

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DEL MATERIAL PEDOT: PSS EN ESTADO SÓLIDO Y LÍQUIDO MEDIANTE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA APLICACIONES EN DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

*OPTICAL STUDY AND CHARACTERIZATION OF PEDOT:
PSS MATERIAL IN SOLID AND LIQUID STATES
USING UV-VIS SPECTROSCOPY FOR OPTOELECTRONIC
DEVICE APPLICATIONS*

Alinne Estefanía Espinosa Lozoya

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
alinneestefania29@gmail.com

Rubén Grajales Coutiño

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx

Jorge Luis Camas Anzueto

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
jcamas@tuxtla.tecnm.mx

Alfredo Rossel Morales Navarro

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
moralessnavarroalfredo@gmail.com

Sabino Velázquez Trujillo

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
sabino.vt@tuxtla.tecnm.mx

Alonso Juárez Ontiveros

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
alonso.jo@tuxtla.tecnm.mx

Recepción: 21/noviembre/2025

Aceptación: 24/diciembre/2025

Resumen

Este estudio se enfoca en la caracterización óptica del material PEDOT: PSS, un polímero conductor que destaca por su alta conductividad, flexibilidad y transparencia, crucial para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos. Se analizan sus propiedades ópticas en estado sólido y líquido mediante

espectroscopía UV-Vis, lo que es fundamental para controlar la propagación de ondas luminosas en dispositivos avanzados. El análisis se realizó utilizando un espectrofotómetro UV-Vis, con una fuente de luz de amplio espectro que abarca longitudes de onda entre 210 y 2500 nm. Este estudio proporciona información crucial para la optimización de dispositivos optoelectrónicos basados en PEDOT: PSS, demostrando la influencia significativa del estado físico y la concentración del material con sus características ópticas. Los resultados experimentales validan la aplicación de la Ley de Beer-Lambert, lo que resalta la importancia de la concentración del material en la modulación de su absorción óptica, siendo un parámetro clave para mejorar la calidad y desempeño de estos dispositivos.

Palabras Clave: Absorbancia, espectroscopía, PEDOT: PSS, UV-Vis.

Abstract

This study focuses on the optical characterization of PEDOT: PSS, a conducting polymer noted for its high conductivity, flexibility, and transparency properties that are crucial for optoelectronic device applications. Its optical properties in solid and liquid states are analyzed using UV-Vis spectroscopy, which is essential for controlling the propagation of light waves in advanced devices. The analysis was carried out with a UV-Vis spectrophotometer coupled to a broadband light source covering wavelengths from 210 to 2500 nm. This study provides critical information for optimizing optoelectronic devices based on PEDOT: PSS, demonstrating the significant influence of the material's physical state and concentration on its optical properties. The experimental results validate the application of the Beer-Lambert law, underscoring the importance of material concentration in modulating optical absorption as a key parameter for improving device quality and performance.

Keywords: Absorbance, PEDOT: PSS, spectroscopy, UV-Vis.

1. Introducción

Los materiales cromóactivos son altamente utilizados en estudios y sensores ópticos debido a su capacidad de modificar propiedades ópticas y electrónicas en respuesta a estímulos externos como luz, temperatura o carga eléctrica. Entre ellos,

el PEDOT: PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate) destaca por su alta conductividad, flexibilidad y transparencia óptica, esto gracias a su estructura molecular única y a la interacción sinérgica entre sus componentes. características que lo convierten en un componente clave para sensores, celdas solares y sistemas de iluminación eficiente [Xia, 2021], [Velasco, 2023], [Choi, 2023], [Aly, 2024].

Las propiedades ópticas de este material, como su índice de refracción anisotrópico, es decir, aquel que varía dependiendo de la dirección en la que se mide, se ven influenciadas por parámetros como el espesor de la película, los tratamientos térmicos y su composición química. No obstante, la caracterización de estas propiedades ópticas bajo condiciones específicas, como la temperatura, representa un desafío experimental crucial en este tipo de estudios.

