



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES PARA EL DESARROLLO DE
TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES.**

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

PRESENTA:

KARINA SÁMANO FERNÁNDEZ

DIRECTORES DE TESIS:

DIRECTOR: DR. ULISES LEÓN SILVA

CODIRECTORA: DRA. MARÍA ELENA NICHÓ DÍAZ

RESUMEN

El presente trabajo aborda el aprovechamiento de residuos agroindustriales para el desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas a dispositivos de almacenamiento de energía y ventanas inteligentes electrocrómicas. Se obtuvo acetato de celulosa a partir de colillas de cigarro para su aplicación como material dieléctrico en capacitores de placas paralelas, mientras que el óxido de níquel (NiO) fue sintetizado mediante síntesis verde empleando extracto de sargazo. Asimismo, se elaboraron compósitos de poli(3-hexiltiofeno) (P3HT)/NiO para su aplicación en dispositivos electrocrómicos.

Los materiales obtenidos fueron caracterizados mediante técnicas fisicoquímicas, electroquímicas y ópticas. Los capacitores fabricados mostraron valores de capacitancia estables a diferentes temperaturas y comportamiento característico de materiales capacitivos en pruebas de impedancia. Por otra parte, los análisis de difracción de rayos X confirmaron la formación de la fase cristalina del NiO, mientras que las pruebas electroquímicas y ópticas evidenciaron que la incorporación de NiO modifica la respuesta electrocrómica y mejora la actividad electroquímica del P3HT. Los dispositivos electrocrómicos desarrollados presentaron cambios reversibles de coloración y adecuado contraste óptico.

Los resultados demuestran la factibilidad de reutilizar residuos como fuente de materiales funcionales para el desarrollo de dispositivos sostenibles con potencial aplicación en almacenamiento de energía y eficiencia energética a través de capacitores y ventanas inteligentes.

ABSTRACT

This work addresses the valorization of agroindustrial waste for the development of sustainable technologies focused on energy storage devices and electrochromic smart windows. Cellulose acetate was obtained from cigarette butts and used as dielectric material for parallel-plate capacitors, while nickel oxide (NiO) was synthesized through a green synthesis route using sargassum extract. In addition, poly(3-hexylthiophene) (P3HT)/NiO composites were prepared for electrochromic device applications.

The materials obtained were characterized using physicochemical, electrochemical, and optical techniques. The fabricated capacitors exhibited stable capacitance values at different temperatures and characteristic capacitive behavior during impedance measurements. Furthermore, X-ray diffraction analyses confirmed the formation of the NiO crystalline phase, while electrochemical and optical studies demonstrated that the incorporation of NiO modifies the electrochromic response and enhances the electrochemical activity of P3HT. The developed electrochromic devices showed reversible color changes and suitable optical contrast.

The results demonstrate the feasibility of reusing waste materials as a source of functional materials for the development of sustainable devices with potential applications in energy storage and energy efficiency through capacitors and smart windows.

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional. Gracias por acompañarme en cada desafío, iluminar mi camino en los momentos de incertidumbre y darme la perseverancia para no rendirme.

A Ti encomiendo este logro, fruto del esfuerzo, la fe y las bendiciones recibidas a lo largo de este camino. Gracias por permitirme llegar hasta aquí y por rodearme de personas que hicieron posible este sueño.

A la Dra. María Elena Nicho Díaz y al Dr. Ulises León Silva:

Mi más sincero agradecimiento por su invaluable orientación, dedicación y apoyo durante el desarrollo de esta tesis. Sus conocimientos, experiencia y compromiso académico fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Gracias por su paciencia, por cada enseñanza compartida y por motivarme constantemente a dar lo mejor de mí en esta etapa de formación profesional. Su guía no solo enriqueció esta investigación, sino también mi crecimiento personal y académico.

A Adriana Cervantes y Liliana Cajero:

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su invaluable apoyo, amistad y acompañamiento durante el desarrollo de esta tesis. Gracias por

compartir conmigo sus conocimientos, experiencias y por estar presentes en cada etapa del trabajo experimental, brindándome siempre su ayuda y motivación.

Su compañerismo, paciencia y disposición hicieron más llevadero este camino, especialmente en los momentos de mayor reto dentro del laboratorio. Más allá del apoyo académico, agradezco la confianza, las palabras de ánimo y los momentos compartidos que hicieron de esta experiencia algo significativa e inolvidable.

Con cariño y gratitud, les dedico parte importante de este logro, ya que sin su apoyo este trabajo no habría sido el mismo.

A mi Comité de Evaluación: la Dra. María Elena Nicho Díaz, el Dr. Ulises León Silva, el Dr. Jesús Castrellón y el Dr. Omar Palillero:

Expreso mi más sincero agradecimiento por el tiempo, la dedicación y las valiosas observaciones brindadas durante la evaluación de este trabajo de tesis. Sus conocimientos, experiencia y aportaciones académicas enriquecieron significativamente esta investigación y contribuyeron a fortalecer mi formación profesional.

Gracias por su disposición, por compartir sus comentarios y recomendaciones, y por el compromiso mostrado en cada etapa de este proceso académico. Sus enseñanzas y orientación representan una parte fundamental en la culminación de esta meta.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp):

Mi más sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad de formar parte de esta institución y por proporcionarme las herramientas, conocimientos y espacios necesarios para mi formación académica y el desarrollo de esta tesis.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Por brindarme una generosa beca que hizo posible continuar y culminar mis estudios de posgrado. Su apoyo fue fundamental para el desarrollo de esta investigación y para mi crecimiento académico y profesional. Con profunda gratitud, reconozco el valioso respaldo recibido durante esta importante etapa de mi formación.

DEDICATORIA

A mis padres:

Gracias por ser el pilar más importante de mi vida y el ejemplo constante de esfuerzo, amor y perseverancia. Este logro no habría sido posible sin su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y cada sacrificio que hicieron para verme crecer y alcanzar mis metas.

A ustedes les debo no solo esta tesis, sino también los valores y la fortaleza que me han guiado en cada paso de mi camino. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por enseñarme que con dedicación y trabajo todo es posible.

Con profundo amor, admiración y gratitud, les dedico este logro, que también es suyo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1. Antecedentes	13
1.1 Introducción	13
1.2 Antecedentes	14
1.3 Planteamiento del problema.....	17
1.4 Justificación.....	17
1.5 Hipótesis	18
1.6 Objetivos	18
1.6.1 Objetivo general.....	18
1.6.2 Objetivos específicos	18
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1 Capacitores y capacitancia	20
2.1.1 Funcionamiento de los capacitores y su clasificación	20
2.1.2 Principales materiales para la fabricación de capacitores	23
2.2 Materiales compuestos para la fabricación de dispositivos electrocrómicos.....	24
2.2.1 Estructura de los materiales compuestos.....	24
2.2.2 Síntesis de materiales compuestos	24
2.3 Óxido de níquel.....	25
2.3.1. Síntesis verde de NiO	26
2.4 Polímeros conductores.....	27
2.4.1 Teoría de bandas en polímero conductores.....	28
2.4.2 Politiofenos	29
2.5. Electrocromismo	31
2.6. Dispositivo electrocrómico (ventanas inteligentes)	32
2.6.1. Polielectrolito	32
2.6.2. Sustrato ITO	33
2.7. Parámetros electrocrómicos	34
2.8 Eficiencia de coloración	35
Capítulo 3. Desarrollo experimental.....	35
3.1. Obtención de acetato de celulosa	36

3.2. Elaboración de electrodos de aluminio/películas de acetato de celulosa	39
3.3. Obtención de dieléctricos de poliéster	41
3.4. Obtención de dieléctricos de mica	42
3.5. Fabricación y caracterización de los capacitores.....	42
3.6. Síntesis verde y caracterización del NiO	44
3.6.1. Síntesis verde del NiO	44
3.6.2. Caracterización del NiO.....	51
3.7. Elaboración de películas de P3HT/NiO.....	52
3.7.1. Caracterización de las películas de P3HT Y P3HT/NiO	54
3.8. Fabricación de los dispositivos electrocrómicos simples y duales	55
3.9. Caracterización de los dispositivos electrocrómicos simples y duales	57
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	58
4.1. Capacitores	58
4.2. Ventanas Inteligentes	65
4.2.1 Propiedades fisicoquímicas de NiO, P3HT y compósitos	65
4.2.1.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	65
4.2.2. Difracción de rayos X	71
4.2.3. Voltamperometría cíclica.....	77
4.2.4. Espectroscopia de UV-Vis y determinación del bandgap.....	87
4.2.5. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	93
4.2.6. Microscopia de fuerza atómica.....	96
4.3. Transmitancia y cinética óptica en los dispositivos electrocrómicos simples (DES).....	101
4.4. Transmitancia y cinética óptica en los dispositivos electrocrómicos duales (DED)	112
4.5. Conclusiones y trabajo futuro.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reactivos utilizados para la síntesis verde y caracterización del NiO.....	44
Tabla 2. Capacitancia calculada y medida del acetato de celulosa. Las celdas con sombreado gris contienen los valores de los electrodos de aluminio sin tratamiento electroquímico.	59
Tabla 3. Capacitancia a diferentes temperaturas con el acetato de celulosa.	61
Tabla 4. Capacitancias calculada y medida a diferentes temperaturas con poliéster como dieléctrico.	62
Tabla 5. Capacitancia calculada y medida a diferentes temperaturas con mica como dieléctrico.....	62
Tabla 6. Tamaño de cristal y grado de cristalinidad del NiO.....	74
Tabla 7. Tamaño de cristal y grado de cristalinidad del P3HT y compositos.....	77
Tabla 8. Valores de Q_{ox} , Q_{red} y Q_{ox}/Q_{red} para el P3HT y sus compósitos.	82
Tabla 9. Valores de Bandgap de P3HT y sus compósitos.	92
Tabla 10. Indicativo de longitud de conjugación	96
Tabla 12. Valores obtenidos de los contrastes ópticos máximos en ambas regiones del espectro para P3HT y sus compósitos.....	108
Tabla 13. Valores obtenidos de los espectros de transmitancia para P3HT y sus compósitos a 532 nm.....	109
Tabla 14. Eficiencia de coloración de P3HT y compositos.....	112
Tabla 15. Valores obtenidos de los espectros de transmitancia para P3HT y sus compósitos.....	115
Tabla 16. Valores obtenidos de los espectros de transmitancia para P3HT y sus compósitos a 532 nm.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de un capacitor de película [3].	21
Figura 2. Capacitor cilíndrico finito [4].	22
Figura 3. Capacitor variable [5].	23
Figura 4. Representación del proceso de la síntesis verde. Imagen generada mediante inteligencia artificial.....	27
Figura 5. A) y B) Recolección de cigarros y C) Separación de papel y filtro.	36
Figura 6. A) Lavado de filtros, B) y C) Secado de filtros.	37
Figura 7. Proceso de extracción Soxhlet.	37
Figura 8. Secado de colillas en horno.	38
Figura 9. A) preparación de la solución B) precipitación C) filtrado y D) acetato de celulosa.	38
Figura 10. Preparación de soluciones.	39
Figura 11. A) lata de aceite, B) aluminio cortado C) electrodos lijados D) electrodos en acetona y E) baño ultrasónico.	40
Figura 12. Celda utilizada para el ataque químico de los electrodos de aluminio.	41
Figura 13. Arreglo del capacitor.	43
Figura 14. Medición de la capacitancia a diferentes temperaturas.	43
Figura 15. Limpieza del sargazo.	45

Figura 16. Secado del sargazo.	46
Figura 17. Molienda del sargazo.	46
Figura 18. Proceso de obtención del extracto de sargazo.	47
Figura 19. Preparación de la solución de acetato de níquel.	48
Figura 20. Nivelación de pH y centrifugado de soluciones de acetato de níquel.	49
Figura 21. Obtención y tratamiento térmico de la pasta	50
Figura 22. Molienda de la muestra.	50
Figura 23. Elaboración de compósitos de P3HT/NiO.	53
Figura 24. A) Spin coating y B) películas de P3HT/NiO sobre ITO y vidrio Corning.	54
Figura 25. Ensamble de los dispositivos electrocrómicos.	56
Figura 26. Diagrama de Nyquist para el dispositivo fabricado con acetato de celulosa.	64
Figura 27. Diagrama de Nyquist para el dispositivo fabricado con mica.	64
Figura 28. Diagrama de Nyquist para el dispositivo fabricado con poliéster.	65
Figura 29. Micrografía de la muestra 1 en polvo del NiO.	66
Figura 30. Micrografía de la muestra 2 en polvo del NiO.	67
Figura 31. Micrografía de la muestra 3 en polvo del NiO.	68
Figura 32. Micrografía de la película del P3HT.	69
Figura 33. Micrografía de la película del P3HT/NiO-1,5%.	70
Figura 34. Micrografía de la película del P3HT/NiO-3,5%.	71
Figura 35. Difractogramas del NiO para los tres parámetros.	72
Figura 36. Patrones de difracción del NiO reportados en [14]	73
Figura 37. Difractograma del P3HT y compósitos.	76
Figura 38. Voltamperograma del P3HT.	78
Figura 39. Voltamperograma del P3HT/NiO-1,5%.	79
Figura 40. Voltamperograma del P3HT/NiO-3,3%.	80
Figura 41. Voltamperograma del P3HT/NiO-3,5%.	81
Figura 42. Voltamperograma del P3HT/NiO-3,8%	82
Figura 43. Voltamperograma del segundo ciclo de cada muestra.	84
Figura 44. A) Cambio de coloración con excitación de voltaje de los dispositivos en corridas de voltametría cíclica de 0-1100 mV, para P3HT y compósitos P3HT/NiO. B) Cambio de coloración con excitación de voltaje de los dispositivos en corridas de voltametría cíclica de 1100-(-200) mV, para P3HT y compósitos P3HT/NiO.	86
Figura 45. Espectros de absorbancia para P3HT y P3HT-NiO.	88
Figura 46. Estimación de bandgap óptico para el P3HT.	89
Figura 47. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-1,5%.	90
Figura 48. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-3,3%.	90
Figura 49. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-3,5%.	91
Figura 50. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-3,8%.	92
Figura 51. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de P3HT, compósitos y NiO.	95
Figura 52. Micrografía del P3HT.	97
Figura 53. Micrografía del P3HT/NiO-1,5%.	98
Figura 54. Micrografía del P3HT/NiO-3,3%.	99
Figura 55. Micrografía del P3HT/NiO-3,5%.	100
Figura 56. Micrografía del P3HT/NiO-3,8%.	101
Figura 57. Espectros de transmitancia para el DES a base de P3HT con excitación de voltaje.	103
Figura 58. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-1,5% con excitación de voltaje.	104
Figura 59. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-3,3% con excitación de voltaje.	105
Figura 60. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-3,5% con excitación de voltaje.	106

Figura 61. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-3,8% con excitación de voltaje. _____	108
Figura 62. Cinética óptica del P3HT y sus compósitos para voltajes de ± 1.4 V. _____	110
Figura 63. Espectros de transmitancia para el DED P3HT con excitación de voltaje. _____	114
Figura 64. Espectros de transmitancia para el P3HT/NiO-3,3% con excitación de voltaje. _____	115
Figura 65. Cinética óptica de los dispositivos duales P3HT y compuesto P3HT/NiO-3,3% para voltajes de ± 1.4 V. _____	118

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Introducción

La creciente generación de residuos industriales, agrícolas y electrónicos ha impulsado el desarrollo de estrategias de valorización orientadas a la obtención de materiales funcionales para aplicaciones energéticas y electrónicas. En este sentido, el aprovechamiento de residuos como fuente de materiales eléctricos y dieléctricos, y compuestos con propiedades deseadas para dispositivos electrocrómicos representa una alternativa sostenible para el desarrollo de capacitores de placas paralelas y ventanas inteligentes. Estas tecnologías son de interés debido a su potencial en almacenamiento de energía, eficiencia energética y reducción del impacto ambiental asociado al uso de materias primas convencionales. Estudios recientes han demostrado que residuos como metales, biomasa y plásticos pueden emplearse en la fabricación de materiales con propiedades dieléctricas adecuadas para aplicaciones electrónicas y electrocrómicas [1], [2].

Los capacitores de placas paralelas dependen directamente de las propiedades del material dieléctrico colocado entre los electrodos, ya que éste determina parámetros fundamentales como la permitividad, la densidad de energía y la estabilidad eléctrica. Diversas investigaciones han reportado el uso de residuos lignocelulósicos, cenizas y subproductos industriales para la obtención de materiales dieléctricos y carbonosos con aplicaciones en dispositivos de almacenamiento energético y componentes electrónicos [3], [4], [5].

Por otra parte, las ventanas inteligentes electrocrómicas han emergido como una tecnología clave para edificaciones energéticamente eficientes, debido a su capacidad para modular dinámicamente la transmisión de luz y calor. Entre los materiales más estudiados destaca el óxido de tungsteno (WO_3), el cual presenta alta eficiencia electrocrómica, estabilidad y rápida respuesta óptica

[6]. Estas ventanas permiten reducir el consumo energético asociado a sistemas de climatización e iluminación, favoreciendo el desarrollo de edificios sostenibles. Investigaciones recientes han reportado el desarrollo de dispositivos híbridos a base de polímeros conductores y compuestos inorgánicos obtenidos de residuos agroindustriales con una excelente respuesta óptica [7].

Por lo tanto, el aprovechamiento de residuos para la obtención y síntesis de materiales eléctricos y dieléctricos, y compuestos polímero-inorgánico para aplicaciones electrocrómicas constituye una línea de investigación estratégica, ya que integra economía circular, reducción de costos y desarrollo de dispositivos avanzados y sostenibles.

1.2 Antecedentes

Tradicionalmente, la manufactura de capacitores depende de la extracción y refinamiento de metales de alta pureza (como aluminio, cobre o plata) y la síntesis de polímeros derivados del petróleo o cerámicas avanzadas. En el contexto de la sustentabilidad, la reutilización de metales provenientes de residuos agroindustriales, en combinación con dieléctricos derivados también de residuos, representa una alternativa ecológica crucial para reducir el impacto ambiental y los costos de producción en la industria de la electrónica. Asimismo, en los últimos años la comunidad científica ha demostrado que componentes biológicos como el sargazo pueden actuar eficazmente como precursores para la síntesis verde de nanoestructuras de óxidos metálicos, disminuyendo el uso de reactivos químicos tóxicos y costosos.[8], [9]

Se ha reportado el desarrollo de ventanas inteligentes utilizando materiales obtenidos de residuos agroindustriales. Vergara Juárez y colaboradores desarrollaron un dispositivo electrocrómico a base de poli(3-hexiltiofeno) P3HT

y sílice extraída de la cascarilla de arroz; la sílice mejoró las propiedades del P3HT, lo cual permitió tener una mayor cristalinidad y una disminución de la banda prohibida. Así mismo, la presencia de la sílice en el P3HT aumentó el contraste óptico en el dispositivo electrocrómico simple (vidrio/ITO/compuesto/electrolito polimérico/ITO/) en un determinado rango de longitud de onda [10].

Liliana Cajero-Sotelo y colaboradores desarrollaron dispositivos electrocrómicos “ventanas inteligentes” basados en compósitos de (P3HT) y dióxido de silicio (SiO_2) obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar, un residuo agroindustrial. Las ventanas inteligentes tienen la capacidad de modificar su transmitancia óptica mediante la aplicación de un voltaje, permitiendo controlar el paso de luz y radiación solar para mejorar la eficiencia energética.[11] En este trabajo se sintetizaron compósitos P3HT/ SiO_2 mediante polimerización oxidativa *in situ*, utilizando diferentes concentraciones de SiO_2 (1, 3 y 5 % en peso). Los materiales fueron caracterizados mediante FTIR, UV-Vis, difracción de rayos X, voltamperometría cíclica, SEM y AFM. Los resultados mostraron que la incorporación de SiO_2 mejoró el ordenamiento de las cadenas poliméricas, aumentó el almacenamiento de carga y disminuyó el band gap del P3HT, favoreciendo sus propiedades electrocrómicas. La adición de SiO_2 al P3HT aumentó el contraste óptico de los DED duales hasta en un 126.9%.[11]

Asimismo, en la literatura se ha reportado que el óxido de níquel es un óxido anódico con la capacidad de mostrar modulación del color desde completamente transparente hasta marrón oscuro con un alto valor de capacitancia teórica, lo que lo hace capaz de usarse como un electrodo de almacenamiento de energía electrocrómico bifuncional para una variedad de aplicaciones [12].

En otro estudio, Gómez y colaboradores (2024) demostraron que la combinación de poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) con óxido de cobre (CuO), produce

mejoras significativas en el desempeño de materiales destinados a dispositivos electrocrómicos. En su estudio, se observó que la incorporación de CuO incrementa la cristalinidad y el ordenamiento del P3HT, lo cual se traduce en una mayor capacidad de carga y en un contraste óptico superior durante los procesos de dopaje y desdopaje. Se destacó que tanto la concentración de CuO como el método de síntesis empleado influyen de manera directa en la estabilidad electroquímica del material y en las tonalidades de color obtenidas en los dispositivos electrocrómicos. Estas mejoras estructurales y electroópticas posicionan a los compósitos P3HT-CuO como alternativa altamente prometedora para el desarrollo de dispositivos electrocrómicos de alto desempeño, así como para futuras aplicaciones en tecnologías optoelectrónicas [13].

También, se ha demostrado que las nanopartículas de óxido de níquel (NiONPs) presentan una alta actividad catalítica y fotocatalítica, especialmente en procesos de degradación de contaminantes orgánicos. En particular, la síntesis “verde” de NiO a partir de extractos vegetales, como *Sargassum wightii*, permite obtener nanopartículas estables a temperatura ambiente, con buena dispersión y propiedades fisicoquímicas controladas. Estas NiONPs han mostrado ser catalizadores eficientes en la degradación de colorantes orgánicos tóxicos, destacando su eficacia al emplearse en conjunto con agentes reductores. Estas propiedades posicionan al NiO como un material versátil y funcional para aplicaciones ambientales y potencialmente útil en sistemas electrocrómicos y otros dispositivos optoelectrónicos [14].

Es importante mencionar, que no se ha reportado la utilización del óxido de níquel sintetizado a partir de sargazo para su aplicación en ventanas inteligentes. Debido a esto, el trabajo realizado presenta un alto contenido de novedad.

1.3 Planteamiento del problema

El incremento en la generación de residuos industriales, agrícolas y electrónicos representa un problema ambiental debido a su acumulación y limitada valorización tecnológica. Aunque muchos de estos residuos contienen compuestos con propiedades dieléctricas, semiconductoras y electroquímicas potencialmente útiles, gran parte continúa siendo destinada a rellenos sanitarios o procesos de disposición inadecuados que generan contaminación y desaprovechamiento de recursos.

Paralelamente, el desarrollo de dispositivos para almacenamiento de energía y eficiencia energética, como los capacitores y las ventanas inteligentes, depende en gran medida de materiales funcionales convencionales cuya producción implica altos costos energéticos y ambientales. En particular, los capacitores requieren materiales dieléctricos con adecuada permitividad y estabilidad eléctrica, mientras que las ventanas inteligentes demandan materiales electrocrómicos capaces de modular la transmisión de luz y calor de manera eficiente.

A pesar de los avances reportados en materiales sostenibles, aún existe una limitada integración de residuos valorizables en el diseño de capacitores y ventanas inteligentes. Debido a esto, resulta necesario desarrollar estrategias de aprovechamiento de residuos que permitan obtener materiales funcionales de bajo costo y menor impacto ambiental, capaces de ser incorporados en diferentes tecnologías energéticas.

1.4 Justificación

Ante los desafíos ambientales actuales, especialmente los derivados del cambio climático, resulta fundamental impulsar el desarrollo de tecnologías que no comprometan los recursos naturales de las futuras generaciones.

En este proyecto, en lugar de emplear materiales cuya fabricación requiere largos procesos industriales con alto consumo de energía y recursos naturales, se optó por reutilizar residuos provenientes de distintas industrias. Estos residuos, que normalmente no son aprovechados y pueden convertirse en contaminantes ambientales, se transforman aquí en materia prima para el desarrollo de tecnologías sostenibles.

Además, el aprovechamiento de estos subproductos permite generar un valor agregado al producto principal, promoviendo un modelo de economía circular. Este enfoque contribuye a prolongar la vida útil de los materiales, reducir el impacto ambiental y fomentar un uso más eficiente de los recursos.

1.5 Hipótesis

El acetato de celulosa obtenido de residuos de cigarro y el óxido de níquel sintetizado a partir de sargazo, son materiales que pueden utilizarse para el desarrollo de tecnologías sostenibles tales como capacitores y ventanas inteligentes.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Determinar la factibilidad de obtención de acetato de celulosa y óxido de níquel a partir de residuos agroindustriales para su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía y electrocrómicos.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Determinar los parámetros para la obtención de acetato de celulosa y la síntesis de óxido de níquel.
2. Obtener el acetato de celulosa y sintetizar el óxido de níquel.

3. Elaborar composites a base de P3HT y óxido de níquel para su aplicación en dispositivos electrocrómicos.
4. Caracterizar fisicoquímicamente los materiales obtenidos.
5. Determinar la configuración de los dispositivos de almacenamiento de energía y electrocrómicos.
6. Ensamblar los dispositivos de almacenamiento de energía y electrocrómicos para su caracterización electroquímica.
7. Evaluar el desempeño de los dispositivos utilizando técnicas electroquímicas de corriente alterna (AC) y directa (DC), y ópticas.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Capacitores y capacitancia

A lo largo de la historia se han realizado diferentes investigaciones sobre el funcionamiento de los capacitores. Al respecto, Deshpande (2015) explica que un capacitor se define como dos conductores (o conjuntos de conductores interconectados) separados por un dieléctrico. Los conductores pueden ser placas, láminas, formas sólidas o incluso cables. El separador puede ser aire, vacío, sólidos, una capa de óxido sobre metal (como en los capacitores electrolíticos), papel o película delgada y plana, colocada o enrollada sobre los conductores [15].

Se denomina capacitancia a la propiedad que presentan los conductores, (materiales que permiten el movimiento libre de cargas eléctricas debido a la presencia de electrones libres) para almacenar carga eléctrica cuando se encuentran sometidos a una determinada diferencia de potencial [16]. La capacitancia se mide en Faradios (F), microfaradios (μF), nanofaradios (nF) y picofaradios (pF) y depende directamente de factores físicos como el área de las placas y la distancia entre ellas, así como del material dieléctrico que separa estas placas.

2.1.1 Funcionamiento de los capacitores y su clasificación

Cuando se aplica un voltaje al capacitor, este tiene la capacidad de almacenar energía eléctrica en sus dos placas, que posteriormente pueda ser liberada, cuando sea requerida; los capacitores han evolucionado a lo largo de la historia siendo utilizados en múltiples aplicaciones como en el almacenamiento de energía, aires acondicionados, arranques de motores eléctricos, memorias en computadoras, pantallas táctiles, sensores, telecomunicaciones, regulación de voltaje, etc.

Existen diversos tipos de capacitores, entre los tres más importantes se encuentran los de placas paralelas, los cilíndricos y los variables.

Capacitores de placas paralelas

El capacitor de placas paralelas es uno de los más importantes y utilizados en la actualidad. Está formado por dos placas conductoras colocadas una frente a la otra y separadas por una pequeña distancia. Entre ellas puede haber un material aislante llamado dieléctrico. Su capacidad para almacenar carga eléctrica depende principalmente de tres factores: el área de las placas (a mayor área, mayor capacidad), la distancia entre ellas (a menor distancia, mayor capacidad) y el material que se encuentre entre las placas. Cuando se aplica una diferencia de voltaje, se almacenan cargas opuestas en cada placa ver Figura 1, lo que permite guardar energía eléctrica [16].

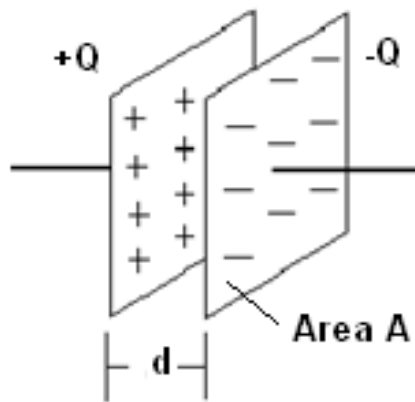


Figura 1. Representación de un capacitor de película [3].

Capacitores cilíndricos

Los capacitores cilíndricos se emplean con frecuencia como elementos de referencia o patrones (se hace alusión a que sirven como modelo confiable

para comparar o verificar otros capacitores), ya que su capacidad puede calcularse con gran precisión a partir de sus dimensiones físicas. Su diseño consiste, generalmente, en dos conductores con forma de cilindro: uno ubicado en el interior y otro que lo rodea, separados por un material aislante ver Figura 2.

Debido a su forma geométrica regular, esta característica permite obtener resultados confiables y reproducibles, lo que los convierte en dispositivos adecuados para mediciones y comparaciones en estudios eléctricos [16].

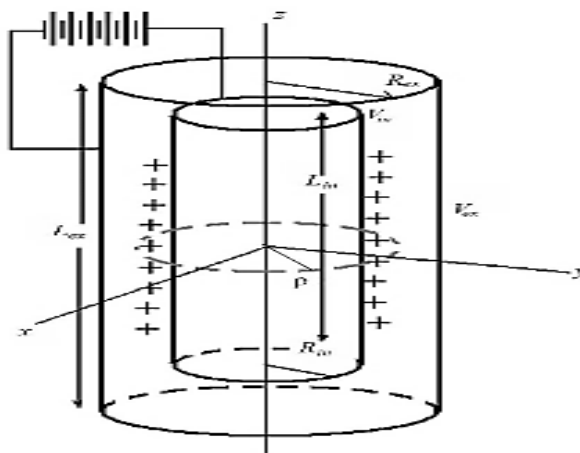


Figura 2. Capacitor cilíndrico finito [4].

Capacitores variables

Los capacitores variables son dispositivos cuya capacidad puede ajustarse dentro de ciertos límites. Generalmente, son de pequeña capacidad y con frecuencia utilizan aire como material aislante entre sus placas. Están constituidos por dos conjuntos de placas metálicas paralelas: uno permanece fijo, mientras que el otro es móvil. Este segundo conjunto puede girar mediante un pequeño eje, de modo que las placas móviles se intercalan entre las placas fijas ver Figura 3 . Al variar el grado de superposición entre ambas, cambia el

área efectiva del capacitor y, en consecuencia, su capacidad para almacenar carga eléctrica [16].

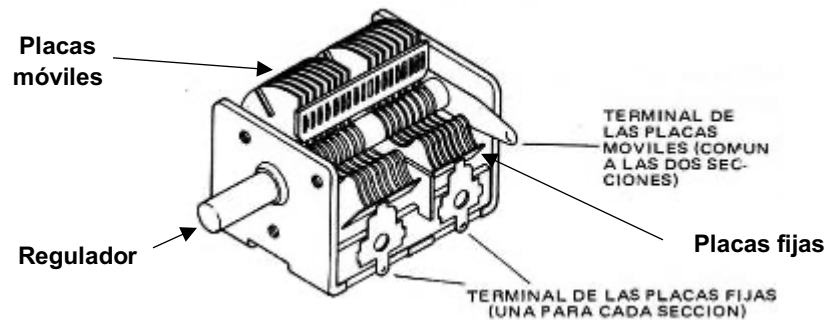


Figura 3. Capacitor variable [5].

