

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



"CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL
POLÍMERO CONDUCTOR PEDOT: PSS
MEDIANTE ELECTRODOS
INTERDIGITADOS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre -2024

AUTORA: Elisa Martínez Machado

DIRECTOR: Abraham Ruiz Gómez

ÍNDICE 1 DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivo del trabajo	11
1.3. Polímero conductor PEDOT: PSS	12
1.4. Antecedentes	14
2. DETALLES EXPERIMENTALES	16
2.1. Electrodo interdigitado (IDE)	16
2.1.1. IDEs del IMB-CNM, CSIC	16
2.1.2. IDEs de Micrux®	17
2.2. Fabricación de capas en los IDEs del IMB-CNM, CSIC	35
2.2.1. Spin coating	40
2.2.2. Drop casting	44
2.3. Caracterización eléctrica de los IDEs del IMB-CNM, CSIC	45
2.4. Fabricación de capas en los IDEs de Micrux	47
2.4.1. Ensayo tipo 1	53
2.4.2. Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS"	54
2.4.3. Ensayo tipo 1.B - "25% vol H ₂ O + 75% vol PEDOT: PSS"	55
2.4.4. Ensayo tipo 1.C - "5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS"	56
2.5. Caracterización eléctrica de los IDEs de Micrux	57
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1. Influencia de la aplicación del campo eléctrico	60
3.2. Influencia de atmósfera	66
3.3. Influencia de temperatura	71
3.4. Influencia de la geometría de los electrodos interdigitados	75
3.5. Influencia de la disolución de disolventes	80
4. CONCLUSIONES	84
4.1. Datos obtenidos	84
4.2. Trabajos futuros	92
5. ANEXO	93
5.1. Resumen de medidas	93
6. BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE 2 DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del PEDOT: PSS	12
Figura 2. Estructura química del PEDOT	13
Figura 3. Electrodo interdigitado de diferentes pasos en sustrato	16
Figura 4. Electrodo interdigitado Micrux®. IDE 1, IDE 2 e IDE 3, ordenados de izquierda a derecha	17
Figura 5. Imagen de la celda del electrodo interdigitado Micrux®	17
Figura 6. Longitudes horizontales del serpentín (x_i) ocupadas en un cuadrante	18
Figura 7. Longitud horizontal del serpentín x_0	19
Figura 8. Representación de la longitud de las “curvas” del serpentín	23
Figura 9. Acetona	35
Figura 10. Agua desionizada	36
Figura 11. Limpiador ultrasónico Elma Transsonic Digitalis	36
Figura 12. Alcohol isopropílico	37
Figura 13. Spinner Polos	38
Figura 14. Cámara de vacío	39
Figura 15. Pipetas de 1000 μ L y 200 μ L, con sus respectivas cánulas	40
Figura 16. Fuente de alimentación Siglent SPD3303X-E	41
Figura 17. Capa de PEDOT:PSS en la que no se aprecia mejora de conductividad	42
Figura 18. Electrodo interdigitado probablemente conduciendo a través los distintos elementos que conforman el sustrato del electrodo	43
Figura 19. Controlador de temperatura ThorLabs TC200	44
Figura 20. Capas de PEDOT: PSS depositadas en IDEs situados en cámara de vacío	45
Figura 21. Foto del oro rayado del finger	46
Figura 22. Curva I-V de diodo	46
Figura 23. Disolución de agua y ácido sulfúrico de 0,05 M	47
Figura 24. Generador de funciones Rigol DG832 alimentado por red 35 MHz (máx.) 2 canales	48
Figura 25. Rampa cíclica entre -1,0 V y +1,3 V en H ₂ SO ₄ 0,05 M	48
Figura 26. Pines del portaelectrodo que conectan con los pads del IDE	49
Figura 27. Microscopio	50
Figura 28. Fingers del IDE 1 vistos mediante el microscopio	51

Figura 29. Pistola de nitrógeno.....	52
Figura 30. Gota de 5 μ L de PEDOT: PSS dentro de la celda del electrodo interdigitado.....	53
Figura 31. Comprobación mediante multímetro.....	56
Figura 32. Bomba DIVAC 2,2L	57
Figura 33. Fuente Keithley 2400 SourceMeter	58
Figura 34. Software de control de LabView.....	58
Figura 35. Curva I-V	59
Figura 36. Gráfica de influencia de aplicación del campo eléctrico en el IDE 1	60
Figura 37. Gráfica de influencia de aplicación del campo eléctrico en el IDE 2	61
Figura 38. Gráfica de influencia de aplicación del campo eléctrico en el IDE 3	61
Figura 39. Esquema de la orientación de las cadenas del polímero	62
Figura 40. Gráfica de influencia de tiempo de aplicación del campo eléctrico en IDE 1	63
Figura 41. Gráfica de influencia de tiempo de aplicación del campo eléctrico en IDE 2	64
Figura 42. Gráfica de influencia de tiempo de aplicación del campo eléctrico en IDE 3	64
Figura 43. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales del IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	66
Figura 44. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales del IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	67
Figura 45. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales del IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	67
Figura 46. Gráfica de tiempo de vida del IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	68
Figura 47. Gráfica de tiempo de vida del IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	68
Figura 48. Gráfica de tiempo de vida del IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	69
Figura 49. Gráfica de tiempo de vida del IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	69
Figura 50. Gráfica de tiempo de vida del IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	70
Figura 51. Gráfica de tiempo de vida del IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)	70

Figura 52. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	71
Figura 53. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	72
Figura 54. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	72
Figura 55. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	73
Figura 56. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	73
Figura 57. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	74
Figura 58. Esquema del polímero depositado entre dos fingers	75
Figura 59. Representación de capa de PEDOT:PSS entre dos fingers de oro	76
Figura 60. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 12 minutos, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	77
Figura 61. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 30 minutos, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	78
Figura 62. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 55 minutos, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	78
Figura 63. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 2 horas, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")	79
Figura 64. Gráfica de influencia de disolución de disolventes	80
Figura 65. Gráfica de influencia de campo eléctrico en PEDOT:PSS disuelto con agua. (Ensayo tipo 1.B - "25% vol H ₂ O + 75% vol PEDOT: PSS")	81
Figura 66. Gráfica de influencia de campo eléctrico en PEDOT:PSS disuelto con DMSO. IDE 1. (Ensayo tipo 1.C - "5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS")	82
Figura 67. Gráfica de influencia de campo eléctrico en PEDOT:PSS disuelto con DMSO. IDE 2. (Ensayo tipo 1.C - "5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS")	82
Figura 68. Gráfica de reproducibilidad y repetibilidad. IDE 1. (Ensayo tipo 1)	94
Figura 69. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1. (Ensayo tipo 1)	95
Figura 70. Gráfica de reproducibilidad y repetibilidad. IDE 2. (Ensayo tipo 1)	95
Figura 71. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2. (Ensayo tipo 1)	96
Figura 72. Gráfica de reproducibilidad y repetibilidad. IDE 3. (Ensayo tipo 1)	96

Figura 73. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 3. (Ensayo tipo 1)	97
Figura 74. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	98
Figura 75. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	99
Figura 76. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	99
Figura 77. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	100
Figura 78. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	100
Figura 79. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	101
Figura 80. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	101
Figura 81. Gráfica de tiempo de vida. IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	102
Figura 82. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	102
Figura 83. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	103
Figura 84. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	104
Figura 85. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	104
Figura 86. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	105
Figura 87. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	105
Figura 88. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	106
Figura 89. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	106
Figura 90. Gráfica de tiempo de vida. IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	107
Figura 91. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)	107
Figura 92. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”)	108
Figura 93. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”)	109

Figura 94. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	109
Figura 95. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	110
Figura 96. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	110
Figura 97. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	111
Figura 98. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	112
Figura 99. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	113
Figura 100. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”).....	113
Figura 101. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 0 V; 0,6 V; 1,2 V; 1,8 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”).....	114
Figura 102. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 0 V; 0,6 V; 1,2 V; 1,8 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”).....	115
Figura 103. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 0 V; 0,6 V; 1,2 V; 1,8 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”).....	115
Figura 104. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 0 V; 0,6 V; 1,2 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”).....	116
Figura 105. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 0 V; 0,6 V; 1,2 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”).....	116
Figura 106. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 0 V; 0,6 V; 1,2 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”).....	117

ÍNDICE 2 DE TABLAS

Tabla 1. Valores numéricos de los parámetros geométricos de los electrodos interdigitados	18
Tabla 2. Cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 1.....	23
Tabla 3. Cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 2.....	28
Tabla 4. Cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 3.....	34
Tabla 5. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”).....	85
Tabla 6. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”).....	86
Tabla 7. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 3. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”).....	87
Tabla 8. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”)	88
Tabla 9. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H2O”)	89
Tabla 10. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)	90
Tabla 11. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)	91
Tabla 12. Tabla resumen de medidas colocadas en Anexo.	93

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La electrónica es un área de conocimiento de la ingeniería. Posee un campo de estudio e investigación que se ocupa de investigar polímeros orgánicos conductores para conocerlos y así, poder usarlos en la fabricación de dispositivos electrónicos.

En cuanto a los polímeros conductores, la mayoría orgánicos, presentan enlaces deslocalizados que forman una estructura similar a la del silicio. Son materiales conocidos por sus habilidades para entregar estimulaciones eléctricas, electroquímicas y electromecánicas directamente al objetivo. Dicho de otra manera, presentan una alta conductividad eléctrica, óptimas propiedades magnéticas, altas propiedades ópticas, propiedades mecánicas eficientes, propiedades de absorción de microondas efectivas y son ligeros. Al mismo tiempo, implican un bajo coste de producción. Todas estas propiedades sumadas al hecho de que muchos de estos compuestos han sido desarrollados de tal forma que puedan ser procesados fácilmente en disolución y utilizados como capas finas han facilitado su uso en la fabricación de celdas fotovoltaicas, diodos emisores de luz, numerosas pantallas de vídeo, las nuevas marcaciones de los productos en los supermercados, el procesamiento de las películas fotográficas, conductores y superconductores, electrodos, cables moleculares, sensores, baterías recargables, transistores plásticos, entre otros.

También, los polímeros conductores poseen distintas aplicaciones actualmente en el campo de la bioelectrónica, ya que pueden ser usados como ingeniería de tejidos o la medicina regenerativa, cuyo objetivo es sustituir o recuperar tejidos defectuosos mediante la fusión de moléculas, células y estructuras bioactivas. Asimismo, se observa que existe información sobre polímeros conductores usados en el campo de la bioelectrónica como biosensores, sondas neuronales, prótesis neuronales y sistemas de liberación controlada.

Por otra parte, es cierto que hasta hace poco tiempo los polímeros conductores mostraban una mayor resistencia que los semiconductores inorgánicos. Sin embargo, actualmente la ciencia sigue reduciendo la resistencia de los polímeros conductores mediante diversas técnicas.



1.2. Objetivo del trabajo

En este TFG se pretende caracterizar películas delgadas de PEDOT: PSS o Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli (estireno sulfonato) utilizando para ello electrodos interdigitados con diferentes pasos de oro (Au), con el objetivo de determinar la variación de la conductividad y movilidad de portadores de carga. Para esta caracterización se pretende enfrentar las capas de polímero a diferentes actuaciones físicas y químicas. Por ejemplo, se analizará la influencia de campos eléctricos externos a sus características, y se estudiará el uso de diferentes disolventes orgánicos para mejorar las propiedades de las capas.



1.3. Polímero conductor PEDOT: PSS

El PEDOT: PSS o Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli (estireno sulfonato) es un polímero orgánico conductor que ofrece gran transparencia, baja densidad, baja conductividad térmica, alta estabilidad térmica, buena compatibilidad, alta ductilidad y bajo coste de producción. Por otro lado, en base a la literatura, la transparencia y la alta conductividad de las películas de PEDOT: PSS han sido estudiadas extensivamente, particularmente, para reemplazar el óxido de indio y estaño (ITO) en energía fotovoltaica, células solares, dispositivos OLED y pantallas táctiles. Además, el PEDOT: PSS ha sido actualmente documentado en aplicaciones bioelectrónicas, como estirables y electrónica portátil.

Asimismo, el PEDOT: PSS tiene una estructura compleja resultante de la combinación de dos polielectrolitos como se muestra en la Figura 1.

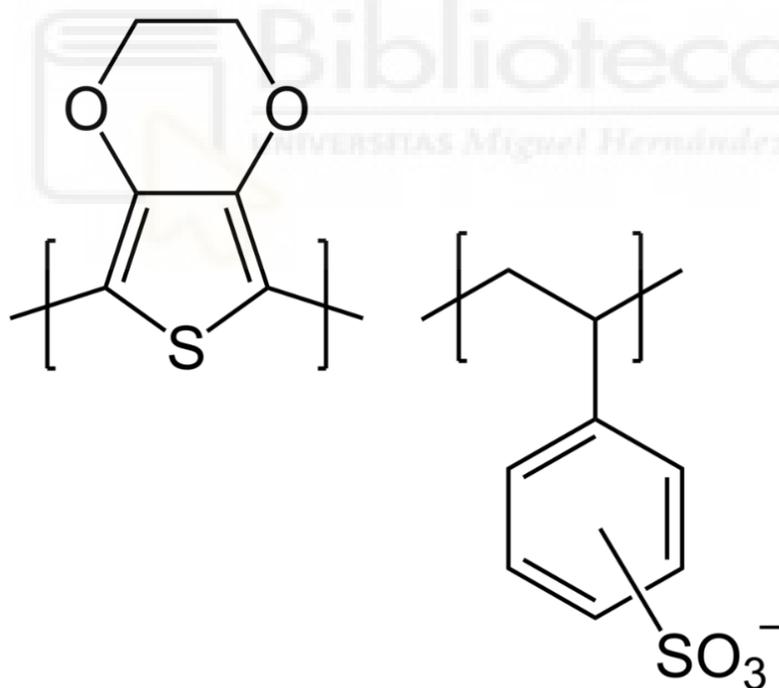


Figura 1. Estructura química del PEDOT: PSS

Por otra parte, el PEDOT, mostrado en la Figura 2, es ópticamente transparente en su estado conductor y tiene una gran estabilidad, una brecha de banda moderada y un potencial redox bajo. Su principal desventaja es su escasa

solubilidad. Para solucionarlo se opta por mezclarlo con el polielectrolito (PSS), esta combinación permite mantener los monómeros PEDOT dispersos en agua o soluciones acuosas.

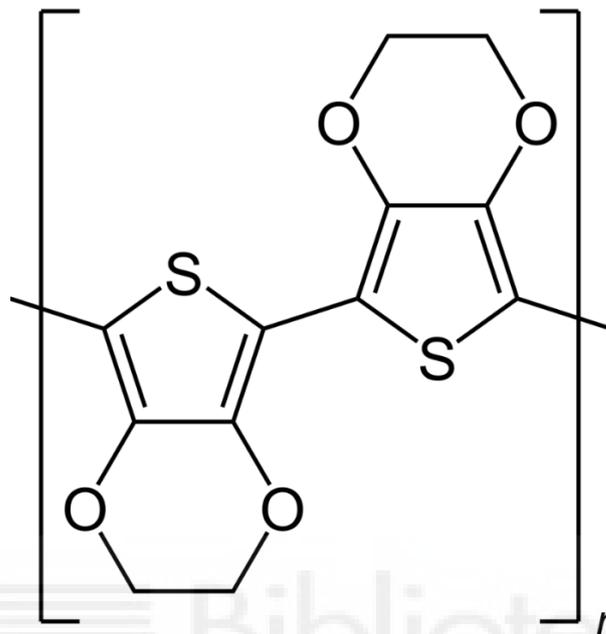


Figura 2. Estructura química del PEDOT

1.4. Antecedentes

El artículo científico “Changes in in-plane electrical conductivity of PEDOT: PSS thin films due to electric field induced dipolar reorientation”, de Mrunal S. Mahajan, D. M. Marathe, Sanjay S. Ghosh, V. Ganesan and Jaydeep V. Sali [1], indica que se producen cambios en la conductividad eléctrica del PEDOT: PSS debido a la reorientación de la cadena del polímero al aplicar un campo eléctrico o al disolver el polímero con DMSO. Antes de nada, se muestran las medidas realizadas para cuatro casos experimentales.

En primer lugar, tenemos el primer caso de experimento que ha consistido en tratar las capas de PEDOT: PSS con campo eléctrico con ayuda de recocido térmico. En esta medida se observa que cuando se aplica el campo eléctrico en dirección perpendicular la conductividad eléctrica se incrementa con un tiempo de tratamiento de hasta 3 horas. Posteriormente del tratamiento de 3 horas, la conductividad eléctrica disminuye. En cambio, para una dirección paralela del campo eléctrico se produce un aumento de la conductividad eléctrica a la hora de tratamiento, después decrece progresivamente hasta que cumple las tres horas de tratamiento. Pasadas las tres horas de tratamiento se observa un aumento de la conductividad que no es significativo.

En segundo lugar, el segundo caso experimental estudiado consiste en tratar la capa PEDOT: PSS con recocido térmico. Esta medida muestra como a partir de las tres horas de tratamiento con recocido térmico se produce un incremento de la conductividad eléctrica. Además, señala que el incremento de la conductividad del primer caso no es debido al recocido térmico, ya que en el primer caso se produce un descenso de la conductividad a partir de las 3 horas de tratamiento para una dirección ortogonal del campo eléctrico y, para una dirección paralela del campo eléctrico a partir de las 3 horas de tratamiento el incremento de conductividad es insignificante.

A continuación, el tercer caso experimental analizado se ha basado en tratar con campo eléctrico y recocido térmico las capas de PEDOT: PSS disuelto con DMSO. En la medida del tercer caso, se observa cómo al aplicar un campo eléctrico tanto de dirección paralela como de dirección perpendicular a la hora de tratamiento la conductividad eléctrica decrece significativamente. Aunque es cierto que decrece más la conductividad ortogonal al campo eléctrico. Después,

por un lado, pasada la hora de tratamiento la conductividad eléctrica paralela al campo eléctrico decrece progresivamente hasta cumplirse las seis horas de tratamiento. Por otro lado, pasada la hora de tratamiento la conductividad eléctrica ortogonal al campo eléctrico permanece prácticamente constante hasta cumplirse las tres horas de tratamiento y, a continuación, decrece inapreciablemente hasta efectuarse las seis horas de tratamiento.

Sin embargo, en dicho artículo se indica que cuando se disuelve el PEDOT: PSS con DMSO y no se trata con campo eléctrico, la conductividad de estas capas aumenta apreciablemente. Hecho que también apunta el artículo: "Mechanisms for doped PEDOT: PSS electrical conductivity improvement" de Nur'Aishah Ahmad Shahrim, Zuraida Ahmad, Amelia Wong Azman, Yose Fachmi Buys and Norshahida Sarifuddin [2].

Finalmente, el cuarto caso examinado se trata de películas de PEDOT: PSS disuelto con DMSO tratadas con recocido térmico. En la medida del cuarto caso, se aprecia como se produce un considerable aumento de la conductividad a la hora de tratamiento, a partir de la hora decrece progresivamente hasta llegar a las tres horas de tratamiento, entonces aumenta inapreciablemente hasta llegar a las seis horas de tratamiento. También, este cuarto caso expuesto nos informa que el recocido térmico no ha sido la causa del descenso de conductividad en el caso del PEDOT: PSS disuelto con DMSO tratado con campo eléctrico y recocido térmico (tercer caso), puesto que mientras que en el tercer caso se empieza a generar el descenso de conductividad a la hora de tratamiento, en el cuarto caso aumenta a la hora de tratamiento.

Así pues, el artículo científico expuesto ha servido de apoyo para el presente trabajo de investigación, puesto que tanto en el artículo científico como en nuestro trabajo de investigación se trabaja con PEDOT: PSS y DMSO, y también se tratan las películas del polímero con recocido térmico y campo eléctrico.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

2.1. Electrodo interdigitados (IDEs)

2.1.1. IDEs del IMB-CNM, CSIC

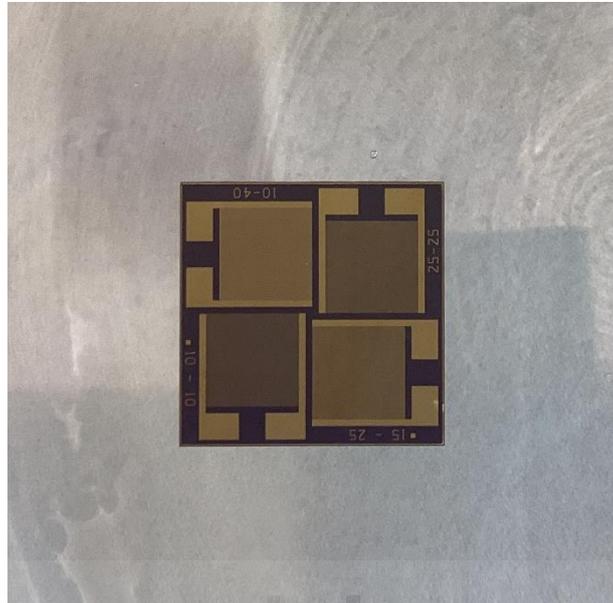


Figura 3. Electrodo interdigitados de diferentes pasos en sustrato

Los electrodos interdigitados de la figura 3 fueron fabricados en las instalaciones de la “Infraestructura Científica y Técnica Singular” laboratorio de micro y nano fabricación del Instituto de Microelectrónica de Barcelona-Centro Nacional de Microelectrónica, Centro Superior de Investigaciones Científicas (IMB-CNM, CSIC).

2.1.2. IDEs de Micrux®

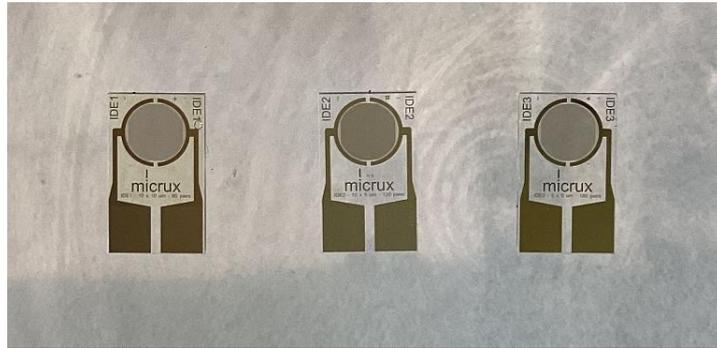


Figura 4. Electrodo interdigitado Micrux®. IDE 1, IDE 2 e IDE 3, ordenados de izquierda a derecha

A continuación, se muestra la imagen del electrodo interdigitado (Figura 5), donde se aprecia que posee fingers, los cuales tendrán un ancho y una separación entre ellos dependiendo del tipo de electrodo interdigitado.

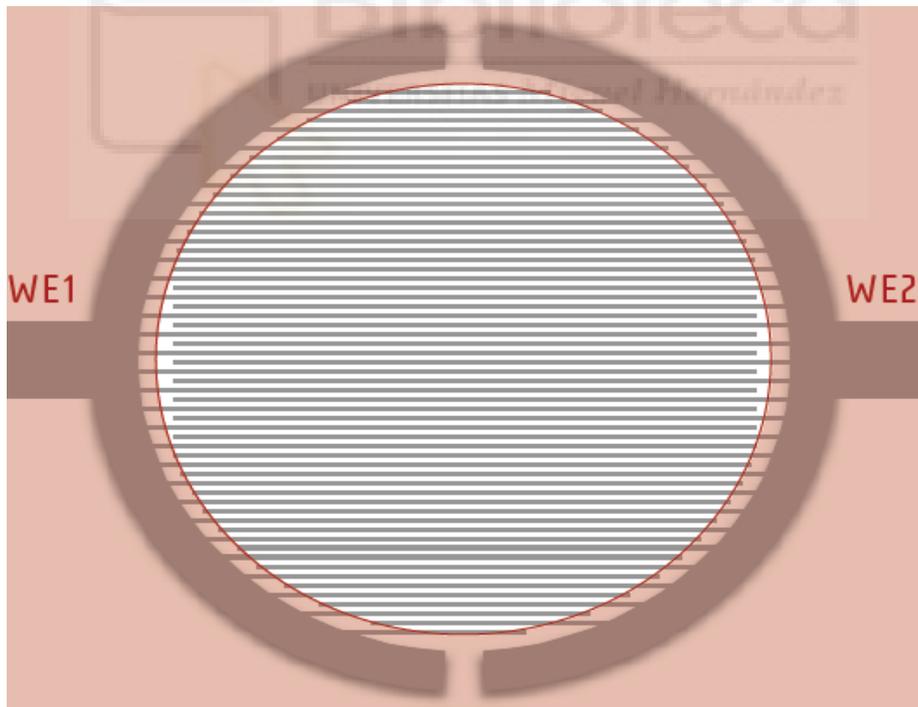


Figura 5. Imagen de la celda del electrodo interdigitado Micrux®

Muestra	Material	Ancho de fingers	Separación entre fingers	Nº de pasos	Espesor (nm)	Longitud del serpentín
IDE 1	Ti/Au	10 μm	10 μm	90	50/150	484,6 mm
IDE 2	Ti/Au	10 μm	5 μm	120	50/150	644,9 mm
IDE 3	Ti/Au	5 μm	5 μm	180	50/150	965,5 mm

Tabla 1. Valores numéricos de los parámetros geométricos de los electrodos interdigitados

A continuación, se va a explicar el procedimiento seguido para calcular la longitud del serpentín del IDE 1 puesto que para calcular la longitud del serpentín del IDE 2 y del IDE 3 realizaremos el mismo procedimiento, pero cambiando el valor de la “y” y el número de longitudes horizontales, los cuales son diferentes para cada IDE.

En primer lugar, separamos el electrodo en cuatro cuadrantes y calculamos la longitud del serpentín que ocupa un cuadrante sin contar las curvas del serpentín (Figura 6).

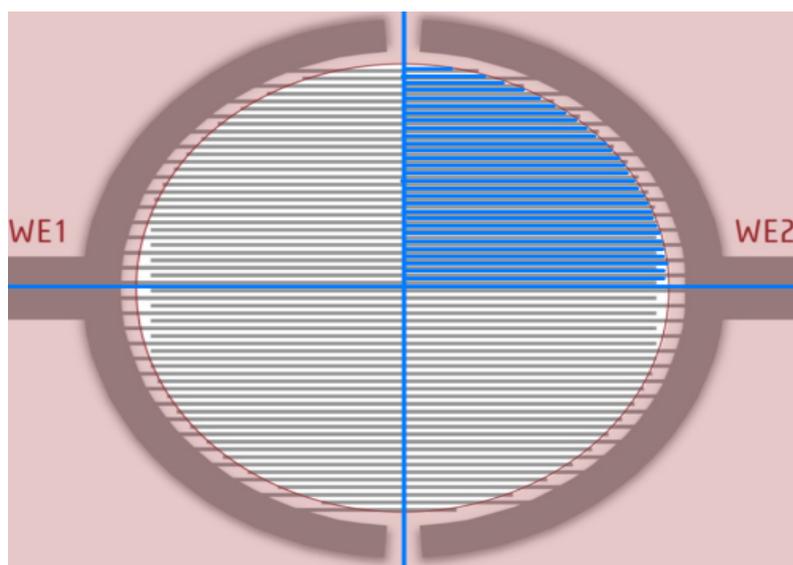


Figura 6. Longitudes horizontales del serpentín (x_i) ocupadas en un cuadrante

Para ello, sabemos que la suma de la separación entre fingers y el ancho de fingers es $20\ \mu\text{m}$ para el IDE 1, el valor de esta suma es “y”. Después, tenemos que saber cuántas longitudes horizontales “ x_i ” existen en un cuadrante. Se sabe que el radio del electrodo es de $1750\ \mu\text{m}$, por lo que tenemos que calcular el número de longitudes horizontales “i”: $1750\ \mu\text{m}/20\ \mu\text{m}= 87,5$ longitudes horizontales, sin embargo, como existe una longitud horizontal del serpentín cada $20\ \mu\text{m}$ de longitud vertical, debemos truncar en 87 longitudes horizontales. Para calcular el valor de las longitudes horizontales realizamos la siguiente operación:

$$x_i = R \cdot \cos(\alpha_i)$$

Debemos de empezar calculando la longitud horizontal x_i cuyo ángulo α_i es de 0° , y acabar calculando la longitud horizontal x_i cuyo ángulo α_i es de 90° , siempre y cuando “i” sea un número entero.

Conviene subrayar que $x_0 = R \cdot \cos(\alpha_0)$ es la longitud horizontal que coincide con el radio de la celda del electrodo interdigitado (Figura 7).

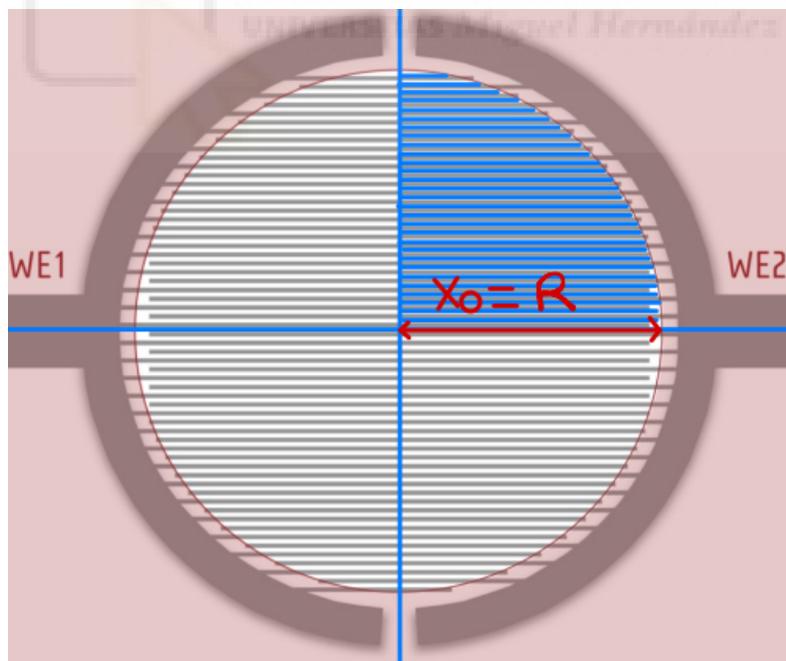


Figura 7. Longitud horizontal del serpentín x_0

Por otro lado, para calcular los ángulos correspondientes a diferentes valores del seno en una circunferencia de radio $1750\ \mu\text{m}$, utilizaremos la relación entre el

seno de un ángulo y el radio de la circunferencia. La fórmula para el seno de un ángulo α en una circunferencia de radio R es:

$\text{sen}(\alpha) = \frac{y_i}{R} = \frac{y \cdot i}{R}$, donde y_i es la distancia vertical desde el eje horizontal hasta el punto de la circunferencia, y R es el radio de la circunferencia.