La caracterización óptica del PEDOT: PSS, ha sido objeto de numerosos estudios, entre ellos la elipsometría espectroscópica, una técnica óptica que mide cambios en la polarización de la luz reflejada para determinar propiedades como el índice de refracción y el espesor, junto con la dispersión Raman, que analiza vibraciones moleculares para identificar estructuras químicas. Estas herramientas permitieron comprender en mayor detalle cómo factores externos, como la temperatura, afectan las propiedades ópticas de este material [Kong, 2022].

La relevancia de los materiales híbridos en la integración de tecnologías sensibles ha sido ampliamente destacada. En investigaciones recientes se emplearon materiales híbridos que combinan PEDOT: PSS con óxidos de metales de transición para fabricar fotodetectores en el rango visible, destacándose una mejora en la detección de luz polarizada [Nguyen, 2021].

Estudios recientes reportaron que las películas compuestas por PEDOT: PSS en combinación con PVA presentan una absorbancia significativa y estable en el rango de 470 a 850 *nm*, coincidiendo con el rango operativo de fuentes LED comunes utilizadas en sensores ópticos. Aunque el PVA muestra un pico de absorbancia alrededor de 300 *nm*, este no afecta las mediciones ópticas en el rango visible y cercano al infrarrojo, permitiendo que el PEDOT: PSS mantenga su respuesta óptica intacta.

El PVA actúa principalmente como una matriz que mejora la adhesión y las propiedades mecánicas de las películas, contribuyendo a la formación de películas uniformes y estables. La absorbancia varía con la concentración y las condiciones ambientales, evidenciando la capacidad del PEDOT: PSS para interactuar con la luz de manera sensible y reproducible, posicionándolo como un material prometedor para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos flexibles y sensibles a estímulos externos [Megchum, 2024].

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar y caracterizar las propiedades ópticas de muestras de PEDOT: PSS/PVA tanto en estado sólido como líquido, con el fin de evaluar cómo se comporta el espectro electromagnético dependiendo de la concentración de la muestra.

Para ello se empleará espectroscopía de absorción UV-VIS para registrar la curva de absorbancia y se determina la relación entre el volumen de la muestra y el nivel de absorción del material verificando su relación con la Ley de Beer–Lambert.

Con base en la caracterización UV–Vis de PEDOT: PSS en sólido y en solución, se seleccionarán longitudes de onda específicas para optimizar las mediciones espectrales de cada tipo de muestra, priorizando ventanas con alta sensibilidad y mínima interferencia, a fin de mejorar la precisión y la comparabilidad de los resultados.

Este estudio busca establecer criterios experimentales para la formulación y optimización de dispositivos optoelectrónicos basados en el polímero conductor PEDOT: PSS/PVA.

2. Métodos

La Figura 1 muestra el esquema experimental empleado para la caracterización del material PEDOT: PSS. El análisis experimental se llevó a cabo utilizando una fuente de luz de amplio espectro, específicamente el modelo DH-2000-BAL que se ilustra en la Figura 2, la cual combina una lámpara de halógeno de tungsteno y deuterio. Esta fuente cubre un rango de longitud de onda que va desde 210 hasta 2500 *nm*. La potencia nominal de la bombilla es de 25 *W* para la lámpara de deuterio y 20 *W* para la de halógeno de tungsteno.

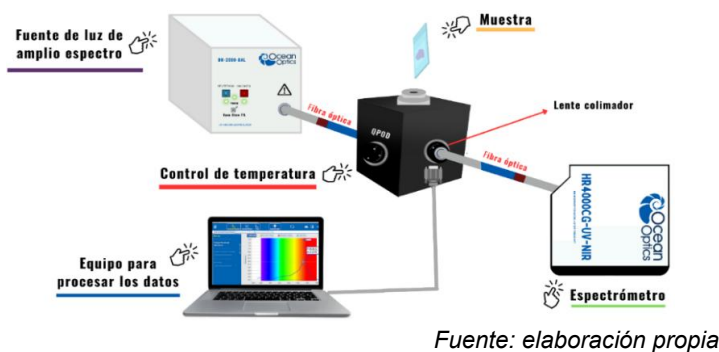


Figura 1 Esquema del arreglo experimental.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Fuente de luz de amplio espectro modelo DH-2000-BAL.

