrão em 1931: um conjunto de três funções de cores correspondentes que satisfazem os valores triestímulos.

A distribuição espectral de potência S(λ) é uma relação entre a área por onde passa um fluxo de radiação (A) e seu ângulo sólido (Ω): S(λ) = A Ω. Os parâmetros triestímulos X, Y e Z de uma fonte de radiação ou de uma distribuição espectral de potência S(λ) são encontrados pela equação (1). K é um fator de escala para a eficiência luminosa, 683 lm/W, e as distribuições espectrais são $\bar{x}, \bar{y}\ e\ \bar{z}$ [18] mostradas na Figura 5.

$$\begin{aligned} X &= K \int S(\lambda)\bar{x}d\lambda\,; \\ Y &= K \int S(\lambda)\bar{y}d\lambda\,; \\ Z &= K \int S(\lambda)\bar{z}d\lambda. \end{aligned} \qquad (1)$$

Figura 5 – Distribuições espectrais correspondentes aos valores triestímulos em unidades arbitrárias em função do comprimento de onda.



Fonte: imagem retirada da referência [18].

Como $\bar{y}$ corresponde a variação da sensibilidade do olho humano ao intervalo fotóptico, então Y fornece o brilho ou luminância da fonte de radiação. Para conhecer informações sobre a cor da luz emitida pela fonte de radiação, existem dois parâmetros x e y indicados na relação (2) conhecidos como coordenadas de cromaticidade que dependem de X, Y e Z.

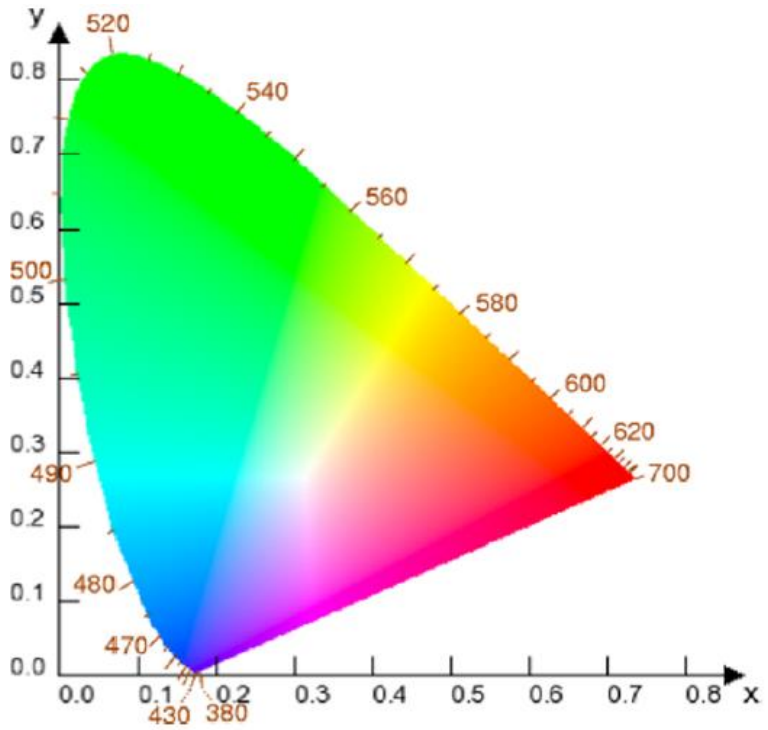
$$x = \frac{X}{X+Y+Z};$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}; \qquad (2)$$

$$z = 1 - (x + y).$$

Na Figura 6 pode-se ver o diagrama formado pelas coordenadas CIE xy. Os valores seguem na ordem horária para os comprimentos de onda, começando para o correspondente para a região em azul (380 nm) até a região correspondente ao vermelho (700 nm). Qualquer ponto sobre a linha que conecta estes dois comprimentos de onda, não podem ser obtidos por uma luz monocromática. Quanto mais para o centro do diagrama, menos pura será uma cor, e para um triângulo formado a partir de três pontos dentro do diagrama, é possível fazer uma combinação linear das cores correspondentes a estes três pontos e formar qualquer cor que esteja contida no triângulo [19].

Figura 6 – Diagrama colorimétrico CIE 1931.



Fonte: Figura retirada da referência [19].

A pureza de uma cor é encontrada pela razão entre a distância desta cor até o branco, pela distância do branco até a sua cor dominante. Existem diferentes padrões de branco dados pela CIE: Iluminante A (0,448;0,408), lâmpada de tungstênio avermelhada; Iluminante B (0,349;0,3452), luz solar ao meio dia; Iluminante C (0,310;0,316) luz solar difusa de céu nublado ao meio dia (Padrão NTSC); Iluminante (E) (0,333;0,333) e Iluminante D6500 (0,313;0,329), radiação de corpo negro a 6500 °C [20].