A continuación, se muestra una tabla con los cálculos realizados para poder calcular las “ x_i ” del IDE 1:

α_i	i	$\alpha_i = \text{arc sen}\left(\frac{y \cdot i}{R}\right)$ (radianes)	$\alpha_i = \text{arc sen}\left(\frac{y \cdot i}{R}\right)$ (grados sexagesimales)	$x_i = R \cdot \cos(\alpha_i)$
α_0	0	0	0	1750
α_1	1	0,01142882	0,65482316	1749,88571
α_2	2	0,022859134	1,30973188	1749,5428
α_3	3	0,034292435	1,9648118	1748,97113
α_4	4	0,045730223	2,62014877	1748,17047
α_5	5	0,057174001	3,27582896	1747,14052
α_6	6	0,06862528	3,93193892	1745,88087
α_7	7	0,08008558	4,58856574	1744,39101
α_8	8	0,091556431	5,24579708	1742,67036
α_9	9	0,103039376	5,90372138	1740,71824
α_{10}	10	0,114535973	6,56242787	1738,53387
α_{11}	11	0,126047796	7,22200674	1736,11636
α_{12}	12	0,137576438	7,88254925	1733,46474
α_{13}	13	0,149123511	8,54414783	1730,57794
α_{14}	14	0,160690653	9,20689622	1727,45478
α_{15}	15	0,172279524	9,87088961	1724,09396
α_{16}	16	0,183891812	10,5362247	1720,49412
α_{17}	17	0,195529237	11,203	1716,65372

α_{18}	18	0,207193548	11,8713158	1712,57117
α_{19}	19	0,218886532	12,5412745	1708,24471
α_{20}	20	0,230610011	13,2129804	1703,6725
α_{21}	21	0,242365851	13,8865404	1698,85255
α_{22}	22	0,254155959	14,5620638	1693,78275
α_{23}	23	0,265982291	15,2396627	1688,46084
α_{24}	24	0,277846851	15,9194519	1682,88443
α_{25}	25	0,289751701	16,6015496	1677,05098
α_{26}	26	0,301698959	17,286077	1670,95781
α_{27}	27	0,313690805	17,9731592	1664,60205
α_{28}	28	0,325729487	18,6629249	1657,9807
α_{29}	29	0,337817324	19,3555069	1651,09055
α_{30}	30	0,349956711	20,0510426	1643,92822
α_{31}	31	0,362150127	20,7496738	1636,49015
α_{32}	32	0,374400137	21,4515477	1628,77254
α_{33}	33	0,386709401	22,1568166	1620,77142
α_{34}	34	0,399080681	22,8656387	1612,48256
α_{35}	35	0,411516846	23,5781785	1603,90149
α_{36}	36	0,424020884	24,2946071	1595,02351
α_{37}	37	0,436595905	25,0151027	1585,84362
α_{38}	38	0,449245157	25,7398515	1576,35656
α_{39}	39	0,461972031	26,4690476	1566,55673
α_{40}	40	0,474780074	27,2028944	1556,43824
α_{41}	41	0,487673001	27,9416048	1545,99483
α_{42}	42	0,500654712	28,685402	1535,21985
α_{43}	43	0,513729301	29,4345207	1524,1063
α_{44}	44	0,526901074	30,1892078	1512,64669
α_{45}	45	0,54017457	30,9497231	1500,8331
α_{45}	46	0,553554578	31,7163411	1488,65711
α_{47}	47	0,56704616	32,4893517	1476,10975
α_{48}	48	0,580654673	33,2690621	1463,18147
α_{49}	49	0,5943858	34,0557977	1449,86206

α_{50}	50	0,608245579	34,8499046	1436,14066
α_{51}	51	0,622240435	35,6517508	1422,00563
α_{52}	52	0,636377222	36,461729	1407,44449
α_{53}	53	0,650663263	37,2802589	1392,44389
α_{54}	54	0,6651064	38,1077896	1376,98947
α_{55}	55	0,679715049	38,9448036	1361,06576
α_{56}	56	0,694498266	39,7918195	1344,65609
α_{57}	57	0,709465814	40,6493968	1327,74244
α_{58}	58	0,724628251	41,5181405	1310,30531
α_{59}	59	0,739997024	42,3987064	1292,32349
α_{60}	60	0,755584582	43,2918076	1273,77392
α_{61}	61	0,7714045	44,1982221	1254,63142
α_{62}	62	0,787471639	45,1188014	1234,86841
α_{63}	63	0,803802319	46,0544804	1214,45461
α_{64}	64	0,820414535	47,0062903	1193,35661
α_{65}	65	0,837328209	47,9753724	1171,53745
α_{66}	66	0,854565494	48,9629961	1148,95605
α_{67}	67	0,872151149	49,97058	1125,56652
α_{68}	68	0,890112986	50,9997174	1101,31739
α_{69}	69	0,90848243	52,052209	1076,15055
α_{70}	70	0,927295218	53,1301024	1050
α_{71}	71	0,946592278	54,2357424	1022,7903
α_{72}	72	0,966420851	55,371836	994,434513
α_{73}	73	0,98683595	56,541535	964,831592
α_{74}	74	1,007902277	57,7485466	933,862945
α_{75}	75	1,029696801	58,9972809	901,387819
α_{76}	76	1,052312279	60,2930523	867,236992
α_{77}	77	1,0758622	61,6423634	831,203946
α_{78}	78	1,100487917	63,0533131	793,032156
α_{79}	79	1,126369265	64,536205	752,396172
α_{80}	80	1,153741033	66,1044918	708,872344
α_{81}	81	1,182919778	67,7763108	661,89123

α_{82}	82	1,214350224	69,5771427	610,655386
α_{83}	83	1,248692198	71,5447928	553,985559
α_{84}	84	1,287002218	73,7397953	490
α_{85}	85	1,331177758	76,2708673	415,331193
α_{86}	86	1,385366761	79,3756685	322,645316
α_{87}	87	1,463840858	83,871903	186,815417

Tabla 2. Cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 1

Una vez calculadas las “ x_i ” que existen en un cuadrante de la celda. Pasamos a calcular la longitud de las “curvas” del serpentín, podemos decir que son perfectamente cuadradas, por tanto, la longitud de las “curvas” del serpentín existente en dos cuadrantes de celda equivale al radio de la celda (Figura 8). La longitud de las “curvas” del serpentín está dibujada en violeta en la figura 8.

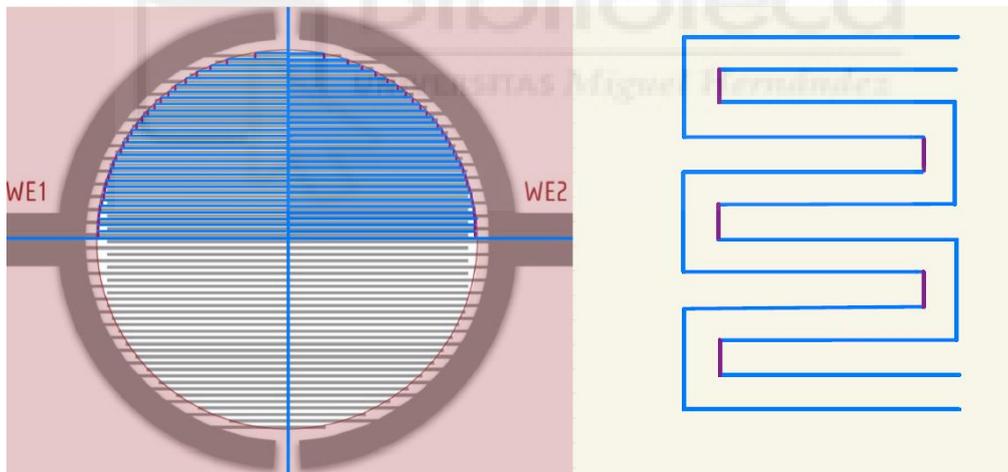


Figura 8. Representación de la longitud de las “curvas” del serpentín

Finalmente, obtenidas todas las longitudes del serpentín procedemos a sumarlas para obtener la total ocupada en una celda:

$$\begin{aligned}
 \text{longitud del serpentín (IDE 1)} &= 2 \cdot R + 2 \cdot R + 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^{87} x_i \right) = \\
 &= 2 \cdot x_0 + 2 \cdot R + 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^{87} x_i \right) =
 \end{aligned}$$

$$= 2 \cdot 1750 + 2 \cdot 1750 + 4 \cdot 119405,191 = 484620,764 \mu\text{m} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 484620,764 \mu\text{m} \cdot 10^{-3} = 484,621 \text{ mm}$$

Donde $2 \cdot x_0$ corresponde a 2 veces el radio horizontal o lo que es lo mismo el diámetro horizontal (Figura 7), $2 \cdot R$ equivale a la longitud de las “curvas” del serpentín ocupadas en las dos mitades de la celda (Figura 8) y, por último $4 \cdot (\sum_{i=0}^{87} x_i)$ son las longitudes horizontales del serpentín existentes en los cuatro cuadrantes de la celda.

A continuación, para calcular la longitud del serpentín del IDE 2, sabemos que su “y” es igual a $15 \mu\text{m}$, y el número de longitudes horizontales “i” va a ser:

$$\frac{1750}{15} = 116,67, \text{ sin embargo, debemos truncar en el } 116, \text{ por lo que tenemos que}$$

calcular 116 longitudes horizontales.

Así pues, se muestra a continuación la tabla con los cálculos realizados para calcular las “x_i” del IDE 2:

α_i	i	$\alpha_i = \text{arc sen} \left(\frac{y \cdot i}{R} \right)$ (radianes)	$\alpha_i = \text{arc sen} \left(\frac{y \cdot i}{R} \right)$ (grados sexagesimales)	$x_i = R \cdot \cos (\alpha_i)$
α_0	0	0	0	1750
α_1	1	0,00857153	0,4911127	1749,93571
α_2	2	0,0171437	0,98226148	1749,74284
α_3	3	0,02571712	1,47348246	1749,42133
α_4	4	0,03429244	1,9648118	1748,97113
α_5	5	0,04287027	2,45628572	1748,39212
α_6	6	0,05145127	2,94794056	1747,68418
α_7	7	0,06003606	3,43981277	1746,84716
α_8	8	0,06862528	3,93193892	1745,88087
α_9	9	0,07721958	4,42435579	1744,78509
α_{10}	10	0,08581959	4,91710034	1743,55958
α_{11}	11	0,09442597	5,41020972	1742,20406

α_{12}	12	0,10303938	5,90372138	1740,71824
α_{13}	13	0,11166046	6,397673	1739,10178
α_{14}	14	0,12028988	6,89210258	1737,35431
α_{15}	15	0,12892832	7,38704844	1735,47544
α_{16}	16	0,13757644	7,88254925	1733,46474
α_{17}	17	0,14623493	8,37864407	1731,32175
α_{18}	18	0,15490447	8,87537238	1729,04598
α_{19}	19	0,16358577	9,3727741	1726,6369
α_{20}	20	0,17227952	9,87088961	1724,09396
α_{21}	21	0,18098645	10,3697598	1721,41657
α_{22}	22	0,18970727	10,8694261	1718,60408
α_{23}	23	0,19844272	11,3699306	1715,65585
α_{24}	24	0,20719355	11,8713158	1712,57117
α_{25}	25	0,2159605	12,3736251	1709,34929
α_{26}	26	0,22474434	12,8769024	1705,98945
α_{27}	27	0,23354586	13,3811923	1702,49082
α_{28}	28	0,24236585	13,8865404	1698,85255
α_{29}	29	0,25120511	14,3929928	1695,07374
α_{30}	30	0,26006447	14,9005967	1691,15345
α_{31}	31	0,26894477	15,4094001	1687,09069
α_{32}	32	0,27784685	15,9194519	1682,88443
α_{33}	33	0,2867716	16,4308022	1678,53359
α_{34}	34	0,29571989	16,9435019	1674,03704
α_{35}	35	0,30469265	17,4576031	1669,3936
α_{36}	36	0,31369081	17,9731592	1664,60205
α_{37}	37	0,3227153	18,4902247	1659,66111
α_{38}	38	0,33176711	19,0088554	1654,56943
α_{39}	39	0,34084724	19,5291085	1649,32562
α_{40}	40	0,34995671	20,0510426	1643,92822
α_{41}	41	0,35909657	20,5747178	1638,37572
α_{42}	42	0,36826789	21,100196	1632,66653
α_{43}	43	0,37747179	21,6275405	1626,799

α_{44}	44	0,3867094	22,1568166	1620,77142
α_{45}	45	0,39598189	22,6880912	1614,58199
α_{45}	46	0,40529047	23,2214333	1608,22884
α_{47}	47	0,41463637	23,7569142	1601,71002
α_{48}	48	0,42402088	24,2946071	1595,02351
α_{49}	49	0,43344532	24,8345875	1588,16718
α_{50}	50	0,44291104	25,3769335	1581,13883
α_{51}	51	0,45241946	25,9217258	1573,93615
α_{52}	52	0,46197203	26,4690476	1566,55673
α_{53}	53	0,47157025	27,0189852	1558,99808
α_{54}	54	0,48121569	27,5716279	1551,25755
α_{55}	55	0,49090995	28,1270682	1543,33243
α_{56}	56	0,50065471	28,685402	1535,21985
α_{57}	57	0,51045171	29,2467289	1526,91683
α_{58}	58	0,52030276	29,8111523	1518,42023
α_{59}	59	0,53020973	30,3787797	1509,7268
α_{60}	60	0,54017457	30,9497231	1500,8331
α_{61}	61	0,55019932	31,5240989	1491,73557
α_{62}	62	0,56028609	32,1020285	1482,43044
α_{63}	63	0,57043711	32,6836388	1472,91378
α_{64}	64	0,58065467	33,2690621	1463,18147
α_{65}	65	0,5909412	33,8584367	1453,22916
α_{66}	66	0,60129922	34,4519073	1443,05232
α_{67}	67	0,61173137	35,0496257	1432,64615
α_{68}	68	0,62224044	35,6517508	1422,00563
α_{69}	69	0,63282933	36,2584496	1411,12544
α_{70}	70	0,64350111	36,8698976	1400
α_{71}	71	0,654259	37,4862795	1388,62342
α_{72}	72	0,6651064	38,1077896	1376,98947
α_{73}	73	0,67604689	38,7346333	1365,09157
α_{74}	74	0,68708424	39,3670273	1352,92276
α_{75}	75	0,69822247	40,0052009	1340,47566

α_{76}	76	0,70946581	40,6493968	1327,74244
α_{77}	77	0,72081876	41,2998728	1314,7148
α_{78}	78	0,73228609	41,9569025	1301,38388
α_{79}	79	0,74387289	42,6207773	1287,74027
α_{80}	80	0,75558458	43,2918076	1273,77392
α_{81}	81	0,76742695	43,9703252	1259,4741
α_{82}	82	0,77940618	44,6566848	1244,82931
α_{83}	83	0,79152893	45,351267	1229,82722
α_{84}	84	0,80380232	46,0544804	1214,45461
α_{85}	85	0,81623403	46,7667652	1198,69721
α_{86}	86	0,82883236	47,4885962	1182,53964
α_{87}	87	0,84160627	48,2204874	1165,96527
α_{88}	88	0,85456549	48,9629961	1148,95605
α_{89}	89	0,86772061	49,7167289	1131,49238
α_{90}	90	0,88108317	50,4823472	1113,55287
α_{91}	91	0,89466582	51,2605754	1095,11415
α_{92}	92	0,90848243	52,052209	1076,15055
α_{93}	93	0,92254832	52,858125	1056,63381
α_{94}	94	0,93688042	53,6792942	1036,53268
α_{95}	95	0,95149759	54,516796	1015,81248
α_{96}	96	0,96642085	55,371836	994,434513
α_{97}	97	0,98167384	56,2457677	972,355388
α_{98}	98	0,99728322	57,1401196	949,526198
α_{99}	99	1,01327932	58,0566284	925,891462
α_{100}	100	1,0296968	58,9972809	901,387819
α_{101}	101	1,04657565	59,9643677	875,94235
α_{102}	102	1,06396236	60,9605525	849,470423
α_{103}	103	1,08191151	61,9889632	821,872861
α_{104}	104	1,10048792	63,0533131	793,032156
α_{105}	105	1,11976951	64,1580672	762,807315
α_{106}	106	1,13985139	65,3086741	731,026675
α_{107}	107	1,16085161	66,5118978	697,477598

α_{108}	108	1,18291978	67,7763108	661,89123
α_{109}	109	1,20625031	69,1130519	623,919065
α_{110}	110	1,23110375	70,5370491	583,095189
α_{111}	111	1,2578433	72,0691122	538,771751
α_{112}	112	1,28700222	73,7397953	490
α_{113}	113	1,31942174	75,5972972	435,287261
α_{114}	114	1,35657797	77,7261922	372,021505
α_{115}	115	1,4015636	80,3036789	294,745653
α_{116}	116	1,46384086	83,871903	186,815417

Tabla 3. Cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 2

$$\begin{aligned}
 \text{longitud del serpentín(IDE 2)} &= 2 \cdot R + 2 \cdot R + 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^{116} x_i \right) = \\
 &= 2 \cdot x_0 + 2 \cdot R + 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^{116} x_i \right) = \\
 &= 2 \cdot 1750 + 2 \cdot 1750 + 4 \cdot 159476,063 = 644904,2522 \mu\text{m} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow 644904,2522 \mu\text{m} \cdot 10^{-3} = 644,904 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Para terminar, calculamos la longitud del serpentín del IDE 3, sabemos que su “ y ” es igual a 10 μm , y el número de longitudes horizontales “ i ” va a ser:

$$\frac{1750}{10} = 175$$

Así pues, se muestra a continuación la tabla con los cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 3:

α_i	i	$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{y \cdot i}{R}\right)$ (radianes)	$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{y \cdot i}{R}\right)$ (grados sexagesimales)	x_i $= R \cdot \cos(\alpha_i)$
α_0	0	0	0	1750
α_1	1	0,00571432	0,32740624	1749,97143
α_2	2	0,01142882	0,65482316	1749,88571
α_3	3	0,0171437	0,98226148	1749,74284
α_4	4	0,02285913	1,30973188	1749,5428
α_5	5	0,02857532	1,63724508	1749,28557
α_6	6	0,03429244	1,9648118	1748,97113
α_7	7	0,04001067	2,29244278	1748,59944
α_8	8	0,04573022	2,62014877	1748,17047
α_9	9	0,05145127	2,94794056	1747,68418
α_{10}	10	0,057174	3,27582896	1747,14052
α_{11}	11	0,06289861	3,60382479	1746,53944
α_{12}	12	0,06862528	3,93193892	1745,88087
α_{13}	13	0,07435421	4,26018226	1745,16475
α_{14}	14	0,08008558	4,58856574	1744,39101
α_{15}	15	0,08581959	4,91710034	1743,55958
α_{16}	16	0,09155643	5,24579708	1742,67036
α_{17}	17	0,09729629	5,57466706	1741,72328
α_{18}	18	0,10303938	5,90372138	1740,71824
α_{19}	19	0,10878587	6,23297124	1739,65514
α_{20}	20	0,11453597	6,56242787	1738,53387
α_{21}	21	0,12028988	6,89210258	1737,35431
α_{22}	22	0,1260478	7,22200674	1736,11636
α_{23}	23	0,13180991	7,55215179	1734,81988
α_{24}	24	0,13757644	7,88254925	1733,46474
α_{25}	25	0,14334757	8,2132107	1732,05081

α_{26}	26	0,14912351	8,54414783	1730,57794
α_{27}	27	0,15490447	8,87537238	1729,04598
α_{28}	28	0,16069065	9,20689622	1727,45478
α_{29}	29	0,16648227	9,53873128	1725,80416
α_{30}	30	0,17227952	9,87088961	1724,09396
α_{31}	31	0,17808263	10,2033833	1722,32401
α_{32}	32	0,18389181	10,5362247	1720,49412
α_{33}	33	0,18970727	10,8694261	1718,60408
α_{34}	34	0,19552924	11,203	1716,65372
α_{35}	35	0,20135792	11,536959	1714,64282
α_{36}	36	0,20719355	11,8713158	1712,57117
α_{37}	37	0,21303634	12,2060833	1710,43854
α_{38}	38	0,21888653	12,5412745	1708,24471
α_{39}	39	0,22474434	12,8769024	1705,98945
α_{40}	40	0,23061001	13,2129804	1703,6725
α_{41}	41	0,23648377	13,5495218	1701,29363
α_{42}	42	0,24236585	13,8865404	1698,85255
α_{43}	43	0,2482565	14,2240497	1696,34902
α_{44}	44	0,25415596	14,5620638	1693,78275
α_{45}	45	0,26006447	14,9005967	1691,15345
α_{45}	46	0,26598229	15,2396627	1688,46084
α_{47}	47	0,27190966	15,5792762	1685,7046
α_{48}	48	0,27784685	15,9194519	1682,88443
α_{49}	49	0,28379411	16,2602047	1680
α_{50}	50	0,2897517	16,6015496	1677,05098
α_{51}	51	0,29571989	16,9435019	1674,03704
α_{52}	52	0,30169896	17,286077	1670,95781
α_{53}	53	0,30768917	17,6292908	1667,81294
α_{54}	54	0,31369081	17,9731592	1664,60205
α_{55}	55	0,31970415	18,3176984	1661,32477
α_{56}	56	0,32572949	18,6629249	1657,9807
α_{57}	57	0,33176711	19,0088554	1654,56943

α_{58}	58	0,33781732	19,3555069	1651,09055
α_{59}	59	0,34388042	19,7028968	1647,54363
α_{60}	60	0,34995671	20,0510426	1643,92822
α_{61}	61	0,35604651	20,3999622	1640,24388
α_{62}	62	0,36215013	20,7496738	1636,49015
α_{63}	63	0,36826789	21,100196	1632,66653
α_{64}	64	0,37440014	21,4515477	1628,77254
α_{65}	65	0,38054719	21,803748	1624,80768
α_{66}	66	0,3867094	22,1568166	1620,77142
α_{67}	67	0,39288711	22,5107733	1616,66323
α_{68}	68	0,39908068	22,8656387	1612,48256
α_{69}	69	0,40529047	23,2214333	1608,22884
α_{70}	70	0,41151685	23,5781785	1603,90149
α_{71}	71	0,41776019	23,9358957	1599,49992
α_{72}	72	0,42402088	24,2946071	1595,02351
α_{73}	73	0,43029932	24,6543351	1590,47163
α_{74}	74	0,43659591	25,0151027	1585,84362
α_{75}	75	0,44291104	25,3769335	1581,13883
α_{76}	76	0,44924516	25,7398515	1576,35656
α_{77}	77	0,45559867	26,1038811	1571,4961
α_{78}	78	0,46197203	26,4690476	1566,55673
α_{79}	79	0,46836568	26,8353766	1561,5377
α_{80}	80	0,47478007	27,2028944	1556,43824
α_{81}	81	0,48121569	27,5716279	1551,25755
α_{82}	82	0,487673	27,9416048	1545,99483
α_{83}	83	0,49415251	28,3128531	1540,64921
α_{84}	84	0,50065471	28,685402	1535,21985
α_{85}	85	0,50718013	29,0592811	1529,70585
α_{86}	86	0,5137293	29,4345207	1524,1063
α_{87}	87	0,52030276	29,8111523	1518,42023
α_{88}	88	0,52690107	30,1892078	1512,64669
α_{89}	89	0,53352481	30,5687201	1506,78466

α_{90}	90	0,54017457	30,9497231	1500,8331
α_{91}	91	0,54685095	31,3322515	1494,79096
α_{92}	92	0,55355458	31,7163411	1488,65711
α_{93}	93	0,56028609	32,1020285	1482,43044
α_{94}	94	0,56704616	32,4893517	1476,10975
α_{95}	95	0,57383545	32,8783496	1469,69385
α_{96}	96	0,58065467	33,2690621	1463,18147
α_{97}	97	0,58750454	33,6615306	1456,57132
α_{98}	98	0,5943858	34,0557977	1449,86206
α_{99}	99	0,60129922	34,4519073	1443,05232
α_{100}	100	0,60824558	34,8499046	1436,14066
α_{101}	101	0,6152257	35,2498363	1429,12561
α_{102}	102	0,62224044	35,6517508	1422,00563
α_{103}	103	0,62929064	36,0556978	1414,77913
α_{104}	104	0,63637722	36,461729	1407,44449
α_{105}	105	0,64350111	36,8698976	1400
α_{106}	106	0,65066326	37,2802589	1392,44389
α_{107}	107	0,65786468	37,6928698	1384,77435
α_{108}	108	0,6651064	38,1077896	1376,98947
α_{109}	109	0,67238949	38,5250797	1369,08729
α_{110}	110	0,67971505	38,9448036	1361,06576
α_{111}	111	0,68708424	39,3670273	1352,92276
α_{112}	112	0,69449827	39,7918195	1344,65609
α_{113}	113	0,70195836	40,2192513	1336,26345
α_{114}	114	0,70946581	40,6493968	1327,74244
α_{115}	115	0,71702198	41,0823331	1319,0906
α_{116}	116	0,72462825	41,5181405	1310,30531
α_{117}	117	0,73228609	41,9569025	1301,38388
α_{118}	118	0,73999702	42,3987064	1292,32349
α_{119}	119	0,74776263	42,843643	1283,12119
α_{120}	120	0,75558458	43,2918076	1273,77392
α_{121}	121	0,7634646	43,7432993	1264,27845

α_{122}	122	0,7714045	44,1982221	1254,63142
α_{123}	123	0,77940618	44,6566848	1244,82931
α_{124}	124	0,78747164	45,1188014	1234,86841
α_{125}	125	0,79560295	45,5846914	1224,74487
α_{126}	126	0,80380232	46,0544804	1214,45461
α_{127}	127	0,81207204	46,5283005	1203,99336
α_{128}	128	0,82041453	47,0062903	1193,35661
α_{129}	129	0,82883236	47,4885962	1182,53964
α_{130}	130	0,83732821	47,9753724	1171,53745
α_{131}	131	0,84590492	48,4667817	1160,34478
α_{132}	132	0,85456549	48,9629961	1148,95605
α_{133}	133	0,86331312	49,4641979	1137,36538
α_{134}	134	0,87215115	49,97058	1125,56652
α_{135}	135	0,88108317	50,4823472	1113,55287
α_{136}	136	0,89011299	50,9997174	1101,31739
α_{137}	137	0,89924463	51,5229222	1088,85261
α_{138}	138	0,90848243	52,052209	1076,15055
α_{139}	139	0,91783098	52,5878415	1063,20271
α_{140}	140	0,92729522	53,1301024	1050
α_{141}	141	0,93688042	53,6792942	1036,53268
α_{142}	142	0,94659228	54,2357424	1022,7903
α_{143}	143	0,95643689	54,7997971	1008,76162
α_{144}	144	0,96642085	55,371836	994,434513
α_{145}	145	0,97655129	55,9522676	979,795897
α_{146}	146	0,98683595	56,541535	964,831592
α_{147}	147	0,99728322	57,1401196	949,526198
α_{148}	148	1,00790228	57,7485466	933,862945
α_{149}	149	1,01870314	58,3673903	917,823512
α_{150}	150	1,0296968	58,9972809	901,387819
α_{151}	151	1,04089538	59,6389124	884,533775
α_{152}	152	1,05231228	60,2930523	867,236992
α_{153}	153	1,06396236	60,9605525	849,470423

α_{154}	154	1,0758622	61,6423634	831,203946
α_{155}	155	1,0880304	62,3395501	812,40384
α_{156}	156	1,10048792	63,0533131	793,032156
α_{157}	157	1,1132585	63,7850135	773,045924
α_{158}	158	1,12636926	64,536205	752,396172
α_{159}	159	1,13985139	65,3086741	731,026675
α_{160}	160	1,15374103	66,1044918	708,872344
α_{161}	161	1,16808049	66,9260819	685,857128
α_{162}	162	1,18291978	67,7763108	661,89123
α_{163}	163	1,1983188	68,6586095	636,867333
α_{164}	164	1,21435022	69,5771427	610,655386
α_{165}	165	1,23110375	70,5370491	583,095189
α_{166}	166	1,2486922	71,5447928	553,985559
α_{167}	167	1,26726084	72,608698	523,067873
α_{168}	168	1,28700222	73,7397953	490
α_{169}	169	1,30818085	74,9532416	454,312668
α_{170}	170	1,33117776	76,2708673	415,331193
α_{171}	171	1,35657797	77,7261922	372,021505
α_{172}	172	1,38536676	79,3756685	322,645316
α_{173}	173	1,41946618	81,3294213	263,818119
α_{174}	174	1,46384086	83,871903	186,815417
α_{175}	175	1,57079633	90	1,072E-13

Tabla 4. Cálculos realizados para calcular las “ x_i ” del IDE 3

$$\begin{aligned}
 \text{longitud del serpentín(IDE 3)} &= 2 \cdot R + 2 \cdot R + 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^{175} x_i \right) = \\
 &= 2 \cdot x_0 + 2 \cdot R + 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^{175} x_i \right) = \\
 &= 2 \cdot 1750 + 2 \cdot 1750 + 4 \cdot 239614,3024 = 965457,2096 \mu\text{m} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow 965457,2096 \mu\text{m} \cdot 10^{-3} = 965,457\text{mm}
 \end{aligned}$$

2.2. Fabricación de capas en los IDEs del IMB-CNM, CSIC.

En primer lugar, limpiamos el IDE. Si se trata de un IDE nuevo, lo depositamos en un vaso de precipitados con acetona (Figura 9). La acetona va a disolver el recubrimiento del IDE. Si el IDE es reutilizado no es necesario realizar este paso. Una vez disuelto el recubrimiento, introducimos el IDE en un vaso de precipitados con agua destilada (Figura 10) en el limpiador de ultrasonidos (Figura 11) durante diez minutos. Después, sumergimos el IDE en un vaso de precipitados con alcohol isopropílico (Figura 12) en el limpiador ultrasónico durante cinco minutos. A continuación, secamos el IDE en el spinner (Figura 13) a 6000 rpm.