2.1.2 Principales materiales para la fabricación de capacitores

Actualmente se producen capacitores de distintas categorías y diversos materiales para la fabricación del dieléctrico. Por ejemplo, la mica es un mineral con alta fuerza dieléctrica, las capacitancias con este material van desde 1 pF hasta 0.1 mF. Otro material es la cerámica, la cual ha sido utilizada para la fabricación de capacitores de baja constante dieléctrica aplicados en altas frecuencias y capacitores de alta constante dieléctrica los cuales son muy utilizados para circuitos de baja frecuencia. El papel celulósico es uno de los materiales más utilizados por su bajo costo, y los capacitores son utilizados en donde se requiera resistir alto voltaje. También, son muy utilizados los plásticos como el teflón y polietileno; las capacidades van desde 500 pF a 1 mF. Estos capacitores tienen costos de fabricación más elevados a diferencia de los de papel. Por último, el aluminio y tantalio son utilizados para fabricar capacitores electrolíticos y sus capacidades van desde 1 hasta 500000 mF [17].

2.2 Materiales compuestos para la fabricación de dispositivos electrocrómicos.

Los materiales compuestos se constituyen, al menos, por una matriz y un refuerzo de distinta naturaleza, cada uno conservando sus propias propiedades físicas, químicas y mecánicas. Sin embargo, cuando se combinan correctamente, se obtiene un material que integra y aprovecha las características individuales de ambos componentes [18].

2.2.1 Estructura de los materiales compuestos

A partir de la combinación de cargas inorgánicas con un polímero, pueden obtenerse tres tipos principales de estructuras compuestas:

- a) Microcompuesto: se forma cuando el polímero no logra introducirse entre las partículas, dando lugar a un material con fases claramente separadas [19].
- b) Nanocompuesto intercalado: ocurre cuando las cadenas del polímero se insertan entre las partículas, generando una estructura organizada en la que se alternan capas de polímero y de material inorgánico [19].
- c) Nanocompuesto exfoliado: se caracteriza por presentar las partículas distribuidas de manera uniforme dentro de la matriz polimérica. Este tipo de estructura es común en nanocompuestos elaborados con materiales como grafeno y arcillas [19].

2.2.2 Síntesis de materiales compuestos

De los procesos más empleados para la fabricación de compósitos o materiales compuestos se encuentran los métodos *ex situ* e *in situ* [13].

MÉTODO EX SITU

En este procedimiento, la polimerización de los monómeros y la síntesis de las partículas metálicas se llevan a cabo de manera independiente. Posteriormente, ambos componentes se combinan mediante un proceso de mezclado mecánico hasta obtener una dispersión uniforme que da origen al compuesto. En este método, las interacciones que pueden establecerse entre el polímero y las partículas son fuerzas de Van der Waals, interacciones de tipo Lewis y enlaces ácido-base [19].

MÉTODO IN SITU

En este procedimiento, las partículas se dispersan previamente en el monómero o en una solución que lo contenga, de modo que la formación del polímero ocurre en presencia de dichas partículas. La reacción de polimerización puede iniciarse mediante un cambio de temperatura (ya sea aumento o disminución) o mediante la adición de un agente de curado (que es una sustancia química encargada de activar o acelerar la reacción, favoreciendo la unión de las moléculas para formar la estructura sólida del polímero). El monómero puede introducirse entre las partículas y, al comenzar la reacción, modificar su polaridad, el propio monómero puede actuar como medio de dispersión, ayudando a mantener las partículas separadas y facilitando una mejor interacción entre estas y la matriz polimérica [13], [19].

2.3 Óxido de níquel

El óxido de níquel (NiO) ha sido muy utilizado como refuerzo para la fabricación de materiales compuestos aplicados en diferentes tecnologías debido a sus propiedades fisicoquímicas. El NiO es un semiconductor tipo p donde el transporte de cargas ocurre principalmente mediante huecos, normalmente no presenta una estequiometría perfecta, debido a la coexistencia de iones Ni^{2+} y una pequeña fracción de iones Ni^{3+} en

su red cristalina, caracterizándose por tener una brecha amplia de energía (2.5 eV), elevada estabilidad térmica y química [8].

Es importante mencionar que el NiO puede obtenerse mediante síntesis verde y que este compuesto obtenido por este método no ha sido reportado para la elaboración de materiales compuestos aplicados a dispositivos electrocrómicos.

2.3.1. Síntesis verde de NiO

La síntesis verde ha cobrado relevancia como alternativas sostenibles a los procesos convencionales, ya que emplean extractos biológicos ricos en compuestos como flavonoides, polifenoles y proteínas que actúan como agentes reductores (convirtiendo los iones de níquel en átomos de níquel neutros) y estabilizantes (evitando la aglomeración de las partículas), permitiendo la formación de partículas sin el uso de sustancias tóxicas. Este enfoque no solo reduce el impacto ambiental, sino que también simplifica el proceso y disminuye los costos de producción [7].

La síntesis verde de partículas de NiO consiste en mezclar una solución acuosa de sales metálicas (acetato de níquel) con un extracto vegetal acuoso, los cuales actúan como agentes reductores y estabilizantes ver Figura 4. Después, la mezcla se agita constantemente durante varias horas a temperatura ambiente [20].

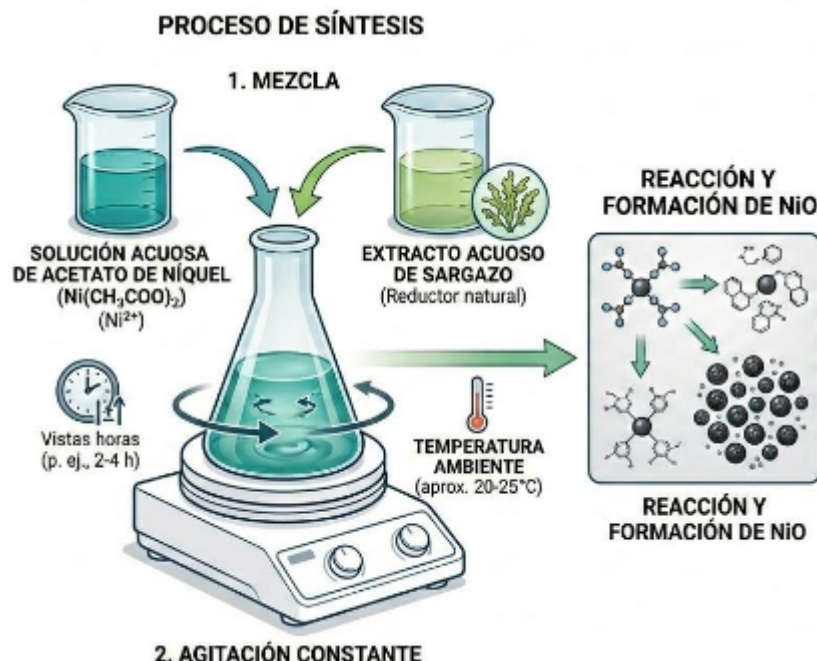


Figura 4. Representación del proceso de la síntesis verde. Imagen generada mediante inteligencia artificial.

2.4 Polímeros conductores

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) los polímeros son sustancias compuestas de macromoléculas, moléculas muy grandes con pesos moleculares que van desde unos pocos miles hasta millones de gramo/mol [21]. Estas macromoléculas han sido muy utilizadas como matriz para envolver y mantener unidos una infinidad de refuerzos, siendo clave para la cohesión y forma del material final.

Los polímeros pueden adoptar distintas formas estructurales, tales como lineales, ramificadas o entrecruzadas. Los polímeros lineales están compuestos por largas secuencias de monómeros conectados entre sí, lo que les da cierta rigidez. En cambio, los polímeros ramificados presentan cadenas laterales unidas a la cadena principal, lo cual suele deberse a la presencia de impurezas o a múltiples grupos funcionales activos en los monómeros. Por

último, un polímero entrecruzado se caracteriza por tener dos o más cadenas enlazadas mediante segmentos secundarios, generando una estructura en forma de red [22].

Los polímeros conductores son materiales formados por polímeros insaturados que contienen cadenas conjugadas, en las cuales los electrones tipo π están deslocalizados. Este tipo de estructura les permite exhibir propiedades semiconductoras, con una banda de energía cercana a los 1,5 eV.[22]

La capacidad de conducción eléctrica de un polímero conductor puede aumentarse principalmente de dos maneras. La primera consiste en someterlo a un proceso de oxidación, ya sea química o electroquímica, con el propósito de doparlo utilizando agentes que donen (tipo n) o acepten (tipo p) electrones. La segunda forma implica modificar su estructura añadiendo heteroátomos o grupos funcionales a la cadena principal del polímero [22].

2.4.1 Teoría de bandas en polímero conductores.

Las bandas de energía, también conocidas como bandas permitidas, se encuentran separadas entre sí por regiones llamadas bandas prohibidas o brechas de energía. La amplitud de estas brechas depende del tipo de átomo y del tipo de enlace presente en el sólido. La teoría de bandas permite explicar la conductividad eléctrica en metales, semiconductores y aislantes, basándose en la distancia que existe entre estas bandas.[23]

El gap de energía es el espacio que separa la banda de mayor energía ocupada por electrones, llamada banda de valencia (BV), de la banda de menor energía desocupada, conocida como banda de conducción (BC). La conductividad de un material está determinada por la facilidad con la que los electrones pueden pasar de la BV a la BC.[23]

En los materiales conductores, la última capa de electrones está parcialmente llena, lo que facilita que los electrones salten a la banda de conducción. En cambio, en semiconductores y aislantes, la banda de valencia está completamente llena, dificultando este salto; esta dificultad es especialmente alta en los aislantes, que presentan un gap de energía mayor [23].

2.4.2 Politiofenos

Los politiofenos (PTs) constituyen una familia de polímeros conductores obtenidos a partir de la polimerización del tiofeno, un compuesto heterocíclico que contiene azufre. Estos materiales pueden adquirir carácter conductor cuando se someten a procesos de dopaje, es decir, cuando se les incorporan o se les extraen electrones del sistema de orbitales π conjugados presentes en su estructura [23].

Una de sus características más relevantes es la capacidad de conducir electricidad, propiedad que se debe a la deslocalización de los electrones a lo largo de la cadena polimérica. Sin embargo, su interés no se limita únicamente a la conductividad. Esta misma deslocalización electrónica también influye en sus propiedades ópticas, particularmente en el color, el cual puede variar en función de factores externos como el tipo de disolvente, la temperatura, el potencial eléctrico aplicado o la interacción con otras moléculas.[23]

Estos cambios en el entorno provocan modificaciones tanto en la conductividad como en la coloración del material, ya que ambos fenómenos están asociados a variaciones en la conformación de la cadena polimérica, como la torsión o alteración de su estructura conjugada. Debido a esta sensibilidad frente a estímulos externos, los PTs presentan un comportamiento versátil que los hace adecuados para aplicaciones en sensores químicos y

dispositivos electrónicos y ópticos, donde se requieren respuestas ajustables y controlables [23].

La síntesis de poli(3-alquiltiofenos) (P3AT) Uno de los procedimientos más importantes fue la síntesis mediante el acoplamiento de Kumada, una reacción de acoplamiento cruzado que emplea reactivos de Grignard y catalizadores metálicos, generalmente de níquel o paladio, para formar enlaces carbono-carbono. Este método permitió obtener polímeros conjugados con mejores propiedades estructurales y eléctricas [24]. Posteriormente, se desarrollaron métodos de polimerización oxidativa utilizando cloruro férrico (FeCl_3) como agente oxidante. En este procedimiento, el monómero 3-alquiltiofeno se disuelve en solventes como cloroformo y posteriormente se oxida químicamente para formar el polímero. Esta metodología destacó por su simplicidad y por producir materiales con altos pesos moleculares y buena estabilidad [13].

Poli (3-hexiltiofeno)

El Poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) surgió como respuesta a las limitaciones presentadas por los primeros PTs, los cuales eran insolubles y difíciles de procesar. Debido a ello, diversos grupos de investigación enfocaron sus esfuerzos en desarrollar materiales que conservaran las propiedades eléctricas de los PTs, pero que además fueran solubles en solventes orgánicos y fáciles de manipular para aplicaciones tecnológicas. [13]

El P3HT es un polímero conjugado que actúa como material donador de electrones de tipo p. En disolución presenta una banda de absorción característica alrededor de los 466 nm y un ancho de banda prohibida cercano

a 1.9 eV. Gracias a la incorporación de cadenas laterales alquilo en su estructura, muestra buena solubilidad en diversos disolventes orgánicos, lo que facilita su procesamiento y deposición en forma de películas delgadas. [13]

Este polímero ha sido ampliamente empleado debido a su desempeño semiconductor, que en muchos casos supera al de otros polímeros conductores como el poli(3-metiltiofeno), la polianilina (PANI) y el polipirrol. Por ello, el P3HT se ha consolidado como uno de los PTs más investigados en el ámbito de la electrónica orgánica [13].

2.5. Electrochromismo

El electrocromismo se describe como la capacidad de ciertos materiales para experimentar un cambio apreciable en sus propiedades ópticas (como la transmitancia, la absorción o la reflectancia) cuando se les aplica un estímulo eléctrico externo. Esta transformación es visible y se mantiene mientras se conserve la señal eléctrica, pero al mismo tiempo es reversible, ya que el material puede retornar a su estado inicial al invertir la polaridad aplicada [13].

Este fenómeno está relacionado con reacciones de oxidación y reducción (procesos redox) que ocurren en el material al intercambiar electrones y iones con el medio. Como resultado, se produce una variación en su estructura electrónica, lo que se traduce en un cambio de color, generalmente entre un estado transparente o incoloro y otro coloreado.[13]

Gracias a esta propiedad reversible y controlable, los materiales electrocrómicos se emplean en dispositivos que requieren regulación de luz y energía, como ventanas inteligentes, espejos antideslumbrantes y pantallas de visualización, donde es posible alternar entre distintos niveles de coloración mediante la aplicación de un voltaje específico [25].

2.6. Dispositivo electrocrómico (ventanas inteligentes)

Las ventanas inteligentes electrocrómicas están formadas por una capa delgada de material electrocrómico que cambia de color cuando se le aplica un voltaje, permitiendo el paso de iones a través de su estructura. Al invertir la polaridad, el material recupera su estado transparente. Debido a este comportamiento reversible, estas ventanas pueden controlar la cantidad de luz que atraviesa el vidrio y, en consecuencia, contribuir a regular la temperatura en el interior de un edificio, favoreciendo el ahorro energético y el confort térmico [14].

El mecanismo responsable de este efecto se basa en la inserción y extracción simultánea de iones y electrones en la película electrocrómica al aplicar una diferencia de potencial. No obstante, para que el sistema funcione correctamente, es necesario que todos los componentes del dispositivo, como el electrodo conductor transparente, el electrolito y las capas activas, sean compatibles entre sí, garantizando así un desempeño eficiente y una adecuada vida útil del sistema [26].

2.6.1. Polielectrolito

Los polielectrolitos son materiales poliméricos que incorporan grupos iónicos en su estructura, lo que les permite disolverse y facilitar el transporte de iones. En el ámbito de los dispositivos electroquímicos, estos materiales cumplen una función esencial, ya que actúan como medio conductor para el movimiento iónico y contribuyen al almacenamiento de carga [6].

Existen distintos tipos de electrolitos poliméricos transparentes, entre los que destacan aquellos basados en óxido de polietileno (PEO) combinados con

ciertas sales, así como polímeros que contienen grupos ácidos capaces de generar sus propios iones. En estos sistemas, algunas sales inorgánicas permiten el paso de iones, pero restringen la conducción de electrones, favoreciendo así un comportamiento predominantemente iónico [13].

2.6.2. Sustrato ITO

El óxido de indio (In_2O_3) y estaño (SnO_2) (ITO) es un material conductor transparente formado principalmente por In_2O_3 con SnO_2 . Esta combinación le confiere propiedades optoelectrónicas sobresalientes, ya que permite el paso de la luz visible mientras mantiene una adecuada conductividad eléctrica [6, 15].

Una de las características más destacadas de los sustratos o vidrios recubiertos con ITO es su alta transmitancia óptica, que generalmente supera el 80% en la región visible del espectro, lo que los hace prácticamente transparentes al ojo humano. Al mismo tiempo, presentan baja resistividad eléctrica, lo que les permite actuar como electrodos conductores sin afectar significativamente la transparencia del dispositivo. Esta dualidad (transparencia y conductividad) es la razón principal de su amplio uso en aplicaciones tecnológicas [6, 15].

Además, los vidrios ITO poseen buena estabilidad química, adecuada adherencia a diferentes recubrimientos y compatibilidad con diversos procesos de deposición de películas delgadas. También presentan una superficie relativamente uniforme, lo que favorece la formación de capas activas en dispositivos electrónicos y electroquímicos [13], [27].

2.6.2. Película electrocrómica

Las películas electrocrómicas han despertado un gran interés debido a su capacidad para modificar de manera reversible la transmisión de luz y energía solar mediante procesos de carga y descarga eléctrica. Gracias a esta propiedad, estos materiales pueden emplearse en dispositivos como ventanas inteligentes, las cuales permiten regular la entrada de luz y calor al interior de edificios, contribuyendo tanto al confort térmico como a la eficiencia energética.[28]

2.7. Parámetros electrocrómicos

Es importante considerar la variación cromática como un aspecto relevante. Dentro de estos parámetros se incluyen la intensidad del color, el nivel de cambio y el tiempo en el que dichas transformaciones tienen lugar. El análisis de estos factores permite comprender con mayor claridad el comportamiento de los materiales electrocrómicos desarrollados, así como compararlos con los reportados en otras investigaciones, facilitando la evaluación de su desempeño en función de los materiales utilizados y su potencial aplicación comercial [29].

El contraste óptico es un parámetro fundamental que cuantifica la variación de color asociada a las transiciones redox del material electrocrómico. En dispositivos electrocrómicos, se busca alcanzar valores elevados de contraste óptico, ya que estos indican una modulación significativa de la respuesta visual, es decir, una diferencia claramente perceptible entre los estados coloreado y decolorado. Este parámetro se define comúnmente como la diferencia porcentual en la transmitancia ($\Delta\%T$) entre el estado oxidado (T_{ox}) y el estado reducido (T_{red}) del material [13].

Además, el $\Delta\%T$ depende de diversos factores, tales como el espesor de la película activa, la morfología del material, la eficiencia en la inserción y

extracción de iones, así como la longitud de onda a la cual se realiza la medición. Un alto contraste óptico no solo mejora la visibilidad del cambio de color, sino que también es un indicador indirecto de la eficiencia del material para aplicaciones como ventanas inteligentes, pantallas y dispositivos de control de luz. Por ello, su evaluación, junto con otros parámetros como el tiempo de respuesta y la estabilidad cíclica, resulta esencial para determinar la viabilidad tecnológica del sistema electrocrómico [29].

2.8 Eficiencia de coloración

La eficiencia de coloración (CE), también denominada eficiencia electrocrómica, es una medida de la efectividad con la que un material electrocrómico convierte la carga eléctrica inyectada en un cambio de propiedades ópticas. Este parámetro se define como la razón entre el cambio de densidad óptica (ΔOD) y la carga transferida (Q), expresándose en $\text{cm}^2 \text{C}^{-1}$. Cuanto mayor es la eficiencia de coloración, mayor es el cambio óptico alcanzado por unidad de carga consumida, lo que indica una respuesta electrocrómica más eficiente y un menor requerimiento energético para la operación del dispositivo.[13]

Capítulo 3. Desarrollo experimental

A continuación, se presentan las metodologías utilizadas para el desarrollo y caracterización de capacitores y ventanas inteligentes. Primeramente, se presenta todo lo relacionado con los capacitores, es decir, la obtención de los dieléctricos y la fabricación y caracterización de dichos dispositivos.

Posteriormente, se presentan la síntesis verde y caracterización del NiO, y la elaboración y caracterización de los compósitos y las ventanas inteligentes.

3.1. Obtención de acetato de celulosa

Se recolectaron aproximadamente 100 colillas de cigarro, de las cuales se separaron manualmente los componentes: filtros y envoltura de papel, ver Figura 5.



Figura 5. A) y B) Recolección de cigarros y C) Separación de papel y filtro.

Los filtros se lavaron con agua del grifo para eliminar las impurezas superficiales. Posteriormente, los filtros (acetato de celulosa) se colocaron sobre papel absorbente durante 1 h para eliminar el exceso de agua ver Figura 6, se secaron en un horno a 70 °C durante 12 h para eliminar la humedad residual.

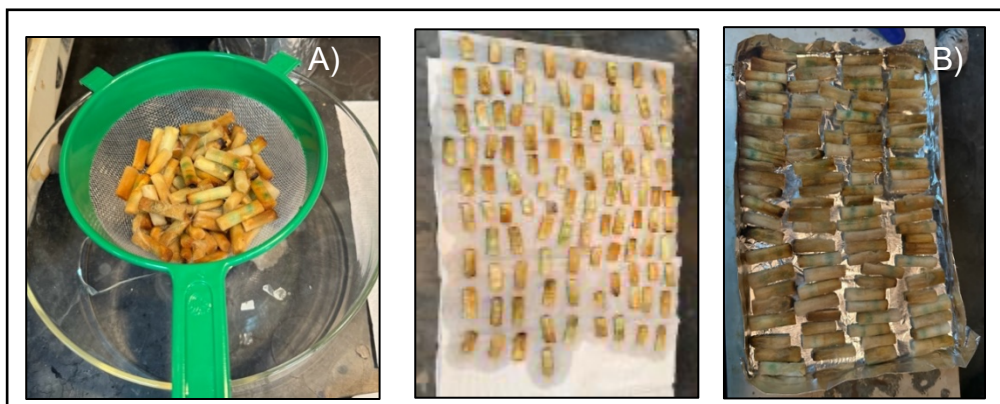


Figura 6. A) Lavado de filtros, B) y C) Secado de filtros.

Para la purificación, los filtros fueron sometidos a un proceso de extracción Soxhlet, ver Figura 7, los cuales se vertieron en un matraz bola, 100 mL de tolueno y 100 mL de etanol, el sistema se mantuvo en reflujo durante 5 h para eliminar la nicotina y otros componentes orgánicos.



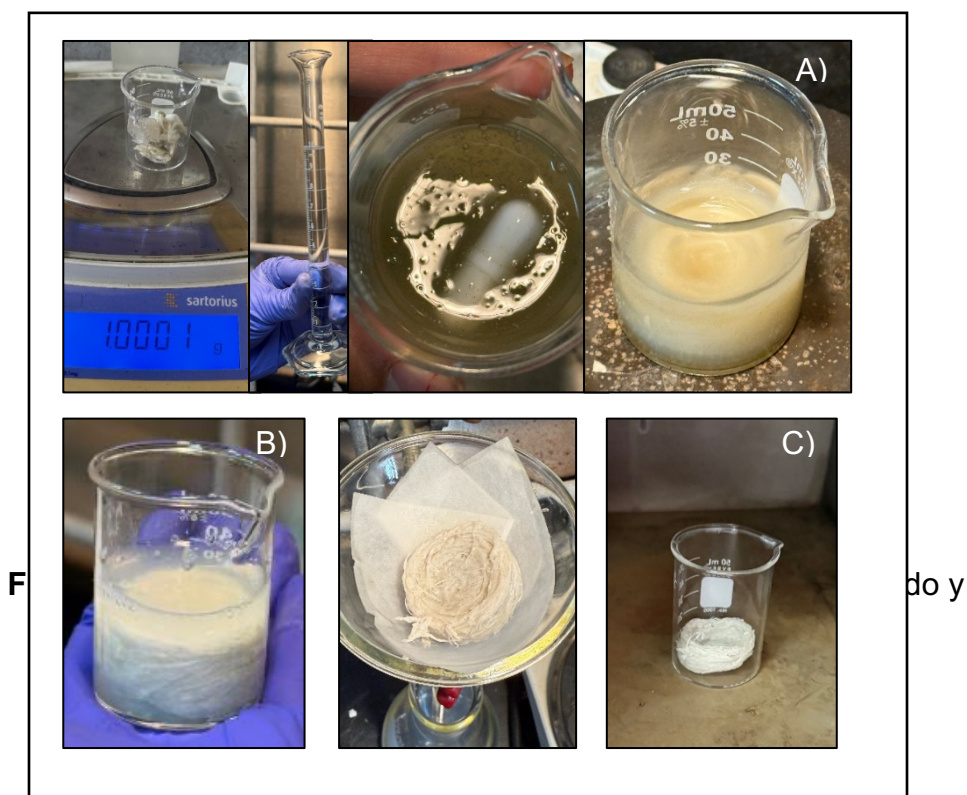
Figura 7. Proceso de extracción Soxhlet.

Posteriormente, los filtros fueron secados en el horno a 70 °C durante 12 h para evaporar el disolvente residual, ver Figura 8.



Figura 8. Secado de colillas en horno.

Se pesó 1 g de colillas de cigarro y posteriormente se disolvió en 10 mL de acetona, manteniendo la mezcla en agitación a temperatura ambiente, posteriormente la solución obtenida se precipitó en agua destilada, hasta la obtención de las fibras de acetato de celulosa. Finalmente, el precipitado se filtró utilizando papel filtro y el material sólido correspondiente al acetato de celulosa se secó a 70 °C durante 12 h, ver Figura 9.



Posteriormente se disolvieron 1 g del acetato de celulosa obtenido en 10 mL de acetona, y se disolvieron 500 mg del acetato en 10 mL de acetona. Cada solución fue agitada durante 30 min a temperatura ambiente y se reposó durante 12 h, ver Figura 10.

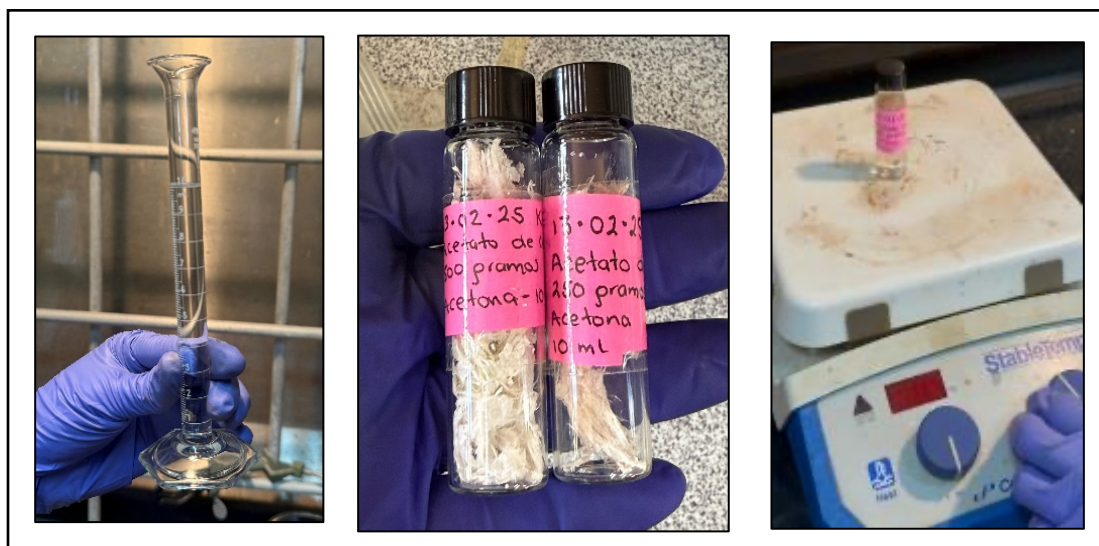


Figura 10. Preparación de soluciones.

3.2. Elaboración de electrodos de aluminio/películas de acetato de celulosa

Para la elaboración de los electrodos, se empleó aluminio reciclado obtenido de latas de aceite, ver Figura 11, como materia prima para la fabricación de los electrodos (placas conductoras). Se cortaron de 2.5 cm de largo y 1 cm de ancho y se procedió al lijado de una de sus caras utilizando papel de lija de diferentes granulometrías (180, 240, 300, 600, 1000) girando 90° entre cada cambio de grano. Después, los electrodos se lavaron con agua de grifo y jabón para remover los residuos desprendidos del lijado. Posteriormente, se colocaron en un vaso de precipitado con acetona y se limpiaron en un baño

ultrasónico durante 15 min ver Figura 11, este proceso se repitió 3 veces. Finalmente, los electrodos fueron secados con aire caliente.



Figura 11. A) lata de aceite, B) aluminio cortado C) electrodos lijados D) electrodos en acetona y E) baño ultrasónico.

Para el ataque químico de los electrodos de aluminio, se utilizó una solución compuesta por 10 mL de ácido fluorhídrico y 10 mL de etanol. Para esto, se sumergieron en una celda durante 10 s, ver Figura 12, aplicando una corriente de 20 mA a través de los electrodos del sistema.

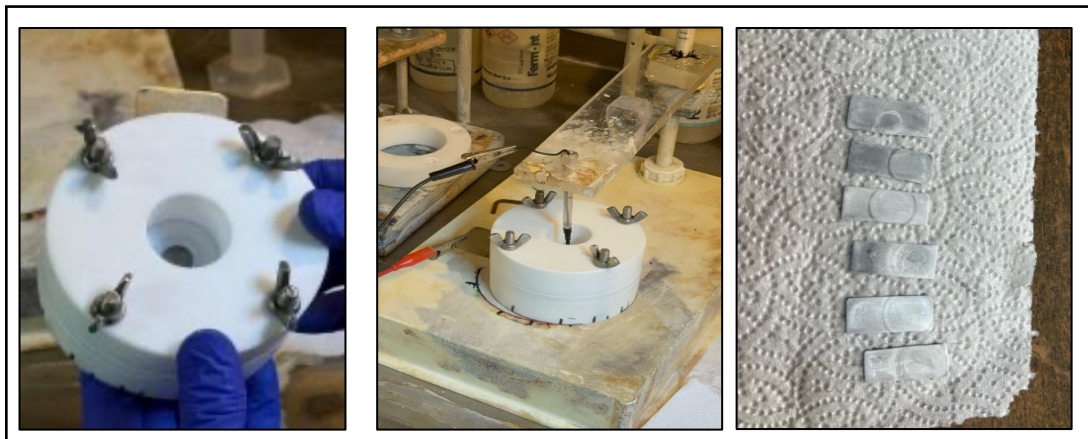


Figura 12. Celda utilizada para el ataque químico de los electrodos de aluminio.

Las películas de acetato de celulosa se obtuvieron sobre electrodos de aluminio sin tratar y tratados químicamente. Para esto, se procedió al depósito por goteo de soluciones de acetato de celulosa (preparada en 3.1) sobre los electrodos de aluminio. Se utilizaron dos concentraciones: 1 g y 500 mg de acetato de celulosa disueltos en 10 mL de acetona, y un volumen de 100 μ L. El secado de las películas se realizó en una atmósfera saturada de acetona.

3.3. Obtención de dieléctricos de poliéster

Se seleccionaron diferentes residuos de telas que tuvieran una composición del 100% de poliéster (una camiseta deportiva color azul, un mantel de mesa color beige y una manta color café). Se cortaron 5 hojas de 1 x 1 cm de cada residuo. Las hojas de poliéster (dieléctricos) se colocaron en vasos de precipitado con acetona y se limpiaron utilizando un baño ultrasónico durante 15 min; este proceso se repitió dos veces con el objetivo de remover colorantes y otras impurezas en los tejidos. Finalmente, se secaron con aire caliente.