En la Figura 3 se presenta un espectrofotómetro de la marca Ocean Optics, específicamente el modelo H4000CG-UV-NIR el cual se utilizó para medir la absorbancia de las muestras, permitiendo determinar la cantidad de luz absorbida en función de la longitud de onda. Este instrumento es fundamental para caracterizar las propiedades ópticas del material, ya que facilita la identificación de las regiones espectrales donde el material presenta menor o mayor absorción, lo que está directamente relacionado con las transiciones electrónicas y la estructura molecular del PEDOT: PSS. Además, mediante estas mediciones es posible detectar posibles enlaces químicos y evaluar la uniformidad y calidad de las muestras preparadas.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Espectrofotómetro Ocean Optics H4000CG-UV-NIR.

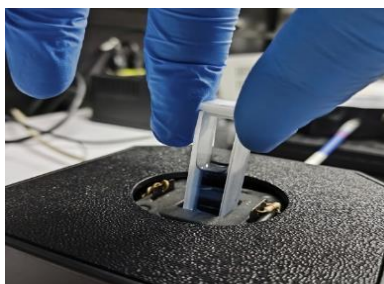
La radiación transmitida es captada por un lente colimador y dirigida hacia el espectrofotómetro. Para garantizar la estabilidad ambiental durante la medición, se utiliza un dispositivo de control de temperatura de la marca Quantum Northwest, específicamente el modelo QpodE el cual se muestra en la Figura 4, mientras que un sistema de procesamiento de datos se encarga de registrar y analizar las señales para obtener los espectros de absorbancia correspondientes.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Controlador de temperatura QpodE.

Con el fin de estudiar el efecto de la concentración y del estado físico sobre la respuesta espectral, las muestras se prepararon bajo condiciones controladas. Se elaboró una solución de PVA en una proporción 1: 1 (1 g de PVA por cada 100 mL de agua desionizada), la cual fue disuelta mediante agitación constante a 90 °C. A partir de esta base, se incorporaron volúmenes definidos de PEDOT: PSS para obtener diferentes concentraciones. Posteriormente se empleó un recipiente de cuarzo para colocar la muestra, tal como se muestra en la Figura 5. Este material fue seleccionado debido a su birrefringencia extremadamente baja en comparación con materiales convencionales. Dicha propiedad permite minimizar distorsiones en las mediciones ópticas de la muestra.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Cubeta de cuarzo con muestra de PEDOT: PSS.

Las formulaciones se evaluaron en dos condiciones: estado líquido y estado sólido como películas delgadas obtenidas por secado controlado hasta alcanzar uniformidad. Este procedimiento permitió analizar de forma sistemática cómo varía la absorbancia con la concentración y comparar el comportamiento espectral entre soluciones y películas.

Durante las pruebas iniciales con muestras en estado líquido, se detectó una absorción óptica elevada, atribuible a la alta concentración y a la característica tonalidad oscura del PEDOT: PSS, un material intrínsecamente opaco. Esta condición comprometió la precisión y sensibilidad de las mediciones. Por esta razón, se ajustaron las concentraciones, reduciendo los volúmenes de PEDOT: PSS para mejorar la transparencia óptica y garantizar así el cumplimiento de los requisitos técnicos para mediciones confiables mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis). En la Tabla 1 se muestran las cantidades de PVA y PEDOT: PSS propuestas para mejorar la transparencia de las muestras y mediciones.

Tabla 1 Volúmenes propuestos en la preparación de muestras de PVA y PEDOT: PSS.