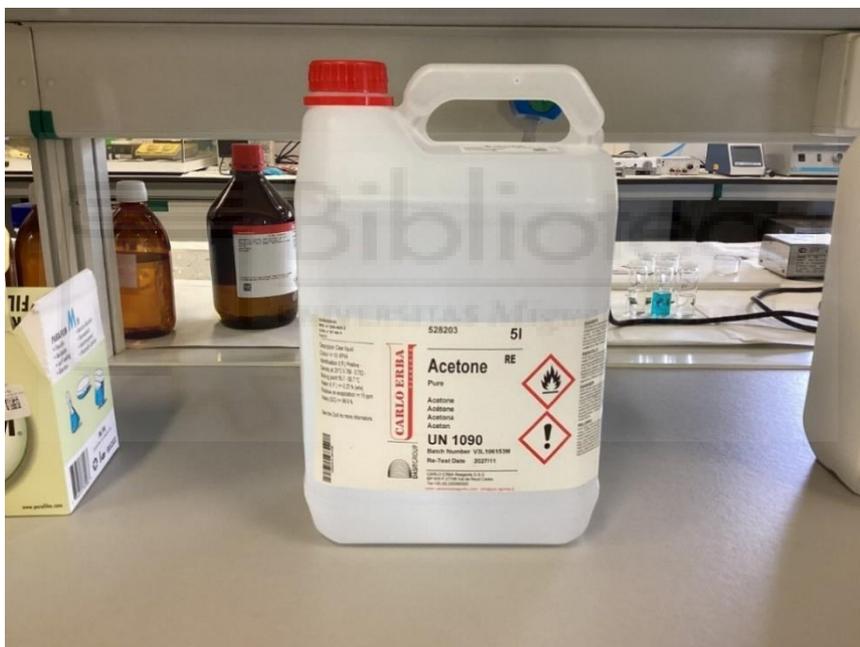


Figura 9. Acetona

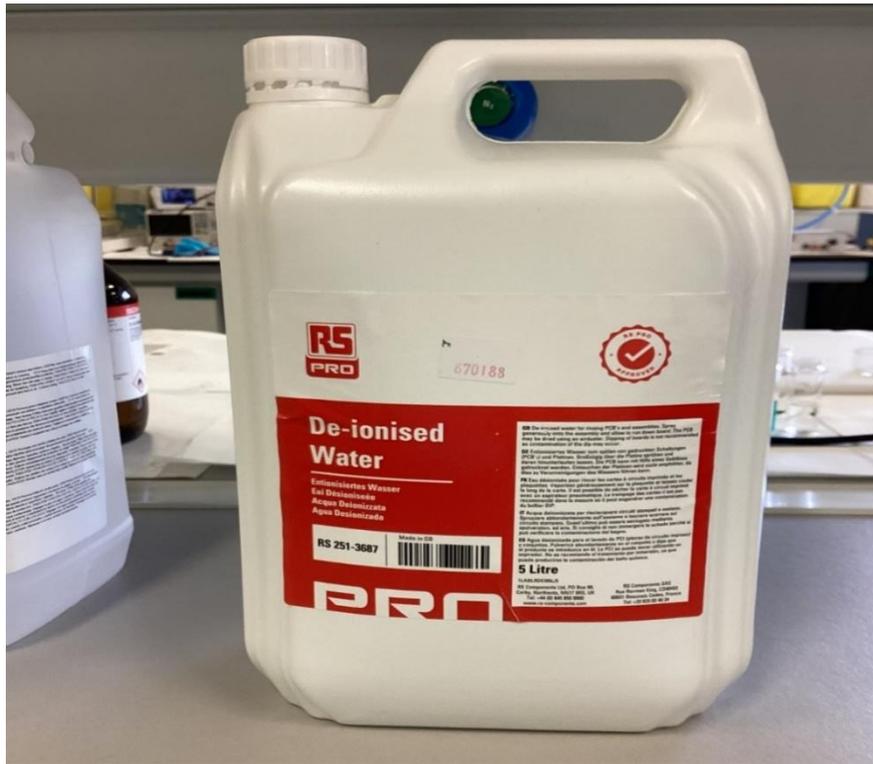


Figura 10. Agua desionizada



Figura 11. Limpiador ultrasónico Elma Transsonic Digital S

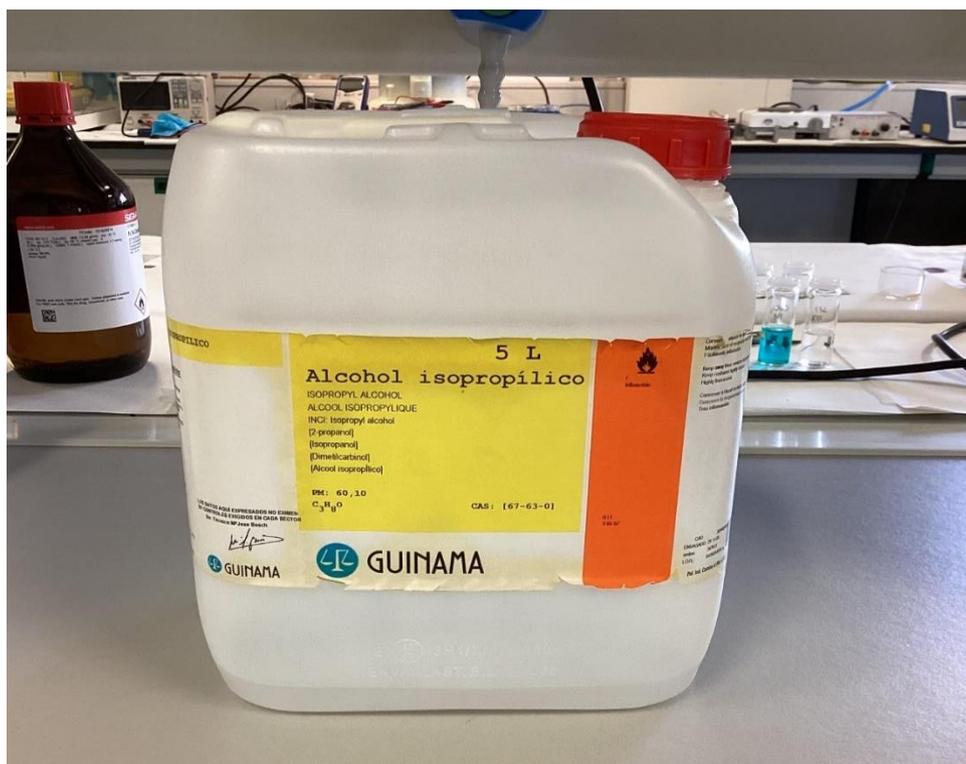


Figura 12. Alcohol isopropílico



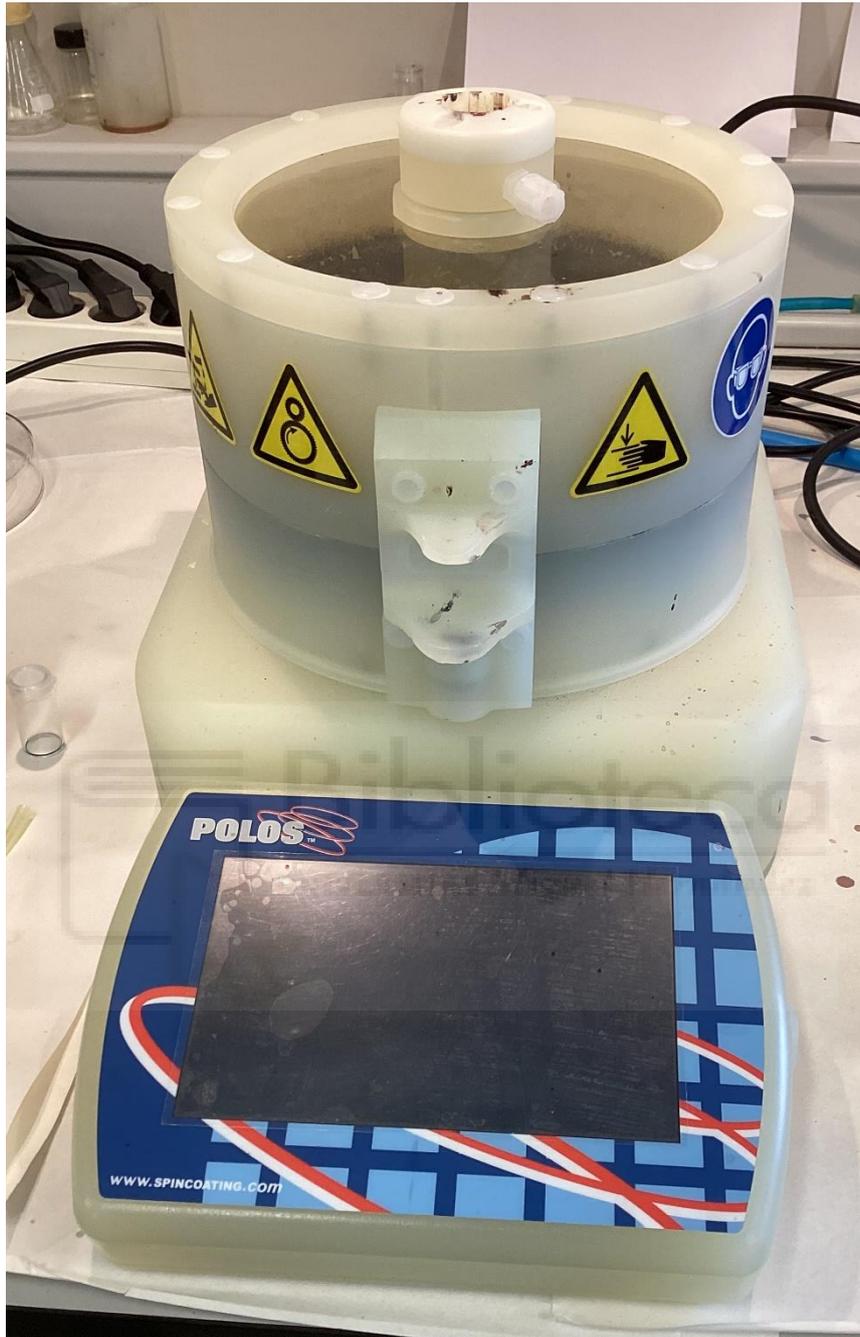


Figura 13. Spinner Polos

Luego, nos llevamos el IDE al microscopio y observamos sus fingers. Si se observan restos de polímero, se pasa un bastoncillo de algodón bañado en alcohol isopropílico. Es importante no apretar con el bastoncillo y que la pasada sea en la dirección de los fingers para no rayarlos.

A continuación, se lleva el IDE a la spinner, se le echan 20 μ L de agua desionizada y se vuelve a secar a 6000 rpm. A continuación, se encintan con cinta adhesiva los pads del IDE.

Una vez limpio el IDE se procede a comprobar que el IDE está en vacío, en la cámara de vacío (Figura 14).

La comprobación de vacío se realiza para asegurar que el IDE no está cortocircuitado o que no existe continuidad por existir restos de polímero entre fingers.



Figura 14. Cámara de vacío

Una vez comprobado el vacío, procedemos a tirar la capa del polímero. Para ello, hemos utilizado dos técnicas: spin coating y drop casting.

2.2.1 Spin coating

El spin coating es una técnica de fabricación de capas de polímeros mediante la cual el spinner hace girar el sustrato a alta velocidad y la fuerza centrífuga estira el polímero en el sustrato.

Es conveniente subrayar que mediante la técnica del spin coating se puede originar una capa uniforme y controlar el espesor de la capa, siendo el espesor de la capa inversamente proporcional a la velocidad de giro del spinner. Por tanto, al poder fabricar capas de mayor espesor podemos reducir la resistencia (Ec.1).

$$R = \rho \frac{s}{h \cdot l} \quad (1)$$

Donde R es la resistencia, ρ es la resistividad, s la separación entre fingers, h es el espesor o la altura de la capa y l la longitud del serpentín.

A continuación, se indica el proceso de fabricación de la capa mediante la técnica comentada en este apartado. Primero colocamos el IDE en el spinner, se asegura la succión del IDE mediante el spinner, tiramos el polímero PEDOT: PSS mediante la pipeta (Figura 15) y spineamos a 1000 rpm. Cuando acaba el ciclo del spinner debemos retirar rápidamente la cinta adhesiva de los pads, colocar el IDE en la placa calefactora y aplicar el campo eléctrico mediante unas pinzas conectadas a la fuente de alimentación (Figura 16).



Figura 15. Pipetas de 1000µL y 200 µL, con sus respectivas cánulas

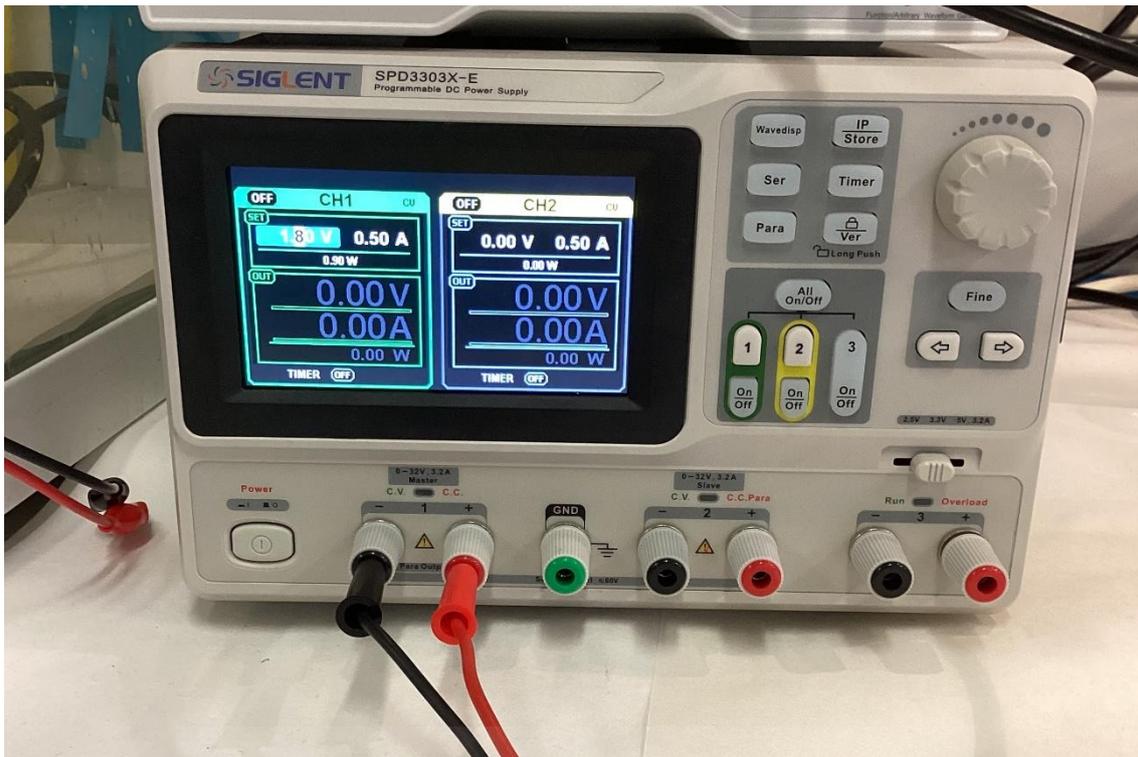


Figura 16. Fuente de alimentación Siglent SPD3303X-E

Sin embargo, se tuvo que abandonar esta técnica. Debido a que la capa del polímero no salía suficientemente húmeda del spinner y, por tanto, cuando íbamos a aplicar el campo eléctrico la capa estaba prácticamente seca. Por consiguiente, cuando aplicábamos el campo eléctrico a la capa, probablemente, no lográbamos reorientar las cadenas del polímero para que se generase una mejora de la conductividad (Figura 17).

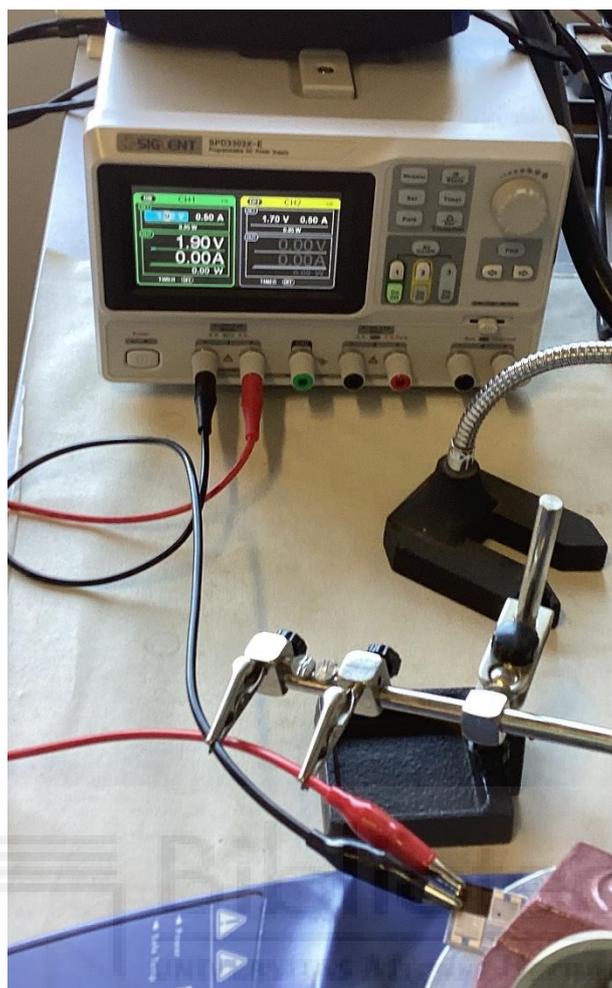


Figura 17. Capa de PEDOT:PSS en la que no se aprecia mejora de conductividad

En consecuencia, no se apreciaba diferencia en la conductividad entre las capas a las que se les aplicaba campo eléctrico y las capas a las que no se les aplicaba. Por otro lado, a veces conseguíamos un incremento de conductividad cuando aplicábamos campo eléctrico. Sin embargo, no podemos asegurar que ese incremento fuera por suministrar campo eléctrico, debido a que podría estar conduciendo a través de los distintos elementos que conforman el sustrato del electrodo (Figura 18).



Figura 18. Electrodo interdigitado probablemente conduciendo a través los distintos elementos que conforman el sustrato del electrodo

La solución adoptada fue cambiar a la técnica del drop casting.

2.2.2. Drop casting

Consiste básicamente en tirar la gota del polímero a una distancia determinada y orientando la punta de la cánula de la pipeta en un ángulo determinado.

En cuanto a la técnica del drop casting, es cierto que la capa no se genera tan uniforme como podría salir con la técnica spin coating. Sin embargo, en los resultados de los IDEs de la misma geometría (10-10, 10-40, 15-25, 25-25, etc) se observa un orden de magnitud parecido.

Así pues, una vez realizado el proceso de limpieza y comprobado el vacío, procedemos a situar el IDE en la cámara de vacío. Desde la fuente de alimentación conectada a la cámara de vacío, suministramos un campo eléctrico que va directamente al IDE. Comprobamos con el multímetro que se está aplicando el campo eléctrico correspondiente, si se está aplicando, procedemos a tirar mediante la pipeta la gota del polímero. Efectuamos el mismo procedimiento con los 4 IDEs. Al primer electrodo le suministramos 0 V, al segundo 0,9 V, al tercero 1,8 V, y al cuarto 2,7 V. Dejamos secar la capa teniendo la cámara de vacío a 50 °C mediante el controlador de temperatura (Figura 19).

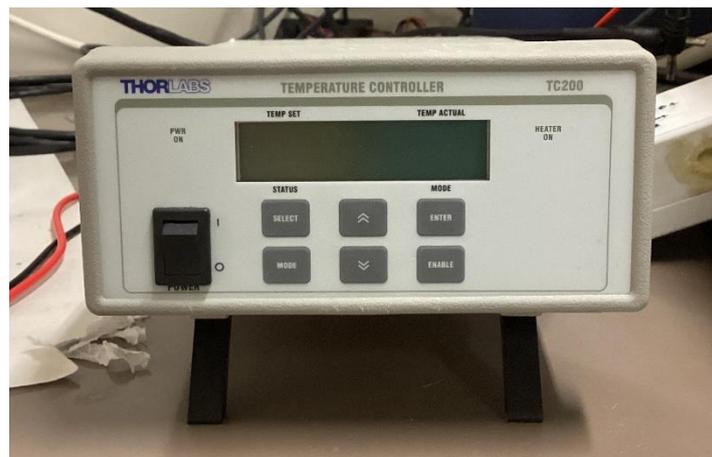


Figura 19. Controlador de temperatura ThorLabs TC200

2.3. Caracterización eléctrica de los IDEs del IMB-CNM, CSIC

Una vez están los cuatro electrodos interdigitados con las capas de los polímeros secas y situados en la cámara de vacío (Figura 20), procedemos a medir.

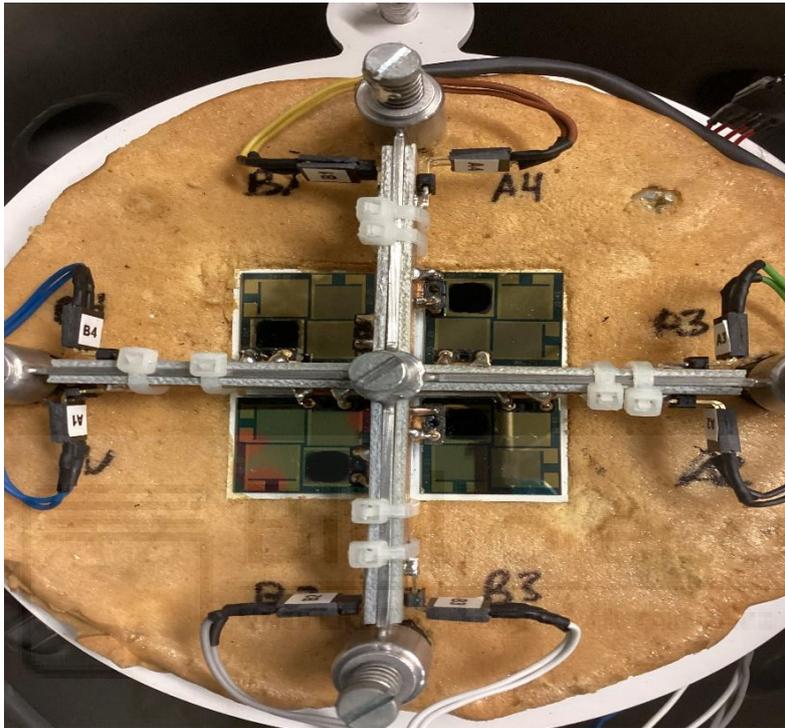


Figura 20. Capas de PEDOT: PSS depositadas en IDEs situados en cámara de vacío

Así pues, se ha medido en vacío, rompiendo el vacío y con temperaturas en vacío.

Al medir en algunas ocasiones se observó una corriente demasiado elevada por lo que se comprobó en el microscopio que se había rayado el oro de los fingers (Figura 21), aumentando así la posibilidad de cortocircuito.

También, en otra ocasión apareció una curva I-V propia de un diodo (Figura 22), debido a una perforación en el pad del IDE producida por el propio pin retractil del portamuestras.

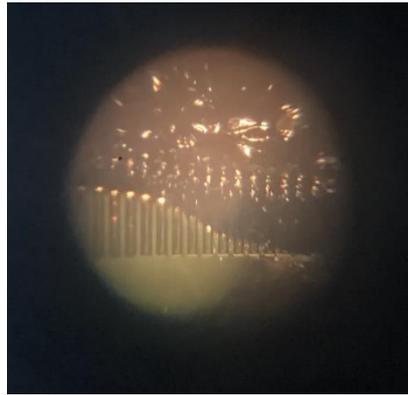


Figura 21. Foto del oro rayado del finger

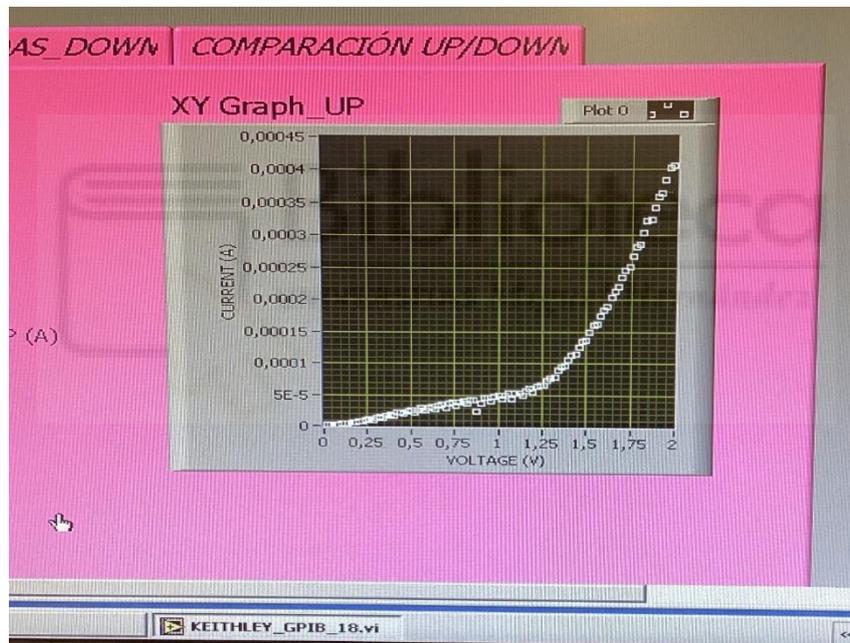


Figura 22. Curva I-V de diodo

En consecuencia, decidimos cambiar de electrodos interdigitados.

2.4. Fabricación de capas en los IDEs de Micrux

En primer lugar, procedemos a limpiar los electrodos interdigitados con una rampa cíclica entre -1,0 V y +1,3 V, de al menos 12 ciclos, en H_2SO_4 0,05 M. Siendo la tasa de barrido de 0,1 V/s. Dicho de otra manera, primero se deposita sobre la celda del electrodo una gota de H_2SO_4 0,05 M (Figura 23) de 15 μL , y a continuación, se suministra dicha rampa al electrodo interdigitado a través del generador de funciones (Figura 24) que va conectado al portaelectrodo (Figura 25), y éste a su vez está conectado a los pads del IDE (Figura 26).