3.4. Obtención de dieléctricos de mica

Los dieléctricos de mica se obtuvieron de placas extraídas de hornos de microondas descompuestos (basura). Con un cúter, se despegaron las capas de la mica (la presentación en los hornos es multicapas) y se cortaron hojas de 1 x 1 cm. Las hojas, se colocaron en un vaso precipitado con acetona y se limpiaron utilizando un baño ultrasónico durante 15 min. Esto se realizó con el fin de eliminar grasas y otros residuos. Finalmente, las hojas se secaron utilizando aire caliente.

3.5. Fabricación y caracterización de los capacitores

El ensamble de los capacitores se llevó a cabo como sigue: se utilizaron dos placas de acrílico previamente perforadas en sus extremos para contener al capacitor. Sobre una de las placas acrílicas se colocó un electrodo de aluminio sin tratar y tratado químicamente recubierto con la película de acetato de celulosa y sobre estos se colocó un segundo electrodo de aluminio (mismas condiciones que el anterior). Posteriormente, se colocó la segunda placa de acrílico sobre el electrodo de aluminio, formando una estructura tipo sándwich. Finalmente, el conjunto se fijó mediante un par de tornillos en cada extremo de las placas de acrílico, asegurando una adecuada compresión y alineación de los componentes, como se muestra en la Figura 13.

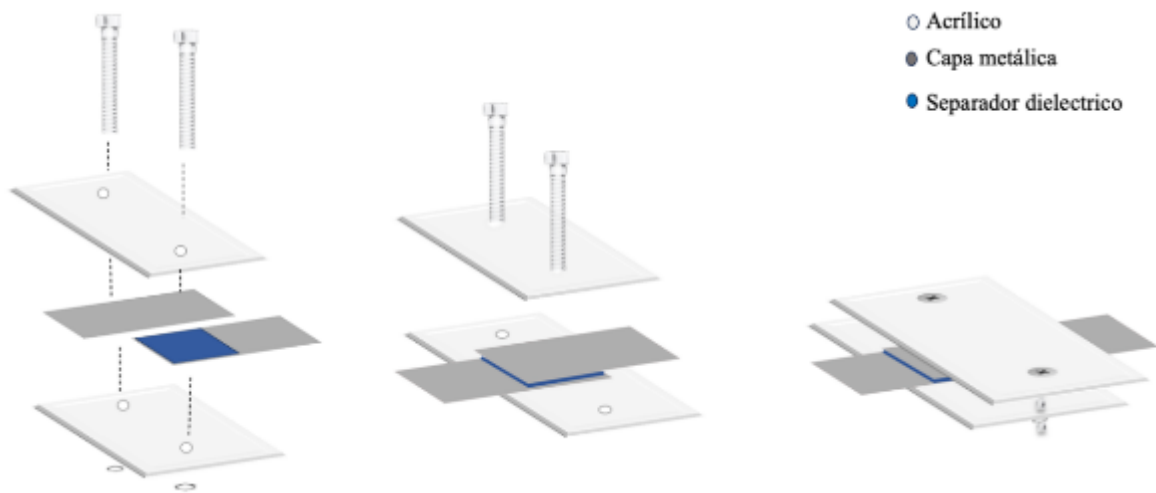


Figura 13. Arreglo del capacitor.

La caracterización de los capacitores de energía se realizó utilizando un capacímetro digital, con el objetivo de determinar el valor de la capacitancia. Se realizaron mediciones a temperatura ambiente y a 60, 80 y 100 °C (utilizando una mufla), con el fin de evaluar su desempeño, ver Figura 14.

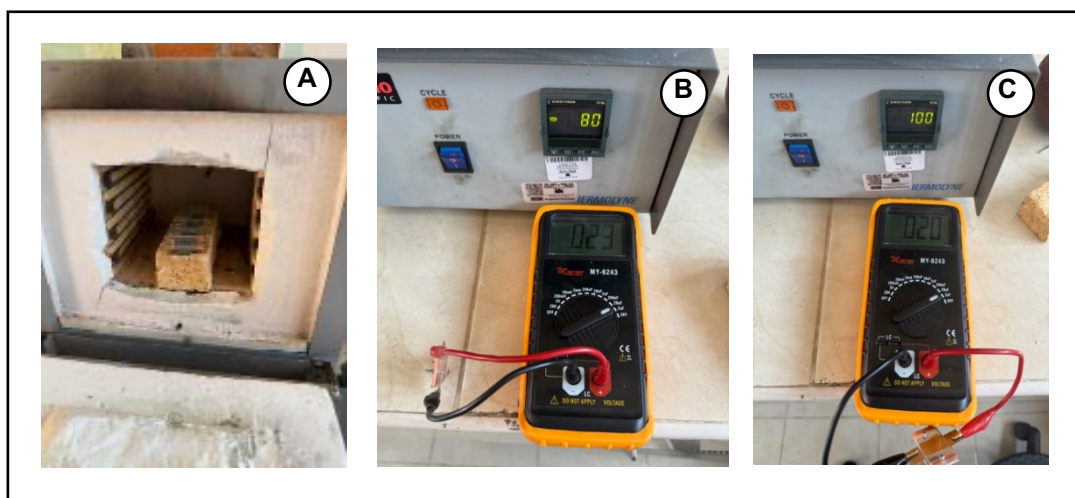


Figura 14. Medición de la capacitancia a diferentes temperaturas.

Además, se realizaron pruebas de impedancia utilizando una amplitud de 60 mV rms y un rango de frecuencia de 0.1 Hz a 30 kHz. Para ello, se utilizó un potenciostato/galvanostato GILL AC de la marca ACM Instruments.

3.6. Síntesis verde y caracterización del NiO

Tabla 1. Reactivos utilizados para la síntesis verde y caracterización del NiO

Reactivo	Fórmula química	Pesos molecular (g/mol)	Pureza	Proveedor	Función
Acetato de níquel (II) tetrahidratado	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	248.86	98%	SIGMA-ALDRICH	Precursor de níquel para la síntesis de NiO
Hidróxido de sodio	NaOH	40	98.9%	Fermont	Ajuste del pH de las soluciones
Ácido acético	CH_3COOH	60.05	99%	SIGMA-ALDRICH	Neutralización del exceso de NaOH
Agua desionizada	H_2O	18.015	-	Libre de iones	Medio para la extracción del sargazo y disolvente para la preparación de las soluciones

3.6.1. Síntesis verde del NiO

La síntesis verde del NiO se realizó como sigue: se utilizó sargazo recolectado de las playas del Caribe Mexicano como precursor, el cual se limpió utilizando un colador para eliminar arena y otros sólidos. Posteriormente, el sargazo se

lavó con agua de grifo para remover impurezas superficiales, y posteriormente, con agua desionizada para garantizar una mayor limpieza superficial del material, ver Figura 15.



Figura 15. Limpieza del sargazo.

El sargazo limpio se extendió en una charola cubierta con papel absorbente y se dejó reposar a temperatura ambiente hasta eliminar la mayor cantidad de agua. Posteriormente, se secó en un horno a 60 °C durante 48 h, asegurando la completa eliminación de humedad, ver Figura 16.



Figura 16. Secado del sargazo.

Después, el sargazo secó y se molió empleando un mortero, hasta obtener un polvo fino homogéneo, ver Figura 17, adecuado para la síntesis del NiO.

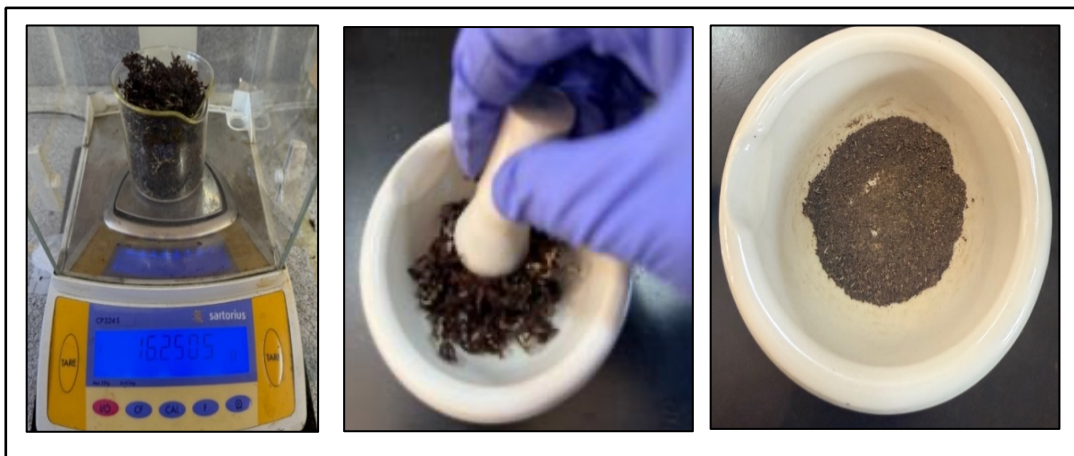


Figura 17. Molienda del sargazo.

Posteriormente, se pesaron 5 g de sargazo molido y se diluyeron en 50 mL de agua desionizada. La mezcla se agitó durante 60 min a temperatura ambiente, para luego filtrar el sólido y obtener el extracto de sargazo, ver Figura 18.

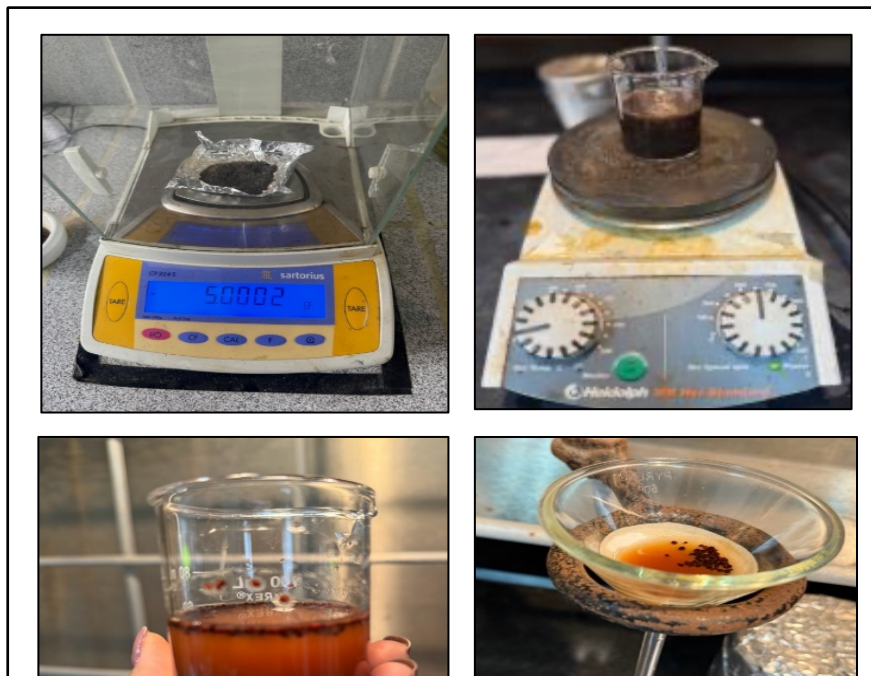


Figura 18. Proceso de obtención del extracto de sargazo.

Al mismo tiempo, se preparó una solución de acetato de níquel 0.5 M disolviendo 12.69 g de acetato de níquel en 100 mL de agua desionizada, la cual fue nombrada como 1, que representa la *muestra 1*.

En la solución acuosa de acetato de níquel, el ion principal que se forma es el catión níquel (II) (Ni^{2+}), el cual se encuentra hidratado en el agua, formando el complejo $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ (responsable del característico color verde esmeralda de la solución). [30]

A esta solución, de la muestra 1, se le añadieron 5 mL del extracto de sargazo previamente obtenido, y se le agregaron perlas de hidróxido de sodio, hasta alcanzar un pH de 12. Debido al exceso de acetato de níquel, no fue posible llegar a dicho pH, el pH que se alcanzó fue de 10. Posteriormente, la mezcla se agitó durante 2 h a temperatura ambiente, ver Figura 19.



Figura 19. Preparación de la solución de acetato de níquel.

Se preparó una segunda solución de acetato de níquel 0.5 M, disolviendo 3.17 g de acetato de níquel en agua desionizada hasta un aforo de 25 mL. Se tomaron 8.7 mL de esta solución y se disolvieron en 100 mL de agua desionizada, la cual se le nombró como 2, que representa la *muestra 2*.

Se preparó una tercera solución de acetato de níquel con la misma concentración 0.5 M de acetato de níquel, disolviendo 3.17 g de acetato de níquel en agua desionizada hasta un aforo de 25 mL, los cuales se tomaron 8.7 mL de esta solución y se disolvieron en 100 mL de agua desionizada, y se nombró como 3, que representa a la *muestra 3*, la diferencia entre la muestra 2 y la muestra 3, fue la incorporación del hidróxido de sodio, a la muestra 2 se le agregaron las perlas completas de hidróxido de sodio, hasta alcanzar un pH de 12, debido a la incorporación del NaOH no controlado se nos pasó hasta un pH de 14, tuvimos que agregar ácido acético para neutralizar a un pH de 12, y para la muestra 3 fue más controlado, se le agregó el hidróxido de sodio por goteo, se preparó una solución de hidróxido de sodio (2 M) 2 gr de NaOH en 25 ml de agua desionizada, fueron 30 gotas aproximadamente las que se vertieron a la solución, y se logró obtener un pH de 12. Posteriormente, a ambas muestras se les agregaron los 5 mL del extracto de sargazo y se agitó durante 2 h a temperatura ambiente.

Una vez ajustado el pH, las soluciones, se transfirieron a tubos de centrifuga y se dejaron reposar durante 12 h. Pasado ese tiempo, las soluciones se centrifugaron utilizando 6000 rpm durante 30 min, ver Figura 20.

Posteriormente, se decantó cuidadosamente la fase acuosa, asegurándose de no perder las partículas sólidas.

La diferencia de las *muestras 2 y 3* con respecto a la *muestra 1* fue que esta última tuvo una mayor concentración de acetato de níquel (exceso de acetato de níquel).



Figura 20. Nivelación de pH y centrifugado de soluciones de acetato de níquel.

Después, lo que se obtuvo se vertió en un vaso de precipitado, se agitó y calentó hasta alcanzar el punto de ebullición; se obtuvo una pasta de color verde oscuro. La pasta se colocó en un crisol y se calentó en una mufla a 400 °C durante 2 h, ver Figura 21.

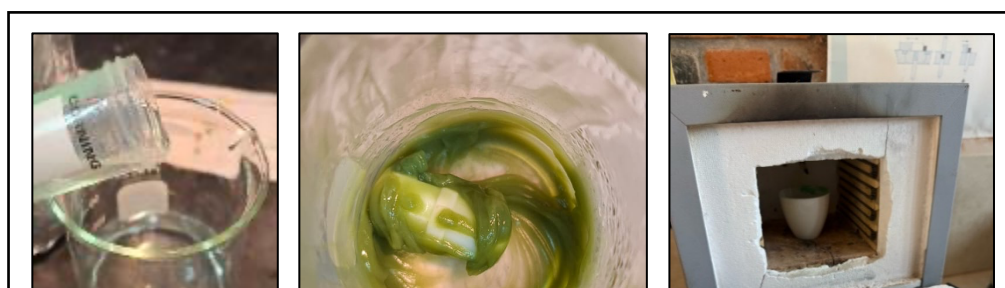


Figura 21. Obtención y tratamiento térmico de la pasta

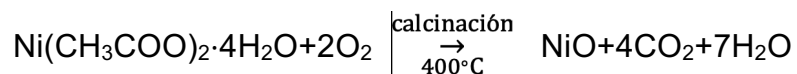
Después del tratamiento térmico, la muestra obtenida se dejó enfriar y, finalmente, se molió utilizando un mortero hasta obtener un polvo fino, ver Figura 22.



Figura 22. Molienda de la muestra.

Durante el proceso de síntesis, el extracto del sargazo funciona como un agente reductor de la sal de níquel (acetato de níquel), debido a que contiene fitoquímicos tales como los fenoles, flavonoides, alcaloides y terpenoides, los cuales donan electrones a los iones de níquel (Ni^{2+}), reduciéndolos a su forma elemental neutra (Ni^0).

La reacción global de la síntesis puede representarse como [31]



El extracto de sargazo no aparece como reactivo estequiométrico porque actúa principalmente como agente complejante, estabilizante y combustible orgánico durante la calcinación.

3.6.2. Caracterización del NiO

La caracterización del NiO se llevó a cabo mediante diversas técnicas de laboratorio con el fin de evaluar sus propiedades físicas y químicas.

Para esto, se realizó un análisis utilizando la difracción de rayos X (DRX), la cual es una técnica fundamental para la identificación de fases cristalinas presentes en el material. Los patrones de difracción obtenidos fueron comparados con un difractograma de referencia previamente reportado en la literatura para el NiO. Esto permitió confirmar la formación de la fase cristalina correspondiente. Esta comparación es esencial para validar la pureza y la correcta síntesis del material.

A partir de los resultados de la DRX, se determinó el grado de cristalinidad del material, el cual proporcionó información sobre la proporción de estructura ordenada presente en la muestra. Asimismo, se estimó el tamaño de cristal mediante el uso de la ecuación de Scherrer, la cual relaciona el ensanchamiento de los picos de difracción con el tamaño promedio de los dominios cristalinos. Este parámetro es relevante, ya que influye directamente en las propiedades físicas y químicas del material.

Además, se realizó un análisis de la morfología superficial del NiO mediante la obtención de imágenes en un microscopio electrónico de barrido (SEM). Este análisis permitió determinar el tamaño, la forma y la distribución de las

partículas. Estos parámetros son relevantes, ya que influyen en las propiedades electroquímicas y ópticas del material y, por lo tanto, en su desempeño en aplicaciones electrocrómicas.

3.7. Elaboración de películas de P3HT/NiO

El P3HT usado para esta tesis fue proporcionado por el laboratorio de “Síntesis y Caracterización de Polímeros” del CIICAp, el cual fue sintetizado mediante oxidación directa del monómero 3-hexiltiofeno utilizando cloruro férrico (FeCl_3) como agente oxidante. Para ello, se disolvieron 0.0167 mol de 3-hexiltiofeno destilado en cloroformo anhidro (CHCl_3) y la solución se añadió lentamente a una solución de FeCl_3 (0.025 mol) bajo atmósfera inerte y a temperatura ambiente. La reacción se llevó a cabo con una relación molar 3HT: FeCl_3 de 1:1.5 y la mezcla se mantuvo en agitación durante 20 h a temperatura ambiente. Una vez finalizada la reacción el polímero obtenido se precipitó en metanol, se filtró y se lavó cuidadosamente de forma secuencial con metanol, ácido clorhídrico al 10% v/v, acetona, hidróxido de amonio al 10% v/v, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) al 1% v/v y agua destilada, finalmente el P3HT se secó para su posterior utilización.[32]

Para la elaboración de los compósitos de P3HT/NiO, se prepararon soluciones conteniendo 15 mg de soluto disueltos en 1 mL de tolueno, ver Figura 23. Se formularon tres concentraciones con diferentes porcentajes en peso de óxido de níquel (3, 5 y 8%), complementadas con P3HT como componente restante, y para comparación se preparó una película con solo P3HT (15 mg).

El proceso consistió en: agitar las soluciones durante 48 h. Posteriormente, se sometieron a un tratamiento ultrasónico por 5 min, ver Figura 23, alternando

ciclos de 1 min de agitación y un minuto de reposo. Esto se realizó para lograr una dispersión homogénea de las partículas.

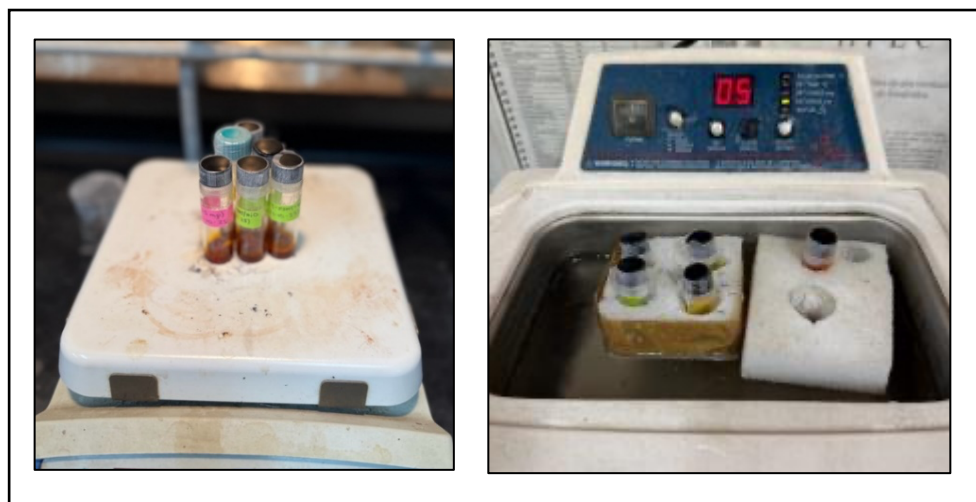


Figura 23. Elaboración de compósitos de P3HT/NiO.

Para la obtención de películas de P3HT/NiO se siguió el siguiente procedimiento:

Se procedió a cortar sustratos de vidrio tipo Corning e ITO. Ambos sustratos se limpiaron con una gasa para eliminar cualquier impureza visible. Posteriormente, los sustratos se sumergieron en una solución jabonosa y se colocaron en un baño ultrasónico durante 15 min. Después, se enjuagaron con agua desionizada y se sumergieron en metanol para limpiarlos en un baño ultrasónico por 15 min. A continuación, se lavaron con acetona en baño ultrasónico por 15 min. Por último, se lavaron con isopropanol en baño ultrasónico por 15 min, y se secaron con aire caliente.

Los compósitos de P3HT/NiO en solución se depositaron mediante la técnica de spin coating ver Figura 24; para cada muestra, se utilizaron 50 μL de la solución, utilizando una velocidad de rotación de 2000 rpm. Se obtuvieron

películas homogéneas sobre ITO y vidrio Corning como se muestran en la Figura 24.

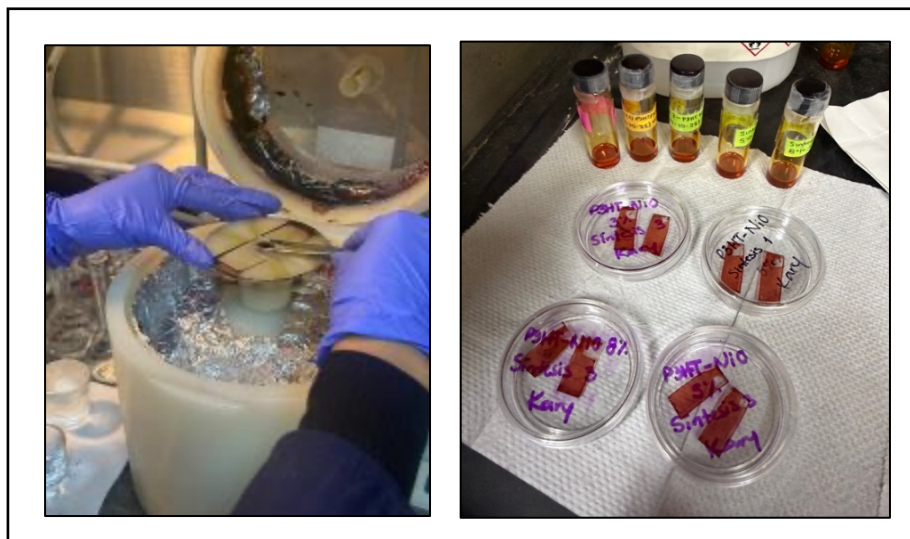


Figura 24. A) Spin coating y B) películas de P3HT/NiO sobre ITO y vidrio Corning.

3.7.1. Caracterización de las películas de P3HT Y P3HT/NiO

La caracterización de las películas de P3HT y P3HT/NiO se realizó utilizando el análisis por SEM y la espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis). Las imágenes del SEM se obtuvieron a 500, 1000, 5000 y 10000 aumentos con el objetivo de realizar un análisis morfológico superficial. Este análisis permitió determinar si las películas eran homogéneas, la distribución de fases en el caso de los composites, la presencia de aglomerados, así como la textura y posibles defectos superficiales.

Adicionalmente, se realizaron estudios de espectroscopía UV-Vis (190-1100 nm) en las películas. Esta técnica se utilizó para determinar las propiedades

ópticas, específicamente la capacidad de absorción de radiación en la región UV-Vis del espectro electromagnético. A partir de los espectros de absorción obtenidos, se estimó la energía de la banda prohibida (*band gap*) de cada material mediante el método de Tauc. Este método consiste en la construcción de una gráfica conocida como “gráfica de Tauc”, en la cual se relaciona el coeficiente de absorción con la energía del fotón incidente. La extrapolación de la región lineal de dicha gráfica hacia el eje de energía permite determinar el valor del *band gap*, parámetro fundamental para comprender el comportamiento electrónico y óptico de los materiales [33].

Asimismo, se realizaron pruebas de voltamperometría cíclica, técnica electroquímica que permite estudiar los procesos de oxidación y reducción que ocurren en las películas de P3HT, P3HT-NiO y PANI. A partir de los voltamperogramas obtenidos, es posible identificar los potenciales redox característicos, evaluar la reversibilidad de las reacciones electroquímicas y analizar la estabilidad de las películas durante ciclos repetidos.

Finalmente, se realizaron análisis mediante microscopía de fuerza atómica (AFM). Esta técnica permitió obtener imágenes de la superficie del material, proporcionando información detallada sobre la topografía, rugosidad y uniformidad de las películas. Estos parámetros son relevantes, ya que pueden influir en las propiedades ópticas y electroquímicas del dispositivo.

En conjunto, estas técnicas de caracterización permitieron una evaluación de las propiedades fisicoquímicas de las películas sintetizadas, las cuales fueron integradas en los DEC.

3.8. Fabricación de los dispositivos electrocrómicos simples y duales

Para la fabricación de los dispositivos electrocrómicos (DECs), se preparó primero un polielectrolito, para lo cual se pesaron 0.6256 g de

polimetilmetacrilato (PMMA), 0.8848 g de carbonato de etileno (EC), 0.14 g de perclorato de litio (LiClO_4), 0.725 mL de carbonato de propileno (PC) y 1 mL de tetrahidrofurano (THF). Todos los reactivos fueron añadidos en el orden en que se presentaron dentro de un vial y se mezclaron bajo agitación constante durante 24 h para asegurar su completa homogenización.

Una vez preparado el polielectrolito, se depositó una gota sobre la película activa (P3HT o P3HT-NiO) obtenida sobre vidrio ITO. Posteriormente, para el caso de los DEC's simples se colocó otro sustrato ITO solo sobre lo anterior, formando un arreglo tipo sándwich, ver Figura 25. Finalmente, el dispositivo fue sellado en todo su perímetro utilizando silicón caliente.

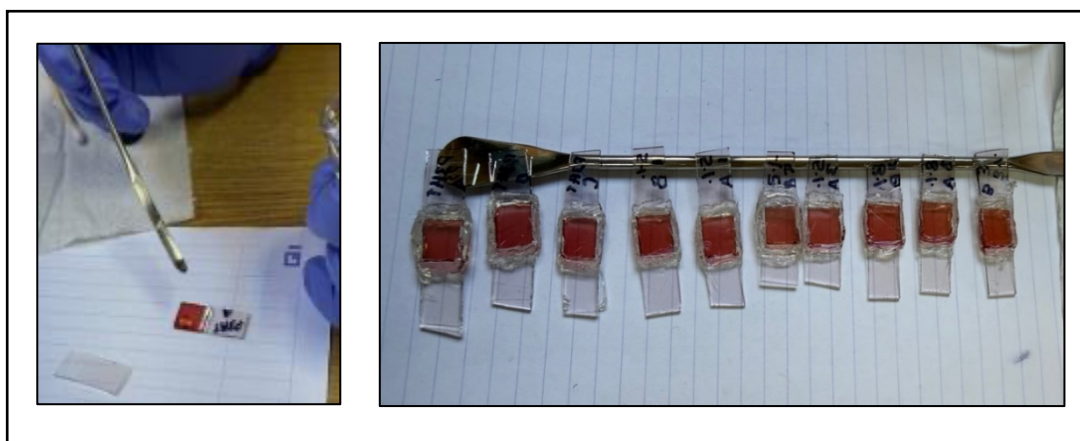


Figura 25. Ensamble de los dispositivos electrocrómicos.

Para la fabricación de los DEC's duales se obtuvieron dos películas sobre sustratos ITO, una de P3HT o P3HT-NiO y otra de polianilina (PANI). Para la obtención de la película de PANI, se colocó un vaso de precipitados sobre una parrilla de agitación con un agitador magnético en su interior. Se midieron 15 mL de ácido clorhídrico (HCl) 2M y se vertieron en un vaso de precipitado bajo agitación constante. Posteriormente, con ayuda de una micropipeta, se tomaron 200 μL del monómero anilina, el cual se añadió gota a gota al vaso de precipitado sin interrumpir la agitación. Se permitió la disolución completa del

monómero en la solución. A continuación, se colocaron dos sustratos de vidrio ITO en las paredes del vaso, procurando que no entraran en contacto con el agitador, depositamos lentamente nuestro agente oxidante, 30 mL de persulfato de amonio, y los dejamos una hora en agitación continua, después los sustratos fueron retirados.

Posteriormente, para la fabricación de los DEC's duales se utilizaron los mismos procedimientos (arreglo tipo sándwich, sellado con silicón, etc.) y polielectrolito preparado para los DEC's simples, solo que esta vez como contraelectrodo fue la película PANI depositada sobre ITO.

3.9. Caracterización de los dispositivos electrocrómicos simples y duales

La caracterización de los dispositivos electrocrómicos simples y duales se llevó a cabo mediante la transmitancia óptica. Esta técnica permite analizar la capacidad del material para transmitir la luz en función del voltaje aplicado, lo cual es fundamental en dispositivos electrocrómicos, ya que su principio de funcionamiento se basa en el cambio reversible del estado coloreado al estado transparente. A partir de estas mediciones, es posible determinar parámetros como el contraste óptico, la eficiencia de coloración y la estabilidad del cambio de estado entre las formas coloreada y decolorada.

Para la realización de las pruebas de transmitancia, se aplicaron voltajes de -1.4, 0 y 1.4 V con el fin de inducir los procesos de oxidación y reducción de las películas de P3HT, P3HT-NiO y PANI. Se estableció un tiempo total de medición de 60 s, con un intervalo de adquisición de datos de 2 s, obteniendo un total de 320 mediciones.

Adicionalmente, se llevaron a cabo estudios de cinética óptica, los cuales permiten analizar la velocidad de respuesta del dispositivo electrocrómico

durante los procesos de coloración y decoloración. A partir de estas pruebas, es posible obtener parámetros como los tiempos de conmutación (switching times), los cuales indican qué tan rápido los DEC's cambian entre sus diferentes estados ópticos. Para estas mediciones, se empleó un tiempo de 60 s, con un total de 6 ciclos, una potencia de láser de 2.4 μW y una longitud de onda de 532.2 nm, condiciones que permitieron monitorear con precisión los cambios en la transmitancia en función del tiempo. Estas condiciones permitieron evaluar el dispositivo ante estímulos eléctricos repetitivos.

En conjunto, estas técnicas de caracterización permitieron una evaluación integral del desempeño de los DEC's, abarcando la medición de transmitancia óptica y cinética óptica.

Capítulo 4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados y discusión de lo correspondiente a la investigación de los capacitores y posteriormente lo correspondiente a la investigación de las ventanas inteligentes.