Muestra	Volumen de PVA (mL)	Volumen de PEDOT: PSS (μL)	Relación PVA: PEDOT: PSS
F	1	200	1: 200
G	1	180	1: 180
H	1	150	1: 150
I	1	130	1: 130
J	1	115	1: 115
K	1	100	1: 100

Fuente: elaboración propia

En la Figura 6 se observan los tubos de ensayo que contienen muestras de PEDOT: PSS en solución líquida, preparadas con distintas concentraciones volumétricas de Alcohol Polivinílico (PVA). Cada muestra está identificada con la proporción volumétrica correspondiente, tal como se detalla en la Tabla 1. Para tener una base común de comparación, el PVA se mantuvo constante y solo se modificó la cantidad de PEDOT: PSS. En la Tabla 2 se presentan los volúmenes aplicados en cada caja de Petri para la formación de películas delgadas con las nuevas formulaciones. Las formulaciones se distribuyeron en dos cajas de Petri, depositando 40 μL por película. La Caja 1 contiene tres películas correspondientes a 100, 115 y 130 μL de

PEDOT: PSS (con PVA fijo), mientras que la Caja 2 contiene dos películas: 150 y 180 μL . En cada caja, las películas se identificaron con números (1, 2, 3) que corresponden a la formulación indicada.



Fuente: elaboración propia

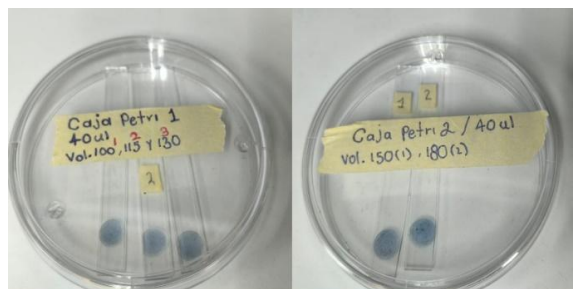
Figura 6 Muestras en estado líquido PEDOT: PSS/PVA.

Tabla 2 Volumen aplicado para la formación de películas delgadas en cajas de Petri.

Caja	Formulaciones en la caja PEDOT: PSS (μL)	Número de películas	Volumen de depósito por película (μL)
1	100; 115; 130	3	40
2	150; 180	2	40

Fuente: elaboración propia

Durante el proceso de secado, las películas se mantuvieron en un ambiente cerrado y libre de polvo, permitiendo la evaporación controlada del disolvente a temperatura ambiente (aproximadamente 23°C). Este procedimiento garantizó un secado uniforme, evitando una posible contaminación superficial que pudiera afectar las propiedades ópticas de las películas. La Figura 7 muestra las películas delgadas depositadas en cajas de Petri, evaluadas en función del volumen aplicado y la transparencia del material.



Fuente: elaboración propia

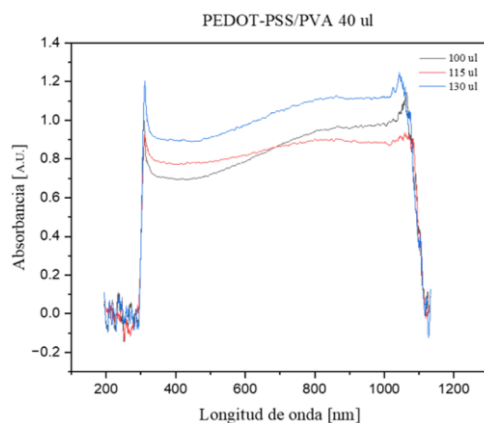
Figura 7 Películas delgadas de PEDOT: PSS/PVA obtenidas por goteo (40 μL /película).

Cada caja está etiquetada indicando el volumen aplicado, que corresponde a los valores señalados en la etiqueta visible en cada imagen. Esta imagen permite observar visualmente las diferencias en transparencia y distribución del material, aspectos relevantes para la caracterización óptica posterior.

3. Resultados

Se obtuvieron espectros de absorbancia UV–Vis de las formulaciones PEDOT: PSS/PVA en estado sólido (películas delgadas) y estado líquido (soluciones), abarcando diferentes volúmenes de PEDOT: PSS con PVA fijo.