Figura 23. Disolución de agua y ácido sulfúrico de 0,05 M



Figura 24. Generador de funciones Rigol DG832 alimentado por red 35 MHz (máx.) 2 canales

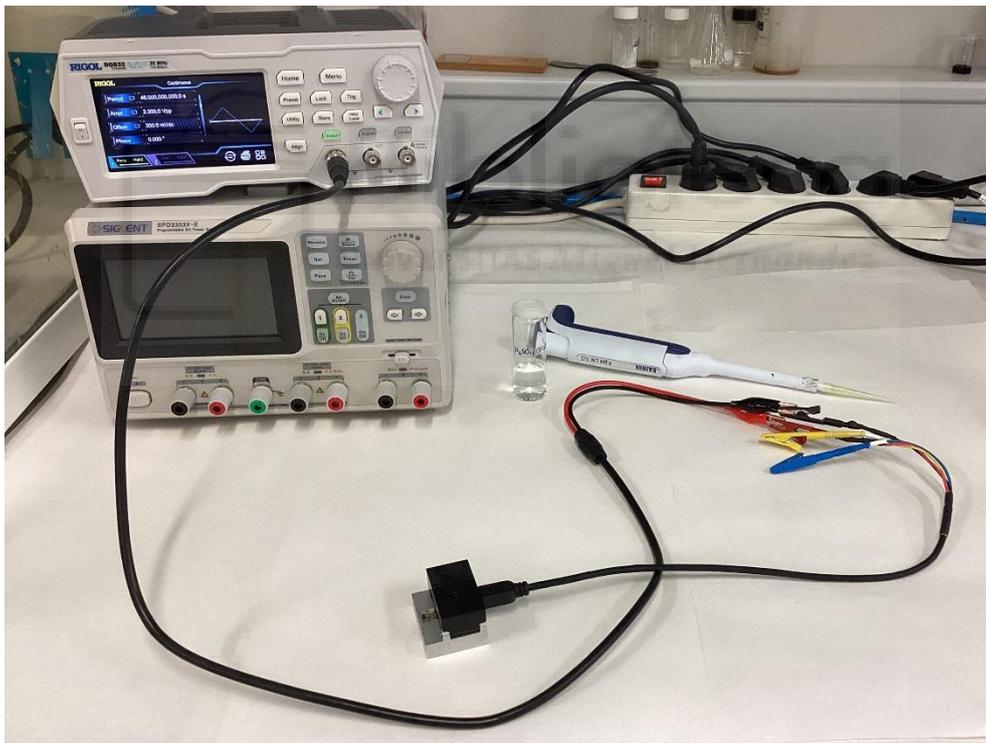


Figura 25. Rampa cíclica entre -1,0 V y +1,3 V en H_2SO_4 0,05 M

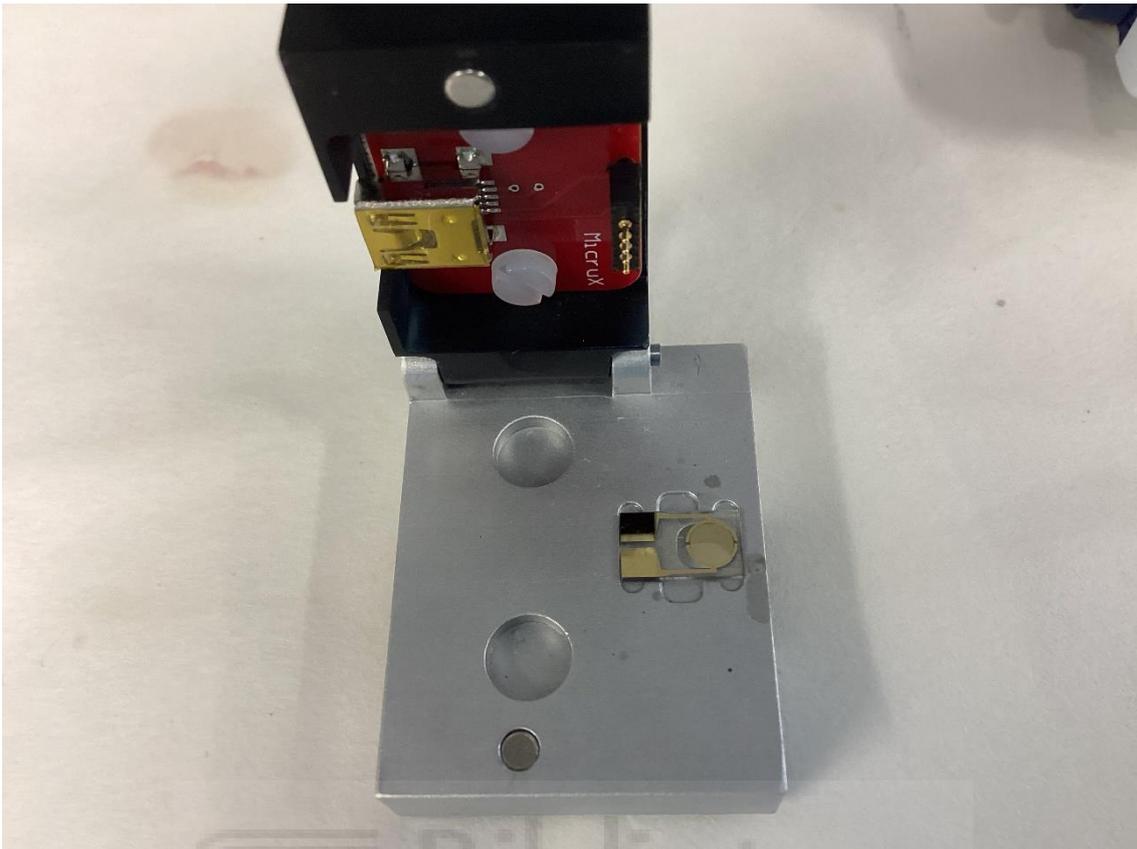


Figura 26. Pines del portaelectrodo que conectan con los pads del IDE

Después, introducimos el IDE en un vaso de precipitados con agua desionizada y depositamos el vaso de precipitados en el limpiador de ultrasonidos durante 10 minutos a 50 °C. Como resultado se desprende la capa del polímero del IDE (si es reutilizado). A continuación, nos llevamos el IDE al microscopio (Figura 27) y observamos los fingers del IDE (Figura 28), si se visualizan restos de polímero se pasa un bastoncillo de algodón con suavidad en dirección de los fingers. Entonces, le tiramos una gota de agua desionizada de 15 μL a través de la pipeta. Finalmente, secamos con nitrógeno (Figura 29).



Figura 27. Microscopio

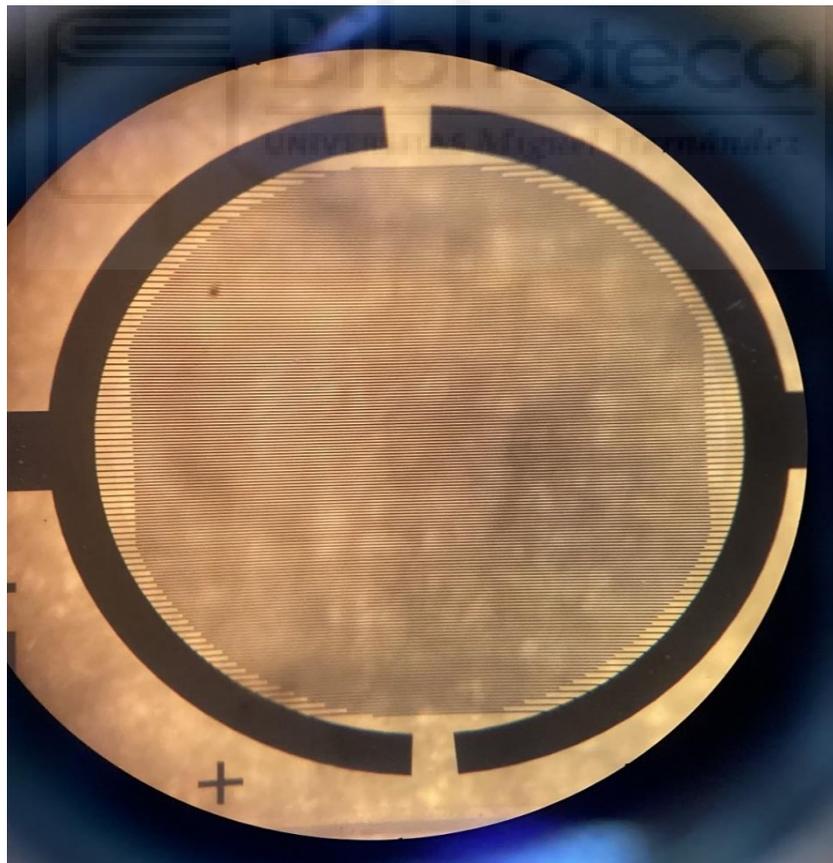
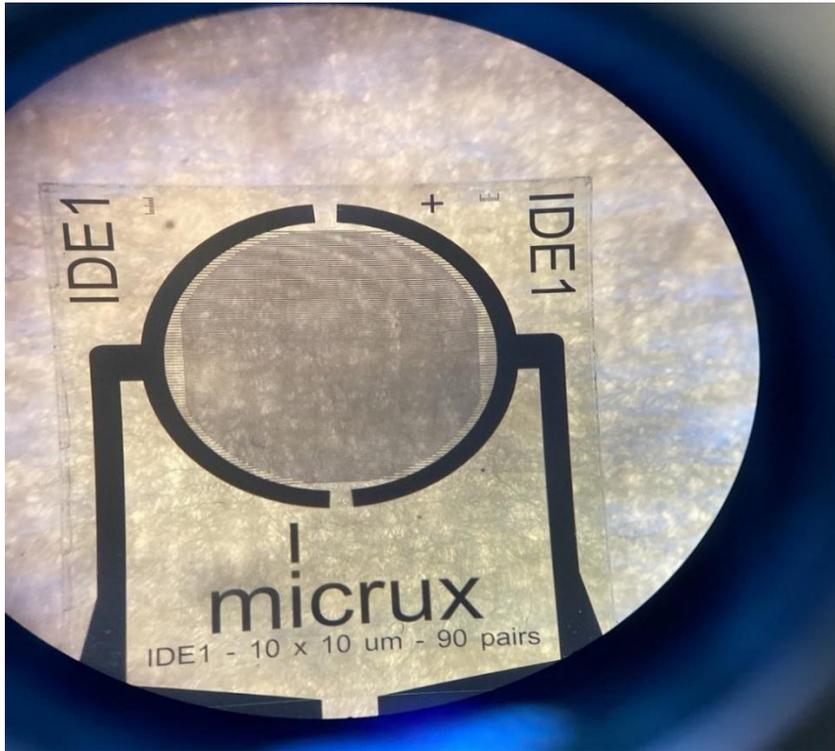


Figura 28. Fingers del IDE 1 vistos mediante el microscopio



Figura 29. Pistola de nitrógeno

Una vez limpio el electrodo interdigitado (IDE), comprobamos que está en vacío en la cámara de vacío. Si está en vacío significa que no existe continuidad, y por tanto el IDE está limpio, y por otro lado que no está cortocircuitado.

Comprobado el vacío, procedemos a fabricar la capa del polímero. Conviene aclarar que en estos electrodos interdigitados hemos fabricado diferentes capas mediante la técnica del drop casting y además cada proceso de fabricación ha sido estandarizado.

2.4.1. Ensayo tipo 1

Primero, se ha realizado el proceso de fabricación denominado: “Ensayo tipo 1”. Ha consistido en tirar una gota de 5 μL de PEDOT: PSS dentro de la celda del electrodo interdigitado (Figura 30), dejar secar durante 12 minutos en la placa calefactora a 50 $^{\circ}\text{C}$, sin aplicar campo eléctrico. Además, en cada electrodo interdigitado (hay 3 tipos: IDE 1, IDE 2 e IDE 3) se han fabricado al menos 5 capas. En otras palabras, en cada IDE se ha fabricado una capa, se ha medido, después se ha limpiado el IDE, se ha fabricado otra capa y, así sucesivamente hasta 5 veces. De manera que se pudo ver si los experimentos eran reproducibles y también si se podían reutilizar los electrodos interdigitados de Micrux.



Figura 30. Gota de 5 μL de PEDOT: PSS dentro de la celda del electrodo interdigitado

2.4.2. Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”

Por un lado, se han elaborado capas de 5 μL de PEDOT: PSS, sin suministrar campo eléctrico, se han secado a 120 $^{\circ}\text{C}$ y se han dejado secar durante 12 minutos, 30 minutos, 55 minutos y 2 horas. Por otro lado, se han fabricado capas de 5 μL de PEDOT: PSS, suministrándoles una tensión de 1,8 V durante 12 minutos, 30 minutos, 55 minutos y 2 horas, mientras se secaban a 120 $^{\circ}\text{C}$ en la placa calefactora.



2.4.3. Ensayo tipo 1.B - “25% vol H₂O + 75% vol PEDOT: PSS”

También, se han fabricado capas de 5 µL de 25% vol H₂O + 75% vol PEDOT: PSS, sin aplicar tensión y dejándolas secar durante 12 minutos, 30 minutos, 55 minutos y 2 horas a 120°C. Por otro lado, se ha fabricado una capa de 5 µL de 25% vol H₂O + 75% vol PEDOT: PSS aplicando una tensión de 1,8 V a 120 °C durante 55 minutos.



2.4.4. Ensayo tipo 1.C - “5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS”

Después, se han fabricado capas de un 5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS. Para fabricar estas capas, primero se ha comprobado que se está aplicando el campo eléctrico correspondiente (0,6 V, 1,2 V o 1,8 V) (Figura 31), y a continuación se ha depositado una gota de 5 μL de 5%vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS dentro de la celda del IDE y se ha puesto a secar el portaelectrodo en la placa calefactora a 50°C durante 12 minutos.

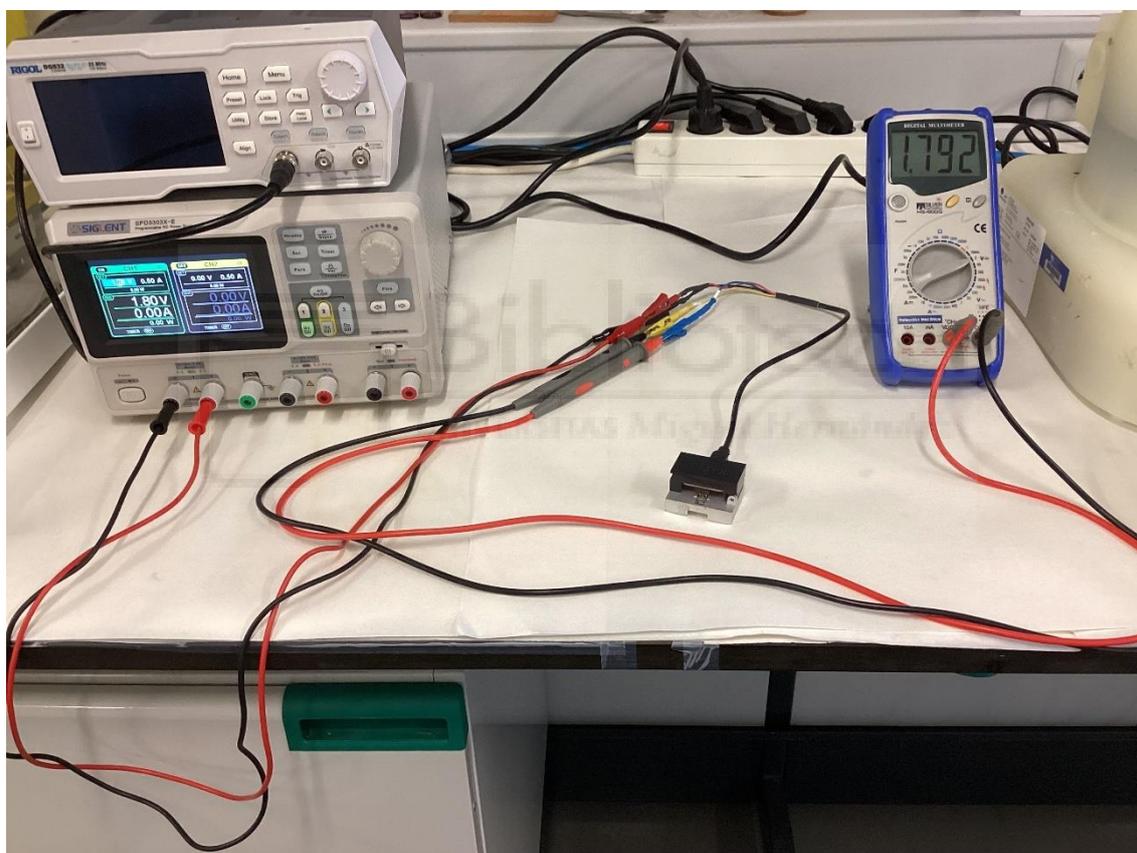


Figura 31. Comprobación mediante multímetro

2.5. Caracterización eléctrica de los IDEs de Micrux

Las capas fabricadas con el proceso llamado “Ensayo tipo 1” se han medido en vacío (extrayendo durante 5 minutos el aire de la cámara de vacío mediante la bomba) e inmediatamente después de romper el vacío.

Por otra parte, el resto de las capas fabricadas se han medido en vacío (extrayendo durante 5 minutos el aire de la cámara de vacío mediante la bomba (Figura 32)), rompiendo el vacío y con temperaturas. Hay que destacar que una vez roto el vacío se ha medido cada 30 minutos durante tres horas para medir su tiempo de vida. También, conviene subrayar que cuando se ha medido con temperaturas ha sido sin realizar vacío, se ha comenzado a medir a temperatura ambiente y se ha ido incrementando 10 °C la temperatura.



Figura 32. Bomba DIVAC 2,2L

En resumen, al tomar medidas junto con la Keithley (Figura 33) y el software de control de LabView (Figura 34) se han generado curvas I-V (Figura 35) que han permitido visualizar el comportamiento eléctrico del polímero PEDOT: PSS dependiendo de cómo se haya fabricado la capa y de en qué condiciones

ambientales se encuentre (vacío, vacío roto, atmósfera y con distintas temperaturas en atmósfera).

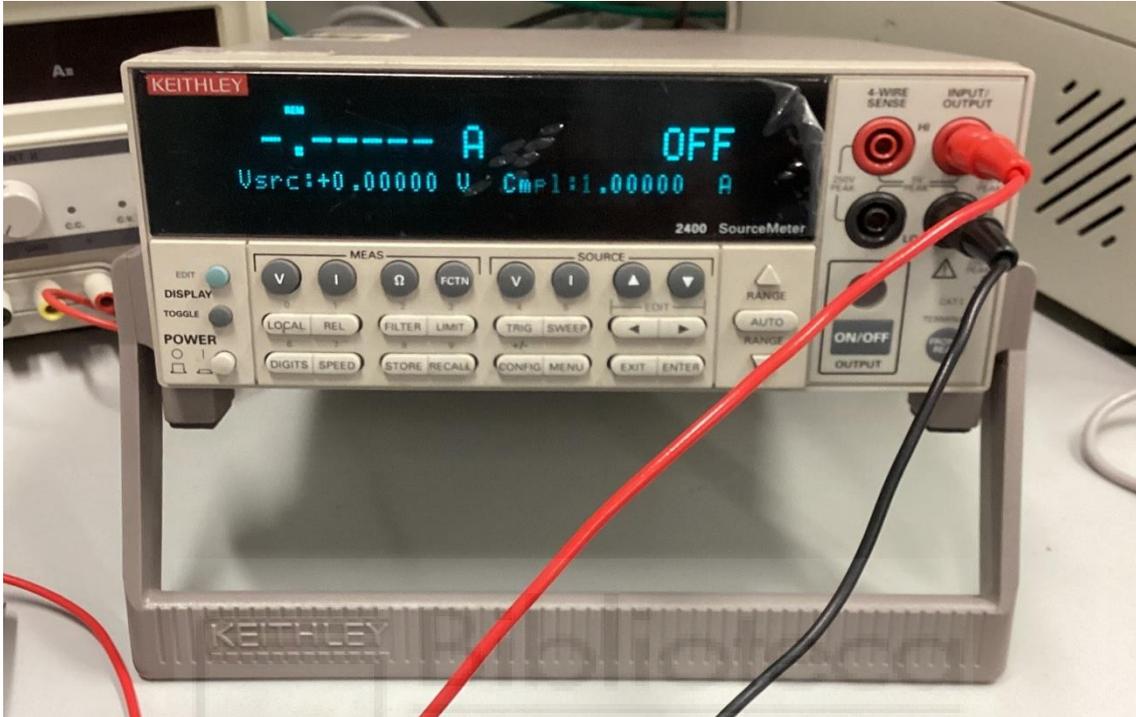


Figura 33. Fuente Keithley 2400 SourceMeter

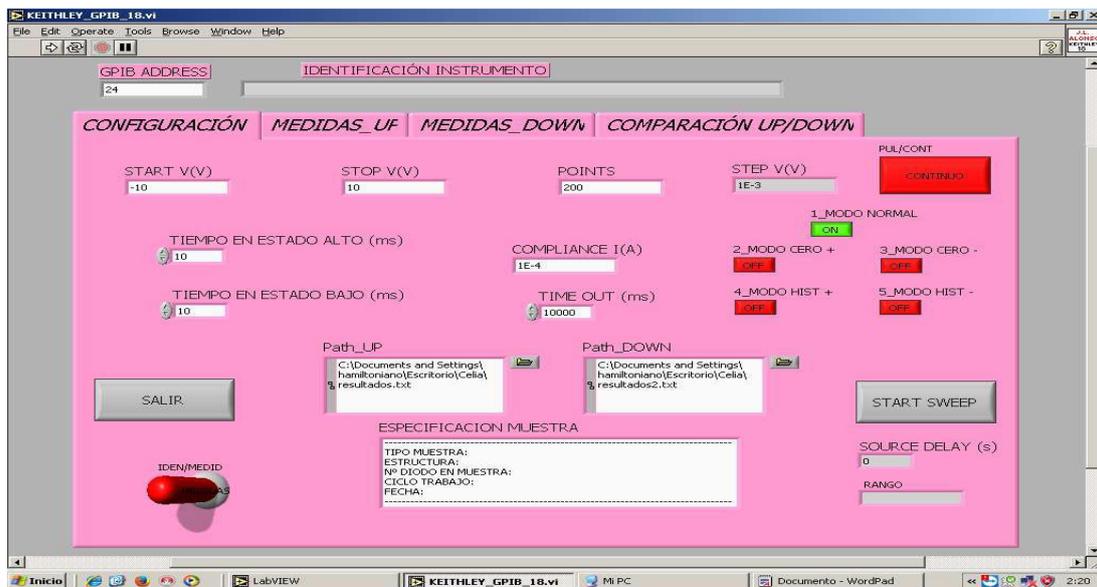


Figura 34. Software de control de LabVIEW

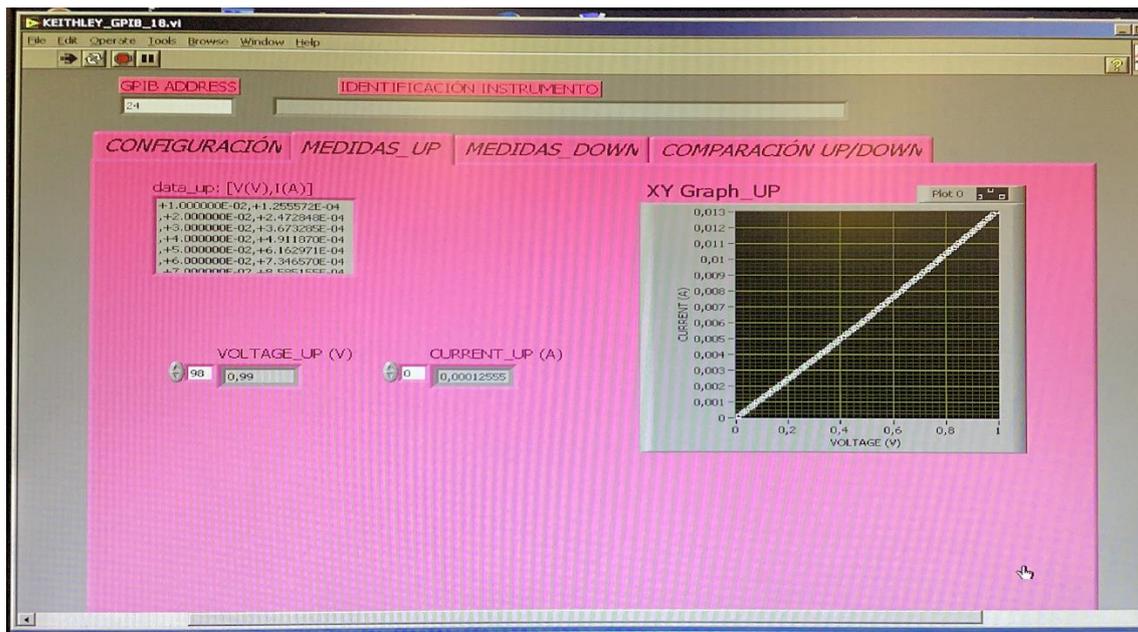


Figura 35. Curva I-V

Dichas curvas I-V se han guardado en forma de archivo TXT lo que ha permitido procesar cada curva I-V en Excel de manera que se han generado gráficas que permiten visualizar de forma clara el comportamiento del polímero conductor estudiado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Influencia de la aplicación del campo eléctrico

A continuación, se muestran las gráficas del IDE 1, IDE 2 e IDE 3, en cada una de ellas tenemos 4 muestras de PEDOT:PSS que no han sido tratadas con campo eléctrico y otras 4 muestras que sí han sido tratadas con un campo eléctrico de 1,8 V. El tiempo indicado en la leyenda es el tiempo durante el cual se ha tratado el polímero conductor con campo eléctrico asistido de recocido térmico o sólo con recocido térmico. Asimismo, se informa de los detalles experimentales en el apartado llamado: 2.4.2. Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”.

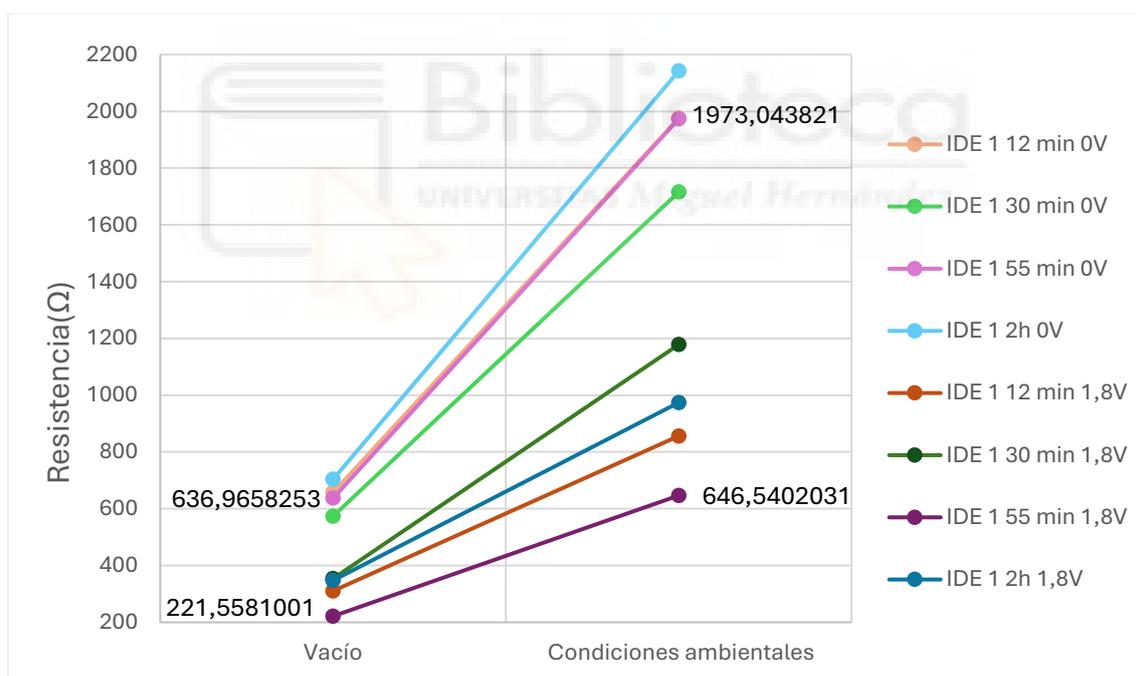


Figura 36. Gráfica de influencia de aplicación del campo eléctrico en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”)

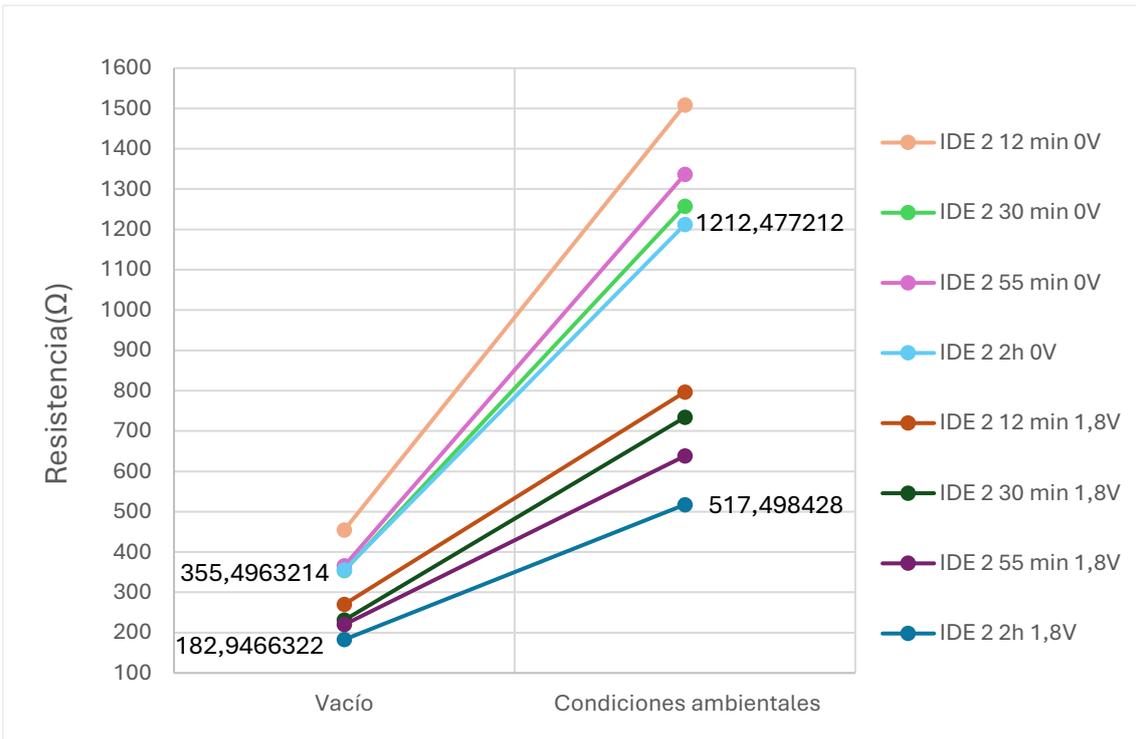


Figura 37. Gráfica de influencia de aplicación del campo eléctrico en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS")

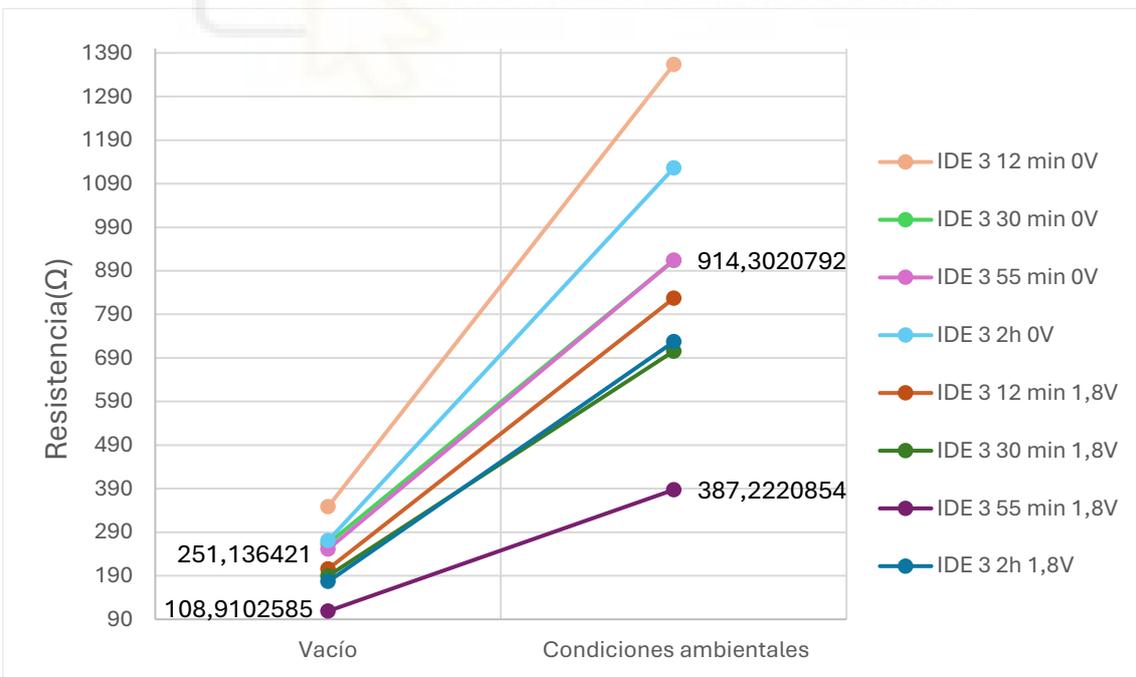


Figura 38. Gráfica de influencia de aplicación del campo eléctrico en el IDE 3. (Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS")

En las gráficas de los 3 tipos de electrodos interdigitados (IDEs) se aprecia que las capas que han sido tratadas con campo eléctrico asistido de recocido térmico presentan menor resistencia que las que no han sido tratadas con campo eléctrico. Este hecho se debe a que al aplicar un campo eléctrico al polímero teóricamente se reorientan las cadenas del polímero, de forma que las cadenas del polímero quedan más estiradas (Figura 39). Por lo tanto, existe menos resistencia al paso de la corriente.