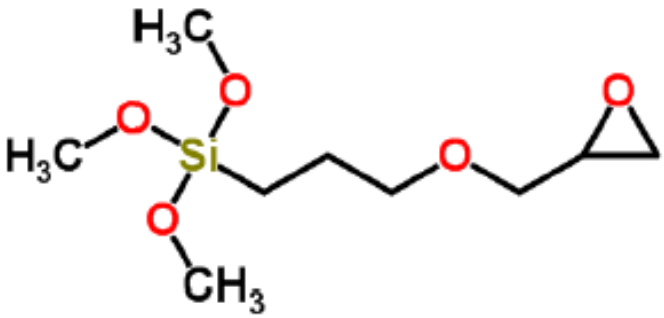
3 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais necessários para a fabricação de dispositivos na subseção 3.1, e na subseção 3.2 serão abordados os materiais utilizados para caracterização dos dispositivos.

3.1 Materiais Para a Fabricação do Dispositivo EL

Para a fabricação dos dispositivos ELs utilizou-se uma solução feita com a mistura de um polímero material sílica/orgânico isolante, um polímero condutor e micro-partículas de um material inorgânico luminescente. A Figura 7 apresenta a estrutura química do o 3-glicidoxipropil-trimetilsilano (GPTMS) fornecido pela empresa ∑-*Aldrich,* código 440167, que foi utilizado como material sílica/orgânico isolante por apresentar transparência e elevada estabilidade química.

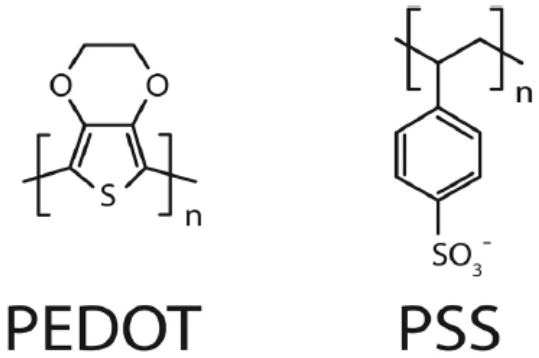
Figura 7 – estrutura química do GPTMS.



Fonte: Figura retirada da referência [15].

A estrutura química do polímero condutor utilizado, que foi o poli(3,4-etileno dioxitiofeno):poli(estireno sulfonado) (PEDOT:PSS), fornecido pela empresa *Heraeus* modelo Clevios PH 1000 está apresentado na Figura 8[15].

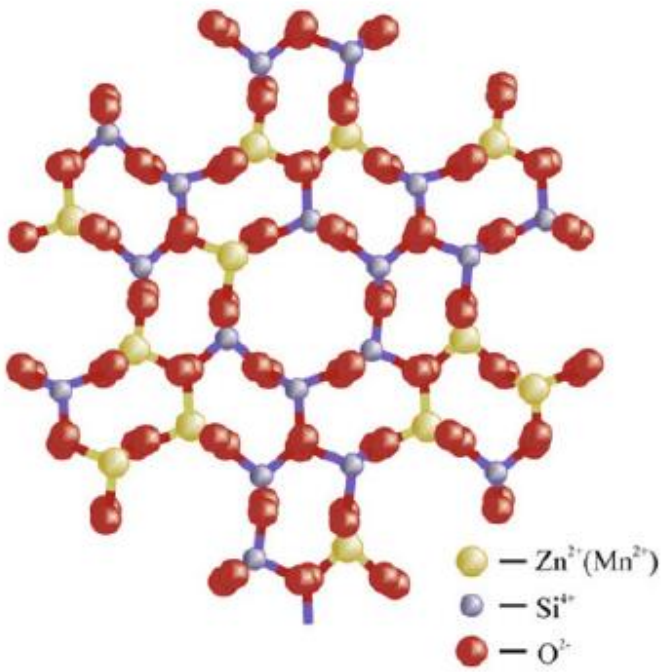
Figura 8 – estrutura química dos polímeros PEDOT e PSS.



Fonte: Figura retirada da fonte [14].

O material luminescente que foi utilizado é constituído por uma matriz de silicato, cuja rede cristalina está apresentada na Figura 9 e um dopante emissor de luz, que é o manganês. Neste material, um átomo de Mn^{+2} substitui um átomo de Zn^{+2}, para formar o silicato de zinco dopado com manganês [16]. Através de um estímulo elétrico ocorre a eletroluminescência, onde o material ativador é excitado, e quando retorna a seu estado fundamental emite radiação característica da transição envolvida. O material foi fornecido pela ∑-*Aldrich*, código 101598766.

Figura 9 – representação química do Zn_2SiO_4:Mn.