La Figura 8 muestra las curvas de absorbancia promedio en función de la longitud de onda para volúmenes variables de las muestras de PEDOT: PSS/PVA (100, 115 y 130 μL). Se observa que la absorbancia es relativamente baja en la región inicial del espectro visible (aproximadamente entre 400 y 500 nm), con valores cercanos a 0.02–0.05, y aumenta gradualmente hacia longitudes de onda mayores, alcanzando una mayor absorción cerca de los 1000 nm . En esta zona, la absorbancia se estabiliza aproximadamente entre 0.8 y 1.0, dependiendo del volumen aplicado.



Fuente: elaboración propia

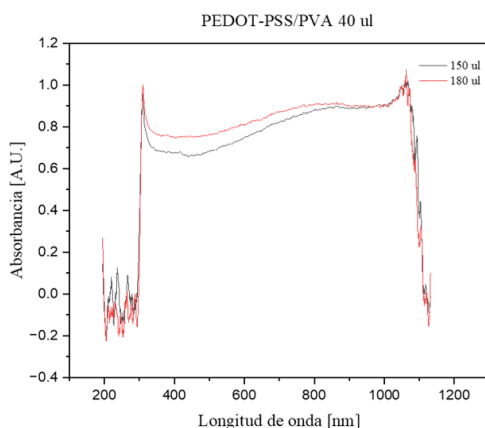
Figura 8 Absorbancia promedio en función de la longitud de onda (100, 115 y 130).

Las muestras con menor volumen (100 μL) exhiben la absorbancia más baja a lo largo del rango espectral, mientras que las de mayor volumen (130 μL) presentan la absorbancia más elevada. En la región de estabilización, las absorbancias son

aproximadamente 0.8 para 100 μL , 0.9 para 115 μL y 1.0 para 130 μL . Este comportamiento es coherente con la Ley de Beer-Lambert, que establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración del material y al espesor efectivo de la muestra. Por lo tanto, un mayor volumen aplicado implica una mayor cantidad de material, incrementando la interacción con la radiación incidente y, consecuentemente, la absorción de luz.

El comportamiento observado indica que las muestras sólidas de PEDOT: PSS/PVA permiten una mayor transmisión en las longitudes de onda cortas y medias, mientras que la absorción se incrementa hacia longitudes de onda más largas.

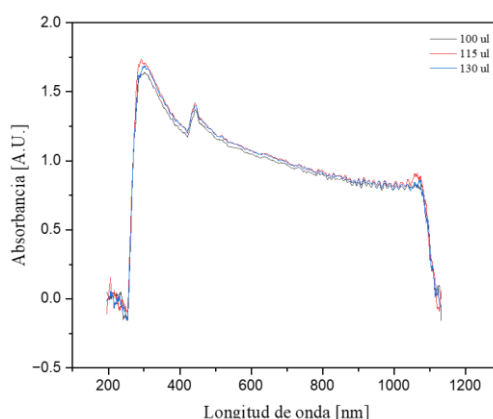
En la Figura 9 se presentan las curvas de absorbancia promedio para volúmenes mayores de muestras de PEDOT: PSS/PVA (150 y 180 μL). Al igual que en las muestras con menor volumen, se observa que la absorbancia es relativamente baja en la región de longitudes de onda corta y media, y tiende a estabilizarse en valores cercanos a 0.8 – 1.0 en la región de longitudes de onda más largas (aproximadamente 600 a 1000 nm). Se aprecia que el volumen mayor (180 μL) muestra una absorbancia ligeramente superior en comparación con el volumen de 150 μL , lo que indica un aumento en la concentración efectiva del material y, por ende, una mayor absorción de luz. Sin embargo, la diferencia entre ambas curvas es menos pronunciada que en los volúmenes menores, lo cual puede indicar un efecto de saturación o límites en la uniformidad de la muestra a mayores concentraciones.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Absorbancia promedio en función de la longitud de onda (150 y 180).