4.1. Capacitores

La ecuación (1) se utilizó para determinar la capacitancia de cada uno de los dispositivos fabricados, considerando los parámetros físicos y dieléctricos correspondientes.

$$C = k \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

ec. (1)

C = Capacitancia

k = Constante dieléctrica relativa del material, acetato de celulosa = 1.3, poliéster = 3.4, mica = 3

ϵ_0 = Permitividad del vacío, $8.854 \times 10^{-12} \text{ F g}^{-1}$

A = Área de las placas metálicas

d = Espesor del dieléctrico

Los valores de capacitancia para los dispositivos con el acetato de celulosa obtenidos con el capacímetro y calculados, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Capacitancia calculada y medida del acetato de celulosa. Las celdas con sombreado gris contienen los valores de los electrodos de aluminio sin tratamiento electroquímico.

Con ataque químico				
Muestras	Área (m)	Espesor o distancia (m)	Capacitancia del capacímetro nF	Capacitancia calculada nF
Acetato de celulosa (1 gr)	0.000130	1.13E-04	0.033	0.0128
Acetato de celulosa (500 mg)	0.000008	2.00E-06	0.032	0.04445
Sin ataque químico				
Acetato de celulosa (1gr)	0.000120	7.50E-05	0.069	0.01778
Acetato de celulosa comercial (1 gr)	0.000110	1.20E-05	0.03	0.10186

Acetato de celulosa (500 mg)	0.000110	7.50E-05	0.058	0.016298
Acetato de celulosa (1gr) 200 μ L	0.000130	2.72E-04	0.015	0.0053

Los resultados muestran que los dispositivos fabricados con acetato de celulosa como material dieléctrico, empleando electrodos de aluminio sin tratamiento y con tratamiento electroquímico, presentan valores de capacitancia similares. Este comportamiento sugiere que el tratamiento electroquímico aplicado al aluminio no genera una mejora significativa en las propiedades capacitivas de los dispositivos.

De manera similar, los dispositivos elaborados con acetato de celulosa comercial y placas de aluminio sin tratar exhibieron valores de capacitancia del mismo orden de magnitud que aquellos fabricados con acetato de celulosa obtenido a partir de residuos de cigarro. Adicionalmente, se evaluó un dispositivo preparado con una concentración de 1 g de acetato de celulosa disuelto en 200 μ L de acetona, utilizando placas de aluminio sin tratamiento electroquímico. En este caso, los valores de capacitancia fueron similares a los otros dispositivos.

En conjunto, estos resultados indican que tanto los materiales empleados como el método de fabricación propuesto son viables para el desarrollo de capacitores de película con enfoque sostenible.

En la Tabla 3 se reportan los valores de capacitancia medidos a temperatura ambiente, así como a 60, 80 y 100 °C, para los dispositivos fabricados con acetato de celulosa. Los resultados obtenidos evidencian que la capacitancia se mantiene prácticamente constante en todo el intervalo de temperaturas, lo cual sugiere una buena estabilidad térmica de los dispositivos.

Tabla 3. Capacitancia a diferentes temperaturas con el acetato de celulosa.

Con ataque químico							
Muestras	Capacitancia experimental nF				Capacitancia teórica nF		
	24 °C	60°C	80°C	100°C	Área (m)	Espesor (m)	Capacitancia calculada
Acetato de celulosa (1 gr)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.0168	1.13E-04	0.17
Acetato de celulosa (500 mg)	0.03	0.03	0.02	0.02	0.00099	2.00E-05	0.56
Sin ataque químico							
Acetato de celulosa (1gr)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	7.50E-05	1.68
Acetato de celulosa comercial (1 gr)	0.05	0.04	0.04	0.03	0.01	1.20E-05	9.59
Acetato de celulosa (500 mg)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.0156	7.50E-05	2.39
Acetato de celulosa (1gr) 200 μL	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0156	2.72E-04	0.66

En la Tabla 4 se presentan los valores de capacitancia correspondientes a los dispositivos fabricados con poliéster y placas de aluminio, evaluados a diferentes temperaturas. Los resultados muestran que la capacitancia se mantiene prácticamente constante en el rango térmico analizado, lo que sugiere una adecuada estabilidad de los dispositivos. Asimismo, los valores de capacitancia obtenidos mediante cálculo teórico se encuentran en el mismo orden de magnitud que los valores experimentales, para el valor teórico se utilizó la ec. 1, y los valores experimentales fueron medidos directamente con el multímetro. Esto nos indica que el procedimiento de fabricación fue implementado de manera correcta y consistente.

Tabla 4. Capacitancias calculada y medida a diferentes temperaturas con poliéster como dieléctrico.

Poliéster	Capacitancia experimental nF				Capacitancia teórica nF		
	60 °C	80 °C	100 °C	24 °C	Área (m)	Espesor (m)	Capacitancia calculada
1	0.006	0.006	0.005	0.006	0.0001	0.000676	0.004
2	0.01	0.01	0.008	0.011	0.0001	0.000272	0.01
3	0.009	0.009	0.008	0.01	0.0001	0.000375	0.008

En la Tabla 5 se presentan los valores de capacitancia correspondientes a los dispositivos fabricados con mica como dieléctrico, evaluados a diferentes temperaturas. Los resultados muestran que la capacitancia se mantiene estable en todo el intervalo de temperatura, lo que sugiere una alta estabilidad en el desempeño de los dispositivos. Asimismo, los valores de capacitancia obtenidos mediante cálculo teórico son muy cercanos a los valores experimentales, lo que indica una buena concordancia entre ambos. Este comportamiento sugiere que el proceso de fabricación fue realizado de manera adecuada.

Tabla 5. Capacitancia calculada y medida a diferentes temperaturas con mica como dieléctrico.

Dieléctrico	Capacitancia experimental nF				Capacitancia teórica nF		
	60 °C	80 °C	100 °C	21 °C	Área (m)	Espesor (m)	Capacitancia calculada
Mica	0.02	0.02	0.019	0.02	0.0001	0.00014	0.045

En las Figuras 26 a 28 se presentan los diagramas de Nyquist obtenidos en las pruebas de impedancia para los dispositivos fabricados con electrodos de aluminio sin tratar y acetato de celulosa, mica, y poliéster, respectivamente. Los dispositivos fabricados con acetato de celulosa y mica presentaron una respuesta caracterizada por valores elevados de impedancia y una tendencia semicircular amplia en todo el rango de frecuencias. Este comportamiento sugiere una alta resistencia interna y una importante contribución capacitiva derivada de la polarización del material dieléctrico. La desviación respecto al comportamiento ideal puede atribuirse a procesos de relajación dieléctrica y a la naturaleza heterogénea de los materiales. Asimismo, la posible absorción de humedad por parte del acetato de celulosa puede favorecer mecanismos adicionales de polarización, incrementando las pérdidas internas del dispositivo.

Por otra parte, el capacitor elaborado con poliéster mostró una respuesta más vertical en todo el rango de frecuencias. Este comportamiento es muy similar al de un capacitor ideal. En consecuencia, este dispositivo presentó el desempeño más eficiente para el almacenamiento electrostático de energía en todo el rango de frecuencias probado.

Es importante mencionar que, al inicio de la prueba, en el rango de altas frecuencias (entre 1 y 30 kHz, diagramas insertados), se identifica una línea recta cuasivertical en todos los dispositivos. Este comportamiento es característico de los capacitores, dado que un capacitor ideal exhibe una línea vertical que forma un ángulo de 90° con respecto a la componente real de la impedancia (Z') [16]. Esto nos indica que los dispositivos desarrollados tienen el potencial para aplicaciones de alta frecuencia como por ejemplo en instrumentos musicales.

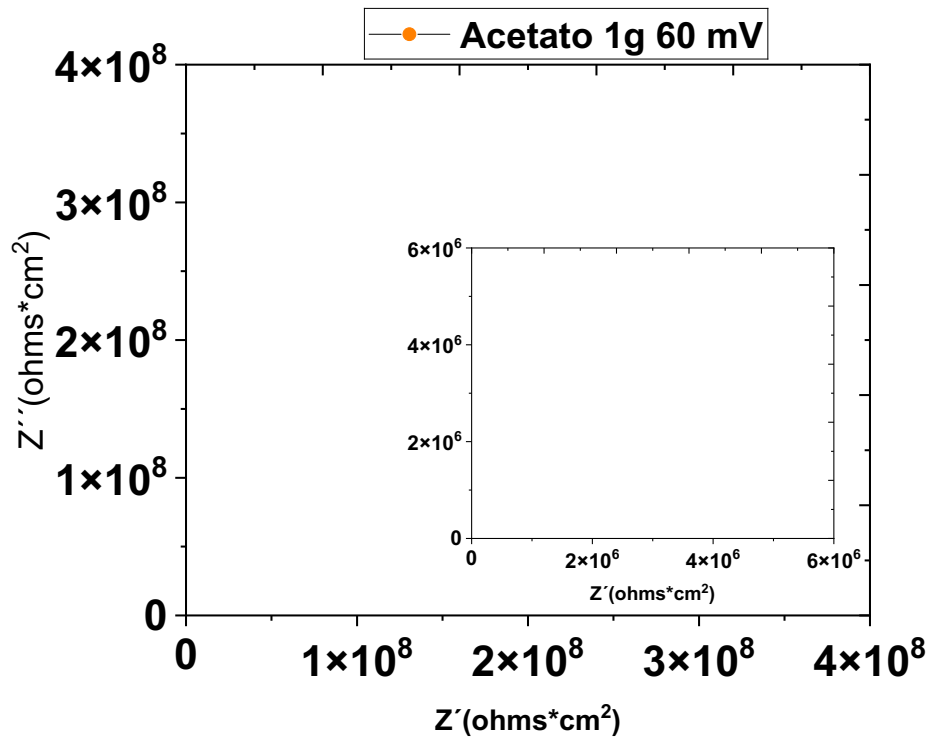


Figura 26. Diagrama de Nyquist para el dispositivo fabricado con acetato de celulosa.

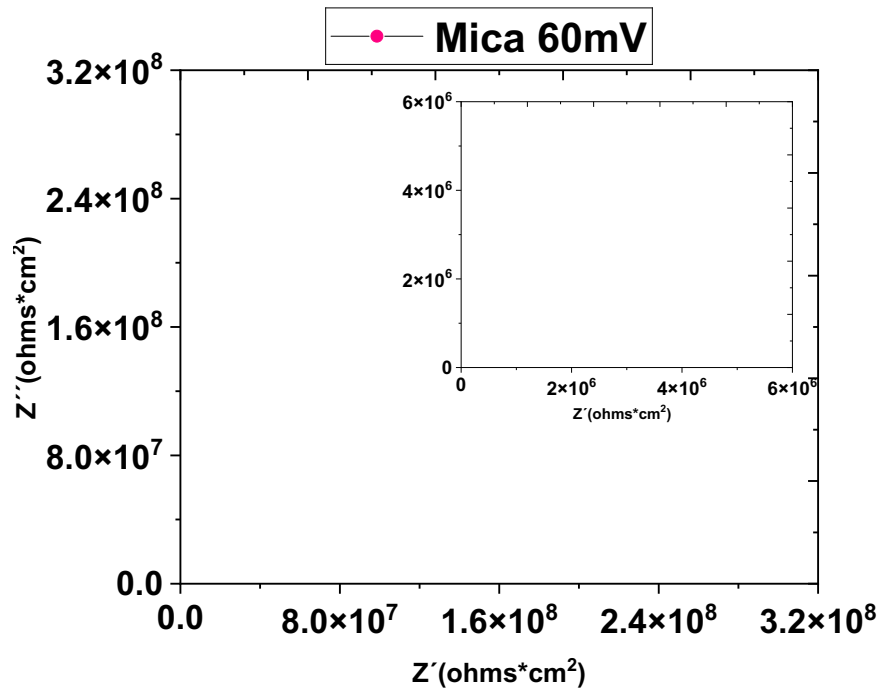


Figura 27. Diagrama de Nyquist para el dispositivo fabricado con mica.

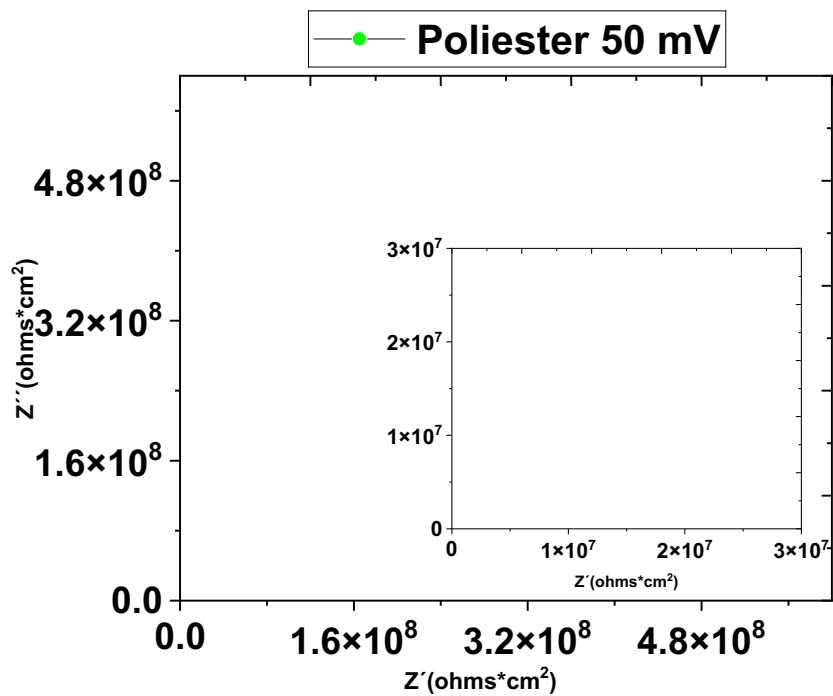


Figura 28. Diagrama de Nyquist para el dispositivo fabricado con poliéster.

4.2. Ventanas Inteligentes

4.2.1 Propiedades fisicoquímicas de NiO, P3HT y compósitos

4.2.1.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La micrografía de SEM de la Figura 29 correspondiente a la *muestra 1* de NiO muestra una morfología constituida por aglomerados irregulares de partículas pequeñas. Se observa una morfología no homogénea del material, con agregados compactos con superficies rugosas y formados de partículas granulares. A mayor aumento (1000x), se distinguen claramente partículas

submicrométricas fuertemente aglomeradas, lo que sugiere una elevada interacción entre partículas durante el proceso de síntesis y secado.

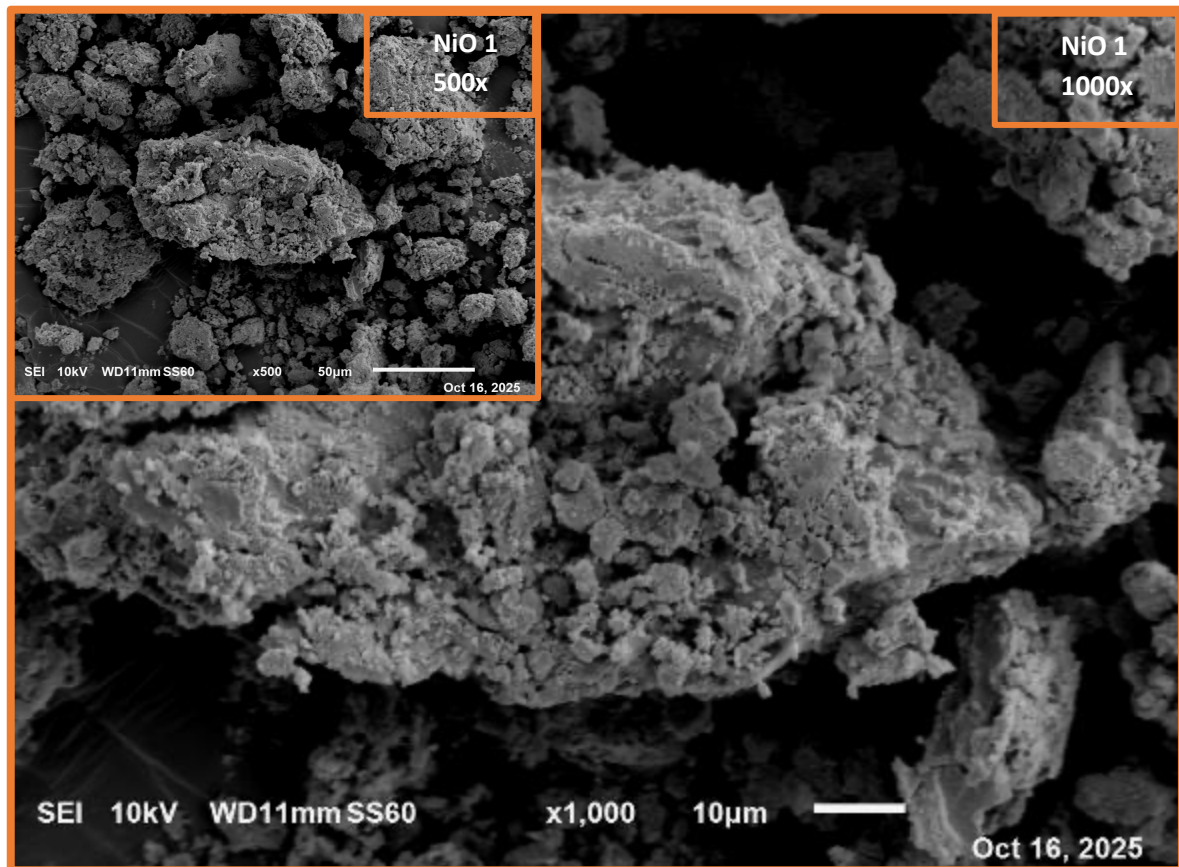


Figura 29. Micrografía de la muestra 1 en polvo del NiO.

La micrografía de SEM de la Figura 30 correspondiente a la *muestra 2* de NiO presenta una morfología más compacta y menos porosa en comparación con la *muestra 1*, ver Figura 29. A 500x se observaron aglomerados de mayor tamaño con superficies más densas y menos definidas. En la imagen a 1000x se aprecia una morfología más homogénea y continua, con partículas finas incrustadas dentro de una matriz aglomerada. Esto puede indicar una mayor unión de granos o crecimiento de grano, posiblemente asociado a variaciones en las condiciones de síntesis.



Figura 30. Micrografía de la muestra 2 en polvo del NiO.

La micrografía de SEM de la Figura 31 para la *muestra 3* de NiO exhibe una morfología de aglomerados más porosos que las *muestras 1 y 2*, y con mayor rugosidad superficial, mostrando una morfología porosa más homogénea que la *muestra 1*. A 500x se observa una distribución relativamente uniforme de agregados, con presencia de cavidades y mejor definición de las partículas. A 1000x se distinguen claramente estructuras altamente rugosas formadas por partículas aglomeradas, lo que sugiere una mayor área superficial efectiva. En este caso a diferencia de la *muestra 2* el agregado del NaOH fue en solución por goteo, lo que probablemente contribuyó a una mejor interacción de los materiales formando una superficie con mayor rugosidad. Una mayor rugosidad indica mayor área de contacto con el entorno, que para el caso de

los DEC's se tendría un mayor contacto con el electrolito lo que beneficiaría el mejor desempeño del dispositivo.

En base a estos resultados se seleccionaron las *muestras 1 y 3* por mostrar una mayor rugosidad para la síntesis de los composites de P3HT/NiO.

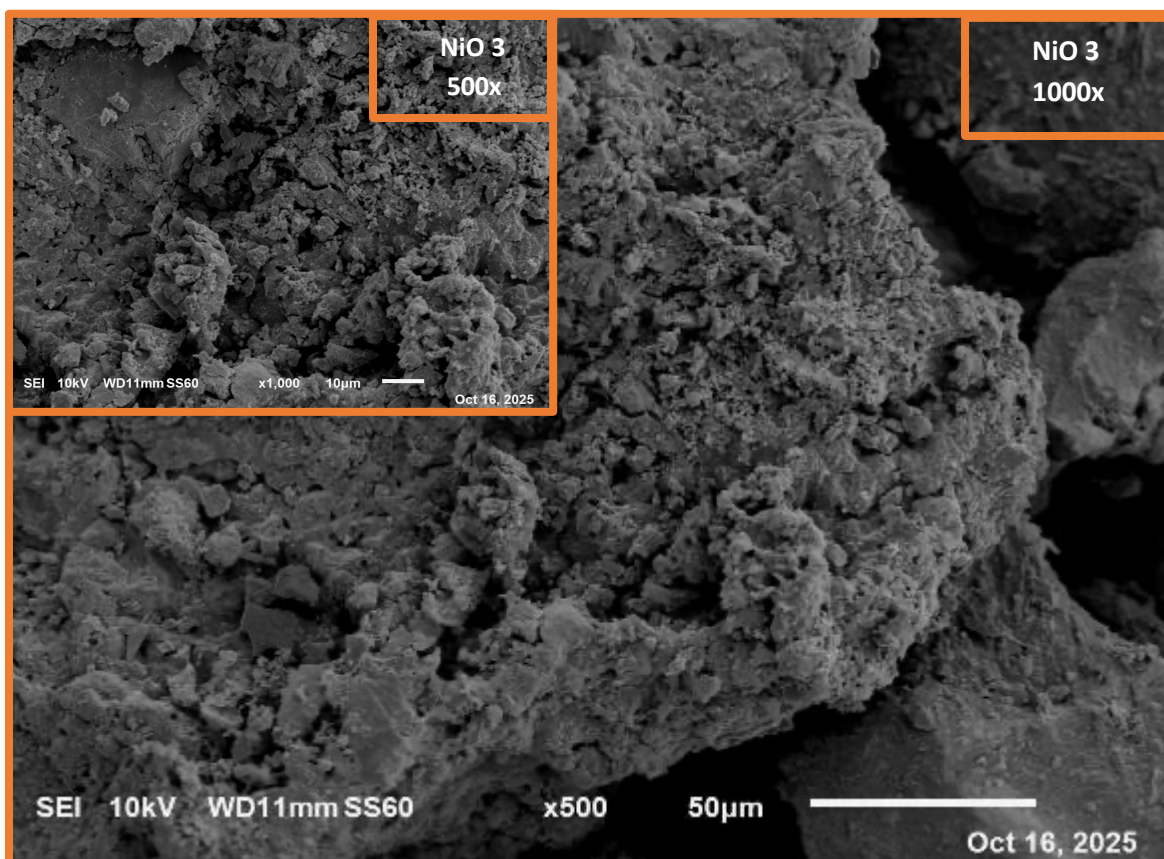


Figura 31. Micrografía de la muestra 3 en polvo del NiO.

La micrografía de SEM de la Figura 32 correspondiente al P3HT muestra una superficie formada por estructuras tipo fibrilar y dominios entrelazados. A un aumento de 5000x se observa una red densa de fibras poliméricas ramificadas, lo cual es típico del autoensamblaje del P3HT durante el proceso de formación de la película. Estas estructuras muestran que el material tiene una distribución relativamente ordenada en algunas zonas, lo que ayuda a que las cargas eléctricas se muevan con mayor facilidad dentro del material. La

superficie se observa uniforme y con una rugosidad similar en toda la muestra, sin partículas o acumulaciones extrañas, lo que indica que el polímero se encuentra puro y sin otros materiales añadidos.

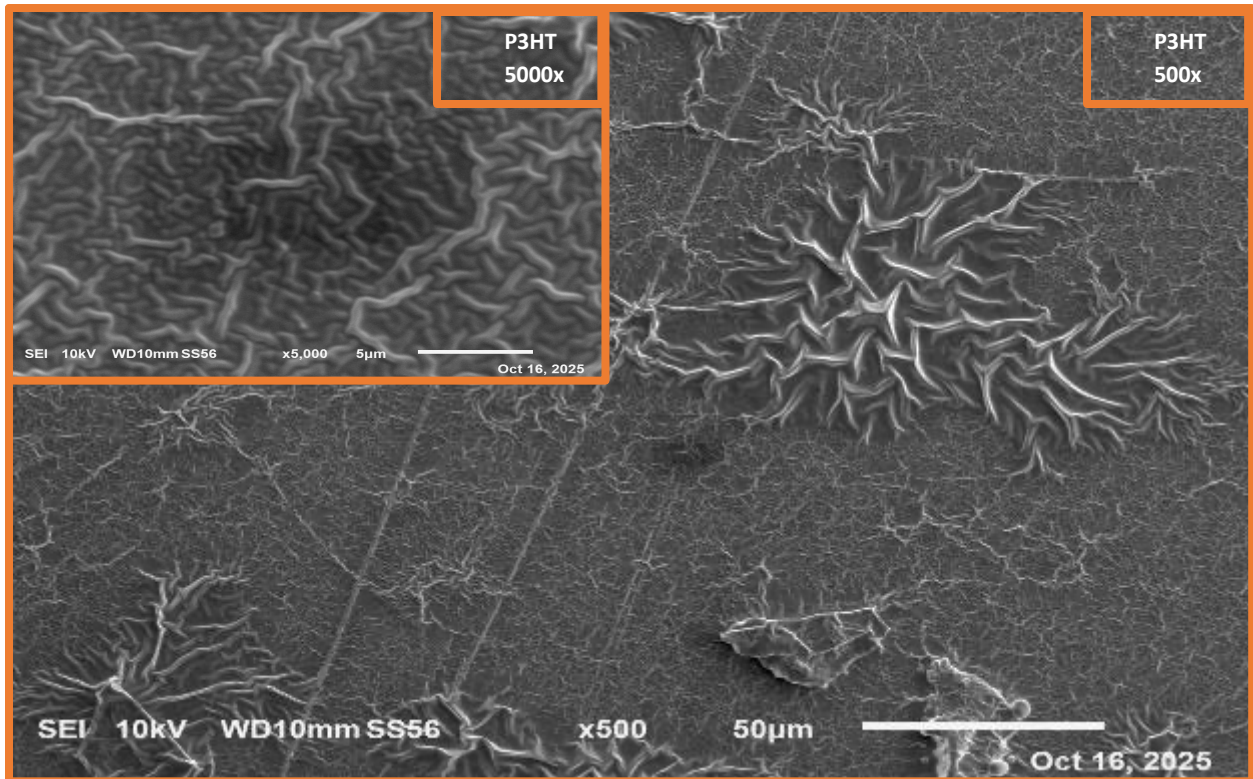


Figura 32. Micrografía de la película del P3HT.

La micrografía de SEM de la figura 33 para el compuesto P3HT/NiO-*muestra 1* al 5% presenta una morfología donde se observa claramente la interacción entre la matriz polimérica y las partículas de óxido metálico. A 500x y 5000x se distinguen estructuras fibrilares del P3HT interrumpidas por la presencia de dominios más densos y contrastados, correspondientes a la incorporación del NiO. Se observan zonas donde las partículas de NiO inducen la formación de aglomerados locales, lo cual puede influir en la movilidad de portadores de carga y en las propiedades electrocrómicas del sistema.

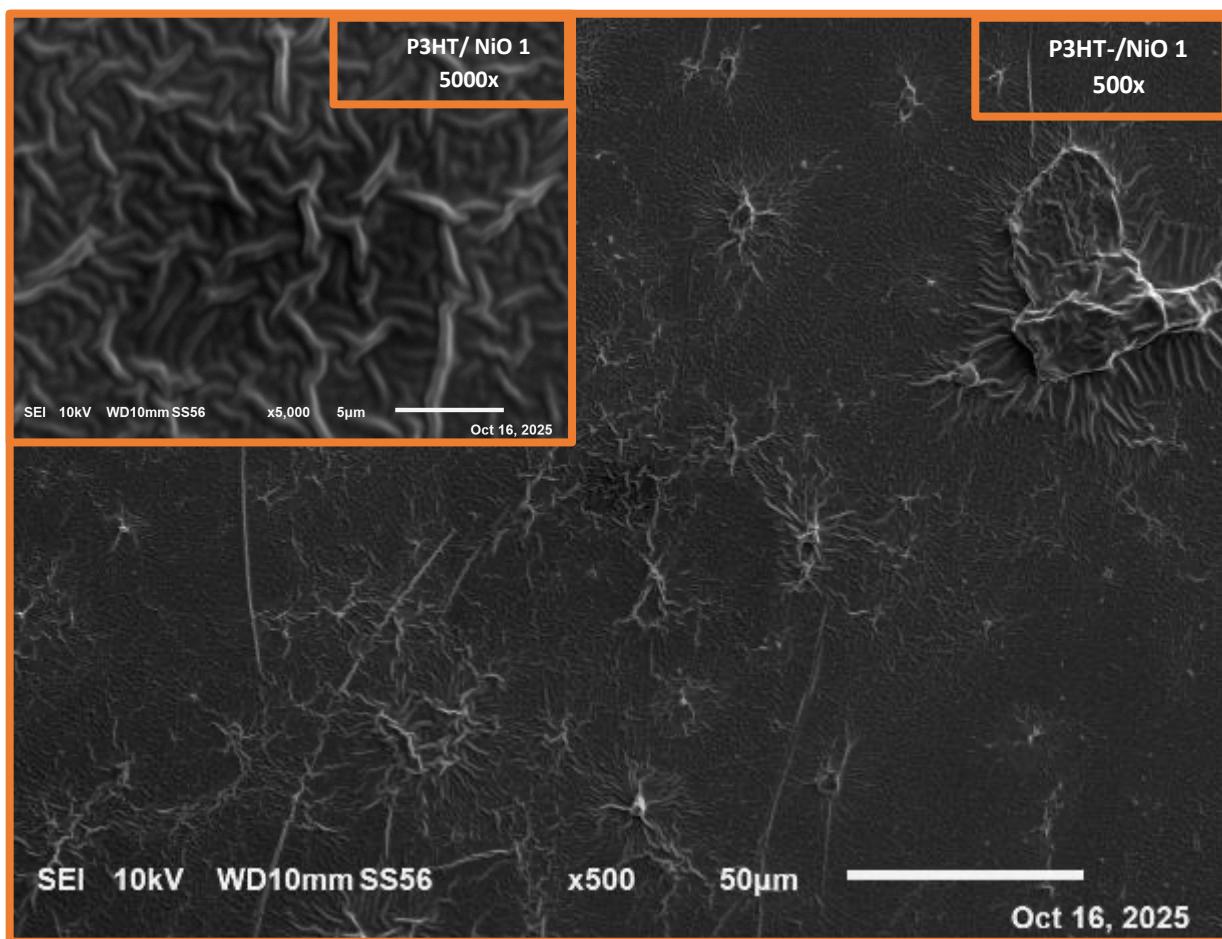


Figura 33. Micrografía de la película del P3HT/NiO-1,5%.

La micrografía de SEM de la figura 34 para el compuesto P3HT/NiO al 5% de la *muestra 3*, muestra una morfología más heterogénea en comparación con la *muestra 1*. A un aumento de 500x se observa una película continua con pequeñas redes o líneas distribuidas sobre la superficie, lo que puede relacionarse con la distribución del NiO dentro de la matriz polimérica. También, se aprecia una estructura más grande con forma radial o tipo “flor”, rodeada por filamentos alargados, indicando una posible acumulación local del material inorgánico o una región donde ocurrió crecimiento preferencial de cristales.

En la imagen ampliada a 5000x se distinguen estructuras alargadas y entrelazadas con apariencia fibrilar o laminar, la superficie presenta rugosidad moderada y distribución relativamente uniforme, sin grandes aglomerados visibles, lo que indica una buena incorporación del NiO dentro de la película compuesta.