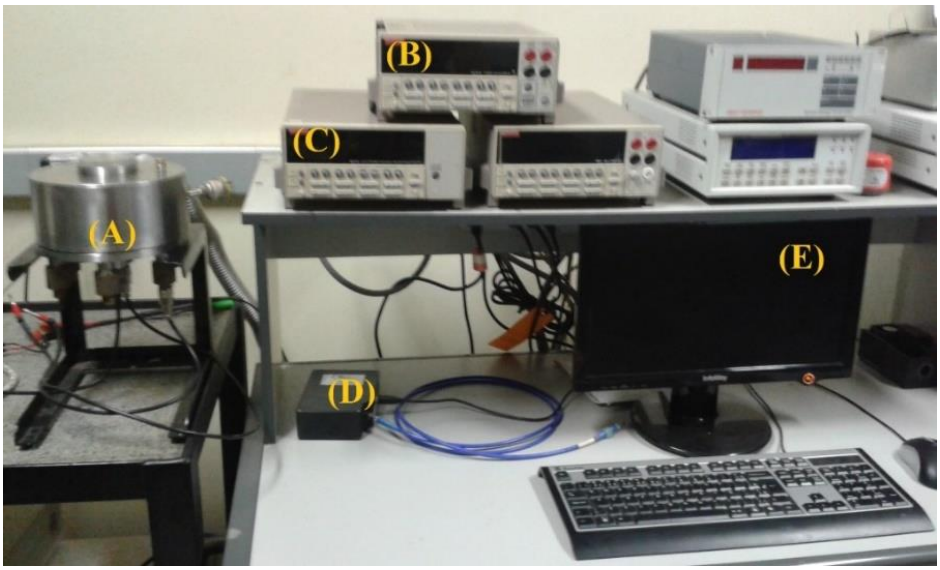


Fonte: Figura retirada da referência [17].

3.2 Aparelhos para Caracterização

Para as medidas de corrente e tensão, utilizou-se a fonte de tensão e corrente *source/meter Keithley modelo 2410,* cuja tensão pode ser variada entre 0 a 1100 V e a corrente entre 0 a 20 mA. A fotocorrente foi obtida com o auxílio de um fotodiodo produzido pela Hamamatsu, modelo S1133-01, conectado ao eletrômetro *Keithley 6517*, enquanto que o espectro de emissão foi registrado com o espectrômetro Ocean Optics, modelo HR4000 ligado a um cabo de fibra óptica. Todos os dados foram gerados e coletados pelo computador através da comunicação GPIB-USB entre aparelhos e o computador. A Figura 10 mostra a disposição dos aparelhos utilizados em laboratório e é possível ver o esquema de fixação e contato de uma amostra ao aparato experimental na Figura 11.

Figura 10 – Foto tirada em laboratório do departamento de Física, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” unidade de Rio Claro, identificando os aparelhos utilizados para a caracterização elétrica das amostras produzidas. (A) é a câmara a vácuo onde as amostras são colocadas e onde o fotodiodo está acoplado; (B) é a fonte de tensão e corrente; (C) é o medidor de fotocorrente; (D) é o espectrômetro ligado a um cabo de fibra óptica; (E) computador ligado aos aparelhos para coleta de dados.



Fonte: foto tirada pela autora em julho de 2018.

Figura 11 – Foto da câmara de vácuo aberta, mostrando como o dispositivo é colocado. Quando a câmara é fechada, o dispositivo pode ser observado através de uma tampa de vidro.

Fonte: foto tirada em laboratório do departamento de Física, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” unidade de Rio Claro pela autora em julho de 2018.

4 METODOLOGIAS

As subseções deste capítulo apresentam: a metodologia para fabricar dispositivos ELs em uma única etapa de processamento (em 4.1) e as informações necessárias para caracterizar estes dispositivos (em 4.2).

4.1 Processo de Fabricação

O GPTMS foi hidrolisado e diluído. Para a hidrólise, preparou-se uma mistura contendo 20 ml de álcool etílico com 54 ml de GPTMS em um balão de vidro acoplado à uma coluna de vigreux, que foi deixada em refluxo por meia hora à 80 °C. A Figura 12 mostra o sistema utilizado, onde um banho de óleo, com controle eletrônico de temperatura, foi empregado para garantir o aquecimento homogêneo da solução.

Figura 12 – Foto da disposição do sistema para hidrólise do GPTMS.

Fonte: foto tirada em laboratório pela autora em 2018.

Após os 30 minutos, foi adicionado 15 ml de água (H_2O) destilada e 1 ml de ácido nítrico (HNO_3), e a mistura permaneceu em agitação e refluxo por 4 horas. Desta forma foi obtido GPTMS na concentração de 501 mg/ml. Posteriormente, esta solução foi diluída em água destilada a 30 mg/ml.