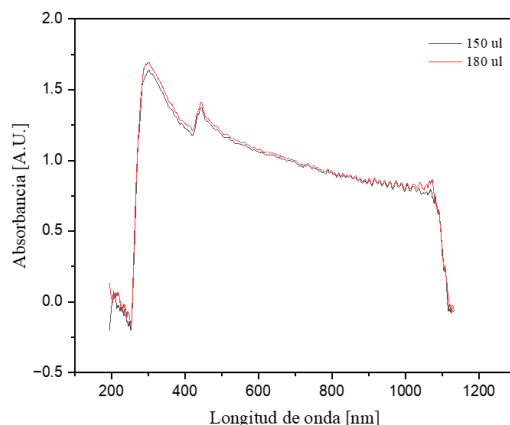
La Figura 10 muestra las curvas de absorbancia promedio para muestras líquidas de PEDOT: PSS/PVA con volúmenes de 100, 115 y 130 μL . Se observa que la absorbancia es notablemente alta en la región ultravioleta, especialmente entre 300 y 400 nm, alcanzando una mayor absorción cercana a 1.2 para el volumen más grande (130 μL) y ligeramente menor para los volúmenes de 100 y 115 μL , con absorbancias alrededor de 1.1 y 1.15 respectivamente.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Absorbancia promedio en estado líquido (100,115 y 130).

A medida que la longitud de onda aumenta hacia la región visible e infrarrojo cercano (más allá de 600 nm), la absorbancia disminuye considerablemente, estabilizándose en un rango bajo entre 0.1 y 0.2. Esto indica que las muestras líquidas permiten una mayor transmisión en estas regiones del espectro. Las curvas correspondientes a diferentes volúmenes muestran tendencias similares, con una ligera diferencia en la intensidad de la absorbancia, donde los volúmenes mayores presentan una absorción más elevada en la región ultravioleta. Este comportamiento sugiere que las muestras líquidas, debido a su menor densidad y mayor homogeneidad óptica en comparación con las muestras sólidas, presentan una menor absorción en el rango visible e infrarrojo cercano, lo que puede ser aprovechado en aplicaciones que requieren mayor transparencia en estas regiones. La Figura 11 presentada corresponde a las muestras líquidas de PEDOT: PSS/PVA con volúmenes mayores, donde se observa un comportamiento similar al descrito para los volúmenes menores, pero con algunas diferencias importantes en la absorbancia.



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Absorbancia promedio en estado líquido (150 y 180).

En Figura 11, la absorbancia en la región ultravioleta (aproximadamente entre 300 y 400 nm) sigue siendo elevada, reflejando una fuerte interacción del material con la radiación en estas longitudes de onda. Sin embargo, a medida que la longitud de onda se incrementa hacia la zona visible e infrarrojo cercano (más allá de 600 nm), la absorbancia disminuye y se estabiliza en valores relativamente bajos, indicando una mayor transmisión en estas regiones. Las curvas correspondientes a los volúmenes mayores muestran que la absorbancia tiende a ser ligeramente más alta en comparación con los volúmenes menores, lo que concuerda con un aumento en la concentración efectiva y el espesor óptico de la muestra, conforme a la Ley de Beer-Lambert. Este comportamiento reafirma que las muestras líquidas presentan una mayor transparencia en las regiones visibles e infrarrojas, mientras mantienen una absorción significativa en el ultravioleta, lo cual es favorable para aplicaciones que requieran equilibrio entre absorción y transmisión óptica.

4. Discusión

Las curvas de absorbancia obtenidas para las muestras de PEDOT: PSS/PVA, tanto en estado sólido como líquido, evidencian diferencias significativas en su comportamiento óptico dentro del rango ultravioleta-visible. Las muestras sólidas presentan menor absorbancia en las longitudes de onda cortas y medias, aumentando progresivamente hacia longitudes mayores, lo que indica una mayor transmisión inicial y un mayor espesor óptico. Este comportamiento está asociado

a la densidad y estructura física del material en estado sólido. En contraste, las muestras líquidas exhiben una absorbancia elevada en la región ultravioleta (aproximadamente 300 - 400 nm) y una disminución notable en la región visible e infrarrojo cercano (600 - 700 nm), reflejando una mayor homogeneidad y menor densidad óptica.