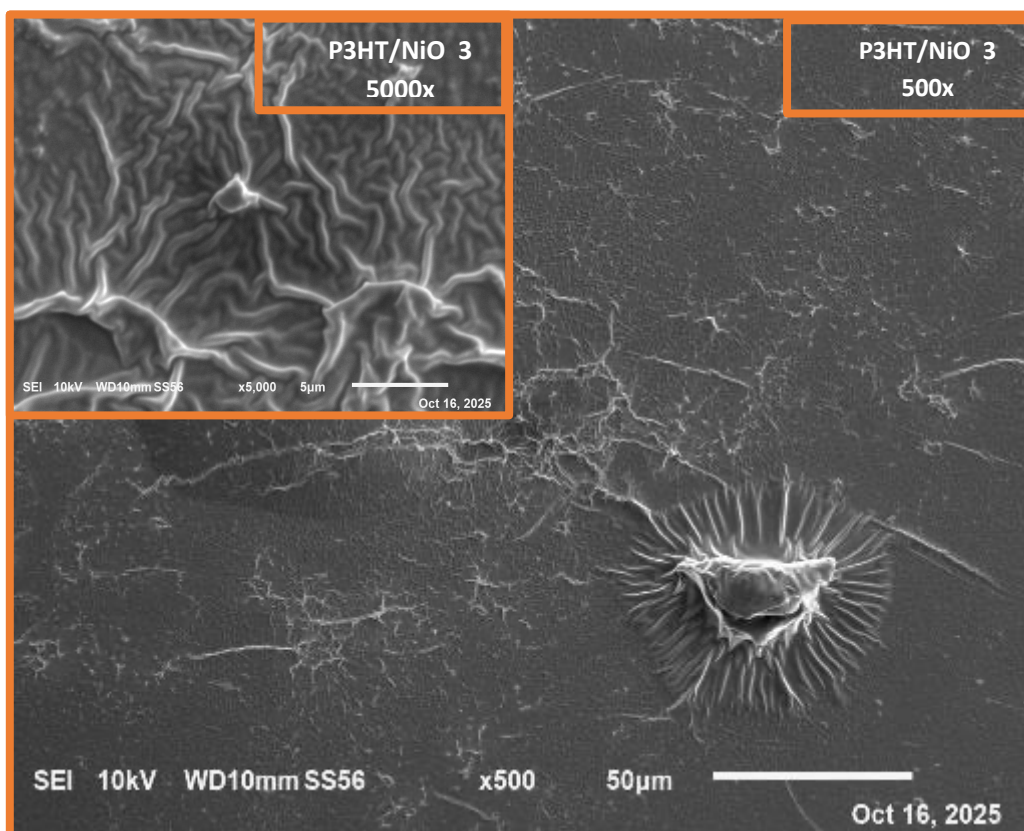


Figura 34. Micrografía de la película del P3HT/NiO-3,5%

Se observó una mayor modificación de la morfología del P3HT en la *muestra* 3, probablemente se debe a una mejor incorporación del NiO en el P3HT.

4.2.2. Difracción de rayos X

En los difractogramas de rayos X presentados en la Figura 35 se observan los patrones de difracción correspondientes a las tres muestras de NiO obtenidos con diferentes parámetros. En los tres difractogramas, ver Figura 35 se

identifican picos característicos del NiO localizados aproximadamente en $2\theta \approx 37^\circ, 43^\circ, 63^\circ, 75^\circ$ y 79° , los cuales corresponden a los planos cristalinos (111), (200), (220), (311) y (222), respectivamente [14]. Estos resultados son coherentes con la estructura hexagonal de wurtzita de las nanopartículas de NiO se caracteriza según los datos de JCPDS (Tarjeta n.º 47–1049) [14]. Esto confirma la formación exitosa de la fase cristalina en todas las muestras analizadas.

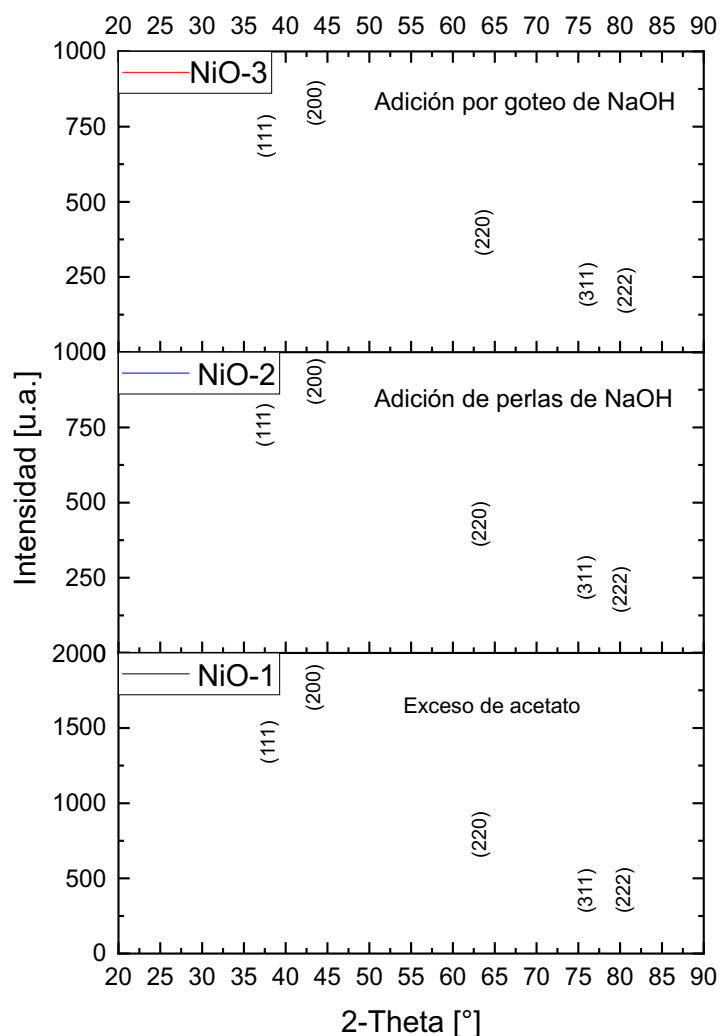


Figura 35. Difractogramas del NiO para los tres parámetros.

Se observan diferencias significativas en la intensidad y definición de los picos entre las muestras. La *muestra NiO-1* (con exceso de acetato) presenta picos de mayor intensidad y definición, lo cual sugiere un mayor tamaño de cristal y una menor dispersión estructural. En contraste, las muestras NiO-2 (con adición de perlas de NaOH) y NiO-3 (con adición de NaOH por goteo) exhiben picos más anchos, lo que indica tamaños de cristal más reducidos y un posible incremento en la densidad de defectos estructurales.

Asimismo, los patrones obtenidos fueron comparados con patrones de NiO, ver Figura 36, reportados en la literatura, corroborando la adecuada síntesis del material.

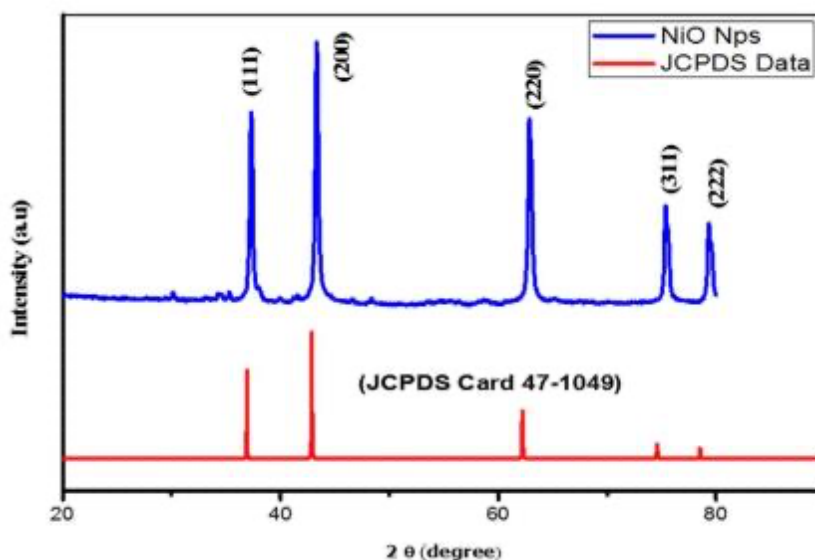


Figura 36. Patrones de difracción del NiO reportados en [14]

Los valores correspondientes al tamaño de cristal y al grado de cristalinidad de cada muestra se presentan en la tabla 6, los cuales fueron determinados mediante la ecuación de Scherrer, ver ec (2).

$$D = \frac{k\lambda}{B \cos \theta} \quad \text{ec} \quad (2)$$

D = tamaño del cristalito

K = constante o factor de forma (0.9)

λ = longitud de onda

B = ancho a media altura del pico más intenso

θ = ángulo de Bragg

El grado de cristalinidad de las muestras se determinó a partir de los patrones de difracción de rayos x (DRX), mediante el método de integración de áreas. Para ello, los difractogramas fueron analizados utilizando el software Origin, donde se realizó la integración del área correspondiente a las regiones cristalinas, asociadas a los picos de difracción del área total comprendida bajo la curva del difractograma.

Tabla 6. Tamaño de cristal y grado de cristalinidad del NiO.

Sample	Grado de cristalinidad (%)	Tamaño de cristal (nm)
NiO 1	46.49	17.03
NiO 2	69.02	8.14
NiO 3	68.34	8.03

El análisis cuantitativo muestra que la muestra NiO-1 posee un tamaño de cristal de 17.03 nm y un grado de cristalinidad de 46.49%, mientras que las muestras NiO-2 y NiO-3 presentan tamaños de cristal considerablemente

menores (8.14 nm y 8.03 nm, respectivamente) y mayores grados de cristalinidad (aproximadamente 69%), ver Tabla 6.

Con base en estos resultados, se seleccionó la muestra 3 de NiO como la más adecuada, debido a que fue obtenida bajo un control más preciso en la adición del agente precipitante (NaOH por goteo), lo que favoreció una mayor interacción de los materiales en la formación del NiO, además mostró un material más poroso. Para comparación se escoge la muestra 1 de NiO porque mostró un espectro de rayos X mejor definido además de que también mostró porosidad.

La Figura 37 muestra los difractogramas de rayos X correspondientes al P3HT y a los compósitos P3HT/NiO con diferentes concentraciones de óxido de níquel. En todos los difractogramas se observan las reflexiones características del P3HT, destacando los planos cristalográficos (100), (200), (300), (002) y (120) localizados a valores de 2θ de 5.24° , 10.56° , 15.98° , 21.40° y 23.72° . Los índices de Miller fueron identificados con la ficha de P3HT:00-54-2080 (sistema cristalino: Ortorrómbico). [34]

Se determinó el tamaño de cristalito mediante la ecuación de Scherrer, ver ec (2) empleando la reflexión (100) del P3HT, debido a que esta reflexión representa el ordenamiento lamelar característico del polímero y es la más utilizada en la literatura para este tipo de materiales.

Los parámetros necesarios para el cálculo fueron obtenidos mediante un ajuste gaussiano realizado en el software Origin. A partir de dicho ajuste se determinaron la posición del máximo de difracción (2θ) y el ancho completo a media altura (FWHM). Posteriormente, el valor de 2θ fue dividido entre dos para obtener el ángulo de Bragg (θ), mientras que el FWHM fue convertido de grados a radianes.

Por otra parte, el grado de cristalinidad fue determinado mediante el análisis de áreas de las regiones cristalinas y amorfas de los difractogramas utilizando el software Origin.

Los valores obtenidos para el tamaño de cristalito y el grado de cristalinidad se presentan en la Tabla 7.

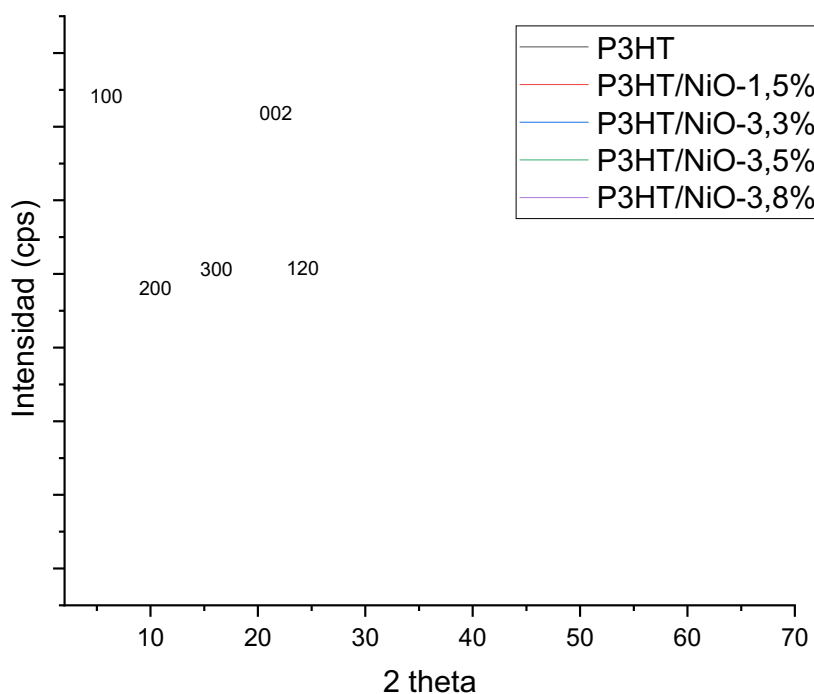


Figura 37. Difractograma del P3HT y composites.

Para el P3HT sin NiO se obtuvo un grado de cristalinidad de 36.41 % y un tamaño de cristal de 10.13 nm ver Tabla 7. Después de incorporar 1,5 % de NiO, el grado de cristalinidad aumentó hasta 44.41 %, mientras que el tamaño de cristal incrementó a 11.11 nm. En la muestra P3HT/NiO-3,3 % se obtuvo el

mayor tamaño de cristal, con un valor de 12.23 nm, acompañado de un grado de cristalinidad de 41.11 %, ver Tabla 7.

El mayor grado de cristalinidad se obtuvo para la muestra P3HT/NiO-3,5 %, con un valor de 49.69 %, mientras que su tamaño de cristal fue de 10.85 nm. Este resultado en cristalinidad, representa un incremento de aproximadamente 13.28 puntos porcentuales respecto al P3HT puro.

Por otro lado, al incrementar la concentración de NiO hasta 8 %, el grado de cristalinidad disminuyó hasta 37.62 %, valor cercano al obtenido para el P3HT puro, mientras que el tamaño de cristal se mantuvo en 11.11 nm.

Tabla 7. Tamaño de cristal y grado de cristalinidad del P3HT y compositos.

Muestra	Tamaño de cristal (nm)	Grado de cristalinidad (%)
P3HT	10.13	36.41
P3HT/NiO-1,5%	11.11	44.41
P3HT/NiO-3,3%	12.23	41.11
P3HT/NiO-3,5%	10.85	49.69
P3HT/NiO-3,8%	11.11	37.62

4.2.3. Voltamperometría cíclica

Los análisis de voltamperometría cíclica de las películas de P3HT y los materiales compuestos P3HT/NiO obtenidos a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹ muestran procesos redox característicos asociados a la oxidación y reducción de las cadenas del polímero.

Para el P3HT puro, se observa la presencia de un pico de oxidación principal localizado aproximadamente a 648 mV y un pico de reducción alrededor de

460 mV, ver Figura 38. Además, la densidad de corriente aumenta considerablemente a potenciales superiores a 1000 mV, comportamiento asociado a la formación de especies oxidadas del polímero. El aumento progresivo de la corriente durante los ciclos indica la activación electroquímica del material y una adecuada estabilidad durante el proceso redox.

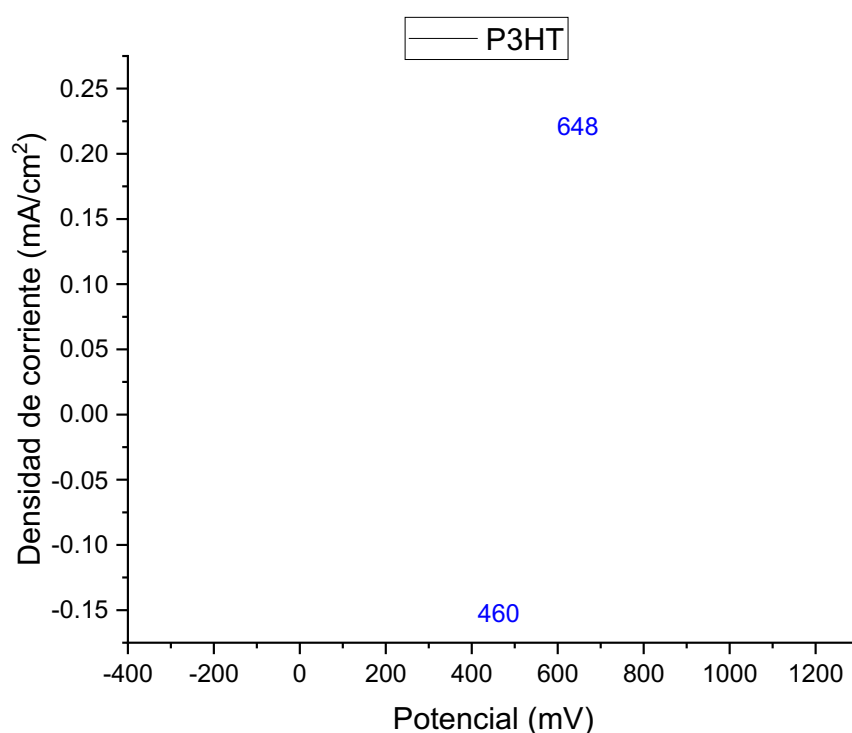


Figura 38. Voltamperograma del P3HT.

Para la muestra P3HT/NiO-1,5%, ver Figura 39, el pico de oxidación se localiza en 552 mV, mientras que el pico de reducción aparece en 318 mV. En comparación con el P3HT puro, ambos picos se desplazan hacia potenciales más bajos, indicando que la incorporación de NiO facilita los procesos de

transferencia de carga. Además, esta muestra presenta la relación Q_{ox}/Q_{red} más alta (2.17), sugiriendo una mayor contribución de los procesos oxidativos, lo que indica que el proceso redox es menos reversible, ver Tabla 8.

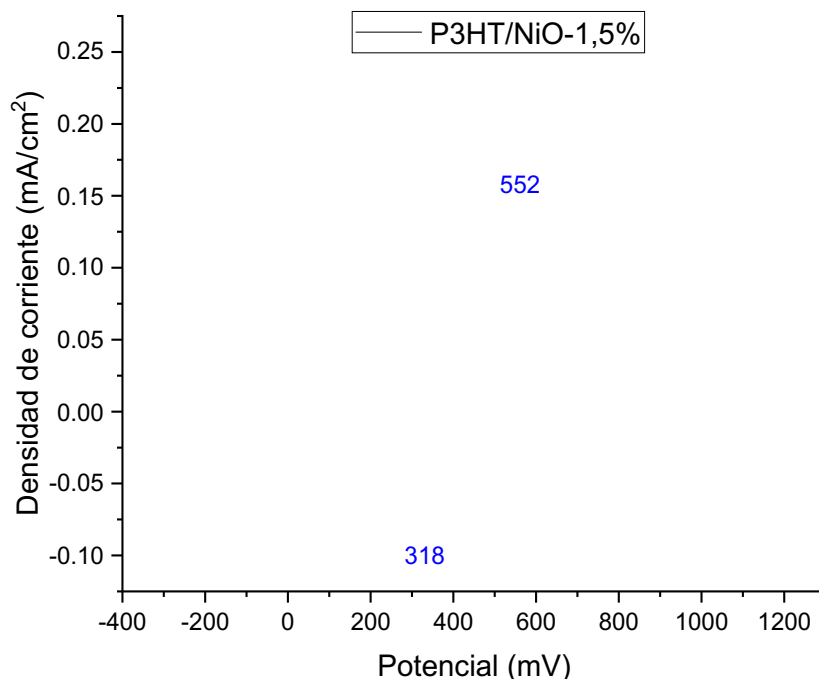


Figura 39. Voltamperograma del P3HT/NiO-1,5%.

La muestra P3HT/NiO-3,3%, ver Figura 40, exhibe un pico de oxidación en 602 mV y un pico de reducción en 357 mV. Se observa un aumento de la densidad de corriente respecto al P3HT puro, lo que indica una mejora en la actividad electroquímica atribuida a la interacción entre el polímero conductor y las nanopartículas de NiO. Asimismo, presenta los valores más altos de carga anódica ($Q_{ox} = 6.32 \text{ mC/cm}^2$), ver Tabla 8.

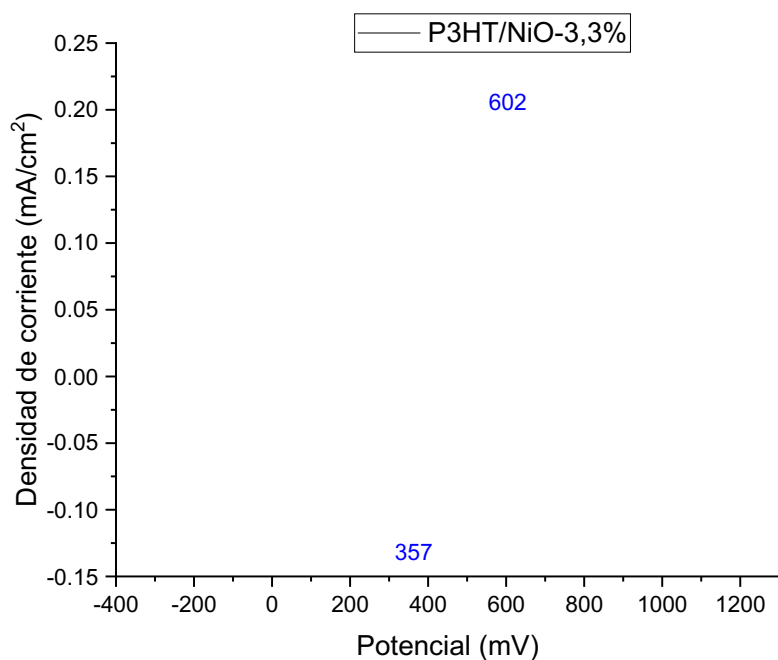


Figura 40. Voltamperograma del P3HT/NiO-3,3%.

En la muestra P3HT/NiO-3,5%, ver Figura 41, el pico de oxidación se encuentra en 685 mV, mientras que el de reducción aparece en 416 mV. El desplazamiento del pico anódico hacia potenciales más positivos indica que el proceso de oxidación requiere mayor energía en comparación con las muestras de menor contenido de NiO. Además, se observa una disminución de la densidad de corriente y de la carga almacenada respecto a la muestra con 3,3 % de NiO.

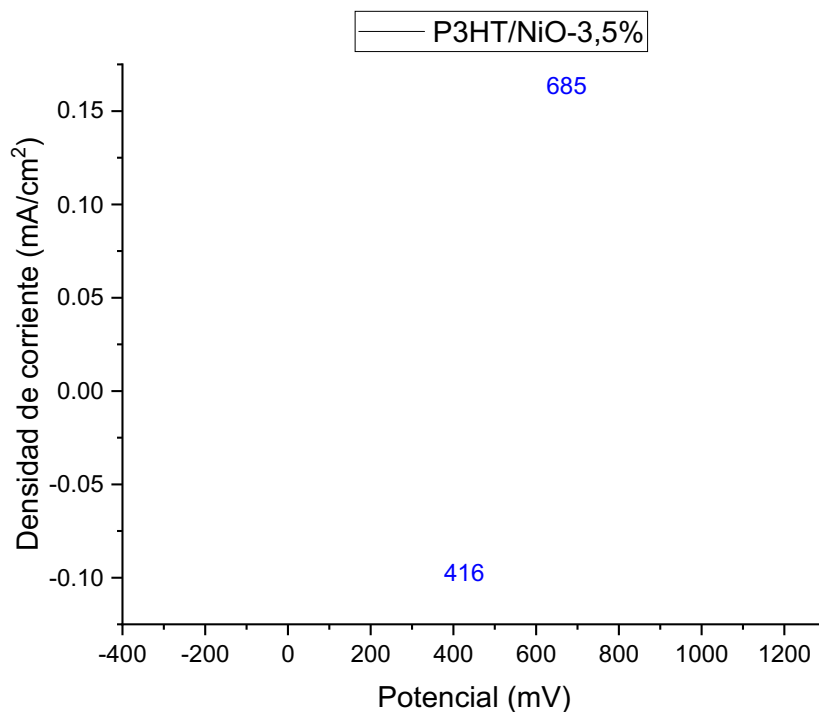


Figura 41. Voltamperograma del P3HT/NiO-3,5%.

La muestra P3HT/NiO-3,8 %, ver Figura 42, presenta un pico de oxidación en 676 mV y un pico de reducción en 450 mV. Aunque mantiene una respuesta redox bien definida, las densidades de corriente son menores que las observadas para las concentraciones intermedias de NiO. Esto puede atribuirse a una posible aglomeración de partículas.

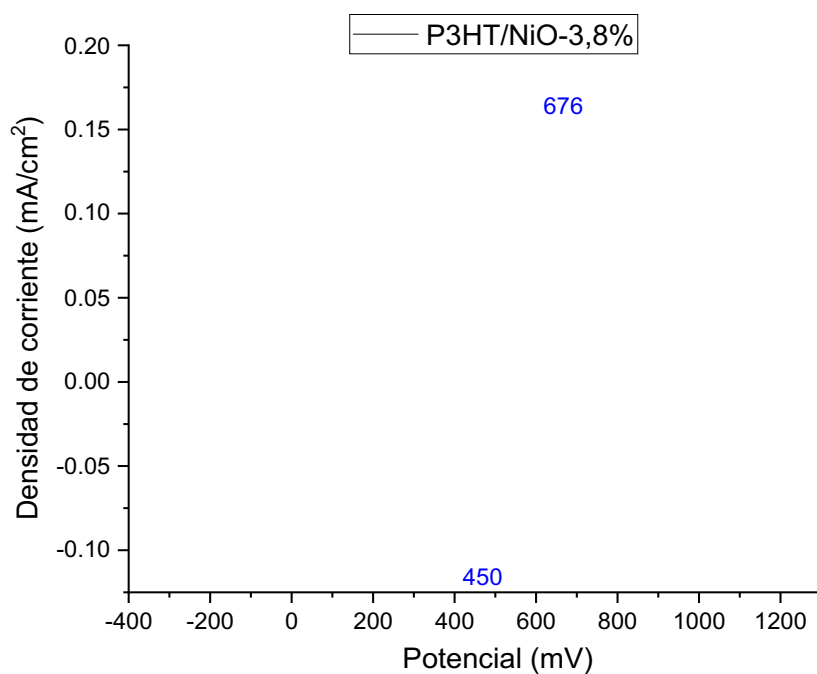


Figura 42. Voltamperograma del P3HT/NiO-3,8%

Tabla 8. Valores de Q_{ox} , Q_{red} y Q_{ox}/Q_{red} para el P3HT y sus compósitos.

Muestra	Q_{ox} (mC/cm ²)	Q_{red} (mC/cm ²)	Q_{ox}/Q_{red}
P3HT	4.6789	3.3568	1.3938
P3HT/NiO-1, 5%	6.1962	2.8501	2.1740
P3HT/NiO-3, 3%	6.3202	3.6646	1.7246
P3HT/NiO-3, 5%	4.683	2.6237	1.7849
P3HT/NiO-3, 8%	3.0705	3.0705	1.5184

La figura 43 muestra el voltamperograma del segundo ciclo de cada muestra. En comparación con el P3HT puro, los compósitos P3HT/NiO-1,5% y P3HT/NiO-3,3% presentan un desplazamiento de los potenciales redox hacia valores menos positivos. La muestra P3HT/NiO-1,5% mostró el mayor corrimiento, con desplazamientos de -96 mV y -165 mV para los procesos de oxidación y reducción, respectivamente. Este comportamiento indica una disminución de la energía requerida para llevar a cabo los procesos redox. Por su parte, la muestra P3HT/NiO-3,3% presentó corrimientos de -56 mV en oxidación y -125 mV en reducción. Aunque estos desplazamientos son menores, dicha muestra exhibió mayores densidades de corriente en el pico de oxidación y una mayor área de ciclo de la curva voltamétrica, lo que sugiere una mejora en la capacidad de transferencia y almacenamiento de carga. Estos resultados indican que la incorporación de NiO dependiendo de la concentración, puede modificar favorablemente las propiedades electroquímicas del P3HT, siendo la composición de 3,3% la que proporciona el mejor equilibrio entre actividad electroquímica y capacidad de intercambio de carga.

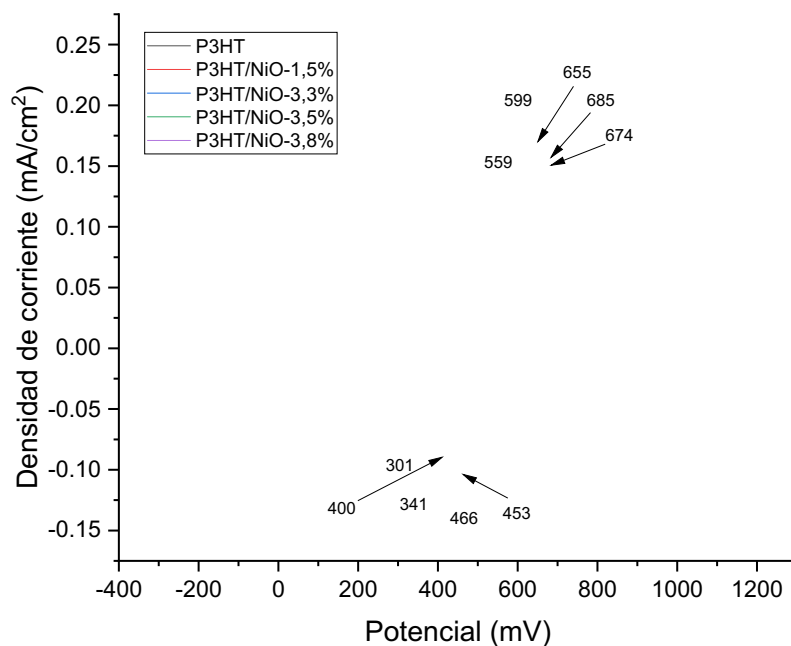


Figura 43. Voltamperograma del segundo ciclo de cada muestra.