A mistura dos materiais foi feita na proporção de 95% (em massa) de silicato de zinco dopado com manganês, 4,5% de GPTMS e 0,5% de PEDOT:PSS. Para melhorar a condutividade do PEDOT:PSS, foi acrescentado 5% (em volume) de etileno glicol à solução do polímero. Em uma primeira etapa, misturou-se o GPTMS com o PEDOT:PSS com o auxílio de um agitador magnético por meia hora em

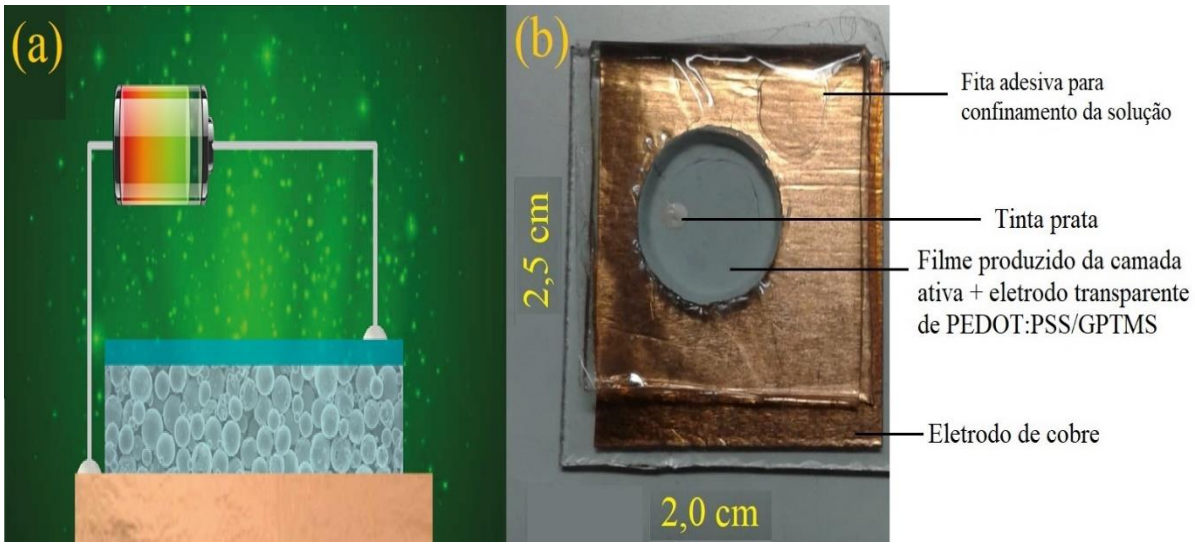
temperatura ambiente, em seguida adicionou-se o silicato de zinco dopado com manganês, onde esta suspensão ficou sob agitação durante dez minutos.

Os dispositivos EL foram feitos sobre uma base rígida para que o filme da mistura polimérica não quebrasse. Neste caso foram utilizadas lâminas de microscopia cortadas com dimensões de 2,5 cm x 2 cm. Foi utilizada uma fita adesiva de cobre como substrato metálico, colada sobre o vidro servindo como o eletrodo metálico opaco. Uma fita adesiva, com espessura de 2 mm, foi perfurada em forma circular (com diâmetro de 10 mm) e colada sobre o substrato metálico para limitar a área de deposição da suspensão sobre o substrato.

O substrato de cobre foi limpo em plasma de oxigênio por dez minutos, utilizando o *Plasma Cleaner EQ* modelo PDC-32G-LD em potência máxima. Assim que o substrato foi retirado do plasma, foi feita a deposição da solução por gotejamento com a utilização de uma pipeta. O dispositivo foi deixado para secar à temperatura ambiente durante vinte e quatro horas, sendo este o momento em que o silicato de zinco dopado com manganês decantou, separando a camada ativa do eletrodo transparente de PEDOT:PSS/GPTMS em uma única etapa de processamento.

O dispositivo foi colocado na estufa a 80° C para a evaporação do solvente. Este processo foi realizado em três horas. Para efetuar o contato elétrico eletrodo transparente com o sistema de medidas utilizou-se tinta prata sobre o filme de PEDOT:PSS/GPTMS. A Figura 13 apresenta o esquema representativo do dispositivo EL ao lado da fotografia de um dispositivo produzido em laboratório.

Figura 13 – (a) Esquema do dispositivo EL. Em azul claro fica a camada ativa, em azul escuro fica o filme semicondutor transparente; (b) foto do dispositivo EL desenvolvido.



Fontes: (a) Figura retirada do pôster produzido por Luiza Gualter Ramires, Flávio Henrique Feres e Giovani Gozzi, "*Desenvolvimento de Dispositivo Eletroluminescente com Uma Única Etapa de Processamento*", apresentado no XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNESP em setembro de 2017; (b) foto tirada em laboratório pela autora.

4.2 Processos de Caracterização

A caracterização colorimérica foi feita enquanto aplicou-se tensão em uma amostra dentro de uma câmara a vácuo localizada em uma sala escura. A coleta da luz emitida pelo dispositivo foi realizada com o auxílio de um cabo de fibra óptica ligado a um espectrômetro. Os dados obtidos possibilitaram, além da determinação do comprimento de onda dominante (λ), a determinação das coordenadas CIE e da pureza de cor da luz emitida.

A caracterização elétrica foi feita em corrente contínua em temperatura ambiente, produzindo uma curva de corrente e fotocorrente contra tensão aplicada. Os eletrodos da amostra, colocada dentro de uma câmara de vácuo.