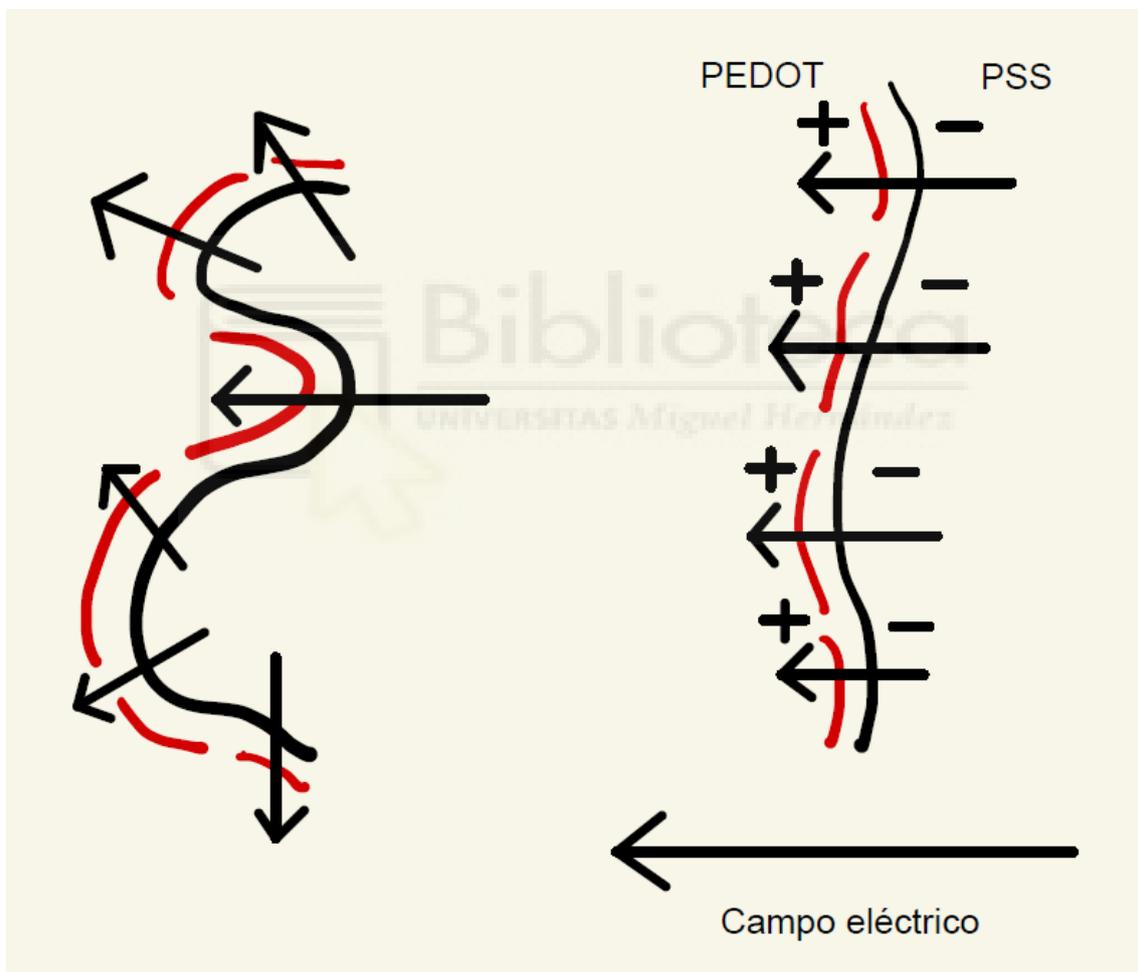


Figura 39. Esquema de la orientación de las cadenas del polímero

En la figura 39, a la izquierda aparece la orientación aleatoria y a la derecha la reorientación bajo la influencia del campo eléctrico.

En concreto, en el IDE 1 tratado con campo eléctrico (denominado en la leyenda: “IDE 1 55 min 1,8V”) se ha producido una disminución de resistencia del 65,22% con respecto al IDE 1 que no ha sido tratado con campo eléctrico (denominado: “IDE 1 55 min 0V”).

Igualmente, en el IDE 2 tratado con campo eléctrico (denominado: “IDE 2 2h 1,8V”) se ha generado una disminución de resistencia del 48,54% con respecto al IDE 2 de referencia (denominado: “IDE 2 2h 0V”).

Finalmente, en el IDE 3 tratado con campo eléctrico (denominado: “IDE 3 55 min 1,8V”) se ha originado una disminución de resistencia del 56,63% con respecto al IDE 3 de referencia (denominado: “IDE 2 55 min 0V”).

Por otro lado, se ha intentado obtener cuál es el tiempo óptimo de aplicación del campo eléctrico al polímero.

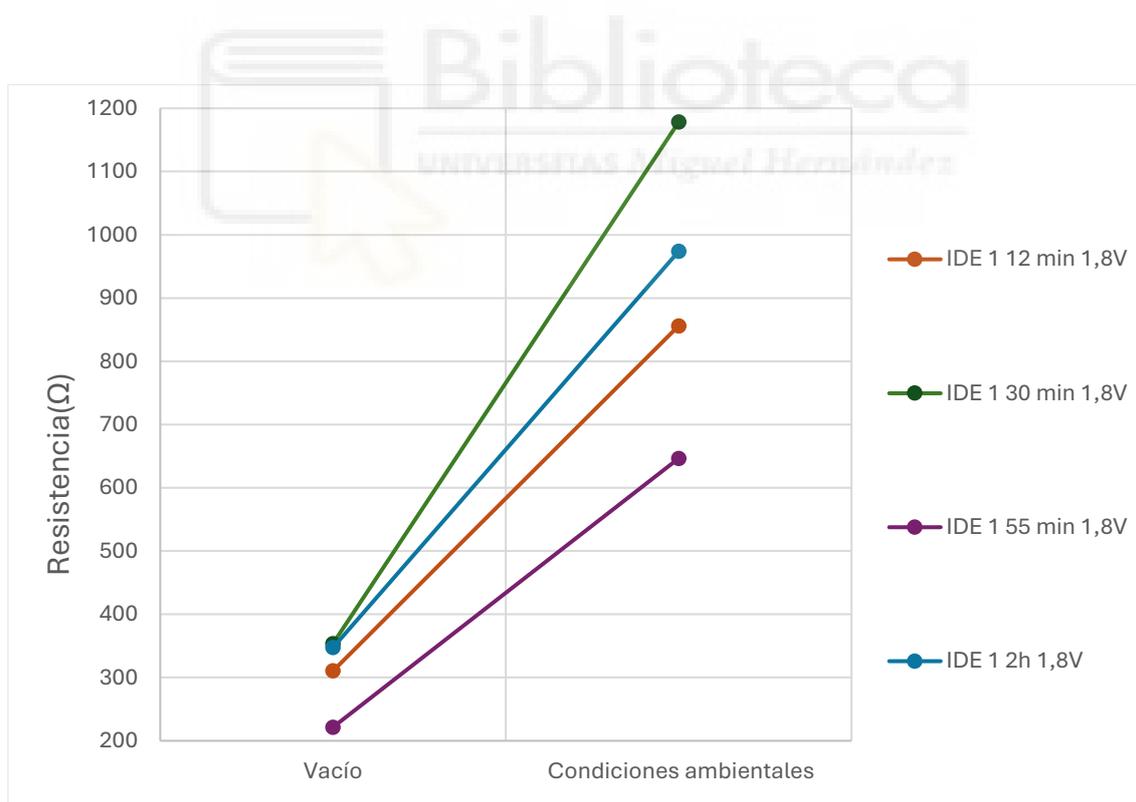


Figura 40. Gráfica de influencia de tiempo de aplicación del campo eléctrico en IDE 1. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”)

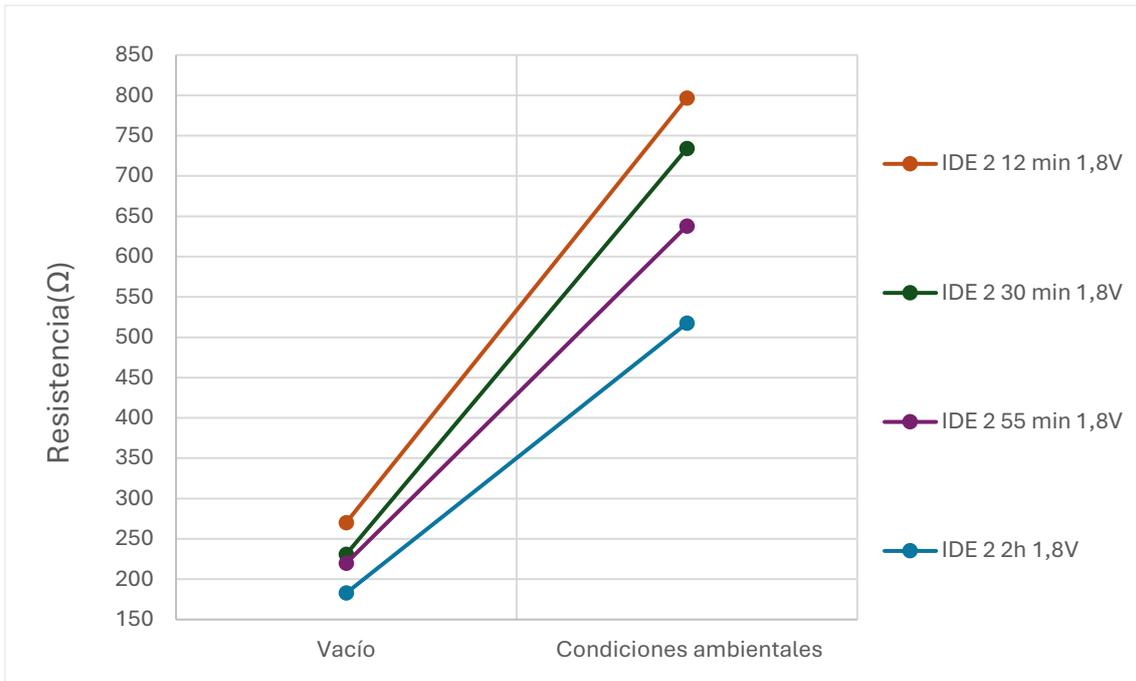


Figura 41. Gráfica de influencia de tiempo de aplicación del campo eléctrico en IDE 2. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”)

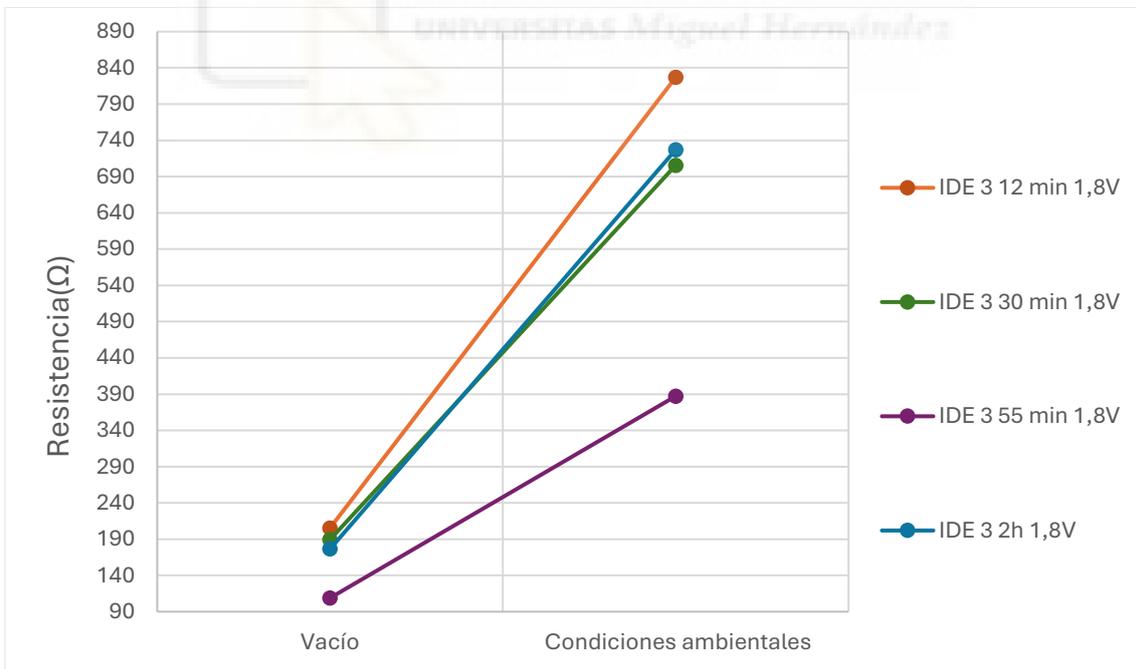


Figura 42. Gráfica de influencia de tiempo de aplicación del campo eléctrico en IDE 3. (Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”)

En vista de los resultados, no se ha podido concluir cual es el tiempo óptimo de tratamiento para conseguir la menor resistencia, se necesita realizar más medidas para determinar el tiempo de aplicación. Aunque, es posible que con un mayor tiempo de tratamiento se disminuya más la resistencia, dado que en ningún IDE tratado con campo eléctrico durante doce minutos se observa la menor resistencia de todas.



3.2. Influencia de atmósfera

Como podemos observar en las siguientes gráficas, el PEDOT: PSS posee menor resistencia en vacío, es decir, en ausencia de atmósfera. En cambio, en un ambiente con atmósfera presenta mayor resistencia.

La atmósfera incluye moléculas de oxígeno y agua. Estas moléculas al ser absorbidas e integradas por el PEDOT: PSS producen un descenso de conductividad.



Figura 43. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales del IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

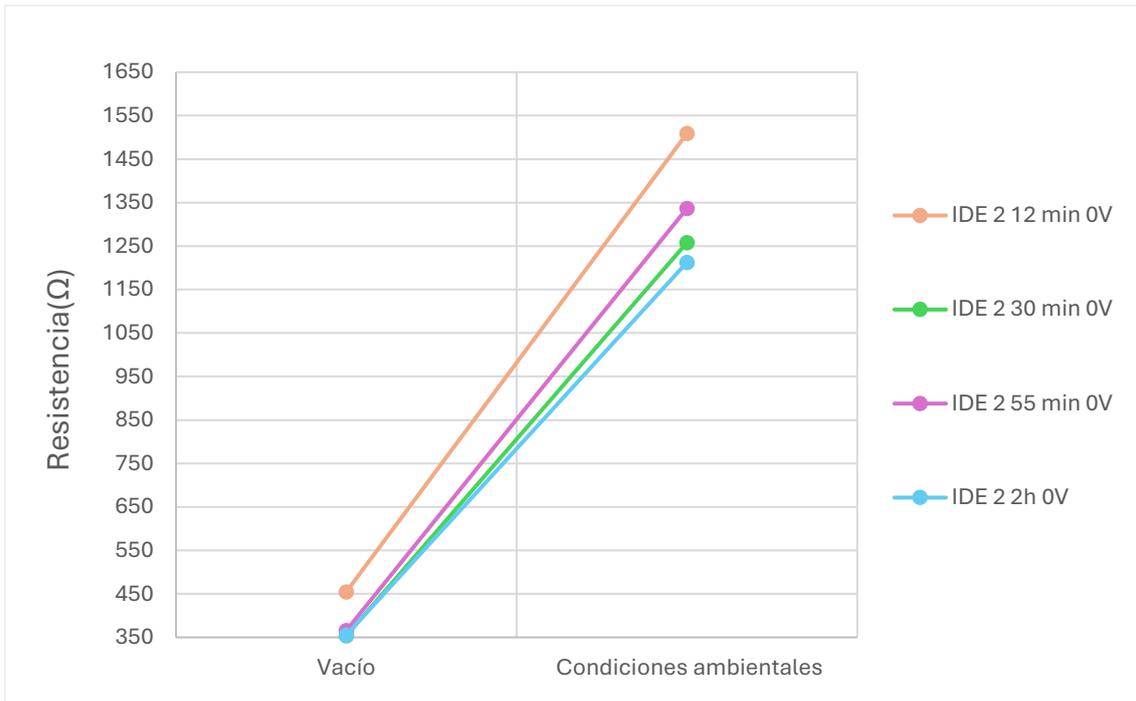


Figura 44. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales del IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

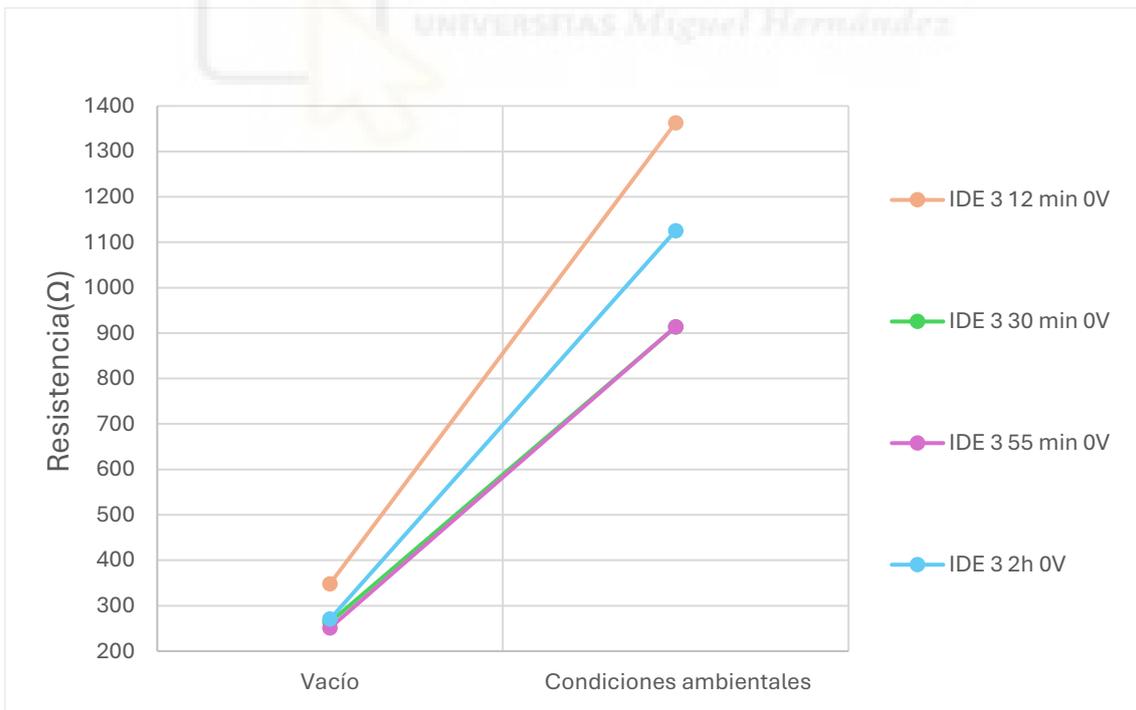


Figura 45. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales del IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

El polímero PEDOT:PSS se estabiliza aproximadamente a las tres horas de romper el vacío:

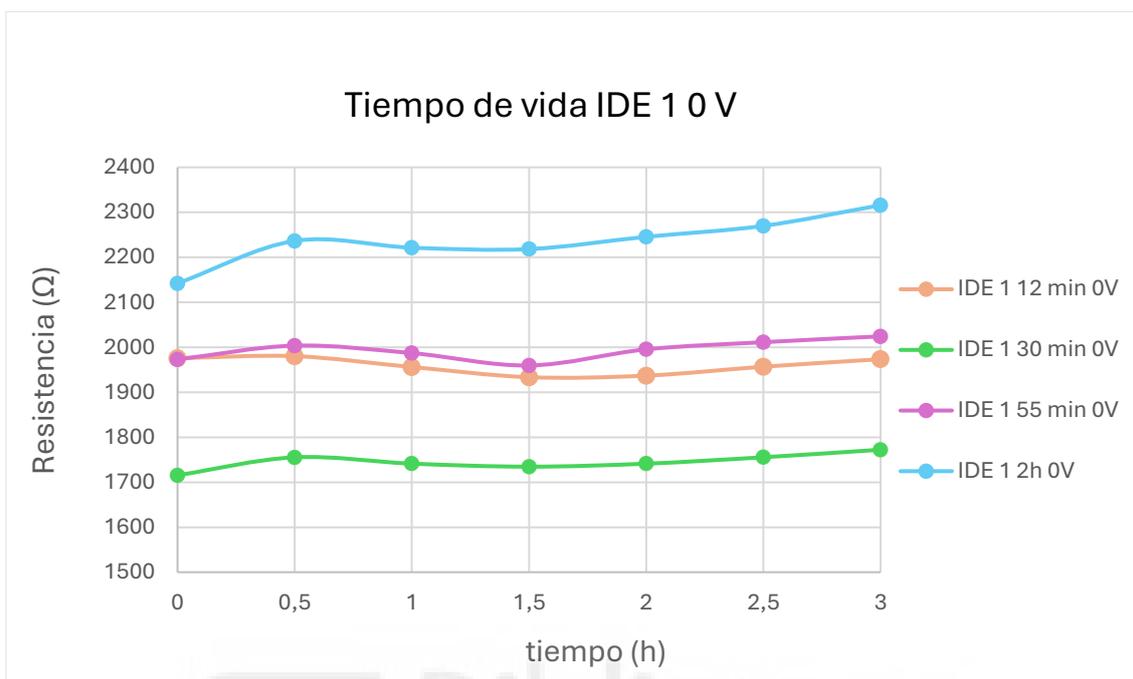


Figura 46. Gráfica de tiempo de vida del IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

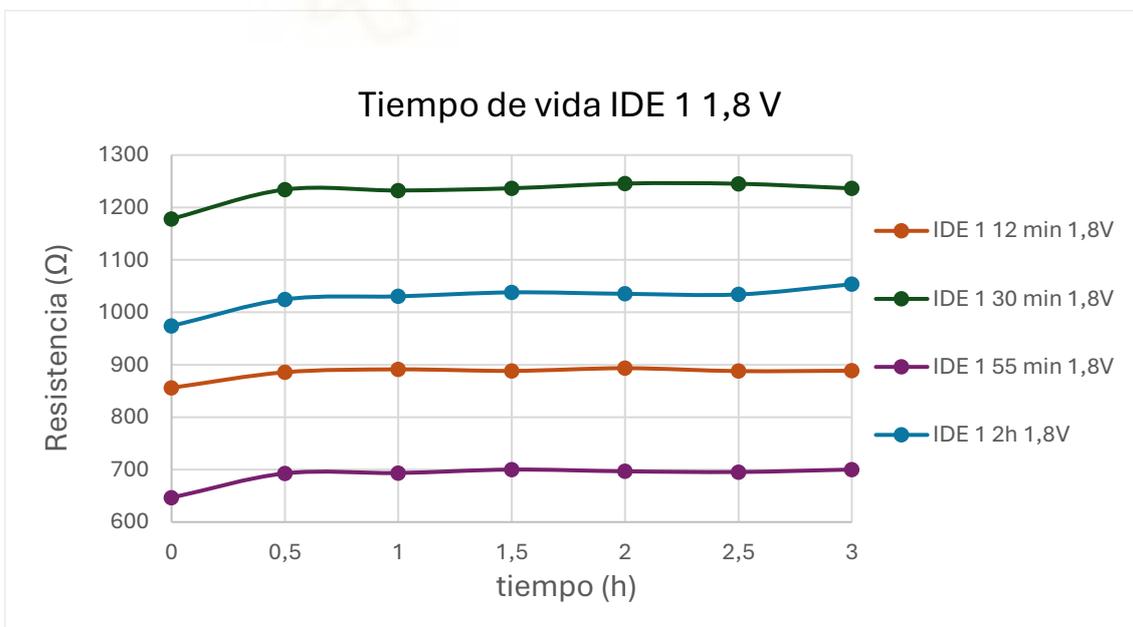


Figura 47. Gráfica de tiempo de vida del IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

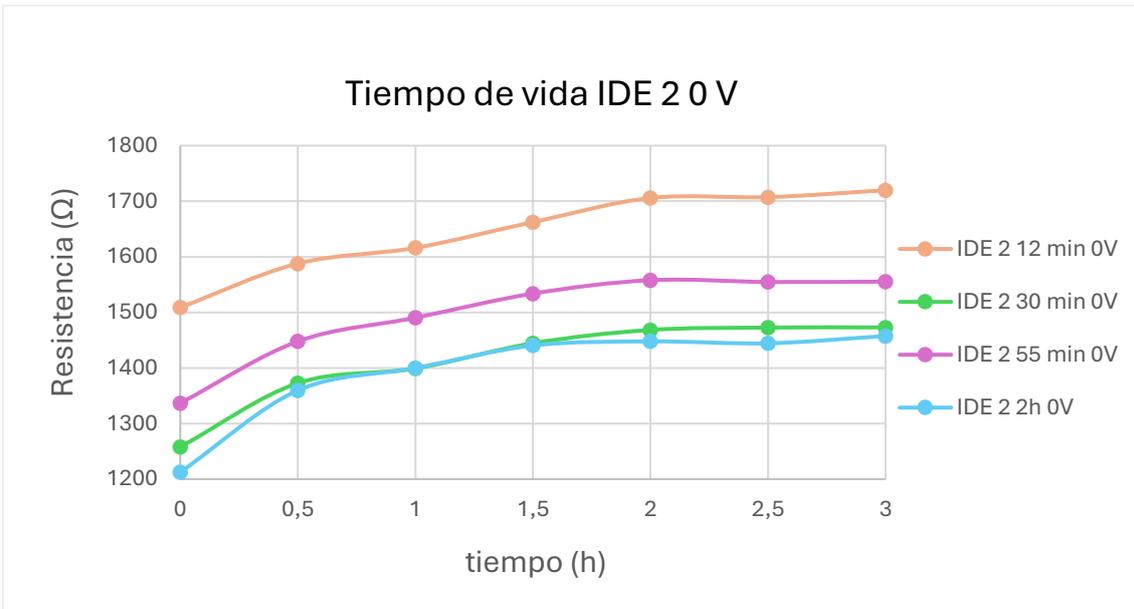


Figura 48. Gráfica de tiempo de vida del IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