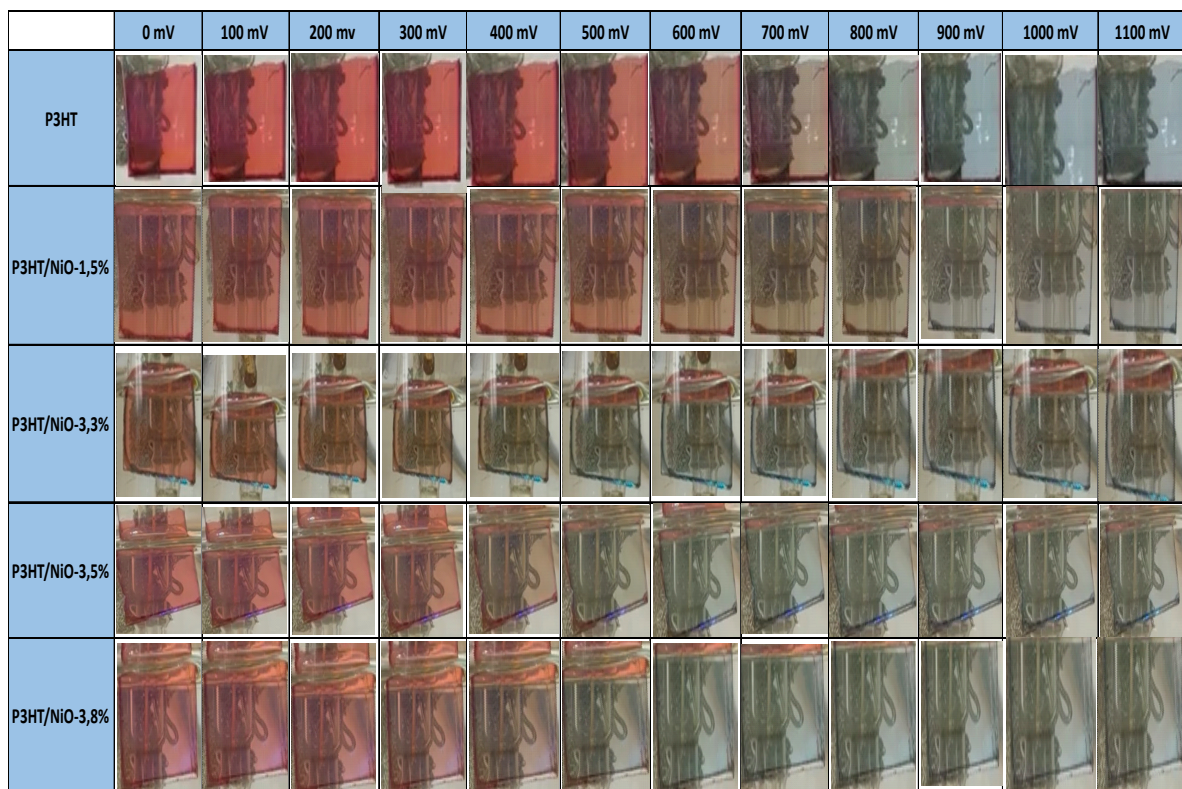
La Figura 44 presenta las diferentes tonalidades observadas para el P3HT puro y los compósitos P3HT/NiO al aplicar potenciales entre 0 y 1100 mV durante los procesos de oxidación y reducción. Cuando se aplica un potencial a las películas poliméricas se inducen reacciones electroquímicas de oxidación y reducción que generan cambios en la coloración del material. La magnitud de estos cambios depende tanto del potencial aplicado como de la concentración de NiO incorporada en la matriz polimérica. Como consecuencia, los dispositivos electrocrómicos obtenidos presentan diferentes intensidades de coloración y decoloración en función de la composición del material.

Durante el barrido anódico, el P3HT puro experimentó una transición gradual desde una tonalidad rojiza hacia una coloración gris-azulada al aumentar el potencial. De manera similar, los compósitos P3HT/NiO mostraron cambios

progresivos de color; sin embargo, la incorporación de NiO modificó la intensidad y velocidad de estas transiciones. Las muestras P3HT/NiO-3,3%, P3HT/NiO-3,5% y P3HT/NiO-3,8% exhibieron cambios de coloración roja a azul a menor potencial, indicando un intercambio de carga más fácil ó rápido. Durante el barrido inverso, desde 1100 mV hasta potenciales negativos, las películas recuperaron prácticamente sus tonalidades iniciales, evidenciando la reversibilidad de los procesos electroquímicos.

El intercambio de carga eléctrica durante las reacciones de oxidación (almacenamiento de carga) y reducción (liberación de carga) se determinó mediante la integración del área bajo las ramas anódica y catódica de los voltamperogramas cíclicos, respectivamente. La carga oxidativa (Q_{ox}) se calculó a partir del área integral de la rama anódica, mientras que la carga reductiva (Q_{red}) se obtuvo a partir del área integral de la rama catódica. Los valores obtenidos para cada material se presentan en la Tabla 8. Asimismo, la reversibilidad electroquímica de los sistemas fue evaluada mediante la relación Q_{ox}/Q_{red} , donde valores más cercanos a la unidad indican una mayor recuperación de la carga almacenada y, por lo tanto, una mayor reversibilidad electroquímica.

A)



B)

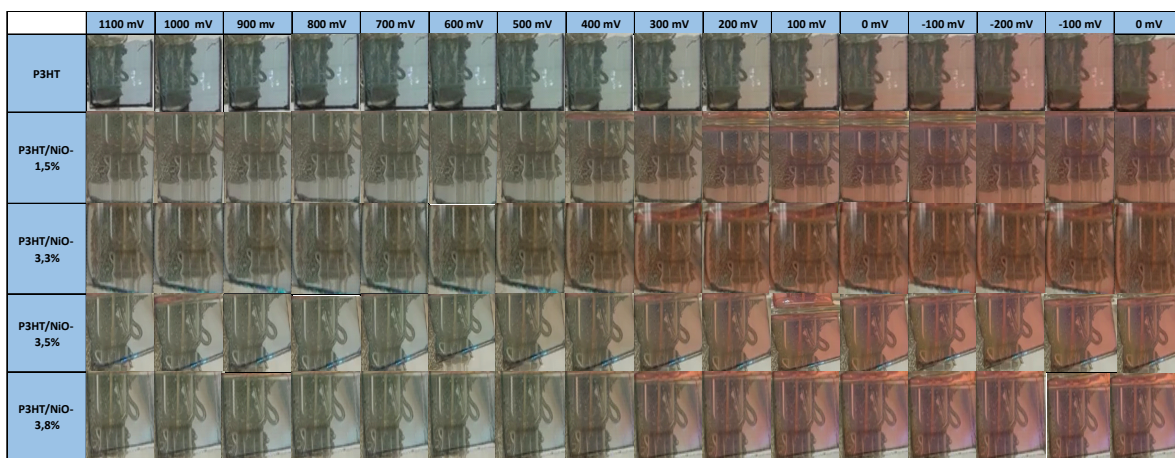


Figura 44. A) Cambio de coloración con excitación de voltaje de los dispositivos en corridas de voltametría cíclica de 0-1100 mV, para P3HT y compósitos P3HT/NiO.

B) Cambio de coloración con excitación de voltaje de los dispositivos en corridas de voltametría cíclica de 1100-(-200) mV, para P3HT y compósitos P3HT/NiO.

4.2.4. Espectroscopia de UV-Vis y determinación del bandgap

En la Figura 45 se muestran los espectros de absorción UV-Vis del P3HT y de los materiales compuestos P3HT/NiO con diferentes concentraciones de NiO. Todas las muestras presentan una banda de absorción intensa centrada aproximadamente en 495 nm, característica de la transición electrónica π - π^* de las cadenas conjugadas del P3HT. La posición del máximo de absorción permanece prácticamente constante para todas las composiciones, lo que indica que la incorporación de NiO no modifica significativamente la estructura electrónica del polímero ni genera corrimientos apreciables hacia la región azul o roja del espectro.

En cuanto a la intensidad de absorción, se observa que las muestras presentan ligeras variaciones respecto al P3HT puro. La incorporación de NiO en P3HT provocó una disminución de su absorbancia. El material P3HT/NiO-3,5 % exhibe la mayor absorbancia, mientras que las composiciones con 3,3% y 3,8 % de NiO muestran valores ligeramente menores.

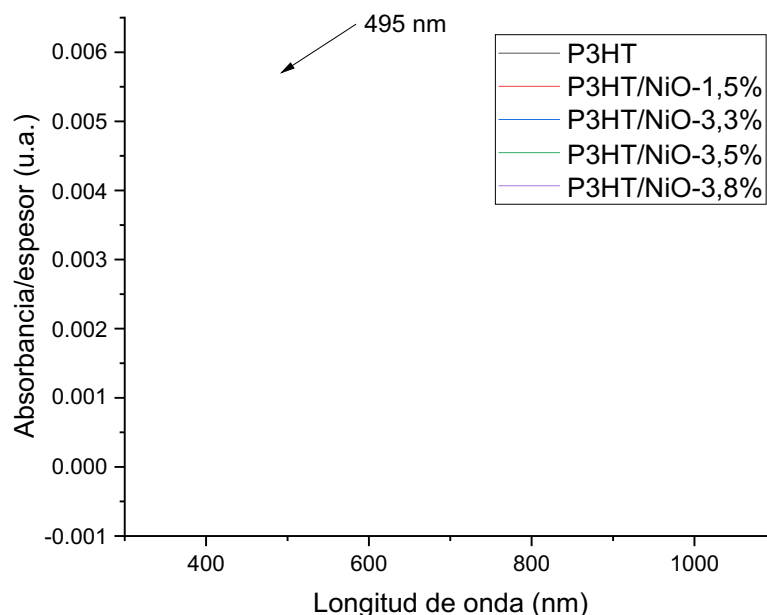


Figura 45. Espectros de absorción para P3HT y P3HT-NiO.

En las Figuras 46 a 50 se muestran la estimación del bandgap óptico del P3HT y composites P3HT/NiO mediante el método de Tauc y en la Tabla 9 los valores obtenidos. En cada caso, el valor del bandgap se obtuvo mediante la extrapolación lineal de la región de absorción hacia el eje de energía. Para el P3HT ver Figura 46, Tabla 9, se determinó un valor de 1.99 eV, el cual se toma como referencia del material base.

Al incorporar NiO, se observa una ligera disminución en el bandgap, y un menor bandgap implica que el material puede absorber luz con menor energía, es decir requiere de menor energía para que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción, absorbiendo luz en una región más amplia del espectro visible, lo que puede favorecer un mayor contraste óptico, mejorando la eficiencia del dispositivo. La muestra P3HT/NiO-1,5% ver Figura 47, Tabla 9, presenta un valor de 1.97 eV, mientras que la muestra P3HT/NiO 3,3% exhibe el menor bandgap con 1.94 eV, ver Tabla 9 lo que sugiere un

mejor acoplamiento electrónico entre el polímero y el óxido, así como una posible mayor deslocalización de los electrones. En el caso de la muestra P3HT/NiO 3,5% mantiene un valor de 1.97 eV, ver Figura 49, Tabla 9. Finalmente, la muestra P3HT/NiO-3,8% ver Figura 50, Tabla 9, presenta un bandgap de 1.96 eV, lo que indica que un incremento en la concentración de NiO no produce una reducción adicional significativa, posiblemente debido a fenómenos de agregación, defectos estructurales o una dispersión no homogénea del óxido.

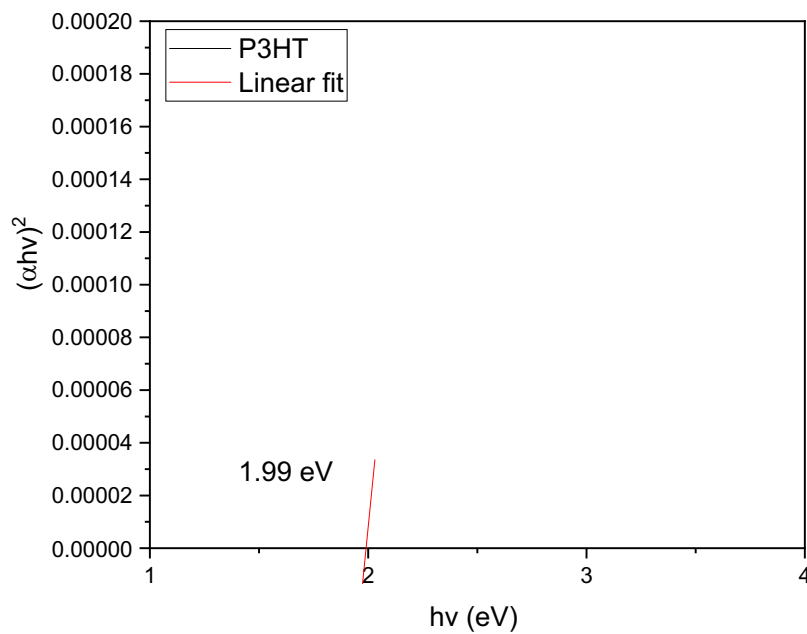


Figura 46. Estimación de bandgap óptico para el P3HT.

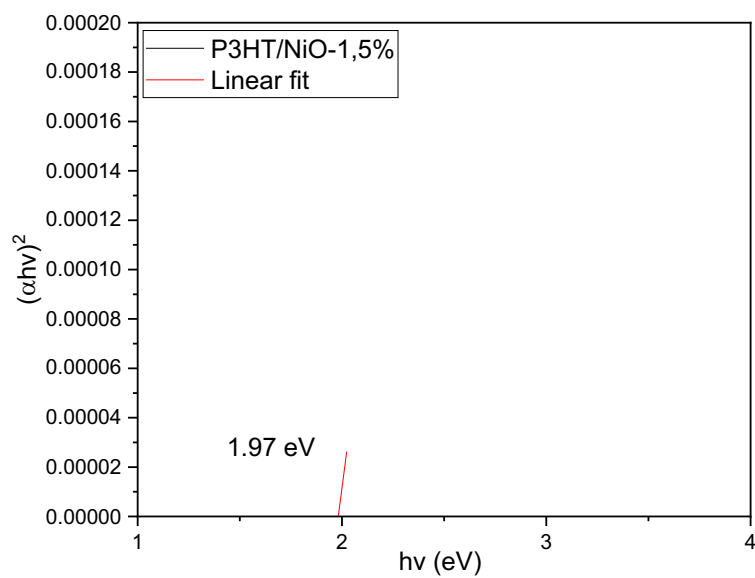


Figura 47. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-1,5%.

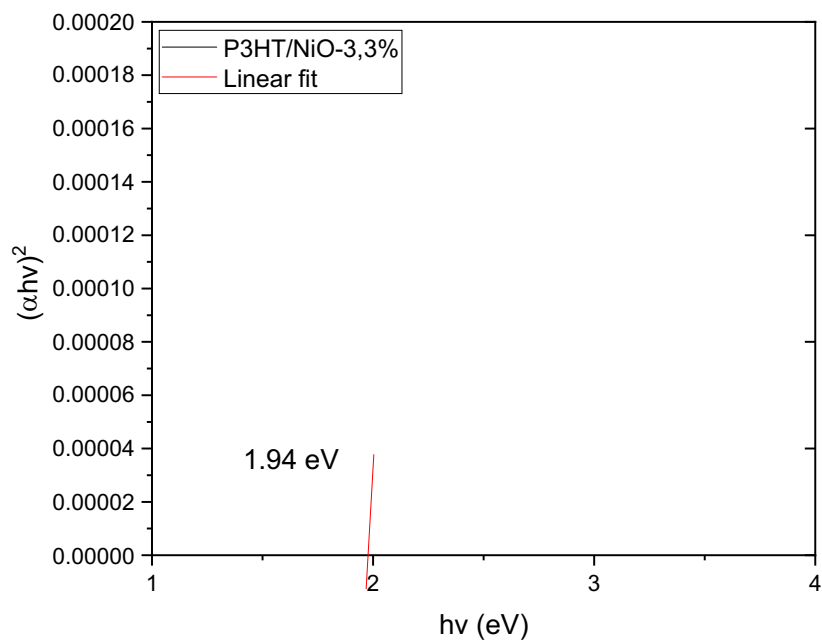


Figura 48. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-3,3%.

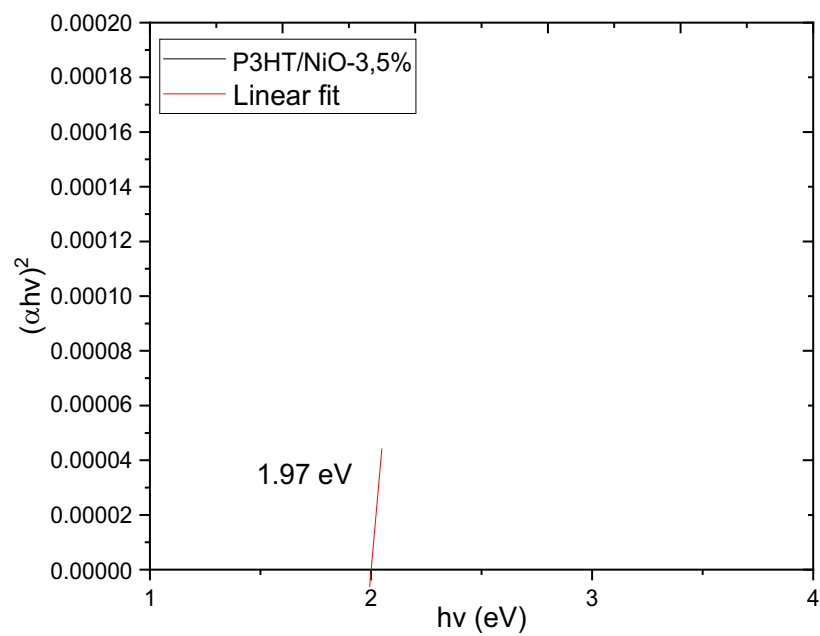


Figura 49. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-3,5%.

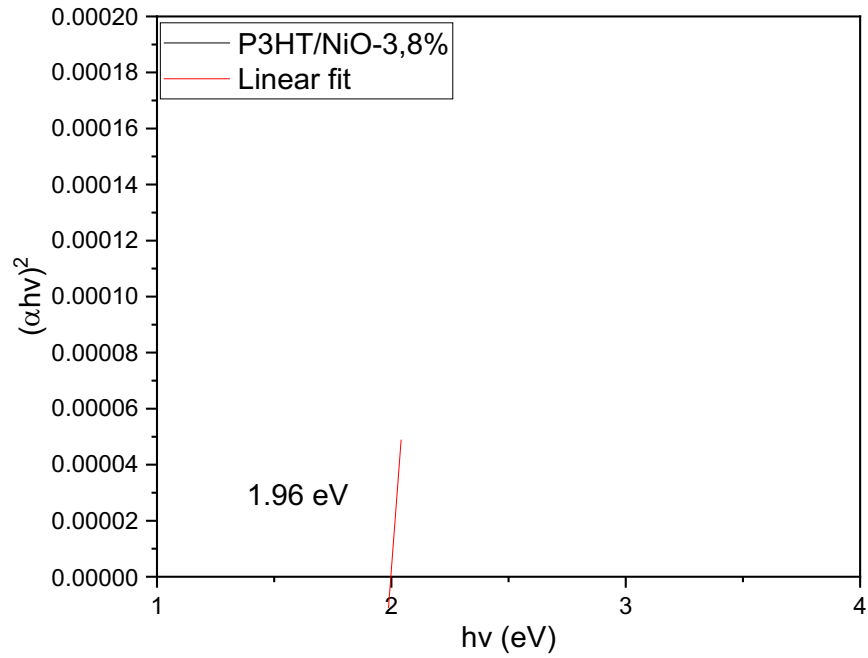


Figura 50. Estimación de bandgap óptico para el P3HT/NiO-3,8%.

Tabla 9. Valores de Bandgap de P3HT y sus compósitos.

Muestra	Bandgap
P3HT	1.99 eV
P3HT/NiO-1, 5%	1.97 eV
P3HT/NiO-3, 3%	1.94 eV
P3HT/NiO-3, 5%	1.97 eV
P3HT/NiO-3, 8%	1.96 eV

4.2.5. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Los espectros FTIR del P3HT y de los materiales compuestos P3HT/NiO con diferentes concentraciones de óxido de níquel se muestran en la Figura 51. En el espectro del P3HT se observan las bandas características reportadas en la literatura para este polímero conductor. El pico localizado alrededor de 1737 cm^{-1} se atribuye a vibraciones de estiramiento de grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). Las bandas observadas en 1455 y 1510 cm^{-1} corresponden a las vibraciones simétricas y asimétricas del enlace $\text{C}=\text{C}$ del anillo de tiofeno conjugado, confirmando la formación de la estructura característica del P3HT.[13]

La banda situada en 1377 cm^{-1} se asocia a vibraciones de deformación simétrica de los grupos metilo de las cadenas laterales hexilo, mientras que la señal en 1240 cm^{-1} se atribuye a vibraciones de flexión $\text{C}-\text{H}$, y a contribuciones de enlaces $\text{C}-\text{C}$ presentes en la estructura del polímero. Asimismo, en el espectro FTIR del P3HT se identificaron tres bandas adicionales, ubicadas aproximadamente en 1737 , 1240 y 1021 cm^{-1} , las cuales pueden atribuirse a residuos de los solventes empleados durante el proceso de purificación. En particular, las señales cercanas a 1240 y 1737 cm^{-1} se relacionan con vibraciones características de la acetona. Asimismo, la banda localizada en 1114 cm^{-1} corresponde al estiramiento del enlace $\text{C}-\text{S}$ del anillo de tiofeno, considerado uno de los modos vibracionales más representativos del P3HT.[13], [35]

Las bandas presentes en 819 cm^{-1} y 726 cm^{-1} corresponden a vibraciones fuera del plano de los enlaces $\text{C}-\text{H}$ del anillo de tiofeno y a movimientos oscilatorios de los grupos metileno de las cadenas hexilo laterales, respectivamente. La presencia de la banda a 819 cm^{-1} confirma la polimerización del 3-hexiltiofeno y la formación de unidades 2,3,5-trisustituidas características del P3HT.[13]

Para el NiO, presenta una banda característica localizada en 551 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de estiramiento del enlace Ni–O, lo que confirma la formación de la fase de óxido de níquel, la anchura de dicha banda indica que los polvos de NiO son nanocristales. Esta señal es característica de los óxidos de níquel y constituye la principal evidencia espectroscópica de la presencia del material.[36]

Adicionalmente, se observan bandas en 845 cm^{-1} y 1446 cm^{-1} . La señal a 845 cm^{-1} puede asociarse a vibraciones de grupos hidroxilo y especies carbonatadas adsorbidas sobre la superficie del NiO, mientras que la banda a 1446 cm^{-1} corresponde a las vibraciones asimétricas del ion carbonato (CO_3^{2-}).[36], [37]

Al comparar el espectro del NiO con los obtenidos para los compósitos P3HT/NiO, se observa que las bandas características del óxido permanecen presentes, aunque con variaciones en su intensidad debido a la interacción entre las partículas de NiO y la matriz polimérica. Particularmente, la banda de 551 cm^{-1} confirma la incorporación exitosa del NiO en los compósitos, mientras que las señales alrededor de 845 cm^{-1} y 1446 cm^{-1} sugieren la presencia de grupos superficiales adsorbidos que pueden contribuir a las interacciones interfaciales entre el óxido y el polímero conductor.

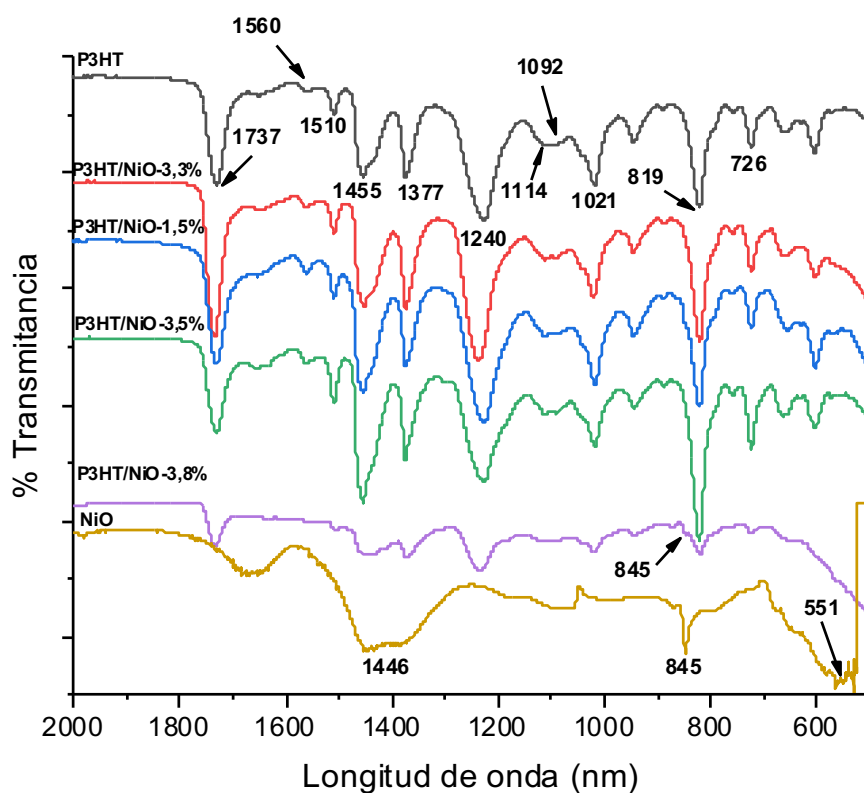


Figura 51. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de P3HT, composites y NiO.

La Tabla 10 presenta los valores del indicador de longitud de conjugación, calculado mediante la relación entre las intensidades de las bandas localizadas en 1455 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} . Valores más bajos de $I_{\text{sym}}/I_{\text{asym}}$ corresponden a longitudes de conjugación mayores. El P3HT presenta un valor de 3.14, mientras que la muestra P3HT/NiO-1,5 % alcanza el valor más

alto 3.62, lo que sugiere un decremento en la longitud efectiva de conjugación debido a la incorporación inicial de NiO.

Sin embargo, las muestras con mayores concentraciones de óxido presentan valores progresivamente menores 2.77 para P3HT/NiO-3,3%, 2.76 para P3HT/NiO-3,5 % y 2.50 para P3HT/NiO-3,8 %, todos menores al del P3HT, lo que indica un aumento de la longitud de conjugación en comparación al P3HT.

Con la finalidad de determinar si el NiO había interaccionado con los electrones de la doble ligadura del anillo tiofeno, se determinó la razón de intensidades de la banda 1455 cm^{-1} correspondiente a la vibración simétricas del enlace C=C del anillo de tiofeno conjugado en relación a la banda 1377 cm^{-1} (I_{1455}/I_{1377}). Dicha relación aumenta desde 1.22 para el P3HT hasta 1.71 para la muestra P3HT/NiO-3,5%. Sin embargo, para la muestra P3HT/NiO-3,8 % esta relación disminuye hasta un valor cercano a 1. La variabilidad de la relación en todos los compositos confirma la interacción del NiO con los anillos de tiofeno.

Tabla 10. Indicativo de longitud de conjugación

Muestra	Indicativo de longitud de conjugación(I_{sim}/I_{asim})	Relación I_{1455}/I_{1377}
P3HT	3.14	1.22
P3HT-NiO-1,5%	3.62	1.52
P3HT-NiO-3,3%	2.77	1.13
P3HT-NiO-3,5%	2.76	1.71
P3HT-NiO-3,8%	2.5	1

4.2.6. Microscopia de fuerza atómica

Las micrografías obtenidas por microscopía de fuerza atómica (AFM) para las películas de P3HT y sus compósitos con NiO a diferentes concentraciones y

condiciones de síntesis se presentan en las Figuras 52 a 56. Cada recuadro corresponde a una topografía 3D de la superficie (escala de $70\text{ }\mu\text{m} \times 70\text{ }\mu\text{m}$), donde la altura (eje Z) representa las variaciones de rugosidad.

El P3HT ver Figura 52, muestra una superficie relativamente homogénea y uniforme, con pocas variaciones en altura. Esto se confirma con su baja rugosidad promedio (52.451 nm).

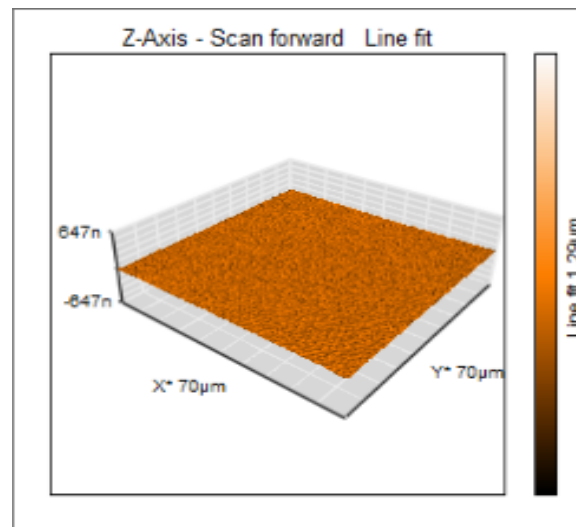


Figura 52. Micrografía del P3HT.

En la muestra de P3HT/NiO-1,5% ver Figura 53, la superficie se vuelve notablemente más irregular, con presencia de picos y valles más marcados, mostrando varias partículas con alturas que sobresalen, esto corrobora la presencia del NiO en P3HT. La película puede presentar una dispersión no completamente homogénea del NiO. La rugosidad aumenta significativamente (307.81 nm).

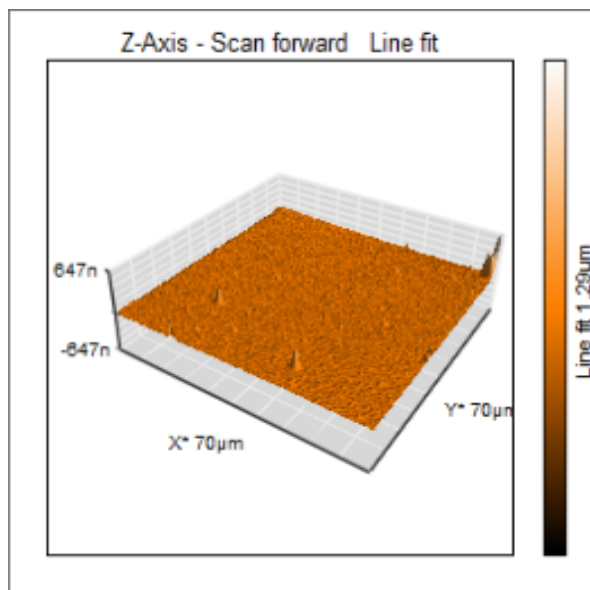


Figura 53. Micrografía del P3HT/NiO-1,5%.

La muestra de P3HT/NiO-3,3% ver Figura 54, presenta aún más irregularidades, con estructuras sobresalientes más evidentes. Esto indica una mayor heterogeneidad superficial, es decir, la superficie del material no es uniforme, sino que presenta variaciones en sus propiedades o estructura, reflejada en la rugosidad más alta (321.84 nm). Esto podría corroborar una mayor incorporación del NiO en P3HT.

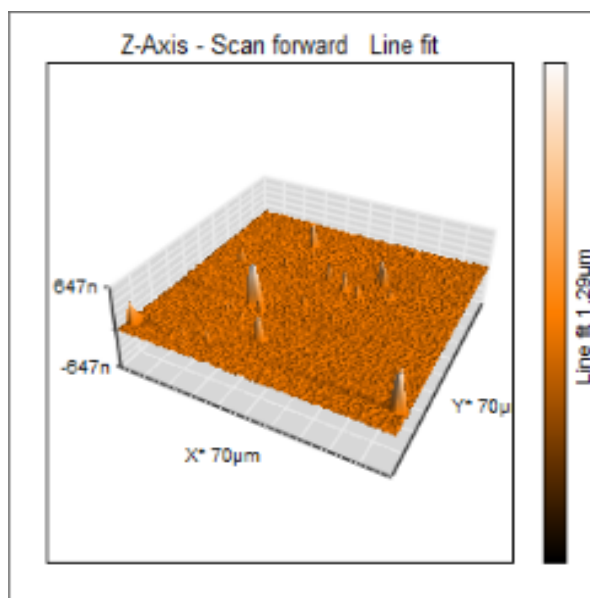


Figura 54. Micrografía del P3HT/NiO-3,3%.