A intensidade luminosa ou luminância, foi medida em candelas, que é a unidade de medidas no SI (BIPM, 2006):

> "Candela é a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática na frequência de $540 \cdot 10^{12}$ hertz e tem uma intensidade radiante nesta direção de 1/683 watt por esferoradiano. Segue que o espectro de eficácia luminosa para radiação monocromática na frequência de $540 \cdot 10^{12}$ hertz é exatamente 683 lumens por watt, K = 683 lm/W = 683 cd sr/W" (referência [17], com tradução nossa)[*].

Dessa forma, foi necessária a transformação da fotocorrente gerada no fotodiodo em candelas. A constante de proporção para conversão foi obtida na referência [15] como $2 \cdot 10^9$ cd/m²A.

Com os dados da corrente I, da luminância l_v e conhecendo a área da fonte luminosa a, é possível encontrar a eficácia do dispositivo η com dimensões de [cd/A] como mostra a equação (3).

$$\eta = \frac{l_v\, a}{I}\,. \qquad (3)$$

A densidade de corrente J descreve uma quantidade de corrente que atravessa uma determinada área, como indica a equação (4). As curvas na literatura são frequentemente encontradas para a densidade de corrente em função da tensão ao invés da própria corrente em função da tensão.

$$J = \frac{I}{a}\,. \qquad (4)$$

[*] Texto original: "The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency 540 x 1012 hertz and that has a radiant intensity in that direction of 1/683 watt per steradian. It follows that the spectral luminous efficacy for monochromatic radiation of frequency of 540 x 1012 hertz is exactly 683 lumens per watt, K = 683 lm/W = 683 cd sr/W."

Em outro caso de comparação com a literatura, foi feita a relação da densidade de corrente e da luminância com o campo elétrico. Para tal, foi utilizada a relação expressada na equação (5), onde a diferença de potencial é V, a distância entre um eletrodo e o outro, ou seja, a espessura do filme de PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn é d, e o campo elétrico é E.

$$E = \frac{V}{d}\,. \tag{5}$$

Foi possível extrair o valor da tensão de operação V_0 a partir da curva gerada para a luminância em função da tensão em escala mono-log. Este valor indica qual é o menor valor de tensão para o qual pode-se detectar a emissão de luz. Para tanto, foi feito um ajuste linear, e através da equação da reta, foi encontrado o parâmetro desejado como mostra a equação (6).

$$\log(l_v) = AV_0 + B$$

$$V_0 = \frac{\log(l_v) - B}{A}\,. \tag{6}$$

Onde A é o coeficiente angular desse ajuste linear e B é mínima luminância detectada pelo aparato experimental, ambos descritos com os dados experimentais. E na equação (7), se encontra o campo elétrico de operação.

$$E_0 = \frac{V_0}{d}\,. \tag{7}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

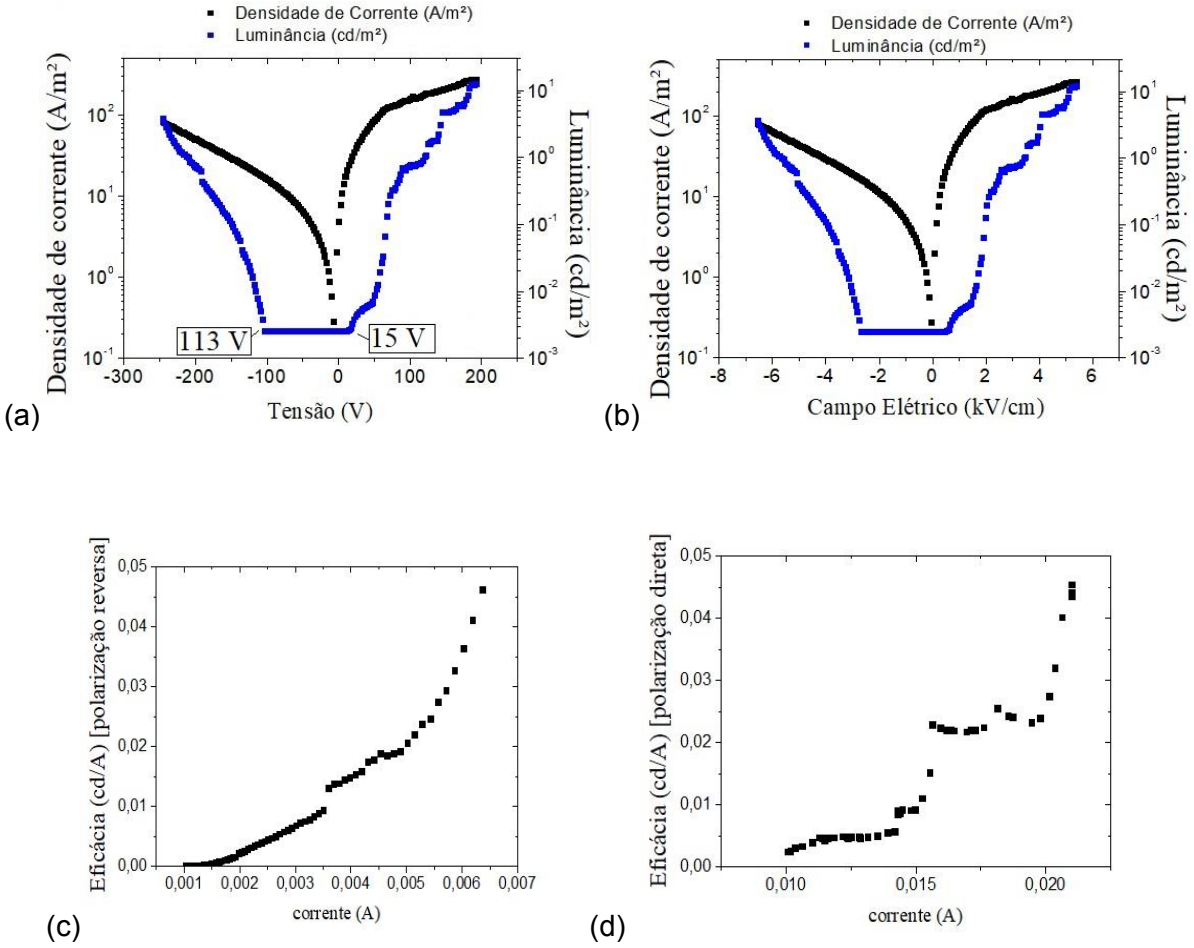
Foi possível obter um dispositivo EL cuja matriz da camada ativa foi feita com PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn, depositada sobre um substrato de cobre. Este dispositivo foi produzido numa única etapa de processamento, onde as partículas do compósito emissor de luz decantaram para formar a camada ativa do dispositivo, e sobre ela um filme fino condutor de PEDOT:PSS/GPTMS, o qual atua como eletrodo transparente. A Figura 14 apresenta uma fotografia de um dispositivo aceso.