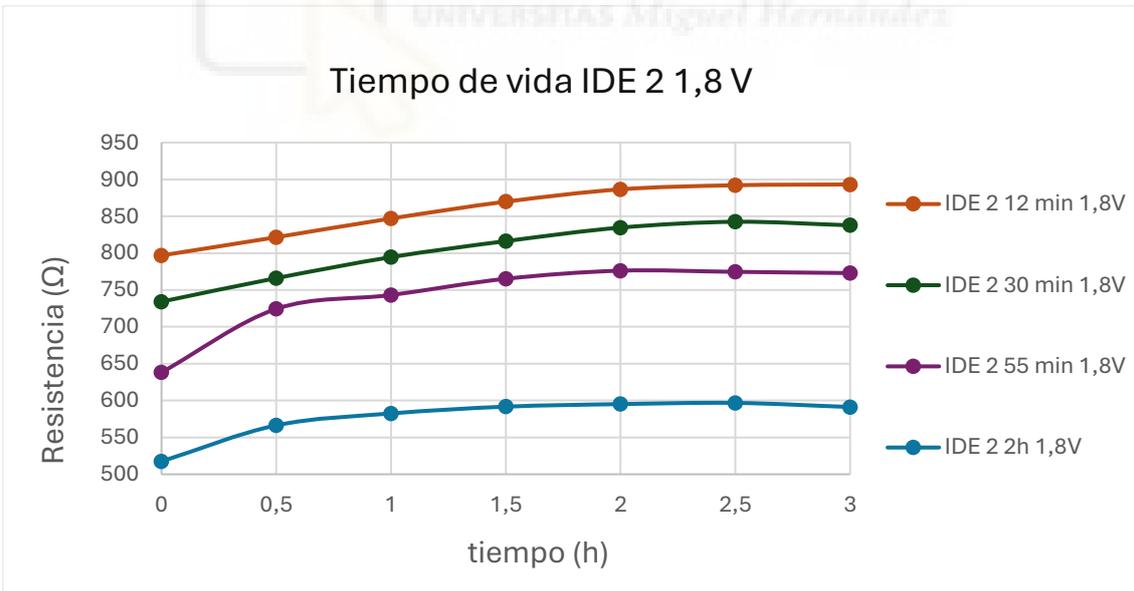


Figura 49. Gráfica de tiempo de vida del IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

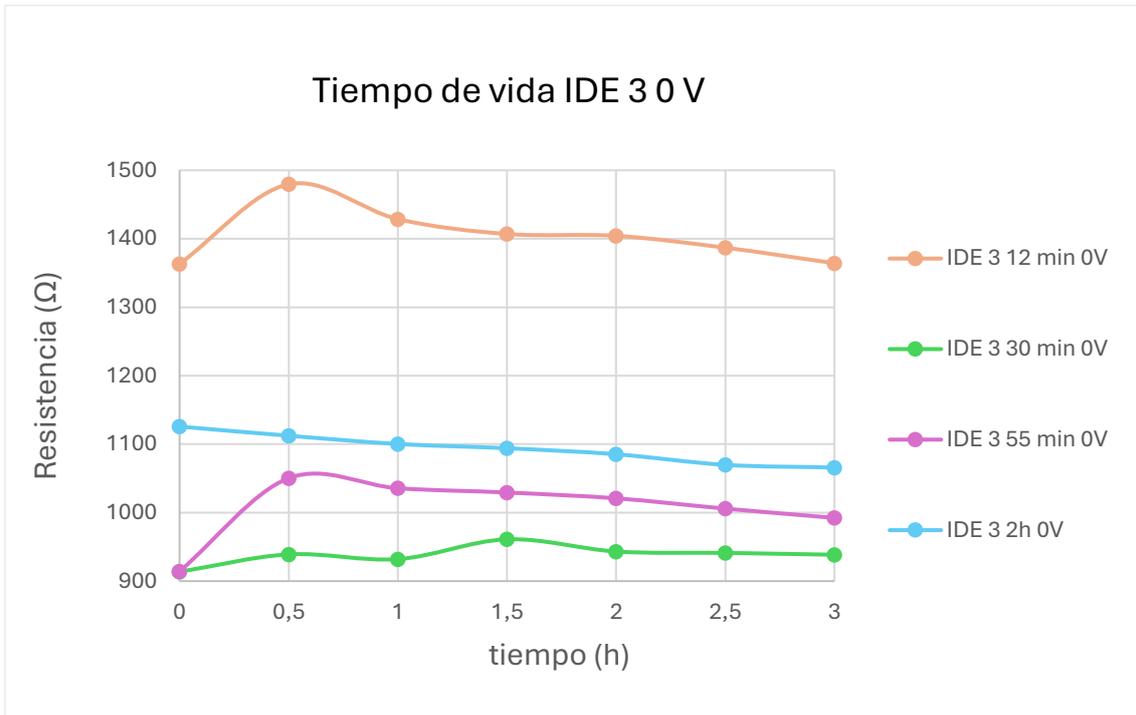


Figura 50. Gráfica de tiempo de vida del IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

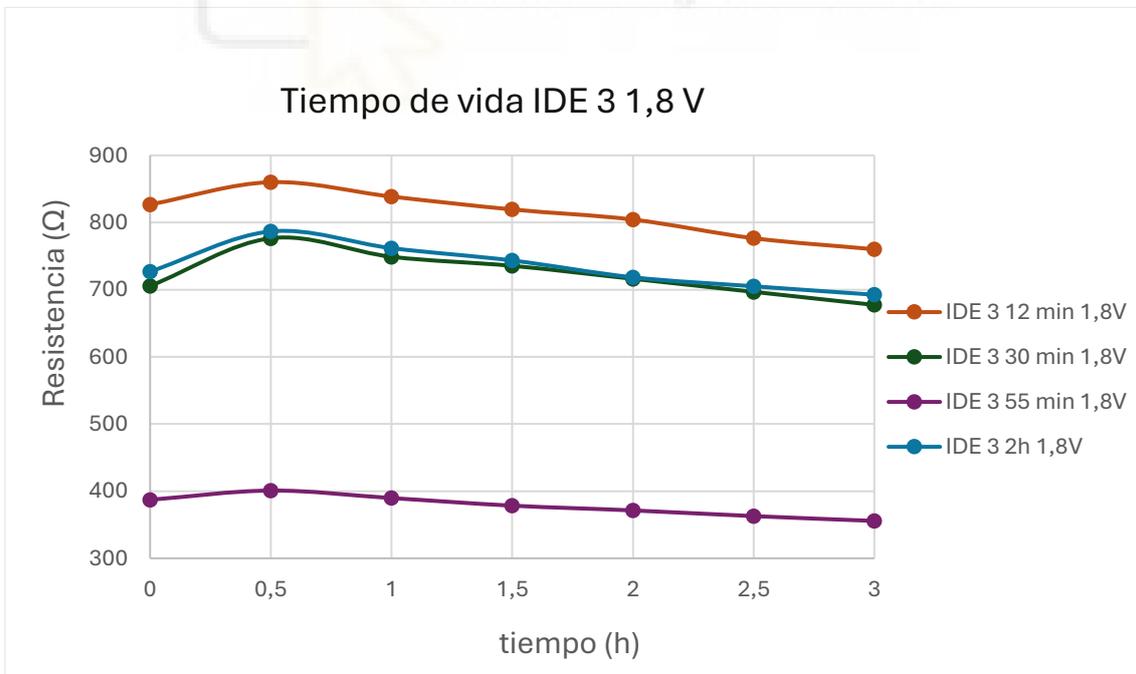


Figura 51. Gráfica de tiempo de vida del IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

3.3. Influencia de temperatura

Someter al polímero estudiado a una temperatura elevada genera un descenso en la resistencia y por tanto una mayor conductividad en el PEDOT:PSS, hecho que se observa en las siguientes gráficas:

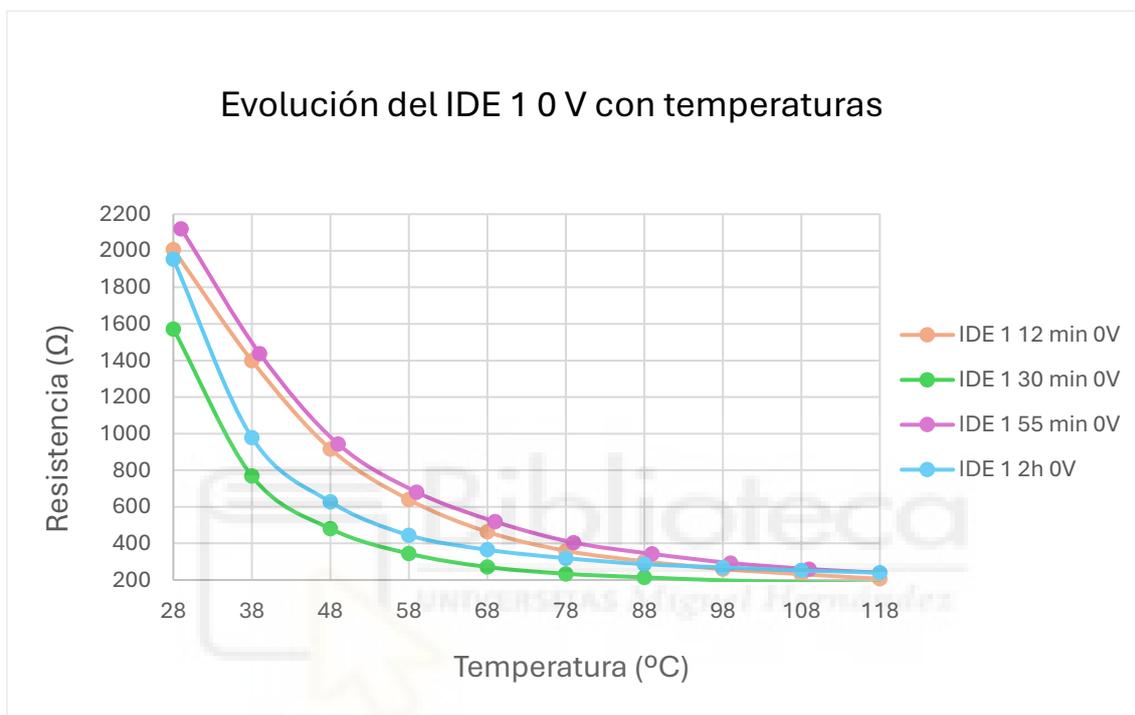


Figura 52. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

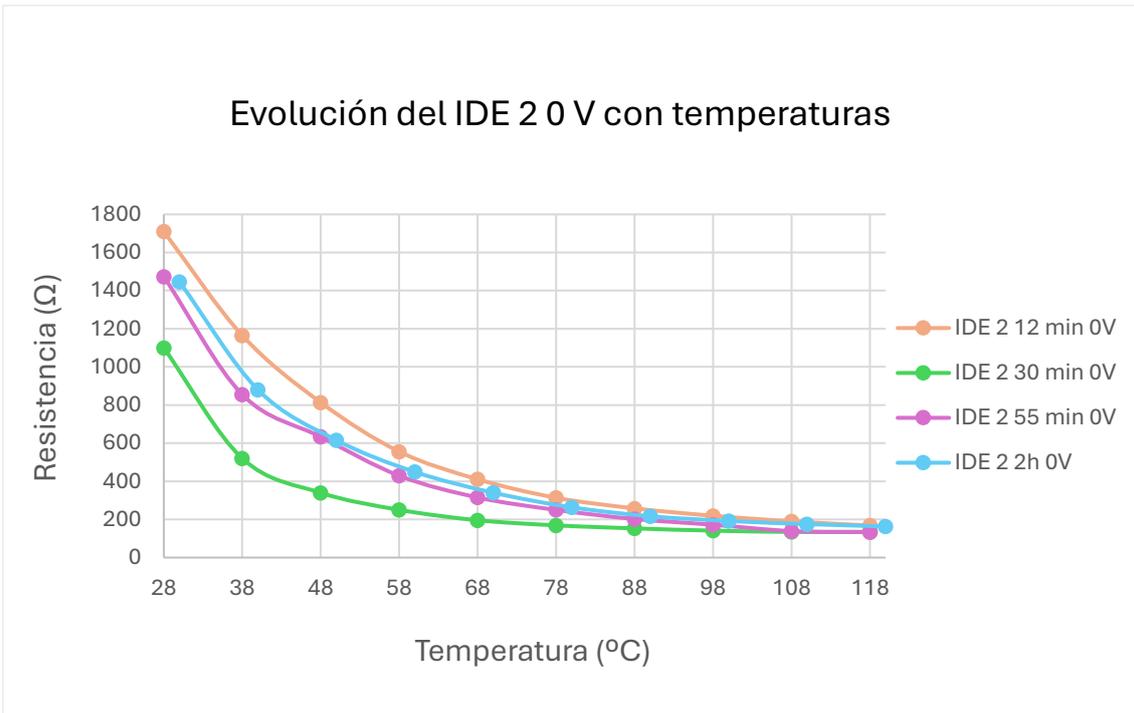


Figura 53. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

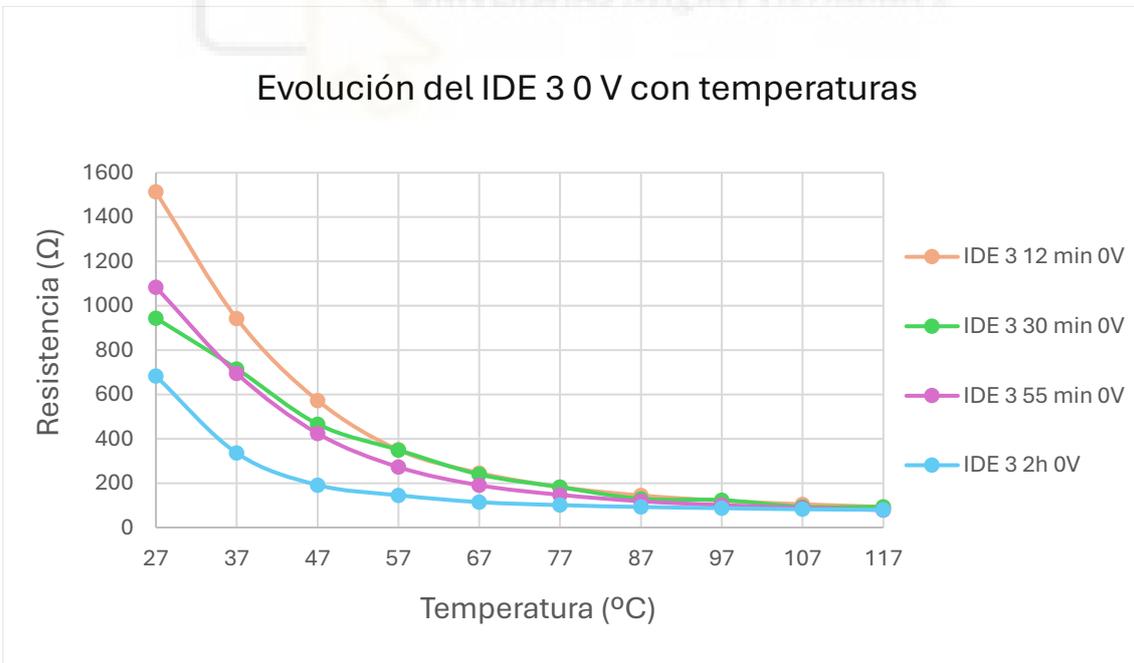


Figura 54. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

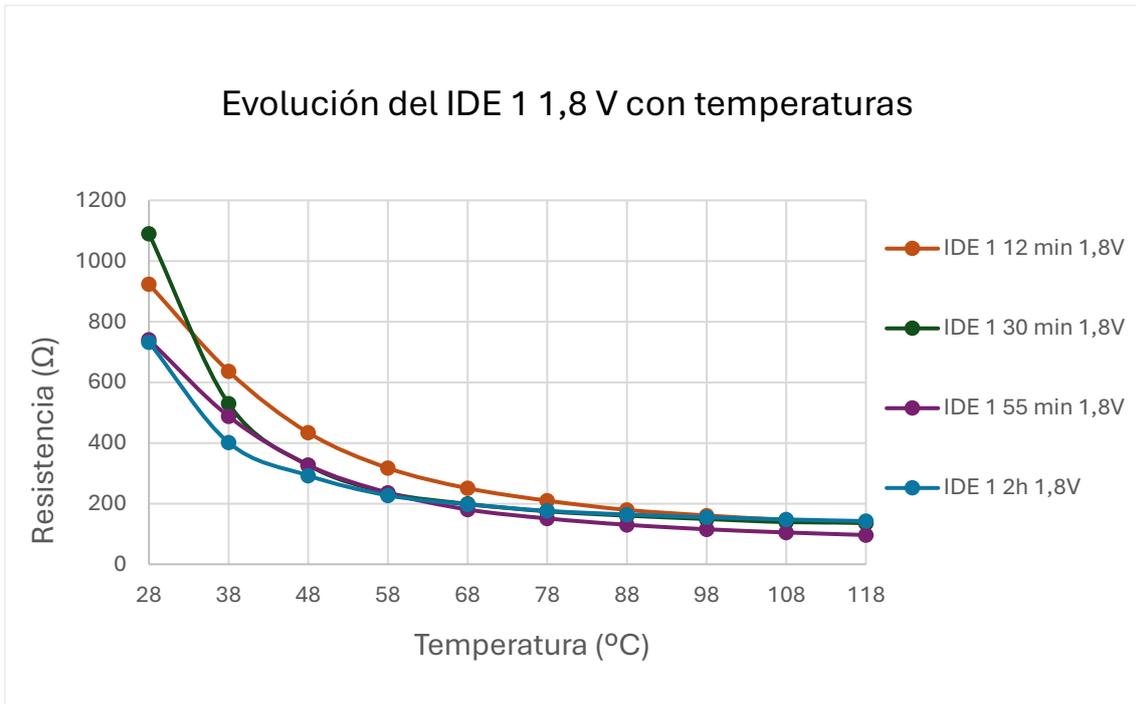


Figura 55. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

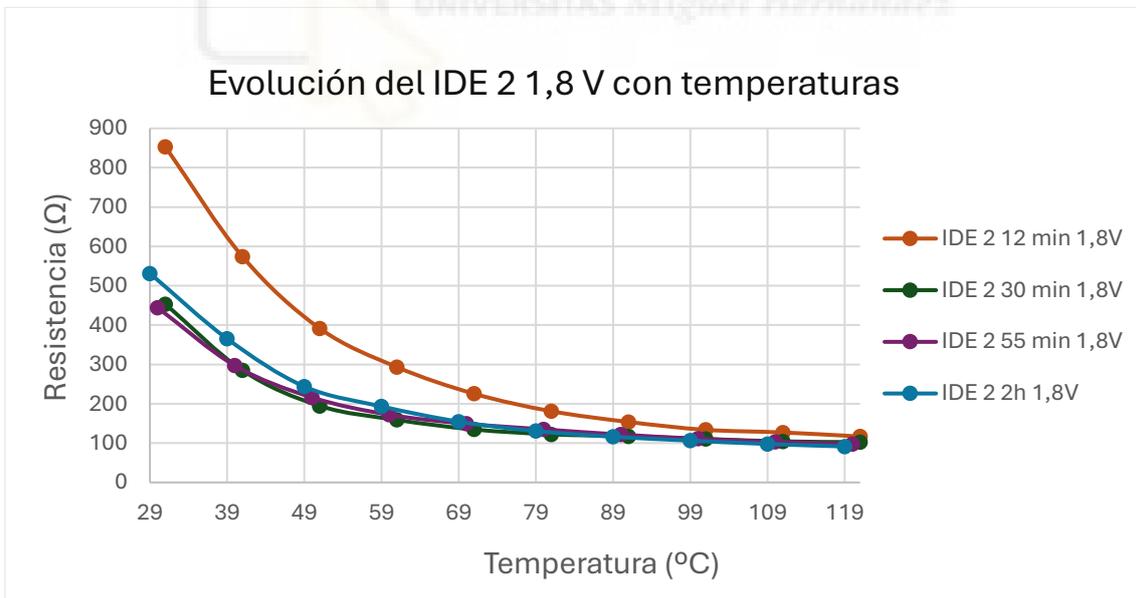


Figura 56. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

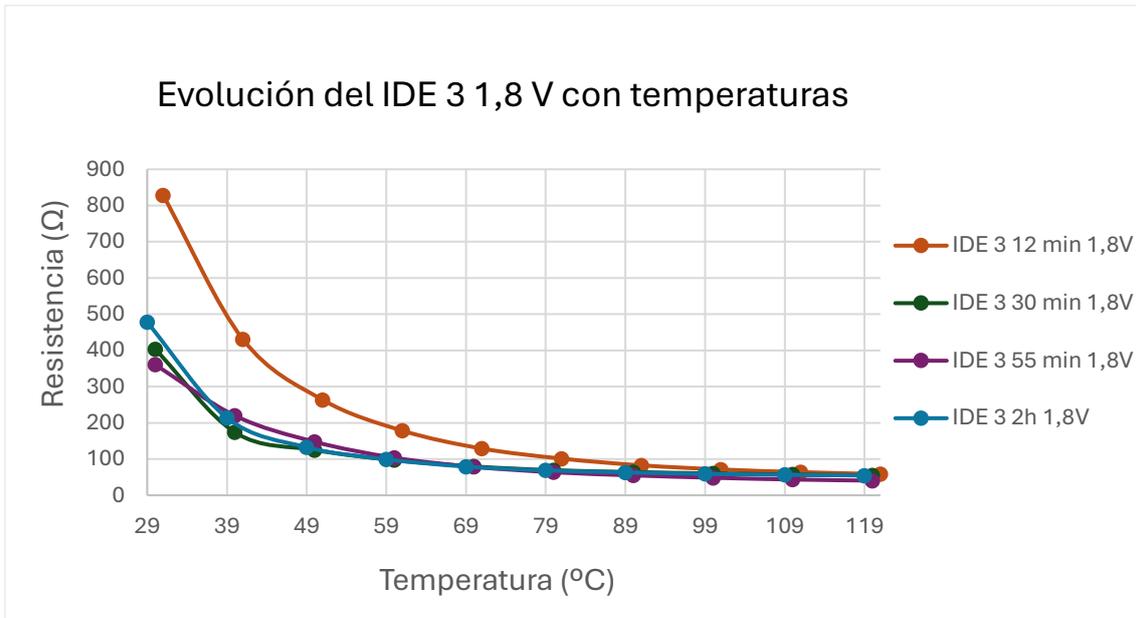


Figura 57. Gráfica de influencia de temperaturas del IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A - “100%vol PEDOT:PSS”)

En concreto, la menor resistencia obtenida ha sido de 40,52 Ω cuando se ha expuesto a 120°C al IDE 3 tratado con un campo eléctrico de 1,8V durante 55 minutos.

3.4. Influencia de la geometría de los electrodos interdigitados

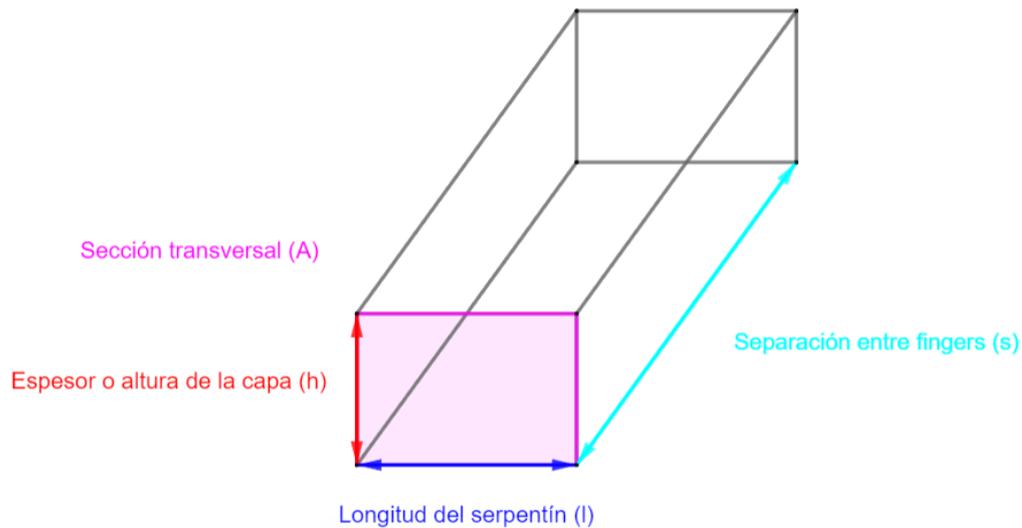


Figura 58. Esquema del polímero depositado entre dos fingers

$$R = \rho \frac{s}{A} = \rho \frac{s}{h \cdot l} \quad (1)$$

La geometría de los electrodos interdigitados es un factor importante que se debe tener en cuenta. Mientras que la resistividad (ρ) de la capa del polímero no depende de la geometría, el resto de los parámetros tales como la separación entre fingers, el espesor del finger y la longitud del serpentin sí. Como en los tres electrodos interdigitados estudiados el espesor o altura de los fingers se mantiene constante, y tan sólo va a conducir el espesor de la capa de PEDOT:PSS que está adyacente a los fingers, es decir, el espesor sobrante de arriba no conduce prácticamente (Figura 59). Entonces, no nos va a variar la resistencia de un IDE respecto a otro a causa del espesor de la capa depositada.

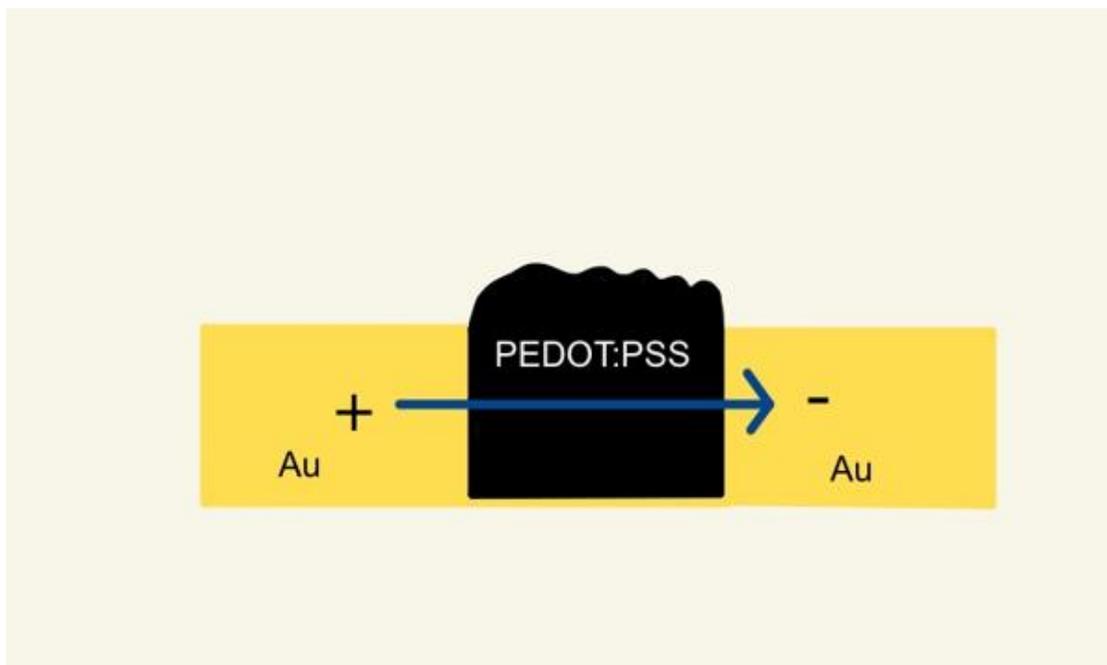


Figura 59. Representación de capa de PEDOT:PSS entre dos fingers de oro

Por tanto, en este apartado sólo se va a comentar la influencia de dos parámetros: la separación entre fingers y la longitud del serpentín. En la fórmula presentada (Ec.1) visualizamos que mientras mayor separación entre fingers existe mayor resistencia ofrece el material y, por otro lado, si existe una mayor longitud del serpentín el material presenta menor resistencia debido a la mayor superficie de contacto entre el electrodo y el polímero. Se debe de tener en cuenta que el PEDOT:PSS sirve como material transportador de huecos, dicho transporte se produce de finger a finger mediante el material transportador, por lo que mientras menor sea la distancia entre fingers menor distancia tendrán que recorrer los electrones y los huecos y por tanto, la resistencia será menor. También, mientras mayor sea la sección transversal del material conductor menor resistencia ofrecerá a la circulación de los electrones, y como vemos en la ecuación 1 la sección transversal depende de la longitud del serpentín y del espesor de la capa. Es por esto por lo que al haber mayor longitud del serpentín la sección transversal del material conductor es mayor y, por tanto, menor es la resistencia.

Así pues, gracias a la ecuación 1 y los valores numéricos de los parámetros de los electrodos interdigitados podemos ordenar los electrodos de menor a mayor resistencia: IDE 3, IDE 2 e IDE1. Siendo el IDE 3 el que menos resistencia ofrece y el IDE 1 el que más. Hecho que se evidencia en las gráficas:

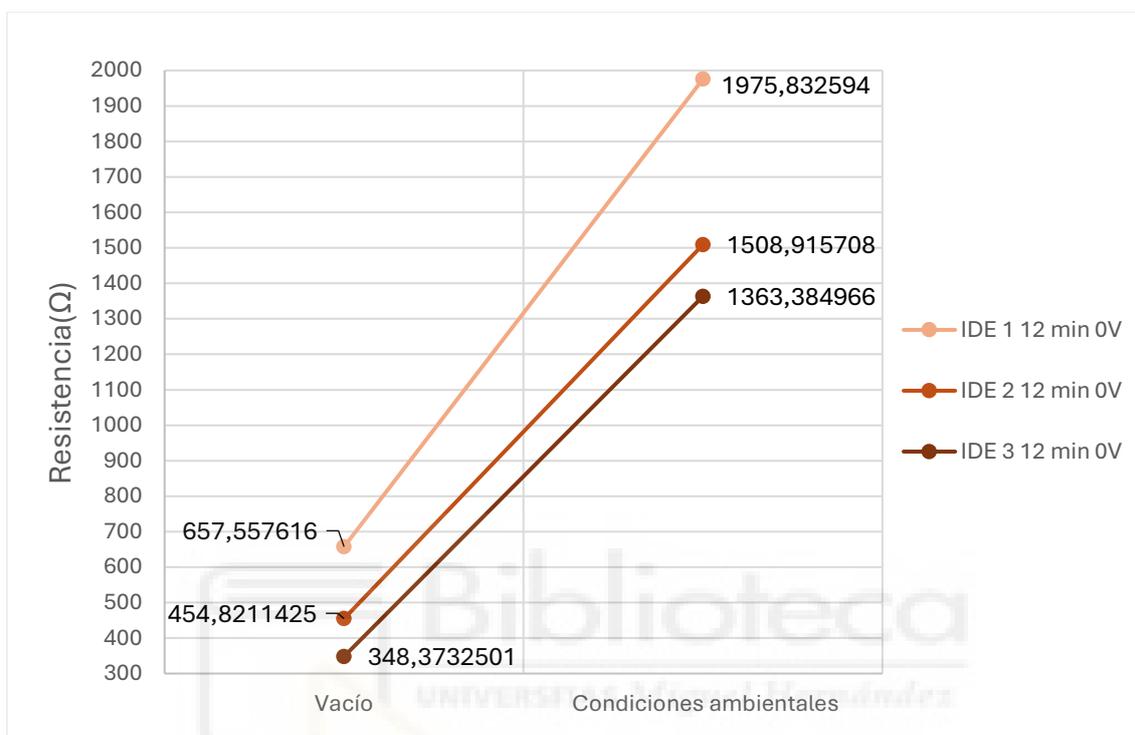


Figura 60. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 12 minutos, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

En efecto, se produce una disminución del IDE 2 respecto del IDE 1 del 30,83%, y una disminución del IDE 3 respecto del IDE 1 del 47,02%.