La muestra de P3HT/NiO-3,5%, mostrada en la Figura 55, presenta una superficie con mayor presencia de estructuras sobresalientes (protuberancias o picos) distribuidos de manera aislada sobre la película. Estas estructuras sobresalen notablemente de la superficie promedio, indicando la presencia de aglomerados o regiones con mayor acumulación del material. El análisis topográfico revela una rugosidad de 317.06 nm, valor considerablemente superior al de películas más uniformes, lo que sugiere una morfología menos plana y una distribución heterogénea de las partículas de NiO dentro de la matriz de P3HT.

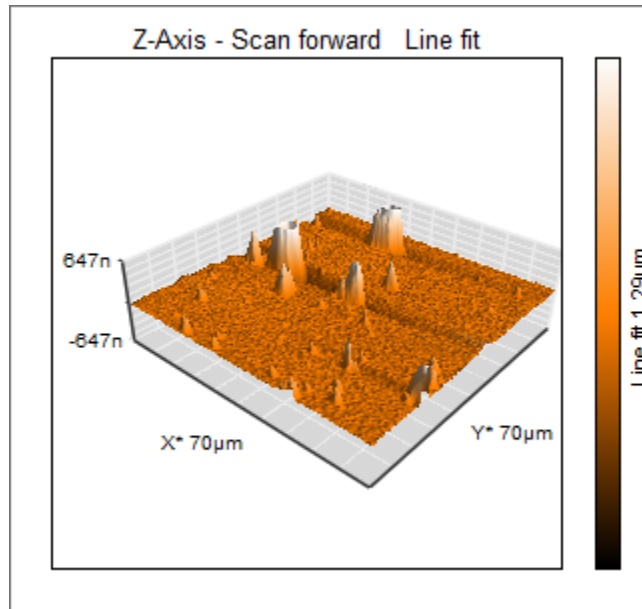


Figura 55. Micrografía del P3HT/NiO-3,5%.

En la muestra P3HT/NiO-3,8% ver Figura 56, se observase una superficie aún menos homogénea, un incremento en la rugosidad, con mayor número de partículas que sobresalen en altura, se aprecian picos altos anchos con estructuras más desordenadas, lo que indica posible aglomeración de partículas a mayor concentración de NiO. Su rugosidad es alta (281.37 nm).

La mayor rugosidad obtenida en los compositos favorece el transporte de carga y la respuesta óptica en ventanas inteligentes, y la muestra con mayor rugosidad es la del composito P3HT/NiO-3,3%, ver Tabla 11.

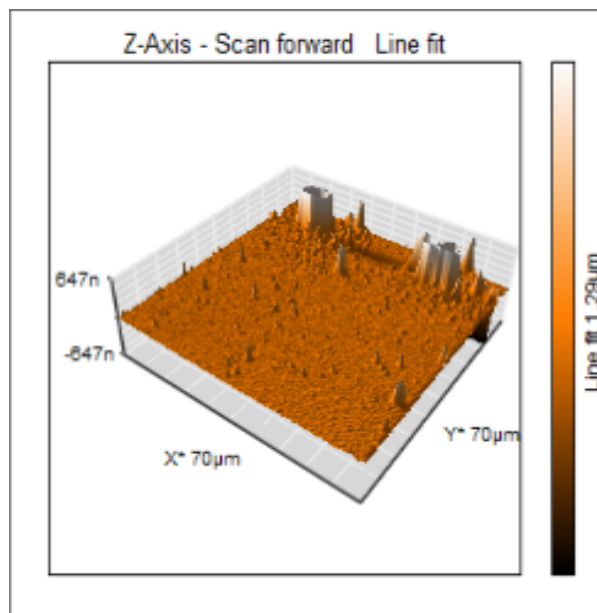


Figura 56. Micrografía del P3HT/NiO-3,8%.

4.3. Transmitancia y cinética óptica en los dispositivos electrocrómicos simples (DES)

En las Figuras 57 a 61, se presentan los espectros de transmitancia en función de la longitud de onda para los DES a base de la película de P3HT y sus compuestos con NiO bajo la aplicación de diferentes potenciales eléctricos (0 V, -1.4 V y 1.4 V). Para la muestra de P3HT, ver Figura 57, se observa un mínimo con baja transmitancia en la región de 400–600 nm, correspondiente a la banda de absorción $\pi-\pi^*$. Al aplicar un potencial negativo -1.4 V, la transmitancia disminuye aún más en esta región, indicando un estado más absorbente, es decir el material está dejando pasar menos luz y absorbiendo más, mostrando el estado completamente reducido del polímero. Al aplicar un potencial positivo 1.4 V, la transmitancia aumenta, es decir ahora pasa más luz

a través del material, la absorción disminuye, el material se vuelve más claro, evidenciando el estado oxidado del material por la formación de la banda bipolarónica a 780 nm aproximadamente. El material tiene menor densidad electrónica e interactúa menos con la luz en esa región. La variación entre estados confirma una respuesta electrocrómica. Sin embargo, a ese potencial de 1.4 V pareciera que la muestra no logra oxidarse completamente, ya que se espera que la banda de absorción π - π^* desaparezca en un dopaje completo. En relación a la zona de 600-1100 nm se observa lo contrario al caso anterior, a un potencial de 0 V se tiene una transmitancia alta aproximadamente 90%, al aplicar un voltaje de -1.4V la transmitancia se incrementa hasta el 100%, es decir a este potencial se tiene la reducción completa del polímero. Al aplicar un potencial de +1.4V, la transmitancia se reduce drásticamente llegando casi al 60%. Esta muestra presenta un mayor contraste óptico en la región mayor de 600 nm. En la Tabla 12 se muestran los contrastes ópticos máximos obtenidos en ambas regiones del espectro.

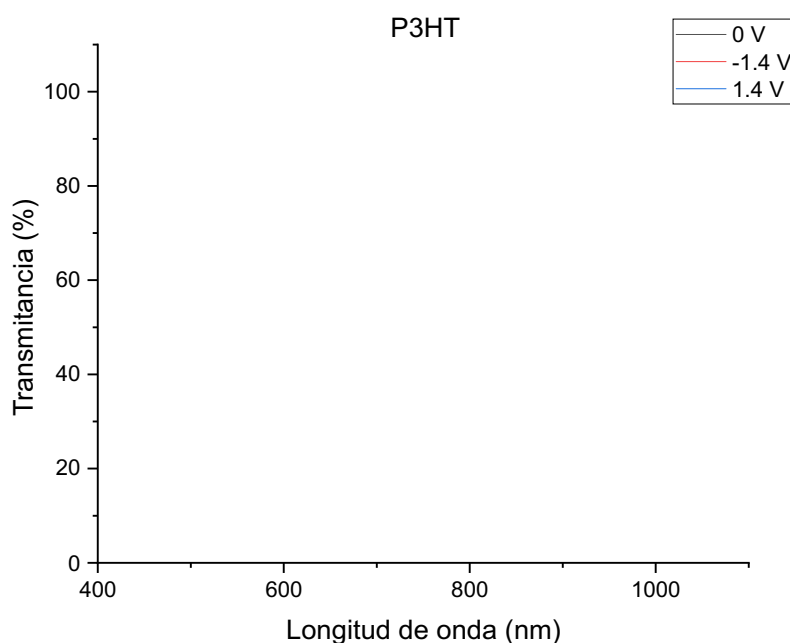


Figura 57. Espectros de transmitancia para el DES a base de P3HT con excitación de voltaje.

Para la muestra de P3HT/NiO-1,5% ver Figura 58, se observa una región de baja transmitancia entre 400 y 600 nm, asociada a la banda de absorción π - π^* característica del P3HT. A un potencial de 0 V, la transmitancia mínima se encuentra alrededor del 20 %, mientras que al aplicar un potencial de -1.4 V la transmitancia aumenta ligeramente en esta región, indicando una disminución en la absorción y sugiriendo que el material se encuentra en un estado más reducido. Por otro lado, al aplicar +1.4 V, la transmitancia aumenta aún más en la zona de absorción, alcanzando valores cercanos al 30 %, lo que evidencia una modificación en la estructura electrónica del material debido al proceso de oxidación.

En la región comprendida entre 600 y 1100 nm, la muestra presenta una transmitancia elevada a 0 V, con valores cercanos al 85–90 %. Al aplicar -1.4 V, la transmitancia disminuye hasta aproximadamente 75 %, mientras que a +1.4 V se reduce aún más, alcanzando valores cercanos al 70 %. Este comportamiento indica la formación de nuevas especies cargadas asociadas al proceso de dopaje electroquímico, las cuales absorben en la región del infrarrojo cercano. La diferencia observada entre los estados de reducción y oxidación confirma la respuesta electrocrómica del material.

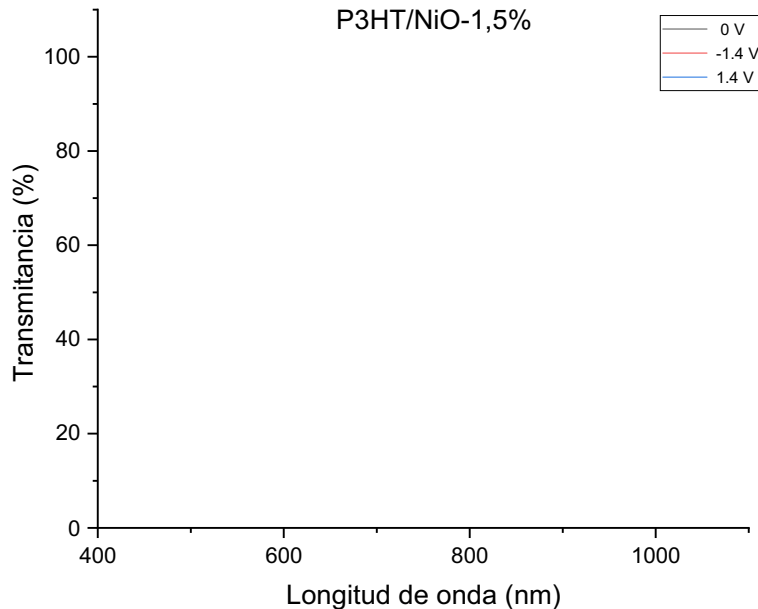


Figura 58. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-1,5% con excitación de voltaje.

Para la muestra de P3HT/NiO-3,3 % ver Figura 59, se observa igualmente una banda de baja transmitancia entre 400 y 600 nm, correspondiente a la transición electrónica π - π^* del P3HT. A 0 V y -1.4 V, los espectros prácticamente se superponen, presentando una transmitancia mínima cercana al 20 %, lo que indica que en esta región la absorción del material permanece elevada. Sin embargo, al aplicar un potencial de +1.4 V, la transmitancia aumenta considerablemente, alcanzando valores cercanos al 40 %, lo que evidencia una disminución de la absorción asociada al proceso de oxidación del polímero.

En la región de 600 a 1100 nm, el comportamiento es inverso. A 0 V y -1.4 V la transmitancia alcanza valores cercanos al 95%, indicando una baja absorción en esta zona espectral. No obstante, al aplicar +1.4 V, la transmitancia disminuye significativamente hasta valores entre 60 y 65 %, lo que evidencia un aumento de la absorción asociado al proceso de oxidación del polímero.

evidenciando la formación de estados polarónicos y/o bipolarónicos que incrementan la absorción en longitudes de onda mayores. El contraste óptico para esta muestra fue mayor al de las muestras anteriores.

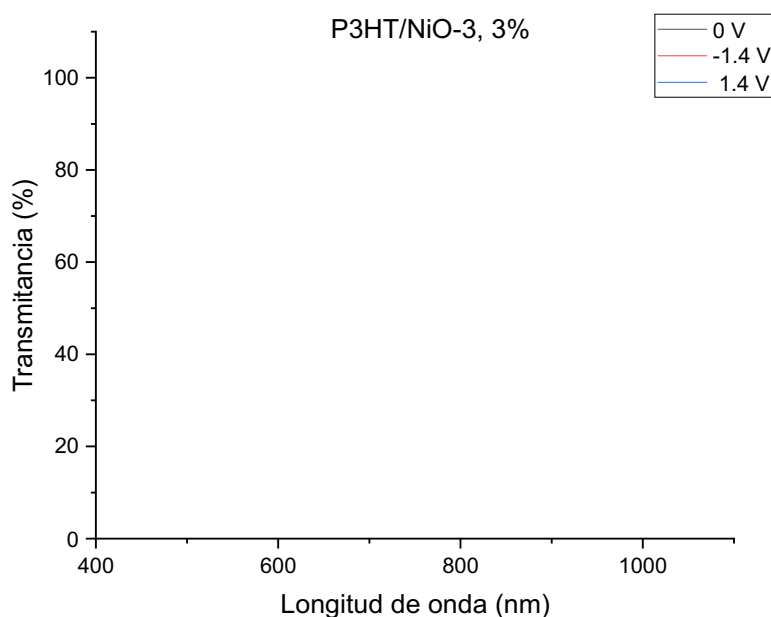


Figura 59. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-3,3% con excitación de voltaje.

Para la muestra de P3HT/NiO-3,5%, ver Figura 60, se observa una banda de baja transmitancia en la región visible 400–600 nm, asociada a la transición electrónica π - π^* característica del P3HT. A 0 V y –1.4 V las curvas presentan un comportamiento muy similar, alcanzando un mínimo de transmitancia cercano a 500 nm. Cuando se aplica un potencial de +1.4 V, la transmitancia en esta región aumenta ligeramente, indicando una disminución de la absorción y, por lo tanto, un proceso de oxidación parcial del polímero.

En la región de 600–1100 nm, el comportamiento es inverso. A 0 V y –1.4 V se observan valores de transmitancia cercanos al 65 %, mientras que al aplicar

+1.4 V la transmitancia disminuye hasta aproximadamente 50 %. Esta reducción indica la formación de estados cargados en la cadena polimérica, asociados a polarones y/o bipolarones, los cuales incrementan la absorción en el infrarrojo cercano. La diferencia entre los estados oxidado y reducido genera un contraste óptico máximo de aproximadamente 14.57 % a 729 nm, mientras que en la región visible el contraste máximo es de 6.98 % a 529 nm, ver Tabla 12. Estos resultados evidencian una respuesta electrocrómica moderada, siendo más notable en la región infrarroja que en la visible.

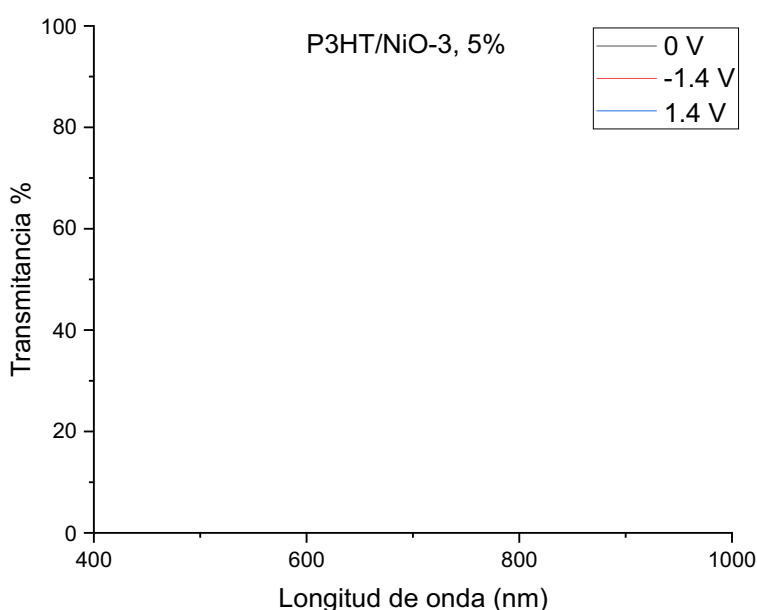


Figura 60. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-3,5% con excitación de voltaje.

Para la muestra de P3HT/NiO-3,8%, ver Figura 61, se observa una respuesta electrocrómica mucho más pronunciada. En la región visible 400–600 nm, las curvas registradas a 0 V y -1.4 V presentan una marcada disminución de la transmitancia alrededor de 520 nm, alcanzando valores cercanos al 25 %, lo que corresponde a la absorción π - π^* característica del estado neutro o

reducido del polímero. Al aplicar un potencial de +1.4 V, la transmitancia aumenta significativamente hasta valores cercanos al 43 %, indicando una disminución importante de la absorción en esta región debido al proceso de oxidación del material.

Este incremento de la transmitancia confirma que el polímero pasa de un estado más absorbente a uno más transparente en la región visible. Además, la disminución de la intensidad de la banda π - π^* sugiere la formación de especies cargadas (polarones y bipolarones), aunque la banda de absorción visible no desaparece completamente, lo que indica que la oxidación podría no ser total.

En la región de 600–1100 nm se observa nuevamente el comportamiento opuesto. A 0 V y -1.4 V la transmitancia alcanza valores elevados, cercanos al 92%, mientras que al aplicar +1.4 V disminuye progresivamente hasta aproximadamente 55 % alrededor de 800 nm.

La muestra presenta un contraste óptico máximo de 20.094 % a 516 nm, ver Tabla 12 en la región visible y de 35.63 % a 770 nm en la región infrarroja, valores similares a los de la muestra P3HT/NiO-3, 3%.

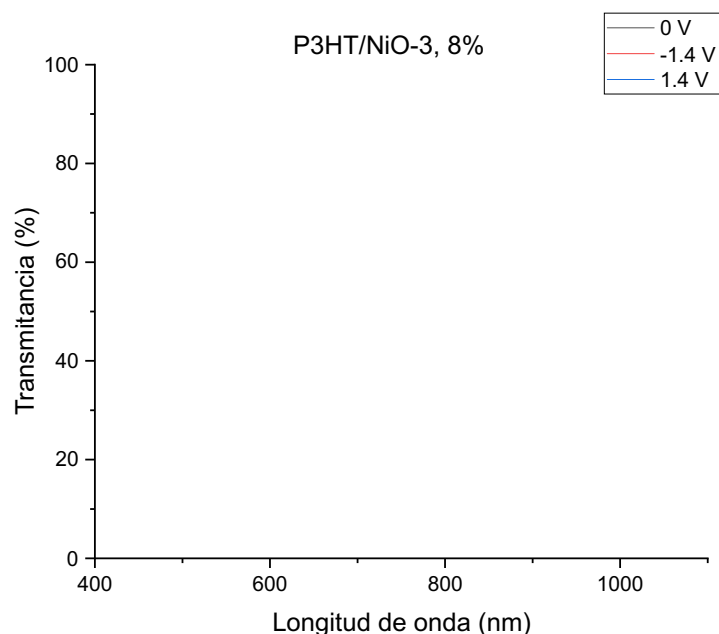


Figura 61. Espectros de transmitancia para el DES P3HT/NiO-3,8% con excitación de voltaje.

Los resultados de la Tabla 12, indican que la incorporación de NiO modifica la respuesta electrocrómica del P3HT, donde existe una concentración óptima, que es la de 3,3%, la cual alcanza el mayor cambio de transmitancia respecto a las otras muestras. Con la incorporación de NiO al P3HT, se logró mejorar el contraste óptico del P3HT en aproximadamente 17% en el rango 400-600 nm y en un 3% en el rango de 600 a 1100 nm.

Tabla 11. Valores obtenidos de los contrastes ópticos máximos en ambas regiones del espectro para P3HT y sus compósitos.

Muestra	Visible		Infrarrojo	
	400 - 600 nm		600 - 1100 nm	
	$\Delta T \text{ max}(\%)$	$\lambda \text{ (nm)}$	$\Delta T \text{ max}(\%)$	$\lambda \text{ (nm)}$
P3HT	17.577	518	39.10	717

P3HT/NiO-1, 5%	2.297	518	7.14	760
P3HT/NiO-3, 3%	20.529	518	40.21	733
P3HT/NiO-3, 5%	6.975	529	14.57	729
P3HT/NiO-3, 8%	20.094	516	35.63	770

Tabla 12. Valores obtenidos de los espectros de transmitancia para P3HT y sus compósitos a 532 nm.

Muestra	$\Delta T \text{ max}(\%)$	$\lambda \text{ (nm)}$
P3HT	16.98	532
P3HT/NiO-1, 5%	1.89	532
P3HT/NiO-3, 3%	19.62	532
P3HT/NiO-3, 5%	6.64	532
P3HT/NiO-3, 8%	18.91	532

En la Tabla 13 se muestran los resultados de los contrastes ópticos a 532 nm que fue la longitud de excitación que se utilizó en las pruebas cinéticas ópticas. Los resultados de la prueba cinética óptica ver Figura 62, muestran una respuesta periódica bien definida a lo largo de los seis ciclos. La transmisión aumenta y disminuye de forma similar en cada ciclo, las muestras presentan una disminución de la transmitancia gradual con el número de ciclo, lo que indica que los dispositivos no son estables, esto puede deberse a que el material se está degradando y presenta alguna pérdida en sus propiedades.

El P3HT, ver Figura 62, muestra una respuesta periódica bien definida. Sin embargo, la amplitud es menor en comparación con los compuestos con NiO, a excepción del compuesto P3HT/NiO-3,5% que mostró un contraste óptico menor. En la muestra P3HT/NiO-1,5%, ver Figura 62, se observa un mayor

incremento en la amplitud de la señal respecto al P3HT, presentando el mayor valor de transmisión, además mostró una mejor estabilidad que los demás DEC a base de compositos, lo que indica una mejor eficiencia.

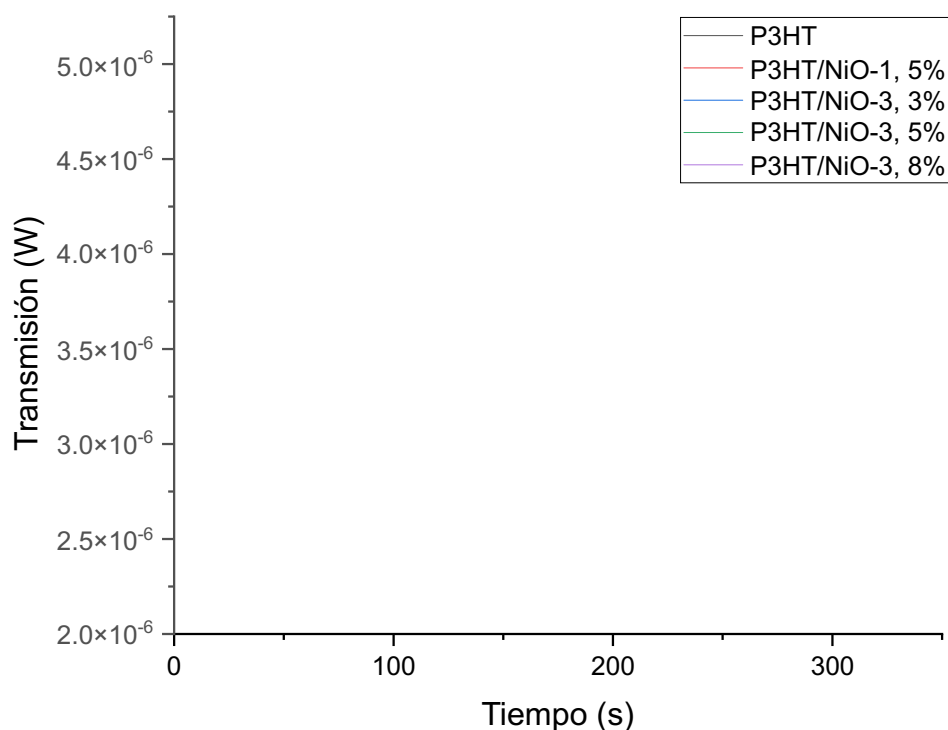


Figura 62. Cinética óptica del P3HT y sus compósitos para voltajes de ± 1.4 V.

La eficiencia de coloración (CE) de las películas electrocrómicas fue calculada a partir de la variación de densidad óptica y de la carga intercambiada durante el proceso de oxidación-reducción, ver ec (3). Los valores obtenidos para cada muestra se presentan en la Tabla 14.

$$CE_{ec} = \frac{\Delta OD \cdot Q}{A} \quad (3)$$

donde:

CE = eficiencia de coloración (cm²/C)

ΔOD = cambio en densidad óptica

Q = carga eléctrica intercambiada, en C

A = área activa de la película/dispositivo, en cm²

Se observa que el P3HT puro presenta una eficiencia de coloración de 54.1358 cm² C⁻¹. Al incorporar 5 % de NiO, de la muestra 1, la eficiencia disminuye drásticamente hasta 5.8035 cm² C⁻¹, indicando que la presencia inicial del óxido de níquel reduce considerablemente la efectividad del proceso electrocrómico.

Para la muestra P3HT/NiO-3,3 %, la eficiencia de coloración aumenta hasta 43.58 cm² C⁻¹, recuperando gran parte del desempeño observado en el P3HT puro. Este incremento sugiere que, a esta concentración, el NiO favorece las interacciones electrónicas dentro del material compuesto y mejora la utilización de la carga inyectada durante el proceso de coloración.

Posteriormente, en la muestra P3HT/NiO-3,5 %, la eficiencia vuelve a disminuir alcanzando un valor de 28.8883 cm² C⁻¹, lo que indica que pequeñas variaciones en la concentración de NiO pueden modificar significativamente el balance entre transporte de carga y cambio óptico. Este comportamiento podría estar relacionado con cambios en la morfología de la película o con una

distribución menos homogénea de las partículas de NiO dentro de la matriz polimérica.

Por otra parte, la muestra P3HT/NiO-3,8 % presenta la mayor eficiencia de coloración de todas las formulaciones estudiadas, alcanzando un valor de $80.8946 \text{ cm}^2 \text{ C}^{-1}$. Este resultado indica que esta composición es capaz de generar una mayor modulación óptica utilizando una menor cantidad de carga eléctrica, evidenciando una interacción más eficiente entre el P3HT y el NiO. Este comportamiento es consistente con los resultados electrocrómicos obtenidos previamente, donde esta muestra presentó uno de los mayores contrastes ópticos tanto en la región visible como en el infrarrojo cercano, ver Tabla 12.

Tabla 13. Eficiencia de coloración de P3HT y compositos.

Eficiencia de coloración	
Muestra	$CE (\text{cm}^2 \text{C}^{-1})$
P3HT	54.1358
P3HT/NiO-1,5%	5.80355
P3HT/NiO-3,3%	43.5821
P3HT/NiO-3,5%	28.8883
P3HT/NiO-3,8%	80.89464

4.4. Transmitancia y cinética óptica en los dispositivos electrocrómicos duales (DED)

Con la finalidad de mejorar el contraste óptico y la estabilidad de los DES, se prepararon los dispositivos electrónicos duales (DED). Las gráficas de transmitancia de los dispositivos duales muestran el comportamiento electrocrómico del P3HT y del compuesto P3HT/NiO-3,3%, ver figuras 63 y 64,

bajo la aplicación de diferentes potenciales (0 V, -1.4 V y 1.4 V), se tomó la muestra del composito P3HT/NiO-3,3%, ya que esa fue la muestra con mejor resultado de los dispositivos simples.

Para el dispositivo basado únicamente en P3HT, ver Figura 63, la mayor diferencia de transmitancia se presenta en la región visible alrededor de 503 nm, donde se obtiene un valor máximo de ΔT de 40% ver tabla 15. La curva correspondiente a -1.4 V presenta una disminución significativa de la transmitancia en el visible respecto al estado oxidado (1.4 V), indicando que el material entra en un estado más absorbente al aplicarse un potencial negativo. Por el contrario, al aplicar 1.4 V la transmitancia aumenta considerablemente, evidenciando el proceso de oxidación del polímero y un estado más transparente. En la región infrarroja se observa una menor modulación óptica, con un ΔT máximo de 14.27% alrededor de 673 nm ver tabla 15.

En el caso del dispositivo P3HT/NiO-3,3%, también se aprecia un comportamiento electrocrómico claro; sin embargo, la incorporación de NiO modifica la respuesta óptica del sistema. En la región visible se registra un ΔT máximo de 26.98% a 514 nm, valor menor al observado para el P3HT puro. Esto sugiere que la adición de NiO reduce parcialmente la amplitud de la modulación óptica en el visible, posiblemente debido a una disminución en la movilidad de carga o a cambios en la interacción electrónica dentro de la película compuesta.

En la región de 600-1000 nm el dispositivo con NiO presenta una variación más pronunciada, alcanzando un ΔT de 29.52% alrededor de 690 nm, superior al del P3HT puro ver tabla 15. Este comportamiento indica que la incorporación de NiO favorece la respuesta óptica en longitudes de onda más altas, mejorando la capacidad de modulación en el infrarrojo cercano.

En ambas muestras se observa que las curvas asociadas a 0 V presentan un comportamiento intermedio entre los estados reducido y oxidado en el

espectro visible, lo que confirma la oxidación mínima parcial de la película al inicio de la prueba.

En general, los resultados indican que el P3HT puro presenta una mayor modulación óptica en la región visible (400-600 nm), mientras que el compuesto P3HT/NiO-3,3% mejora la respuesta en la región de 600-1000 nm, lo que podría ser favorable para aplicaciones electrocrómicas y ventanas inteligentes con control selectivo de radiación solar.

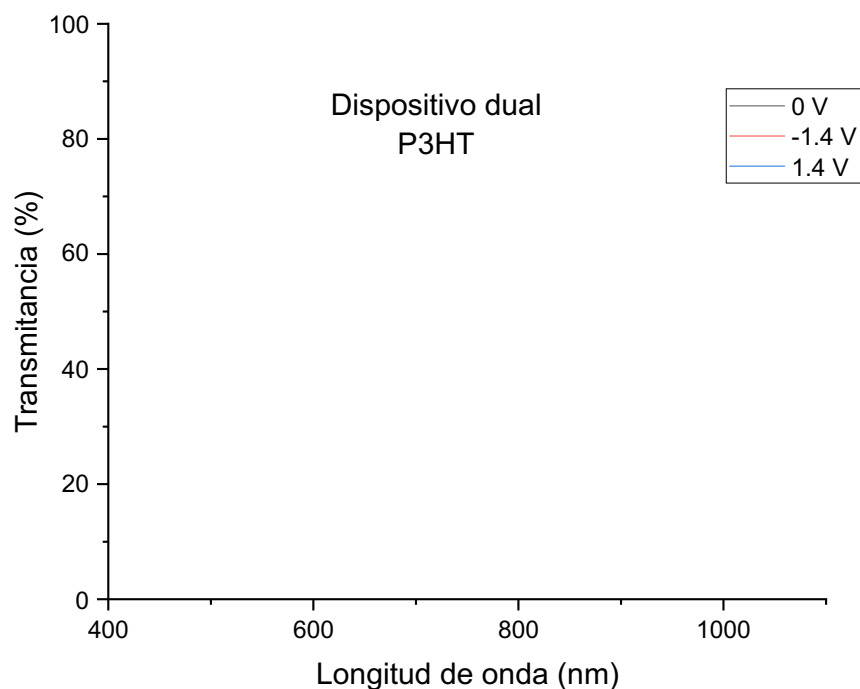


Figura 63. Espectros de transmitancia para el DED P3HT con excitación de voltaje.