Figura 14 – Foto do dispositivo EL produzido em uma única etapa de processamento, emitindo luz visível verde ao ser submetido a uma diferença de potencial.

Fonte: foto tirada em laboratório pela autora em 2018.

A espessura do dispositivo foi de 380 µm. Adicionalmente, o dispositivo apresentou condutância de $10^{-1}\ S$ na polarização reversa e $10^{0}\ S$ na polarização direta, que são valores muito superiores ao intervalo para o qual se obtém dispositivo com alto desempenho (10^{-3} a 10^{-4} S). Na Figura 15(a) são mostradas as curvas de densidade de corrente e luminância em função da tensão. A tensão de operação na polarização direta foi de aproximadamente 15 V e em polarização reversa 113 V. Esta grande diferença na tensão de operação pode ser atribuída a deterioração do dispositivo durante o ensaio de caracterização em regime de polarização direta. A luminância máxima foi de aproximadamente 11 cd/m² (em 195 V) em polarização direta, e de 4 cd/m² (em 250 V) em polarização reversa. A Figura 15(b) apresenta a curva da densidade de corrente e da luminância do dispositivo em função do campo elétrico, onde foi obtido um campo elétrico de operação de aproximadamente 0,6 kV/cm em polarização direta e 3 kV/cm em polarização reversa. A eficácia do disposto é mostrada nas Figuras 15(c) e 15(d) para a polarização reversa e direta, respectivamente. Ambas alcançaram um valor máximo em torno de 5 10^{-2} cd/A.

Figura 15 – (a) Curvas de densidade de corrente e luminância em função da tensão para o dispositivo produzido, indicando os valores para a tensão de operação em ambas as polarizações; (b) densidade de corrente e luminância em função do campo elétrico; (c) eficácia em função da corrente do mesmo dispositivo na polarização reversa; (d) eficácia em função da corrente do mesmo dispositivo na polarização direta.



Fonte: gráfico feito pela autora com os dados experimentais obtidos.

Na Tabela 2 apresentamos os parâmetros de desempenho obtidos dos resultados experimentais do dispositivo EL produzido neste trabalho em comparação com os dispositivos LECEL reportados na literatura, que foram apresentados no capítulo 2.

Tabela 2 – comparação de dados obtidos para o dispositivo EL produzido neste trabalho com os dados da literatura.

Dispositivo EL	Tensão de operação (polarização direta) (V)	Tensão de operação (polarização reversa) (V)	Eficácia (cd/A)	Luminância máxima (cd/m²)	Campo elétrico de operação (Polarização reversa e direta)
1_(Chinaglia *et al*) Camada ativa: POMA+PVDF-TrFE entre eletrodo de ITO e Al	25	40	-	100 (em 100 V)	
2_(R. Colucci *et al*) Camada ativa: PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn entre eletrodo de ITO e Au	30	36	26	2500 (em 20 kV/cm)	< 5 kV/cm em ambas as polarizações
3_(R. Colucci *et al*) Camada ativa: PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn entre eletrodo de PEDOT:PSS/GPTMS e Au	-	-	-	2 (em 20 kV/cm)	< 10 kV/cm em ambas as polarizações
4_(única etapa) Camada ativa: PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn entre eletrodo de PEDOT:PSS/GPTMS e cobre	15	113	0,05	11 (em 195 V ~ 5 kV/cm na polarização direta) e 4 (em 250 V ~ 6 kV/cm na polarização reversa)	0,6 kV/cm (em polarização direta) e 3 kV/cm (em polarização reversa)