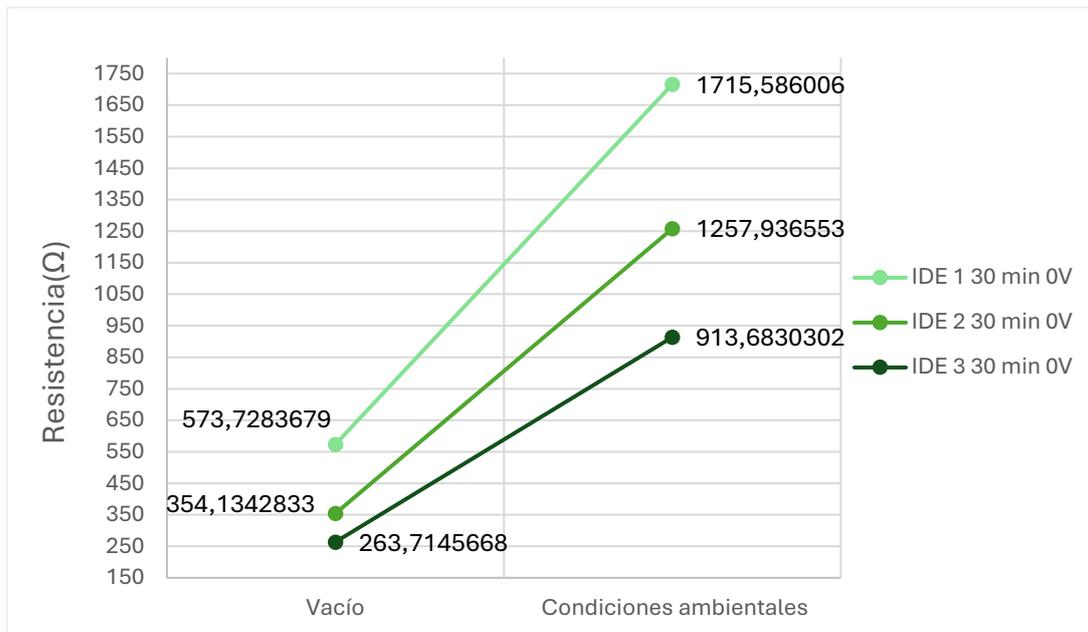


Figura 61. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 30 minutos, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

En este caso, se observa una disminución del IDE 2 respecto del IDE 1 del 38,28%, y una disminución del IDE 3 respecto del IDE 1 del 54,04%.



Figura 62. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 55 minutos, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

En las capas secadas durante 55 minutos, se produce una disminución del IDE 2 respecto del IDE 1 del 42,53%, y una disminución del IDE 3 respecto del IDE 1 del 60,57%.

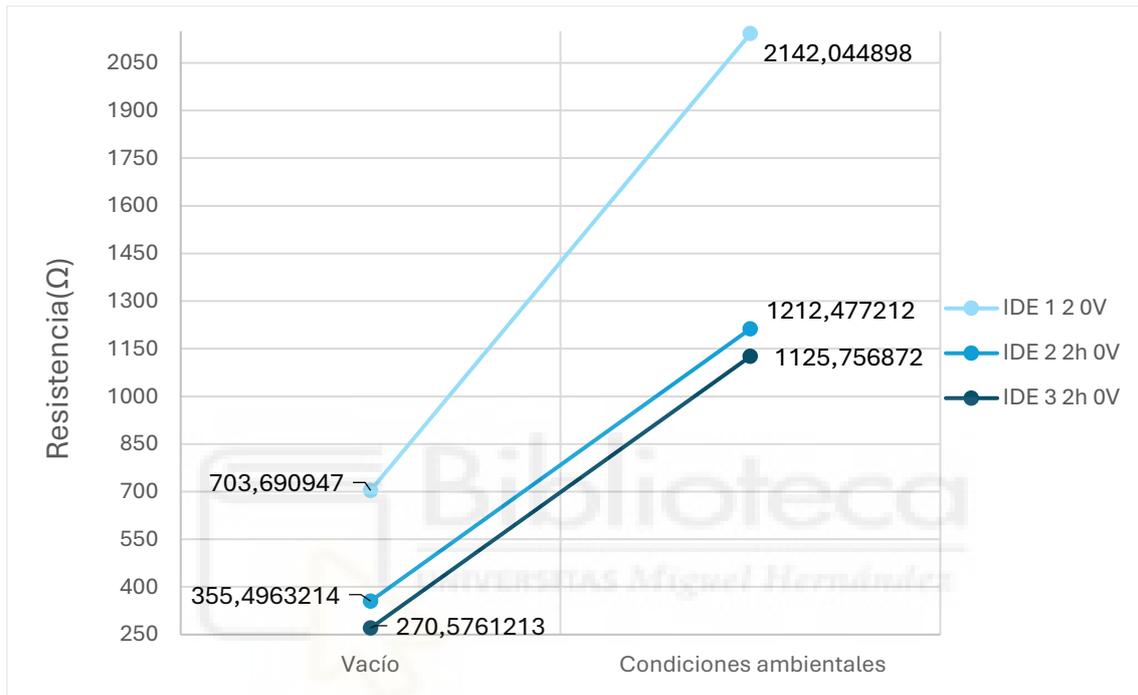


Figura 63. Gráfica de influencia de geometría de IDEs. 2 horas, 0 V. (Ensayo tipo 1.A - "100%vol PEDOT:PSS")

Por último, en las capas expuestas a recocido térmico durante 2 horas, se produce una disminución del IDE 2 respecto del IDE 1 del 49,48%, y una disminución del IDE 3 respecto del IDE 1 del 61,55%.

3.5. Influencia de la disolución de disolventes

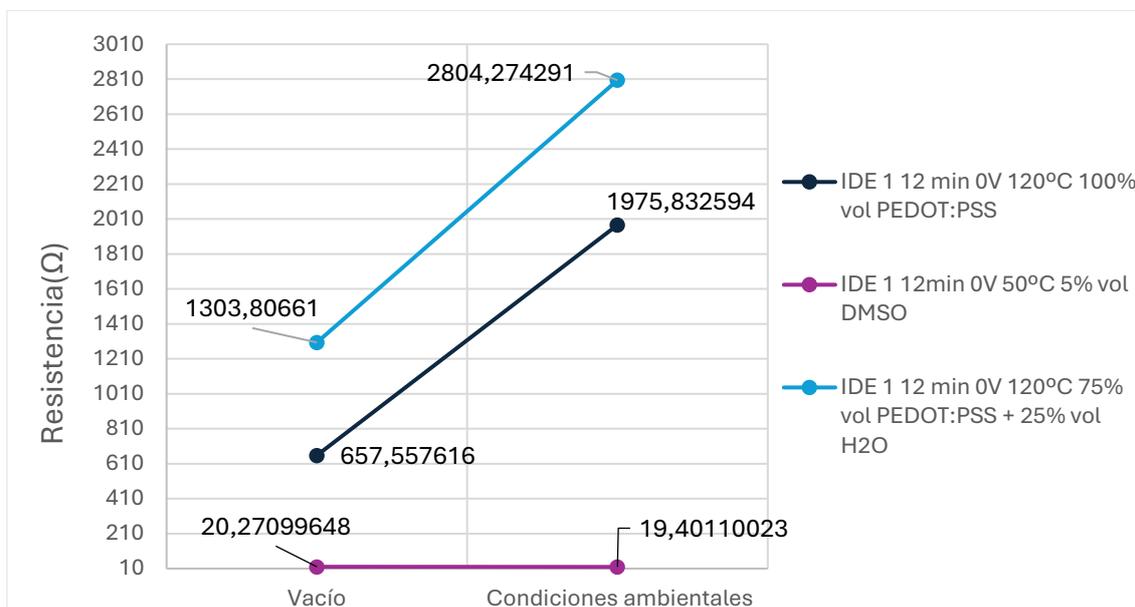


Figura 64. Gráfica de influencia de disolución de disolventes

La disolución de PEDOT:PSS con agua o con DMSO se ha realizado con el fin de mejorar la conductividad del PEDOT:PSS. El agua no ha mejorado la conductividad del polímero, en cambio, el DMSO sí. Gracias a disolver el PEDOT:PSS con DMSO se ha conseguido una disminución de la resistencia del 96,92% con respecto a la capa de PEDOT:PSS (100%vol).

También, se intentó producir una disminución de la resistencia aplicando un campo eléctrico a la capa de PEDOT:PSS disuelto con agua y a la capa de PEDOT:PSS disuelto con DMSO.

Por un lado, en el IDE que contiene el PEDOT:PSS disuelto con agua y que se ha tratado con un campo eléctrico de 1,8V a 120°C, se observa una disminución de la resistencia:



Figura 65. Gráfica de influencia de campo eléctrico en PEDOT:PSS disuelto con agua. (Ensayo tipo 1.B - “25% vol H₂O + 75% vol PEDOT:PSS”)

Se produce una disminución de resistencia de la capa tratada con campo eléctrico en el IDE 1 (denominado en leyenda: “IDE1 55 min 1,8V”) del 38,60% con respecto al IDE 1 (denominado: “IDE 1 55 min 0V”) que no ha sido tratado con campo eléctrico.

Por otro lado, al aplicar campo eléctrico al PEDOT:PSS disuelto con DMSO obtenemos estos resultados:

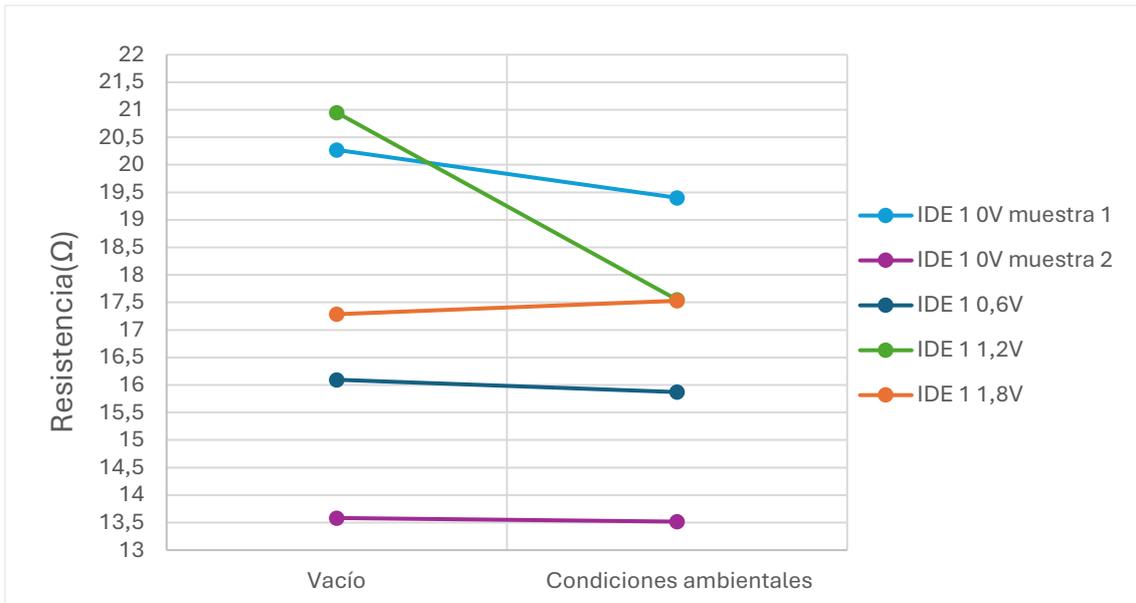


Figura 66. Gráfica de influencia de campo eléctrico en PEDOT:PSS disuelto con DMSO. IDE 1. (Ensayo tipo 1.C - "5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS")

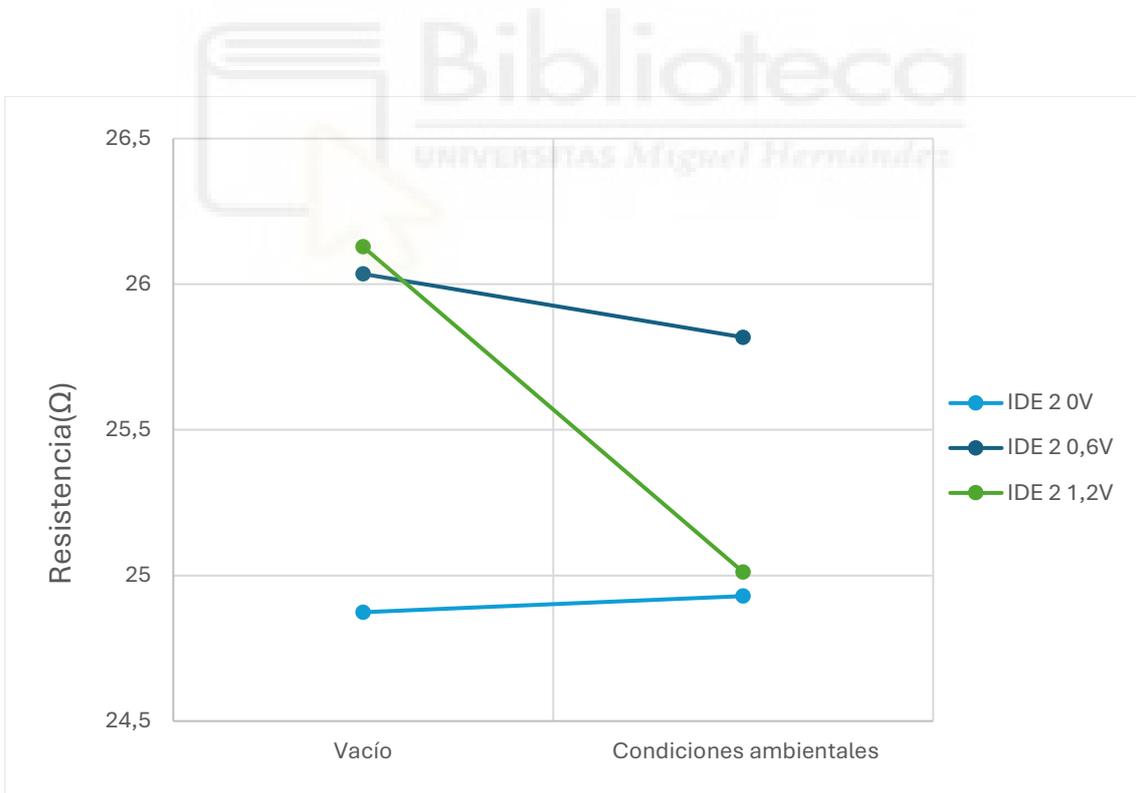


Figura 67. Gráfica de influencia de campo eléctrico en PEDOT:PSS disuelto con DMSO. IDE 2. (Ensayo tipo 1.C - "5% vol DMSO + 95% vol PEDOT: PSS")

En las gráficas presentadas no se aprecia una mejora evidente en la conductividad al aplicar campo eléctrico durante la fabricación de las capas. En efecto, se observa en las gráficas “5%vol DMSO + 95%vol PEDOT:PSS” correspondientes al IDE 1 e IDE 2, que las capas llamadas en la leyenda: “IDE 1 0V muestra 2” e “IDE 2 0V” muestran mayor conductividad que las capas a las que se les ha aplicado campo eléctrico. Conviene subrayar que el DMSO es una sustancia química higroscópica, es decir, absorbe con facilidad la humedad del ambiente. Durante la fabricación y medición de las capas no se ha podido controlar la humedad del espacio de trabajo. Además, el portaelectrodo utilizado sólo posee capacidad para un electrodo, por tanto, no se ha podido realizar el tratamiento con campo eléctrico a todas las muestras al mismo tiempo. Debido a que cada muestra se ha fabricado en tiempos distintos, las condiciones ambientales de cada muestra han podido ser distintas, afectando de esta forma a los resultados.



4. CONCLUSIONES

4.1. Datos obtenidos

En primer lugar, se ha comprobado que el hecho de suministrar un campo eléctrico a las capas de PEDOT:PSS y a las capas de PEDOT:PSS disuelto con agua sí produce una disminución de resistencia en el material. En cambio, en las capas de PEDOT:PSS disuelto con DMSO no se ha podido comprobar.

También, se ha visto que las capas de PEDOT:PSS y las capas de PEDOT:PSS disuelto con agua conducen mejor en vacío que en condiciones ambientales. En cambio, las capas de PEDOT:PSS disuelto con DMSO presentan una resistencia similar en condiciones de vacío y en condiciones ambientales.

Asimismo, también se ha observado que las capas de PEDOT:PSS y las capas de PEDOT:PSS disuelto con agua presentan una mejora de la conductividad a medida que se va incrementado la temperatura. Conviene recalcar que según la literatura existente el PEDOT:PSS se desnaturaliza a los 150 °C. Por otro lado, los resultados de las capas de PEDOT:PSS disuelto con DMSO no muestran una mejora de conductividad evidente conforme aumenta la temperatura.

Al mismo tiempo, gracias al estudio de la geometría de los electrodos interdigitados se ha podido prever que electrodo interdigitado 3 (IDE 3) es el que proporciona la menor resistencia de los tres tipos de electrodos interdigitados. Hecho que confirman los resultados obtenidos del Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS".

En cuanto a la disolución de disolventes para mejorar las propiedades de las capas de PEDOT:PSS, los resultados han indicado que disolver el polímero conductor estudiado con agua no mejora sus propiedades. Sin embargo, si se ha visto una mejora significativa en las propiedades de las capas de PEDOT:PSS disuelto con DMSO.

En vista de los resultados obtenidos, considero que la opción que proporciona la menor resistencia de todas las presentadas es la opción del PEDOT:PSS disuelto con DMSO sin tratar con campo eléctrico, puesto que alcanza resistencias de 19 Ω o 13 Ω en un ambiente de atmósfera que suele ser en el que se trabaja.

Tablas resumen de los resultados obtenidos:

Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS"

IDE	1							
Temperatura secado (°C)	120 °C							
Tiempo secado	12 min		30 min		55 min		2h	
Tensión (V)	0V	1,8	0V	1,8	0V	1,8	0V	1,8
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	658	311	574	354	637	222	704	347
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	1976	856	1716	1178	1973	647	2142	974

Tabla 5. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS")

Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS"

IDE	2							
Temperatura secado (°C)	120 °C							
Tiempo secado	12 min		30 min		55 min		2h	
Tensión (V)	0 V	1,8	0 V	1,8	0 V	1,8	0 V	1,8
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	455	270	354	231	366	220	355	183
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	1509	497	1258	734	1337	638	1212	517

Tabla 6. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS")

Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS"

IDE	3							
Temperatura secado (°C)	120 °C							
Tiempo secado	12 min		30 min		55 min		2h	
Tensión (V)	0 V	1,8	0 V	1,8	0 V	1,8	0 V	1,8
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	348	206	264	190	251	109	271	177
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	1363	827	914	706	914	387	1126	727

Tabla 7. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 3. (Ensayo tipo 1.A - "100% vol PEDOT:PSS")

Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”

IDE	1				
Temperatura secado (°C)	120 °C				
Tiempo secado	12 min	30 min	55 min		2h
Tensión (V)	0 V	0 V	0 V	1,8 V	0 V
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	1304	1177	1146	498	1196
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	2804	2434	2218	828	2352

Tabla 8. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”

IDE	2			
Temperatura secado (°C)	120 °C			
Tiempo secado	12 min	30 min	55 min	2h
Tensión (V)	0 V	0 V	0 V	0 V
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	694	555	517	553
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	1815	1485	1648	1470

Tabla 9. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

**Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol
DMSO”**

IDE	1				
Temperatura secado (°C)	50 °C				
Tiempo secado	12 minutos				
Tensión (V)	0 V muestra 1	0 V muestra 2	0,6 V	1,2 V	1,8 V
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	20,27	13,58	16,10	20,95	17,29
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	19,40	13,52	15,87	17,55	17,53

Tabla 10. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 1. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”

IDE	2		
Temperatura secado (°C)	50 °C		
Tiempo secado	12 minutos		
Tensión (V)	0 V	0,6 V	1,2 V
\bar{X} Resistencia (Ω) (Vacío)	24,87	26,04	26,13
\bar{X} Resistencia (Ω) (Condiciones ambientales)	24,93	25,82	25,01

Tabla 11. Tabla resumen resultados obtenidos en el IDE 2. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

4.2. Trabajos futuros

Al suministrar un campo eléctrico a los electrodos que contenían PEDOT:PSS y a otros que contenían PEDOT:PSS disuelto con agua, se ha comprobado que sí se produce una mejora en la conductividad, por tanto, probablemente también se debería observar una mejora en la conductividad del PEDOT:PSS disuelto con DMSO al aplicarle un campo eléctrico. Entonces, sería interesante seguir investigando si es posible reducir la resistencia del PEDOT:PSS disuelto con DMSO tratándolo con campo eléctrico. Para ello, se debe controlar la humedad del ambiente y tratar todas las capas simultáneamente, de forma que todas las capas se sequen en las mismas condiciones ambientales. Unas capas deberán tratarse con campo eléctrico asistido con recocido térmico y otras tan sólo con recocido térmico, las cuales servirán de referencia para comparar el efecto del campo eléctrico.



5. ANEXO

5.1. Resumen de medidas.

Ensayo	Tiempo secado	Temperatura (°C)	Tensión suministrada (V)
Ensayo tipo 1	12 minutos	50	0V
Ensayo tipo 1.A - “100% vol PEDOT:PSS”	12 minutos, 30 minutos, 55 minutos y 2 horas	120	0V
			1,8V
Ensayo tipo 1.B - “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H ₂ O”	12 minutos, 30 minutos, 55 minutos y 2 horas	120	0V
			55 minutos
Ensayo tipo 1.C - “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”	12 minutos	50	0V; 0,6V; 1,2V; 1,8V

Tabla 12. Tabla resumen de medidas colocadas en Anexo.

Conviene subrayar que las gráficas mostradas a continuación han sido obtenidas mediante los electrodos interdigitados de Micrux.

Ensayo tipo 1

Temperatura de secado de la capa del polímero: 50 °C

Tiempo de secado de la capa del polímero: 12 minutos aproximadamente

Voltaje aplicado: no se aplica

Tiempo durante el cual se aplica campo eléctrico: no se aplica

Tiempo durante el cual se extrae atmósfera mediante bomba: 5 minutos

IDE 1



Figura 68. Gráfica de reproducibilidad y repetibilidad. IDE 1. (Ensayo tipo 1)

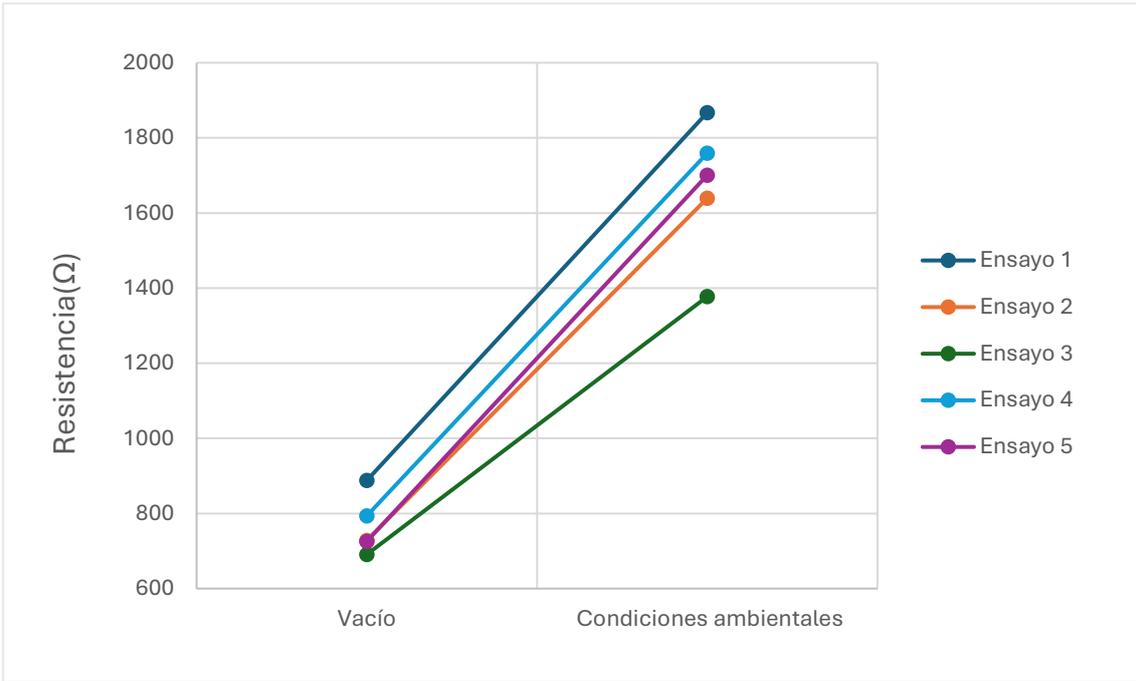


Figura 69. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1. (Ensayo tipo 1)

IDE 2

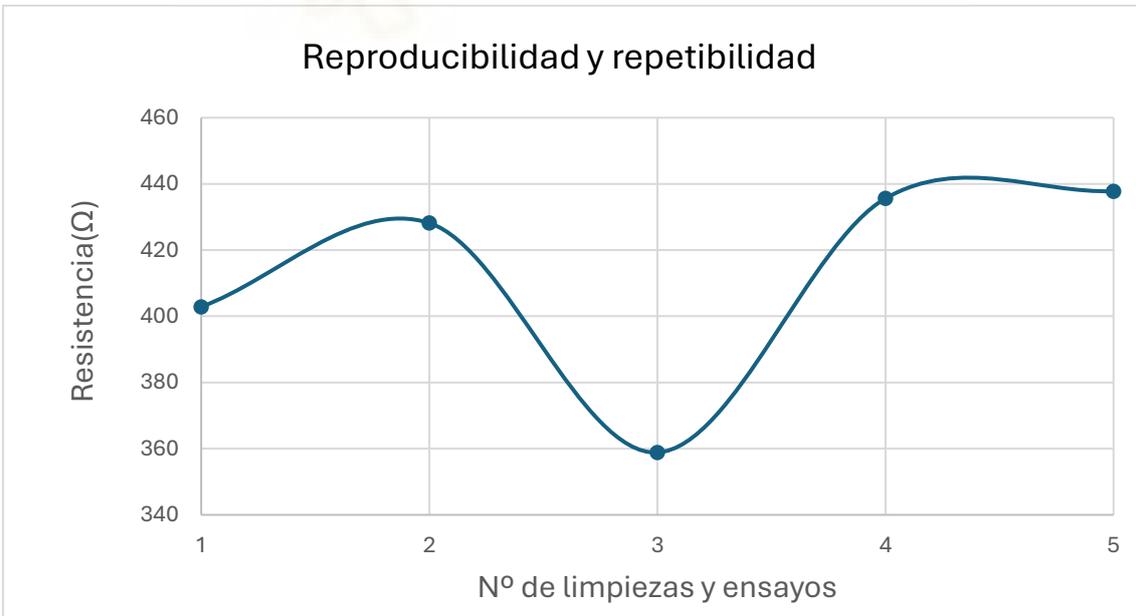


Figura 70. Gráfica de reproducibilidad y repetibilidad. IDE 2. (Ensayo tipo 1)

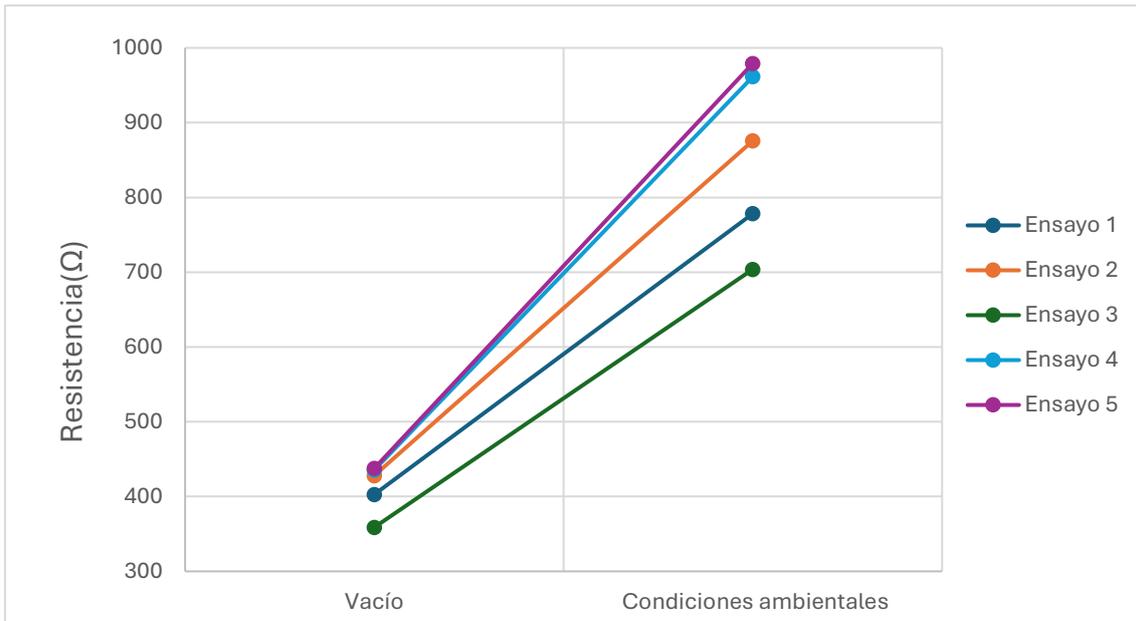


Figura 71. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2. (Ensayo tipo 1)