Los resultados demuestran que el estado físico y la concentración del material influyen directamente en sus propiedades ópticas, lo cual es fundamental para la formulación y optimización de dispositivos optoelectrónicos basados en PEDOT: PSS.

Finalmente, se confirma la validez de la Ley de Beer-Lambert en la relación directa entre volumen (concentración) y absorbancia, siendo este un parámetro clave para el control y mejora de las propiedades ópticas de las muestras.

5. Conclusiones

La caracterización UV-Vis de PEDOT: PSS/PVA en estado sólido y líquido confirmó diferencias claras de comportamiento óptico entre ambas configuraciones. De forma general, el estado físico y la concentración del material determinan la respuesta espectral, en conjunto con la ley de Beer-Lambert, lo que aporta una base confiable para ajustar formulaciones y condiciones de medición. Estos hallazgos respaldan el uso de este sistema como plataforma para el diseño y la optimización de dispositivos optoelectrónicos.

Como trabajo a futuro se propone caracterizar la polarización de la luz en este material (rotación óptica y dicroísmo/birrefringencia, y su dependencia con espesor, concentración y temperatura) empleando la Ley de Malus y las matrices de Jones/Mueller a fin de vincular la absorción UV-Vis con propiedades de polarización relevantes para aplicaciones optoelectrónicas avanzadas.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Aly, Kamal A., Yasser A. M. Ismail, Ziad Salman S. Alsulami, Tariq Z. Abolibda, Abdullah Almohammed, Sobhi M. Gomha, Hoda A. Ahmed, and Mohamed S. Ibrahim, (2024). Effect of Sn Nanoparticles on the Optical

- Properties of PEDOT: PSS Thin Films. *Frontiers in Physics* 12. doi:10.3389/fphy.2024.1331133.
- [2] Choi, Young Kyun, Tae Hyuk Kim, Jeong Han Song, Byung Ku Jung, Woosik Kim, Jung Ho Bae, Hyung Jin Choi, Jeonghun Kwak, Jae Won Shim, and Soong Ju Oh. 2023. Charge Transport Transition of PEDOT: PSS Thin Films for Temperature-Insensitive Wearable Strain Sensors. *Nanoscale* 15(17), pp. 7980–90. doi:10.1039/d2nr05688g.
- [3] Kong, Minghua, Miquel Garriga, Juan Sebastián Reparaz, and Maria Isabel Alonso, (2022). Advanced Optical Characterization of PEDOT: PSS by Combining Spectroscopic Ellipsometry and Raman Scattering. *ACS Omega* 7(43), pp. 39429–36. doi:10.1021/acsomega.2c05945.
- [4] Megchum-Ruedas, Carlos Alberto, Pedro Marcos Velasco-Bolom, Rubén Grajales-Coutiño, Jorge Luis Camas-Anzueto, Madaín Pérez-Patricio, and Carlos Alberto Hernández-Gutiérrez, (2024). A Film Composed of PEDOT: PSS / PVA as a Sensitive Medium for PH Sensor in Optical Fiber. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 233. doi: 10.1016/j.measurement.2024.114750.
- [5] Nguyen, Xuan Hao, Hoai Nhan Luong, Hoang Anh Pham, Nhat Minh Nguyen, and Vinh Quang Dang, (2021). Visible Photodetector Based on Transition Metal-Doped ZnO NRs / PEDOT: PSS Hybrid Materials. *RSC Advances* 11(57), pp. 36340–47. doi:10.1039/d1ra06315d.
- [6] Velasco Davoise, Lara, Rafael Peña Capilla, and Ana M. Díez-Pascual, (2023). Isotropic and Anisotropic Complex Refractive Index of PEDOT: PSS. *Polymers* 15(15). doi:10.3390/polym15153298.
- [7] Xia, Yijie, and Shuyang Dai, (2021). Review on Applications of PEDOTs and PEDOT: PSS in Perovskite Solar Cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32(10), pp. 12746–57.