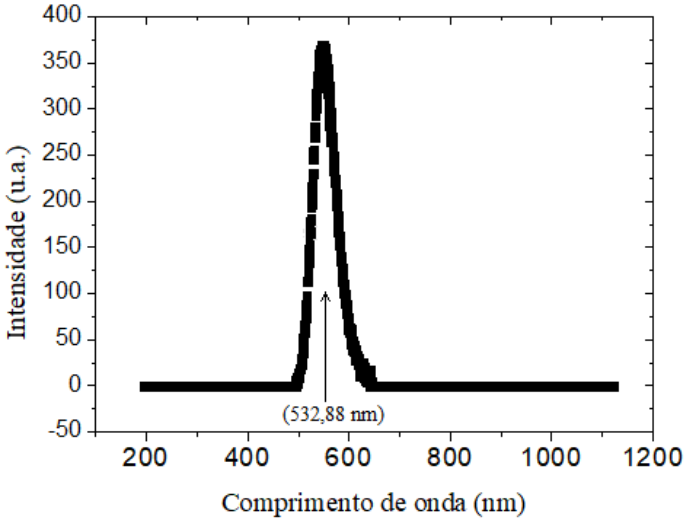
Fonte: Tabela feita pela autora.

Comparando os resultados do dispositivo 4 indicado na Tabela com os dispositivos 1 e 2, os valores obtidos para o campo elétrico e para a tensão de operação na polarização direta foram satisfatórios, enquanto que a luminância não foi tão alta, mas expressou algo positivo indicando que foi visível a olho nu.

Em comparação ao dispositivo 3, cujo eletrodo transparente foi produzido com GPTMS/PEDOT:PSS, os parâmetros de desempenho, incluindo a luminância máxima, do dispositivo produzido em uma única etapa de processamento foram superiores aos do dispositivo anteriormente reportado na literatura.

O espectro de emissão obtido do dispositivo produzido em uma única etapa de processamento está apresentado na Figura 16, e indica que o comprimento de onda dominante, ou seja, o comprimento de onda mais detectado pelo espectrômetro foi de 533 nm, correspondente à cor verde do espectro visível. Este valor é próximo ao valor obtido da fotoluminescência do Zn_2SiO_4:Mn, cujo comprimento de onda é em torno 520 nm.

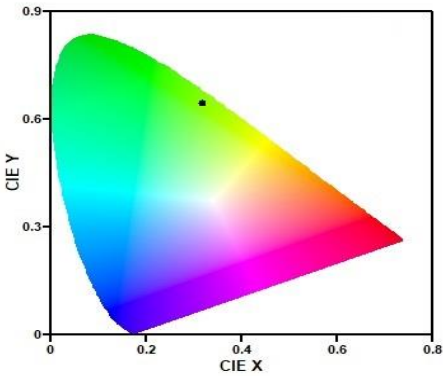
Figura 16 – espectro de emissão de luz do dispositivo EL produzido neste trabalho, onde a intensidade é medida em unidades arbitrárias.



Fonte: gráfico feito pela autora experimentalmente.

O diagrama colorimétrico CIE foi obtido utilizando o Iluminante E (0,333;0,333), mostrado na Figura 18. A pureza da cor foi de 78% e as coordenadas foram x = 0,3171 e y = 0,6438, indicando um tom de verde como esperado pelo comprimento de onda dominante.

Figura 17 – Diagrama CIE para o dispositivo EL produzido, onde o ponto indicado na Figura representa a posição colorimérica a partir das coordenadas x = 0,3171 e y = 0,6438.



Fonte: gráfico feito pela autora com dados experimentais.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma nova maneira de produção de dispositivos eletroluminescentes, que se resume a uma única etapa de processamento. Nesta etapa, uma suspensão composta pela combinação de PEDOT:PSS/GPTMS/Zn_2SiO_4:Mn foi depositada sobre um substrato de cobre. Em função da instabilidade da suspensão, houve decantação das micropartículas eletroluminescentes, formando, deste modo, a camada ativa do dispositivo. Ainda neste processo de decantação, uma fração da solução de PEDOT:PSS/GPTMS, que se separou do material ativo, formou espontaneamente um eletrodo transparente sobre a camada ativa do dispositivo. Como não foi possível controlar o processo de decantação das micropartículas de Zn_2SiO_4:Mn, a reprodutibilidade do dispositivo ainda é baixa.