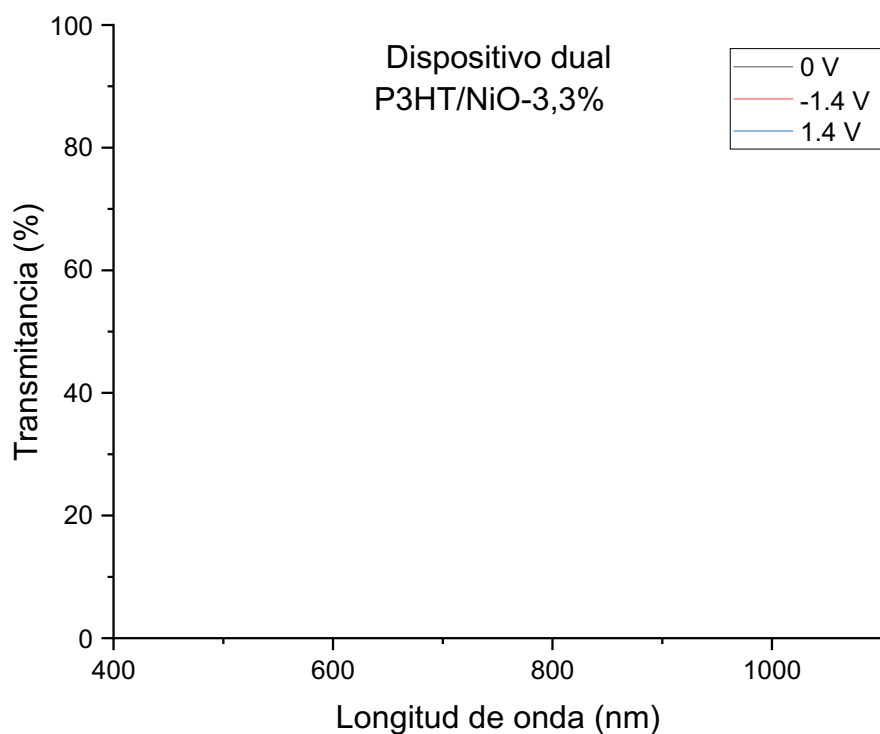


Figura 64. Espectros de transmitancia para el P3HT/NiO-3,3% con excitación de voltaje.

Tabla 14. Valores obtenidos de los espectros de transmitancia para P3HT y sus compósitos.

Muestra	Visible		Infrarrojo	
	400 - 600 nm		600 - 1000 nm	
	$\Delta T \text{ max}(\%)$	$\lambda \text{ (nm)}$	$\Delta T \text{ max}(\%)$	$\lambda \text{ (nm)}$
P3HT	40.22	503	14.27	673
P3HT/NiO-3, 3%	26.98	514	29.52	690

La longitud de excitación que se utilizó para las pruebas cinéticas ópticas de las muestras fue a 532 nm ver Tabla 16, muestra el contraste óptico a esa longitud de onda.

Tabla 15. Valores obtenidos de los espectros de transmitancia para P3HT y sus compósitos a 532 nm.

Muestra	$\Delta T \text{ max}(\%)$	$\lambda \text{ (nm)}$
P3HT	37	532
P3HT/NiO-3, 3%	26	532

CINÉTICA ÓPTICA

La figura 65 muestra los resultados de la cinética óptica de los dispositivos duales basados en P3HT y P3HT/NiO-3,3%. En la gráfica se representa la variación de la transmisión óptica en función del tiempo, donde cada cambio abrupto corresponde a la aplicación alternada de potenciales eléctricos (± 1.4 V) que inducen los procesos de oxidación y reducción de los materiales.

Ambos dispositivos presentan una respuesta periódica y reproducible a lo largo de los ciclos, lo que evidencia un comportamiento electrocrómico reversible y una adecuada estabilidad durante el proceso de conmutación. Se observa que, al aplicarse el potencial correspondiente al estado oxidado, la transmisión aumenta rápidamente, mientras que al invertir el potencial y llevar el material al estado reducido, la transmisión disminuye de manera pronunciada.

El dispositivo basado únicamente en P3HT presenta valores de transmisión máximos cercanos a 4.0×10^{-6} W y mínimos alrededor de 1.34×10^{-6} W. Las transiciones entre ambos estados son rápidas y relativamente estables, mostrando una señal uniforme en los diferentes ciclos, lo cual indica buena reversibilidad y estabilidad electroquímica del polímero conductor.

El dispositivo P3HT/NiO-3,3% exhibe valores máximos de transmisión superiores, alcanzando aproximadamente 4.3×10^{-6} W. Esto sugiere que la

incorporación de NiO favorece una mayor modulación óptica durante el estado transparente del dispositivo (estado oxidado de la película). Además, la señal mantiene una respuesta repetitiva y estable durante los ciclos, indicando que el material compuesto conserva una buena estabilidad operativa.

También, puede observarse que el dispositivo con NiO presenta una ligera disminución gradual de la señal en la parte superior de cada ciclo, lo que podría asociarse a la movilidad de carga dentro de la película compuesta. Este comportamiento sugiere que la incorporación de NiO modifica la dinámica de transporte de carga del sistema, afectando ligeramente la velocidad de respuesta óptica.

En general, los resultados de cinética óptica demuestran que ambos dispositivos poseen buena reversibilidad y estabilidad electrocrómica. El P3HT puro presenta una respuesta más uniforme, mientras que el compuesto P3HT/NiO -3,3% muestra una mayor intensidad de transmisión y una modulación óptica más amplia, lo cual puede resultar favorable para aplicaciones en ventanas inteligentes y dispositivos electrocrómicos.

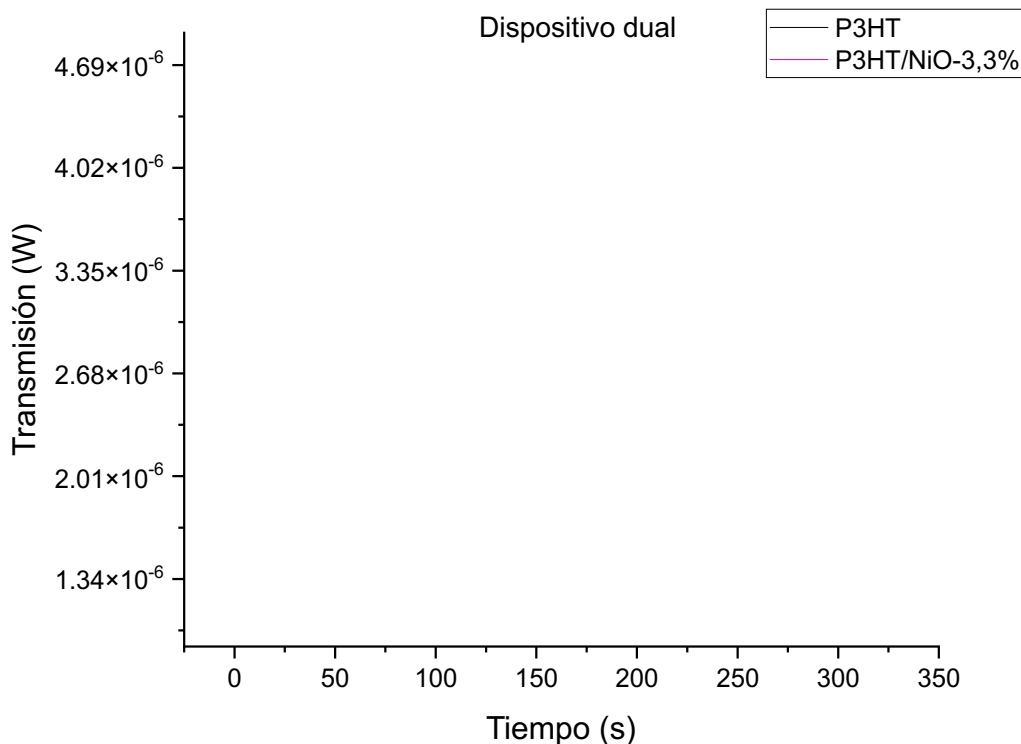


Figura 65. Cinética óptica de los dispositivos duales P3HT y compuesto P3HT/NiO-3,3% para voltajes de ± 1.4 V.

4.5. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se demostró la factibilidad de aprovechar residuos agroindustriales y urbanos para el desarrollo de materiales funcionales aplicados en tecnologías sostenibles, específicamente en dispositivos de almacenamiento de energía y ventanas inteligentes electrocrómicas.

A partir de colillas de cigarro se obtuvo acetato de celulosa utilizado como material dieléctrico en capacitores de placas paralelas, mientras que el óxido de níquel fue sintetizado exitosamente mediante síntesis verde utilizando extracto de sargazo.

Los capacitores fabricados con acetato de celulosa presentaron valores de capacitancia estables y del mismo orden de magnitud que los obtenidos con materiales comerciales, lo que evidencia la viabilidad del material recuperado para aplicaciones dieléctricas. Además, las pruebas realizadas a diferentes temperaturas mostraron una adecuada estabilidad térmica, mientras que los diagramas de impedancia confirmaron un comportamiento característico de materiales capacitivos, indicando su potencial aplicación en dispositivos electrónicos de alta frecuencia.

Por otra parte, los análisis de difracción de rayos X confirmaron la formación de la fase cristalina correspondiente al NiO sintetizado mediante el método verde. Asimismo, los estudios electroquímicos, ópticos y morfológicos demostraron que la incorporación de NiO modifica las propiedades del P3HT, favoreciendo una mejora en la respuesta electrocrómica y en la actividad electroquímica de los compósitos desarrollados.

Los dispositivos electrocrómicos fabricados presentaron cambios reversibles de coloración, buena modulación óptica y respuesta repetitiva durante los ciclos de oxidación y reducción. Los resultados obtenidos indican que la adición de NiO influye en las propiedades ópticas y cinéticas del sistema, contribuyendo a mejorar el desempeño de los dispositivos electrocrómicos.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que los residuos utilizados en esta investigación pueden transformarse en materiales con valor agregado y aplicaciones tecnológicas reales, contribuyendo al desarrollo de dispositivos sostenibles y al aprovechamiento responsable de residuos contaminantes. Además, este trabajo aporta una alternativa sustentable para la obtención de materiales funcionales con potencial aplicación en tecnologías orientadas a la eficiencia energética y al almacenamiento de energía.

Finalmente, esta investigación abre la posibilidad de continuar explorando el uso de residuos agroindustriales en la fabricación de materiales avanzados, así como optimizar las propiedades electroquímicas y ópticas de los dispositivos desarrollados para futuras aplicaciones tecnológicas y comerciales.

REFERENCIAS

- [1] E. P. da Silva *et al.*, “Sustainable energy and waste management: How to transform plastic waste into carbon nanostructures for electrochemical supercapacitors,” *Waste Management*, vol. 171, pp. 71–85, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.08.028.
- [2] M. W. Abebe, P. V. Rathod, A. F. Baye, and H. Kim, “Synthesis and comprehensive evaluation of waste biomass-derived carbon dots as sustainable electrolytes for Vis-NIR modulation of electrochromic devices,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 294, p. 113921, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.solmat.2025.113921.
- [3] Ł. Kolanowski, M. Graś, M. Bartkowiak, B. Doczekalska, and G. Lota, “Electrochemical Capacitors Based on Electrodes Made of Lignocellulosic Waste Materials,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 11, no. 7, pp. 3863–3871, Jul. 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00598-w.
- [4] S. S. Danewalia, G. Sharma, S. Thakur, and K. Singh, “Agricultural wastes as a resource of raw materials for developing low-dielectric glass-ceramics,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 24617, Apr. 2016, doi: 10.1038/srep24617.
- [5] J. Phillips, “Toward an Improved Understanding of the Role of Dielectrics in Capacitors,” *Materials*, vol. 11, no. 9, p. 1519, Aug. 2018, doi: 10.3390/ma11091519.
- [6] A. Khan and A. Kadam, “Comprehensive insights into the electrochromic properties of tungsten trioxide for next generation energy efficient smart windows,” *Journal of Alloys and Compounds Communications*, vol. 9, p. 100157, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.jacomc.2026.100157.
- [7] L. Cajero-Sotelo, M. E. Nicho, U. León-Silva, J. Castrellón-Uribe, M. R. Díaz-Guillén, and A. M. Salgado-Delgado, “Eco-Friendly SiO_2 From Sugarcane Bagasse Enhance P3HT Electrochromic Devices,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 143, no. 13, Apr. 2026, doi: 10.1002/app.70388.

- [8] M. Mahdavi, F. Namvar, M. Ahmad, and R. Mohamad, "Green Biosynthesis and Characterization of Magnetic Iron Oxide (Fe₃O₄) Nanoparticles Using Seaweed (*Sargassum muticum*) Aqueous Extract," *Molecules*, vol. 18, no. 5, pp. 5954–5964, May 2013, doi: 10.3390/molecules18055954.
- [9] J. L. López-Miranda *et al.*, "Sargassum natans I Algae: An Alternative for a Greener Approach for the Synthesis of ZnO Nanostructures with Biological and Environmental Applications," *Mar. Drugs*, vol. 21, no. 5, p. 297, May 2023, doi: 10.3390/md21050297.
- [10] F. Vergara-Juárez, A. Baray-Calderón, U. León-Silva, F. Delgado-Arroyo, and M. E. Nicho, "Effect of incorporating silica extracted from natural source in poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)," *Journal of Polymer Research*, vol. 28, no. 12, p. 485, Dec. 2021, doi: 10.1007/s10965-021-02852-z.
- [11] L. Cajero-Sotelo, M. E. Nicho, U. León-Silva, J. Castrellón-Urbe, M. R. Díaz-Guillén, and A. M. Salgado-Delgado, "Eco-Friendly SiO₂ From Sugarcane Bagasse Enhance P3HT Electrochromic Devices," *J. Appl. Polym. Sci.*, Apr. 2026, doi: 10.1002/app.70388.
- [12] M. Awais, E. Gibson, J. G. Vos, D. P. Dowling, A. Hagfeldt, and D. Dini, "Fabrication of Efficient NiO Photocathodes Prepared via RDS with Novel Routes of Substrate Processing for *p*-Type Dye-Sensitized Solar Cells," *ChemElectroChem*, vol. 1, no. 2, pp. 384–391, Feb. 2014, doi: 10.1002/celc.201300178.
- [13] M.I.C.A. ATALIA GOMEZ CORTEZ, "GOCART05T," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, Cuernavaca, Morelos., 2024. Accessed: Jan. 25, 2026. [Online]. Available: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/4534>
- [14] P. Ramesh and A. Rajendran, "Green synthesis of nickel oxide nanoparticles for photodegradation analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 68, pp. 367–372, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.226.
- [15] R. P. Deshpande, *Capacitors*, 1st ed. 2015.
- [16] Maria de los Angeles Oñate Ordoñez, "Capacitores de potencia," Universidad la Salle, México, 2002. Accessed: Feb. 27, 2026. [Online].

Available:

<https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ppt2002/0219648/0219648.pdf>

- [17] Optaciano Vásquez García, “Física General III Capacitancia, Dieléctricos y Polarización Optaciano Vásquez García Capítulo v CAPACITANCIA Y DIELECTRICOS,” Oct. 2014.
- [18] G. J. P. A. D. H. G. Vásquez. Sandra Milena Velásquez Restrepo, “Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos,” p. 81, Mar. 02, 2016. Accessed: Mar. 01, 2026. [Online]. Available:
<file:///C:/Users/Cesar%20S%C3%A1mano/Downloads/Dialnet-UsoDeFibrasVegetalesEnMaterialesCompuestosDeMatriz-5767279.pdf>
- [19] PAMELA YAJAIRA REYES RODRÍGUEZ, “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE COBRE Y ÓXIDO DE COBRE Y SU INCORPORACIÓN EN UNA MATRIZ POLIMÉRICA Y EL ESTUDIO DE SUS PROPIEDADES ANTIBACTERIANAS,” SALTILLO, COAHUILA, 2012. Accessed: Mar. 02, 2026. [Online]. Available:
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/166/1/Pamela%20Yajaira%20Reyes%20Rodriguez%20maestria.pdf>
- [20] W. Ahmad, S. Chandra Bhatt, M. Verma, V. Kumar, and H. Kim, “A review on current trends in the green synthesis of nickel oxide nanoparticles, characterizations, and their applications,” *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, vol. 18, p. 100674, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.enmm.2022.100674.
- [21] R. J. B. D.-H. H. P. H. D. J. G. J. K. M. M. W. S.-P. V. V. R. C. Hiorns, “Guía Breve para la Nomenclatura de Polímeros,” vol. 1.1, pp. 1–2, 2012. [Online]. Available: <https://www.cas.org/>
- [22] L. Bolaños Ch and L. X. Alvarez, “POLÍMEROS CONDUCTORES: APLICACIONES EN CELDAS FOTOVOLTAICAS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS,” vol. 34, no. 1, pp. 18–38, 2018.

- [23] I.Q. BEATRIZ ALINE GARCÍA ESCOBAR, “DISPOSITIVOS ELECTROCRÓMICOS A BASE DE POLI (3-HEXILTIOFENO) Y SUS COMPOSITOS CON NANOCRISTALES DE CELULOSA,” UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, Cuernavaca, Mor., 2023. Accessed: Mar. 02, 2026. [Online]. Available: <https://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/4081/GAEBST07T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] Gordon E. Elsenbaumer, “Processible and environmentally stable conducting polymers. Synthetic Metals,” pp. 169–174, 1986.
- [25] © Inês, I. Fortuna, and N. Fernandes Da Cunha, “DESENVOLVIMENTO DE NANOFILMES À BASE DE ÓXIDO DE TUNGSTÊNIO PARA APLICAÇÕES EM TRANSÍSTORES ELECTROCRÓMICOS,” Universidad nova de lisboa, 2013.
- [26] David Bravo Solano, “Optimización de las propiedades electrocrómicas de películas delgadas de WO₃ depositadas por la técnica de erosión catódica reactiva dc.,” Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2022.
- [27] Techinstro, “ITO coated glass.”
- [28] E. Avendaño, A. Azens, G. A. Niklasson, and C. G. Granqvist, “Electrochromism in nickel oxide films containing Mg, Al, Si, V, Zr, Nb, Ag, or Ta,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 84, no. 1–4, pp. 337–350, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.solmat.2003.11.032.
- [29] P. M. S. Monk, R. J. Mortimer, and D. R. Rosseinsky, *Electrochromism*. Wiley, 1995. doi: 10.1002/9783527615377.
- [30] R. I. Bickley, H. G. M. Edwards, S. J. Rose, and R. Gustar, “A raman spectroscopic study of nickel(II) acetate, Ni(CH₃COO)₂ and its aqueous and methanolic solutions,” *J. Mol. Struct.*, vol. 238, pp. 15–26, Oct. 1990, doi: 10.1016/0022-2860(90)85002-Z.
- [31] J. C. De Jesus, I. González, A. Quevedo, and T. Puerta, “Thermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate: an integrated study by TGA, QMS and XPS techniques,” *J. Mol. Catal. A Chem.*, vol. 228, no. 1–2, pp. 283–291, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.molcata.2004.09.065.

- [32] M. E. Nicho, W. Jaimes, M. E. Rivas-Aguilar, H. Hu, and M. A. Quevedo-López, "Synthesis of poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl) in presence of CdS nanoparticles: microscopic and spectroscopic studies," 2017.
- [33] Ł. Haryński, A. Olejnik, K. Grochowska, and K. Siuzdak, "A facile method for Tauc exponent and corresponding electronic transitions determination in semiconductors directly from UV–Vis spectroscopy data," *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 127, p. 112205, May 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112205.
- [34] I.Q. ADRIANA LIZETH CERVANTES MENDIOLA, "SÍNTESIS IN SITU DE ÓXIDO DE HIERRO EN PRESENCIA DE FIBRAS DE POLI(3-HEXILTIONENO) OBTENIDAS POR LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, 2021.
- [35] Liliana Cajero Sotelo, María E. Nicho, Ulises León Silva, Jesús Castrellón Uribe, Mario R. Díaz Guillén, and Areli M. Salgado Delgado, "Eco- Friendly SiO₂ From Sugarcane Bagasse Enhance P3HT Electrochromic Devices".
- [36] Elvira Leyva-Navarro, Deisy Cisneros-Sánchez, Pedro Demetrio Mune-Bandera, Orleidis Loyola-Breffé, and Edelio Danguillecourt-Álvarez, "Characterization and evaluation of physicochemical and electrical properties of nickel (II) hydroxide, obtained with industrial ," vol. 35, pp. 215–237, Feb. 2023.
- [37] Z. Wei, H. Qiao, H. Yang, C. Zhang, and X. Yan, "Characterization of NiO nanoparticles by anodic arc plasma method," *J. Alloys Compd.*, vol. 479, no. 1–2, pp. 855–858, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2009.01.064.

ANEXOS

MEMORIAS DEL XXXI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM.
24 AL 26 DE SEPTIEMBRE DE 2025. GUANAJUATO, GUANAJUATO, MÉXICO.

Tema A2 Manufactura y Materiales: Procesos sustentables

“Reciclabilidad en el desarrollo de capacitores de película para un futuro sostenible”

K. Sámano-Fernández, U. León-Silva*, M. E. Nicho, E. E. Antúnez, J. A. Sandoval-Espino, J. A. Marbán-Salgado, A. L. Cervantes-Mendiola.

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Mor., México.
*ulives.leon@uam.mx

RESUMEN

El desarrollo de capacitores sostenibles es un avance crucial en la electrónica moderna, pues busca reducir el impacto ambiental de estos componentes esenciales. En el presente trabajo, se utilizaron materiales reciclados (aluminio, poliéster, mica y acetato de celulosa) para el desarrollo de capacitores de película; el aluminio se utilizó para elaborar las placas metálicas, y el poliéster, acetato de celulosa y la mica como dieléctricos. Los dispositivos se caracterizaron por espectroscopia de impedancia a 22 °C y eléctricamente para determinar su capacitancia a 22, 60, 80 y 100 °C. Así mismo, la capacitancia fue calculada para comparación. Los resultados indicaron que los dispositivos tienen la capacidad para almacenar energía, un excelente funcionamiento en altas frecuencias y su capacitancia es estable a diferentes temperaturas. Por lo tanto, es factible el desarrollo de capacitores sostenibles a partir de materiales reciclados para contribuir con la economía circular y el cuidado del medio ambiente.

Palabras Clave: Almacenamiento de energía, Nyquist, Voltaje, Campo eléctrico.

ABSTRACT

The development of sustainable capacitors is a crucial advance in modern electronics, as it seeks to reduce the environmental impact of these essential components. In this work, recycled materials (aluminum, polyester, mica, and cellulose acetate) were used to develop film capacitors; aluminum was used to make the metal plates, and polyester, cellulose acetate, and mica were used as dielectrics. The devices were characterized by impedance spectroscopy at 22°C and electrically to determine their capacitance at 22, 60, 80, and 100°C. Capacitance was also calculated for comparison. The results indicated that the devices have the capacity to store energy, perform excellently at high frequencies, and their capacitance is stable at different temperatures. Therefore, the development of sustainable capacitors from recycled materials is feasible to contribute to the circular economy and environmental protection.

Keywords: Energy storage, Nyquist, Voltage, Electric field.

1. Introducción

El aumento global en la demanda de dispositivos electrónicos con gran capacidad de almacenamiento de energía ha impulsado a los científicos a innovar [1] con conciencia ambiental debido al grave problema del cambio climático. Por lo tanto, se han redirigido los esfuerzos de investigación hacia la eficiencia energética y las tecnologías de energía renovable [2], así como a nuevas tecnologías de almacenamiento de energía [3]. Entre estas últimas, los capacitores fabricados con materiales reciclados y amigables con el medio ambiente están emergiendo como soluciones viables y factibles

para satisfacer las crecientes demandas energéticas [4] de esta sociedad conectada. Las baterías de iones de litio (LIB, siglas en inglés) son actualmente las tecnologías dominantes de almacenamiento de energía [1]. Sin embargo, las LIB tienen el riesgo de incendios espontáneos y el intenso calor que estos generan tienen preocupados a los fabricantes y usuarios de estas tecnologías [5]. Además, las LIB almacenan energía mediante reacciones químicas, que pueden ser relativamente lentas, lo que limita su densidad de potencia y provoca fluctuaciones de temperatura durante el funcionamiento [1]. Por otro lado, los capacitores de película (FC) tienen una mayor densidad de potencia y una mejor estabilidad térmica en comparación con las



La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica SOMIM, A.C.
Otorga la presente:

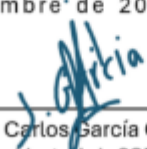
CONSTANCIA

a:

Karina Sámano Fernández

Por su destacada participación como **PONENTE** con el tema
"(A2-54) Reciclabilidad en el desarrollo de capacitores de película para un futuro sostenible"

dentro del marco del 31^{er} CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE
LA SOMIM, celebrado del 24 al 26 de septiembre de 2025 en la
Universidad de Guanajuato.


Dr. Juan Carlos García Castrejón
Presidente de la SOMIM A.C.

 MORELOS LA TIERRA QUE NOS UNE GOBIERNO DEL ESTADO DE MORELOS	ECONOMÍA SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y DEL TRABAJO	CCYTEM CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS	MUSEO DE CIENCIAS DIRECCIÓN DEL MUSEO DE CIENCIAS DE MORELOS
---	--	---	---

**EL CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS
OTORGA LA PRESENTE**

CONSTANCIA

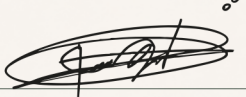
a:

Karina Sámano Fernández

Por su participación como tallerista en el evento
"Soy Mujer y Hago Ciencia"
celebrado en la Ayudantía del poblado de Ocotepéc.
Con un total de cuatro horas culturales.

Cuernavaca, Morelos a 26 de febrero de 2026.


Jaime Eugenio Afau Roffiel
Director general del Consejo de Ciencia y Tecnología
del Estado de Morelos


Alejandra Ramírez Mendoza
Directora del Centro Morelense de
Comunicación de la Ciencia



**LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS ,
A TRAVÉS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A :



ING. KARINA SÁMANO FERNÁNDEZ

Por su destacada participación como tallerista en el programa de "Visitas Guiadas al CIICAp", que se llevó a cabo el 29 de abril de 2025, actividad de divulgación científica y difusión de los programas educativos de posgrado; dirigido a estudiantes del Centro Universitario Benjamín Franklin.



Atentamente
Por una humanidad Culta

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE

TITULAR DE LA DIRECCIÓN
CIICAP-UAEM



Folio: 99

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



**LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS ,
A TRAVÉS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A



KARINA SÁMANO FERNÁNDEZ

Por su destacada participación como TALLERISTA en la "Noche de Observación Estelar", actividad de divulgación de la ciencia y fomento de las vocaciones científicas, dirigido a público en general. Que se llevó a cabo el pasado 5 de noviembre de 2025, en las instalaciones del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.



Atentamente
Por una humanidad Culta

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE

ENCARGADO DE DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DEL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y
CIENCIAS APLICADAS DE LA UAEM



Folio: 337

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Cuernavaca, Morelos, 01 de septiembre de 2026.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA EL DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES. que presenta la alumna **KARINA SÁMANO FERNÁNDEZ**, para obtener el título de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. J. JESÚS CASTRELLÓN URIBE

DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL

DR. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO

DRA. MARÍA ELENA NICHÓ DÍAZ

DR. ULISES LEÓN SILVA

Se adiciona efirma UAEM



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65,
Tel. 777 329 70 00 Ext. 6208 / ciicap.posgrado@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

MARIA ELENA NICHIO DIAZ | Fecha:2026-09-02 09:19:20 | FIRMANTE

o3UjlZ2uy2khMIUTFIAdATJlvLIW6DHPZyBxCfBQZdzER9l1DC6liZ7AcPGrL4FQtp6jPPmY41sL706VVvzb1T1x/Wb9zK3Owzq79vVnffWX2ZDPYS3TfuhU/ADVz8M1X01naoJ42AGVi4CaApmuWcMbcP340fYIsWbqPBqHBT2Yd3JJmawpbyDGWnboQU+XY+F0Ug2YJ6Z7Jl96JUePJr+fqCQJf/940VZi//rU89zIS+JXy5hxAF00HjTnFi1MsGu9Kem/4/v1TzdfkbnC/VyDZpLu9JOPclebUx0DPyj0vfjCVH54TA3sCR0833NyHYAXJtD0UF7TiKur6wQ==

JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2026-09-02 09:28:34 | FIRMANTE

BTfJfL7Tgnw7puMVfvAuMK3f9NzEkV4CX2ogIKF967ZxTYJenpl29iM6dayYHrKtGRkNt4wXAa4AM2NMMD1EHidmNCTXvp3ukOUUORbWOYzE3SoKeRYZgwlMME7MWF81DiNRCQxsHu6s6WpezyEWqclUvg87kgBcPhA5QNiIpa6pY5DL0EXXqB14BZl7LZihk39604KpiPZ21OEWPfpCYzsC4AcOla+iMVs89mCcCGmEU+2xXH6N/g2H+v+XZ0DO1skRZF9lYnXnPlnqEgWe5bc0FkayMRBBwUH/re8//vPAiN/tmR3oU2na6y/LjePbJ83RpQizVC5BjtuWMMg==

OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2026-09-02 10:33:58 | FIRMANTE

uEppmqRCwXd1u/+YheanzL4V/hVWNRJ1i9Pt0XoDuSfJPf2IKi7zzTivs+Rlr+COl0CI8nN6/5hW86Y8y6aH0aXswINZD0yvgai1UffpLa/A18SdignDDc1FjrVSwVeD1BdsSKshVICiuFLMhiziv1umoizjKpXlqEhD6tydk7tC+e/wl58z7gmCmJ92ddfvfT9kJGcvezbVGkn2kUldiVT5SsaTpAoc+ZrGfc31pbdmCZQjt2zTvJ2xk5kzeheDrFjR5P/6FZSgKGuemP/WJHOI/OVZQUhPkdvox+alvIKcMcMhVHG4ASsXKTVRCdCnSWyVEMHQW45xs+M1bQ==

ULISES LEON SILVA | Fecha:2026-09-02 20:53:04 | FIRMANTE

JVqVxK2PbUXHziWLybo7nVFb+Da1MOMyFADJsw2bq7xaVkcP4AXeyq1p9FU6ybovgdwYrf5s8Vfx6C9IL27VD7ZUWrTJwW7W6lUPKTfnUwR+W4CNW92/202YQmRpb9nFhT+hcjNRDYzaFX7N2IKRELuj8O/D/yvUW+EPfXmgfGm9Tdu8GK5Bowps4/PRTBcilmIPjtyqUkguNVyAg7hqKpVznT8wALcAnGu2OMxmuO5YfRhcC5CVM9XPH8KmThfrg98wa0l3qoiCkHl2ZEZfjABpRLLMkKdNVCfCihZ6zSdzvZyr6635g9G4+a7dwuynJpfhYLy0HY0eLI5ZNN1g==

J. JESUS CASTRELLON URIBE | Fecha:2026-09-04 12:10:52 | FIRMANTE

Xfo7uVEPI/hjehfB8qFxFUfV888BGCBSMMKsSLWXpfASWXIKrWyoKh2pWnzCnGBFaj5ZdvxESlrkX0UnVIIExwaQU26w+C8tGfBoirg35gSYgxp5vPzfVZcDGh4smZKjV98+lelnwk03lZ0F3RZRTArhIBm0L1j+aDhQNfnooUcl6h6H5K9pljUf/o8rVqH1XXPKC6QrCIXCU7Z1Wl67J13qfQ8b+H8FTEdOOxHZksunwk2UKh1PwFU8mTKG4yJHHtKEEmlb7ebYpfPVdZ0orsJsCm+JW9lOlgs2yR3AJzzUtBKCL42xNdNa5MwcmSiM1bR2XME52Xpf8HAGrcQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



pDsF0V7a4

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/HUFzbxz1KvQutgmXx0ZzVqXzcHDLFxV>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029