Foram realizadas caracterizações elétrica, óptica e colorimérica a partir destes dispositivos, obtendo-se curvas de densidade de corrente e luminância em função da tensão e em função do campo elétrico, relação de eficácia em função da corrente, espectro de eletroluminescência e diagrama de coordenadas CIE. A partir destes resultados, foi possível determinar a eficácia luminosa dos dispositivos como de 5 10^{-2} cd/A, a tensão de operação como 15 V (em polarização direta), luminância máxima de 11 cd/m² em polarização direta (195 V). A luz emitida do dispositivo apresentou comprimento de onda dominante de 533 nm, coordenadas CIE no Iluminante E x = 0,3171 e y = 0,6438, com pureza de 78%. Estes resultados indicam um dispositivo EL que emite luz na cor verde do espectro visível, mostrando que o conceito do processamento em uma única etapa é viável.

REFERÊNCIAS

1 DESTRIAU, M. M. G.; PERRIN, M. J.. *Electroluminescence. – Luminescence dans les champs electriques et phenomenes electroniques dans les semi-conducteurs*. Comptes Rendus des Seances de L`academie des Sciences*,* v. 208, p. 36-37, 1939;

2 DESTRIAU, M. M. G.; LOUDETTE, G. *Phosphorescence. – Influence du champ eletrique sur la forme des bandes d`emission en electroluminescence*. Comptes Rendus des Seances de L`academie des Sciences*,* v. 208, n. 20, p. 5169-1571, 1939;

3 ARKHIPOV, V. I.; *et al. Charge Carrier mobility in doped semiconducting polymers.* Applied Physics Letters, v. 82, n. 19, p. 3245-3247, 2003;

4 PIREAUX, J.; CAUDANO, *R. X-ray photoemission study of core-electron relaxation energies and valence-band formation of linear alkenes .2. solid-phase measurements*. Physical Review B, v.15, p. 2242–2249 , 1977;

5 SU, W.; SCHRIEFER, J.; HEEGER, A. *Soliton exitations in polyacetylene*. Physical Review B, v.22, n. 4, p. 2099–2110, 1980;

6 MOLAPO, K. M., et al. *Electronic of conjugated polymers (I): Polyaniline*. International Journal of Electrochemical Science, v. 7, p. 11859-11875, 2012;

7 LI, M.; LI, Y.; LI, D.; LONG, Y. *Recent developments and applications of screen-printed electrodes in evir on mental assays – A review*. Analytica Chemica Acta, v. 734, p. 31-44, 2012;

8 HUANG, D. C. abd J.; BRADLEY, D.; CAMPBELL, *A. High performance, flexible polymer light-emitting diodes (PLEDs) with gravure contact printed hole injection and light emitting layers*. Organic Electronics, v.11, n. , p. 1088–1095, 2010;

9 SONDERGAARD, R. R.; HOSEL, M.; KREBS, F. C. *Roll-to-roll fabrication of large área functional organic materials.* Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. V. 51, p. 1634, 2013;

10 A. L. Heeger *et* al, *Plymer Light-Emitting Eletrochemical Cells*. Science. V 269. 25 agosto 1995;

11 BURROUGHES, J.; JONES, C.; FRIEND, R. *New semiconductor device physics in polymer diodes and transistors*. Nature, v.335, n. 8, p. 137–141, 1988;

12 D. L. Chinaglia *et al*, *Fabrication of novel Light-Emitting Devices Based on Green-Phosphor/Conductive-Polymer Composites*. Philosophical Magazine Letters. V 87. No 6. Junho 2007. 403-408;

13 G. Gozzi *et al*, *Charge Injection in an LED with a Hybrid Composite as the Emissive Layer*. Materials Science and Engineering C. Fevereiro 2011;

14 R. Colucci *et al*, *Cross-Linked PEDOT:PSS as an alternative for Low-Cost Solution-Processed Eletronic Devices.* Materials Science and Engineering C. 6 abril 2018;

15 Feres, F. H., Santos, L. F., Gozzi, G., *Temperature and Eletric Field Influence on the Eletrical Properties of Light-Emitting Devices Comprising PEDOT:PSS/GPTMS/ Zn_2SiO_4:Mn Composites*. Materials Research Society. 2018;

16 Gozzi, G., *A Study of the Eletromuminescence Mechanism in a Light-Emitting Composite Produced wiht PEDOT:PSS, PVA and Zn_2SiO_4:Mn*. Optical Materials. 2 Agosto 2018;

17 Feres, F. *Fabricação e Caracterização de Dispositivos Eletroluminescentes Fabricados com Compósitos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Rio Claro. 2017;

18 A. A. Gaertner. Optical Radiation Measurement. Modern Metrology Concerns, Dr. Luigi Cocco (Ed.), ISBN: 978-953-51-0584-8, InTech, disponível em: http://www.intechopen.com/books/modern-metrologyconcerns/optical-radiation-measurements. 2012;

19 Santos, L. F.; Pereira, C. J., *Composição de Cores Através da Calibração Radiométrica e Fotométrica de LEDs: Teoria e Experimento.* Revista Brasileira de Ensino de Física. V. 35, n 2, 2314. 2013;

20 Colucci, R. *Desenvolvimento de um compósito contendo polímero condutor (PEDOT:PSS) e material ORMOSIL (GPTMS) com aplicação na fabricação de 44 dispositivos eletroluminescentes*. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Rio Claro. 2016;