IDE 3

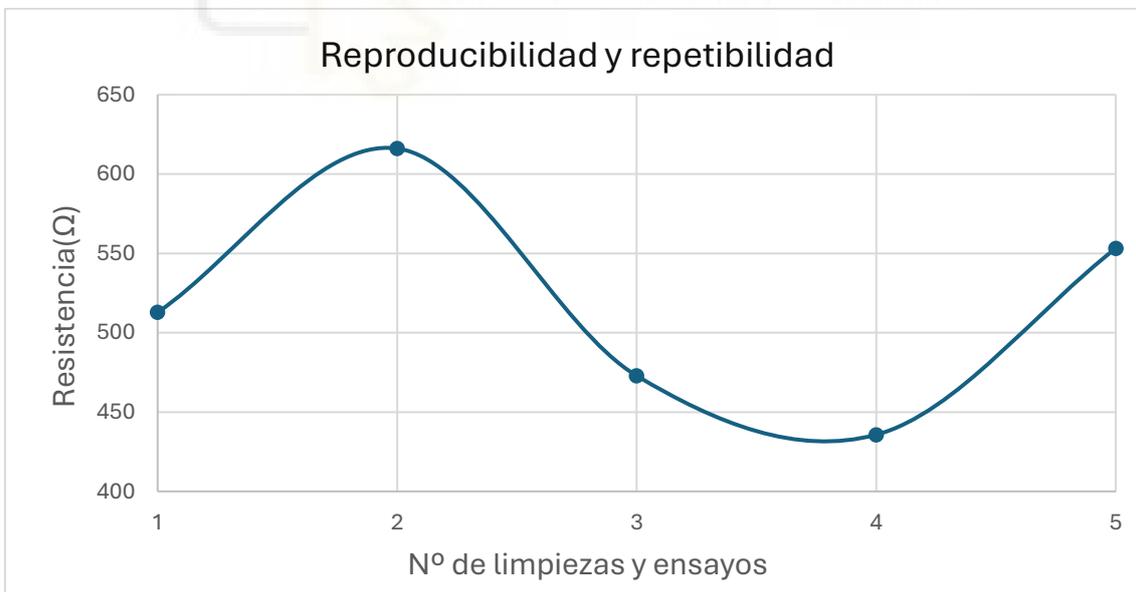


Figura 72. Gráfica de reproducibilidad y repetibilidad. IDE 3. (Ensayo tipo 1)

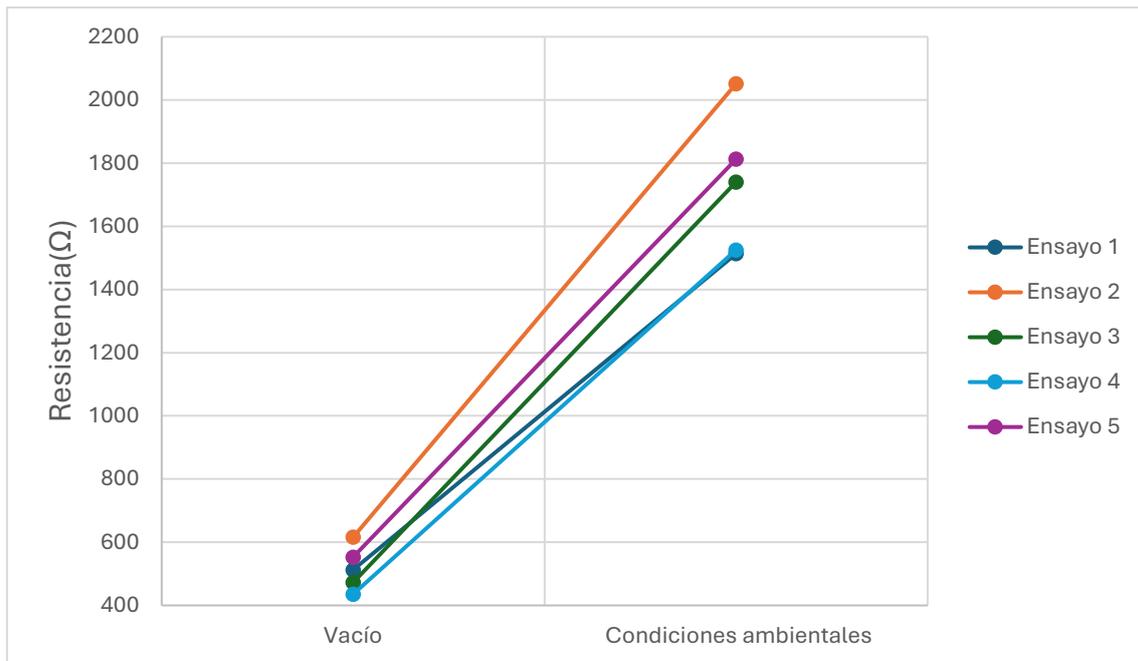


Figura 73. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 3. (Ensayo tipo 1)

En las gráficas se observa que se obtiene menor resistencia en el IDE 2 que en el IDE 3. Habiendo estudiado la influencia de la geometría de los electrodos interdigitados, sabemos que la resistencia del IDE 3 debería ser menor que la del IDE 2. Por tanto, podemos decir que si aparece menor resistencia en el IDE 2 que en el IDE 3 no es a causa de la geometría de los electrodos interdigitados, sino que es debido a un factor externo a la geometría.

Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS, 0 V”

Temperatura de secado de la capa del polímero: 120 °C.

Tiempo de secado de la capa del polímero: indicado en la leyenda de la gráfica.

Tiempo durante el cual se extrae atmósfera mediante bomba: 5 minutos.

Voltaje aplicado: no se aplica

Tiempo durante el cual se aplica campo eléctrico: no se aplica campo eléctrico

IDE 1

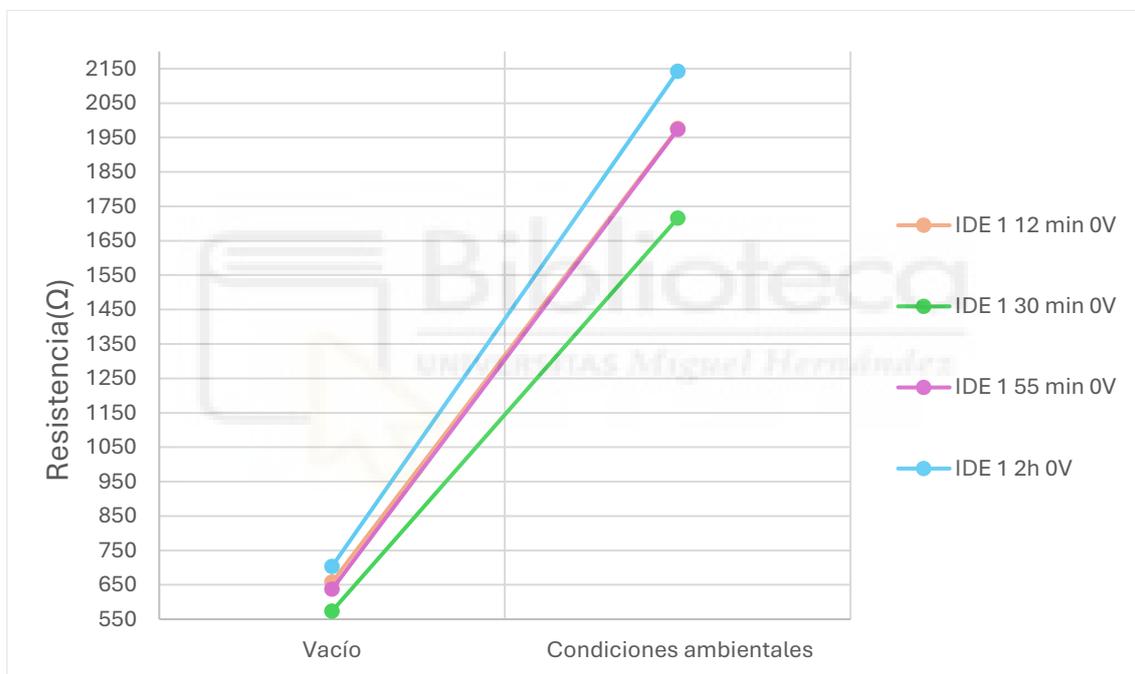


Figura 74. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 0 V.
(Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

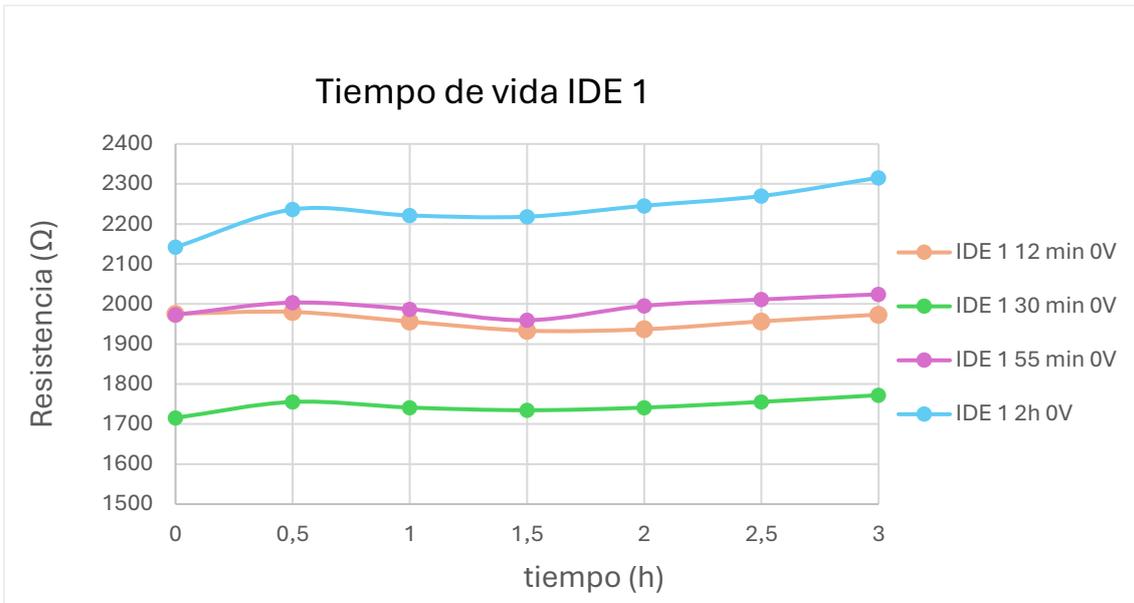


Figura 75. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

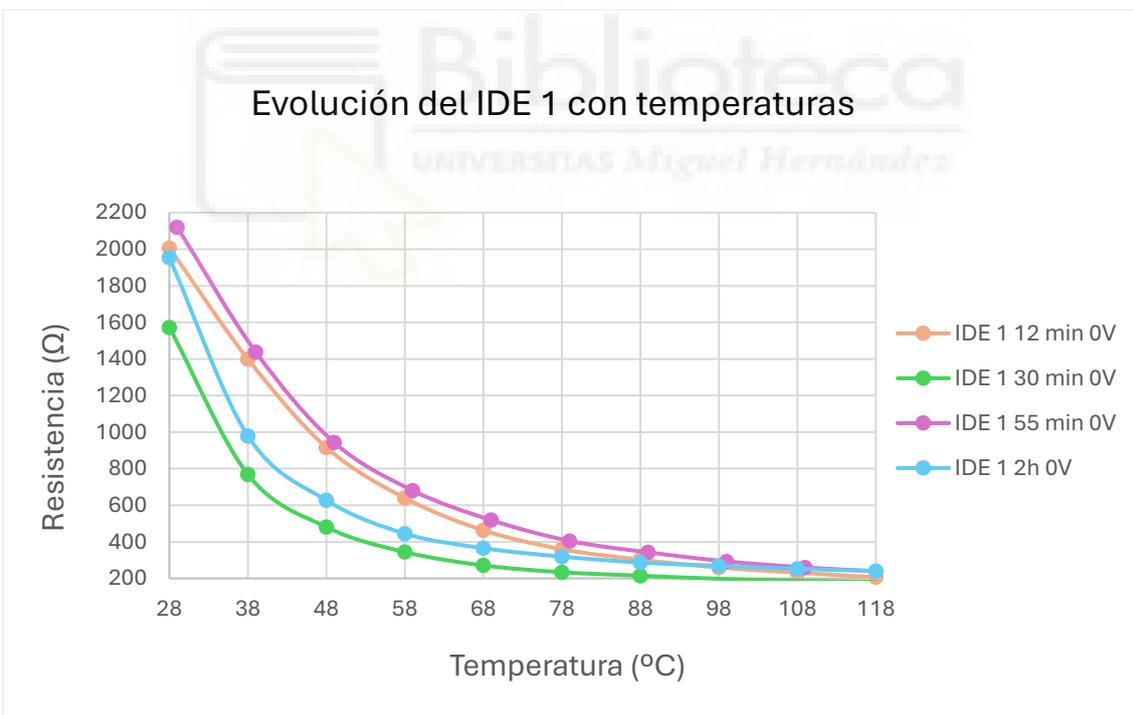


Figura 76. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

IDE 2

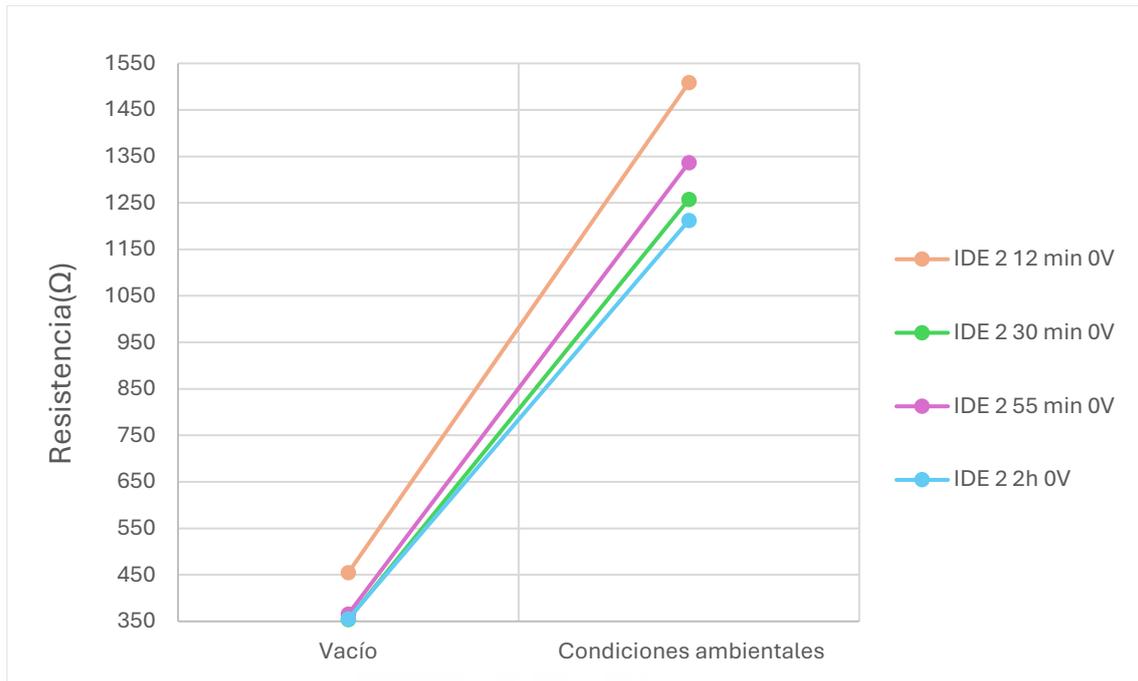


Figura 77. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)



Figura 78. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

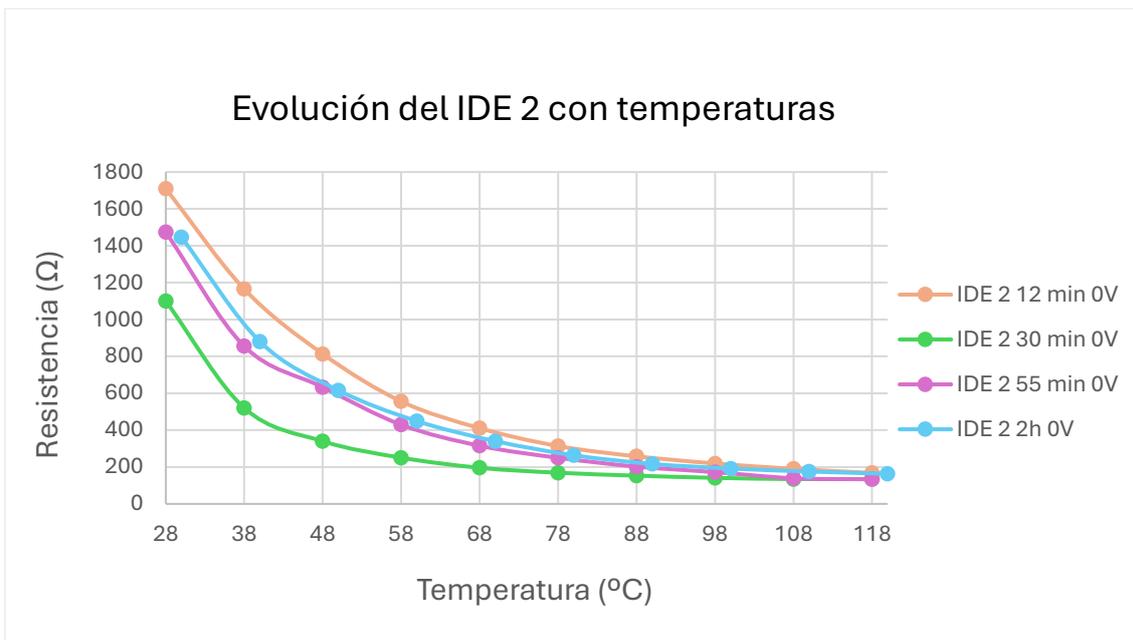


Figura 79. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

IDE 3

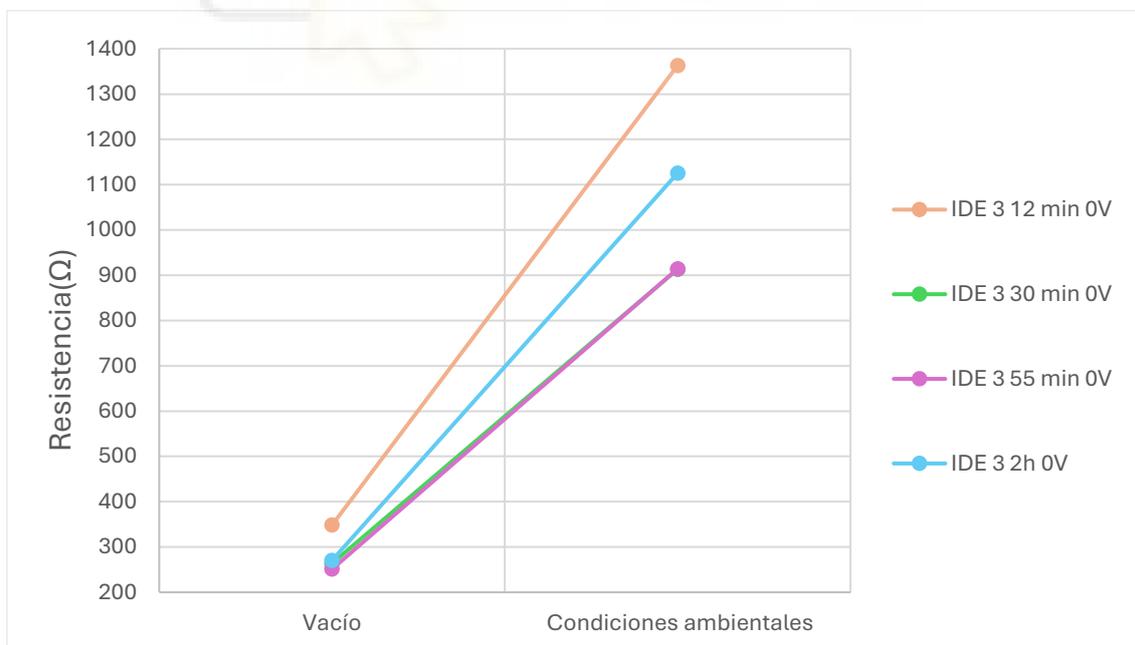


Figura 80. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

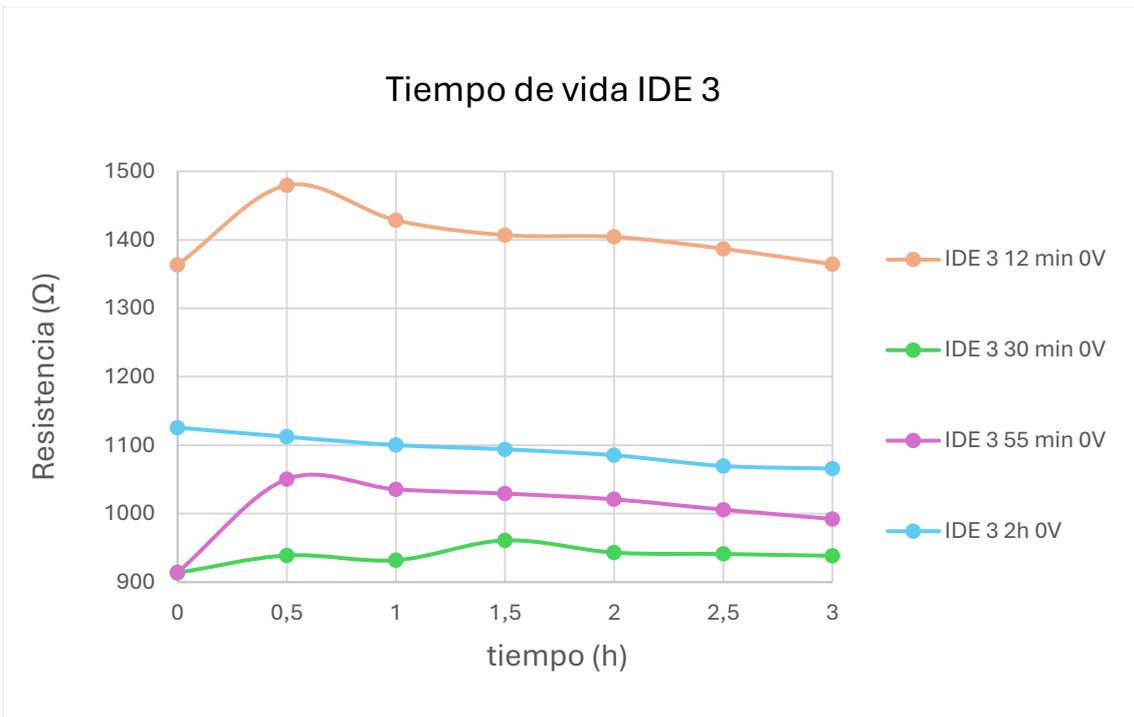


Figura 81. Gráfica de tiempo de vida. IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

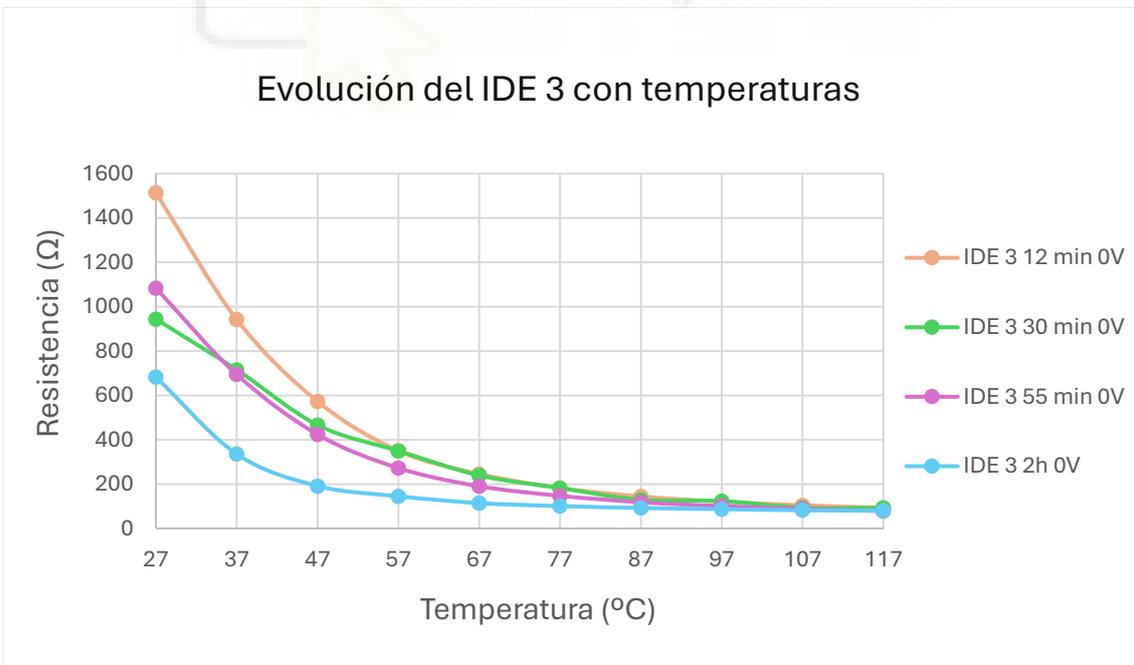


Figura 82. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 3, 0 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS, 1,8 V”

Temperatura de secado de la capa del polímero: 120 °C.

Tiempo de secado de la capa del polímero: indicado en la leyenda de la gráfica.

Tiempo durante el cual se extrae atmósfera mediante bomba: 5 minutos.

Voltaje aplicado: 1,8V

Tiempo durante el cual se aplica campo eléctrico: indicado en la leyenda de la gráfica.

IDE 1

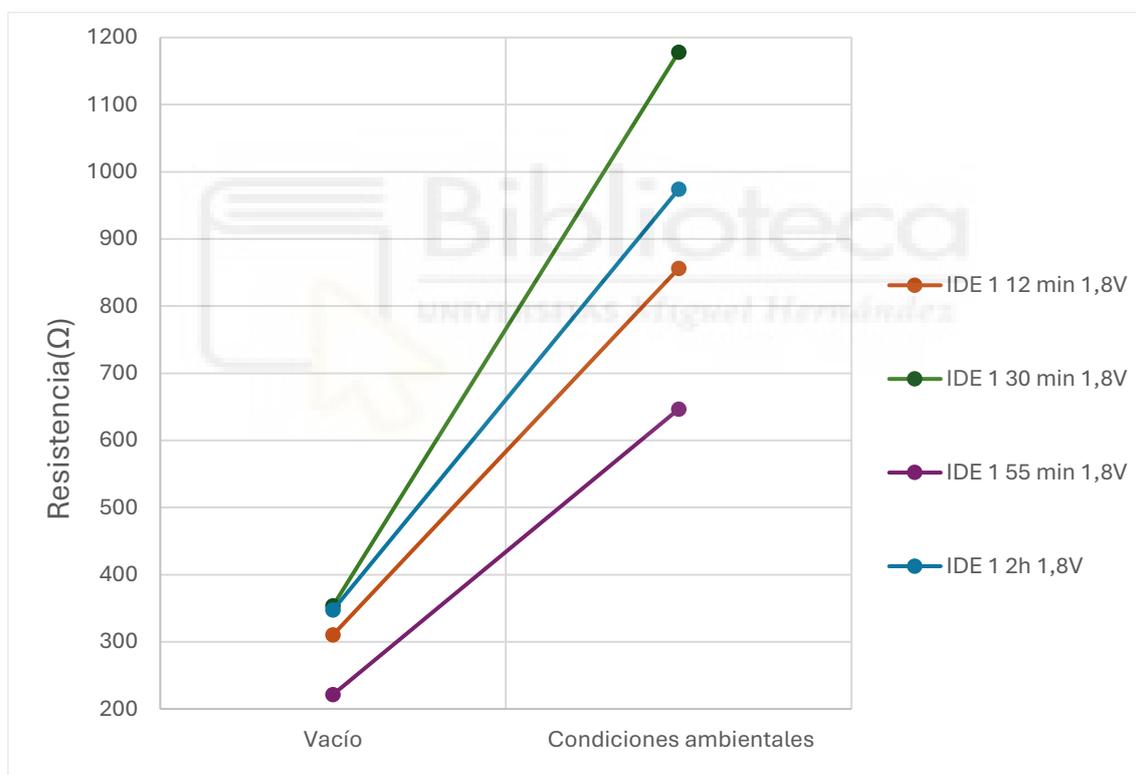


Figura 83. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

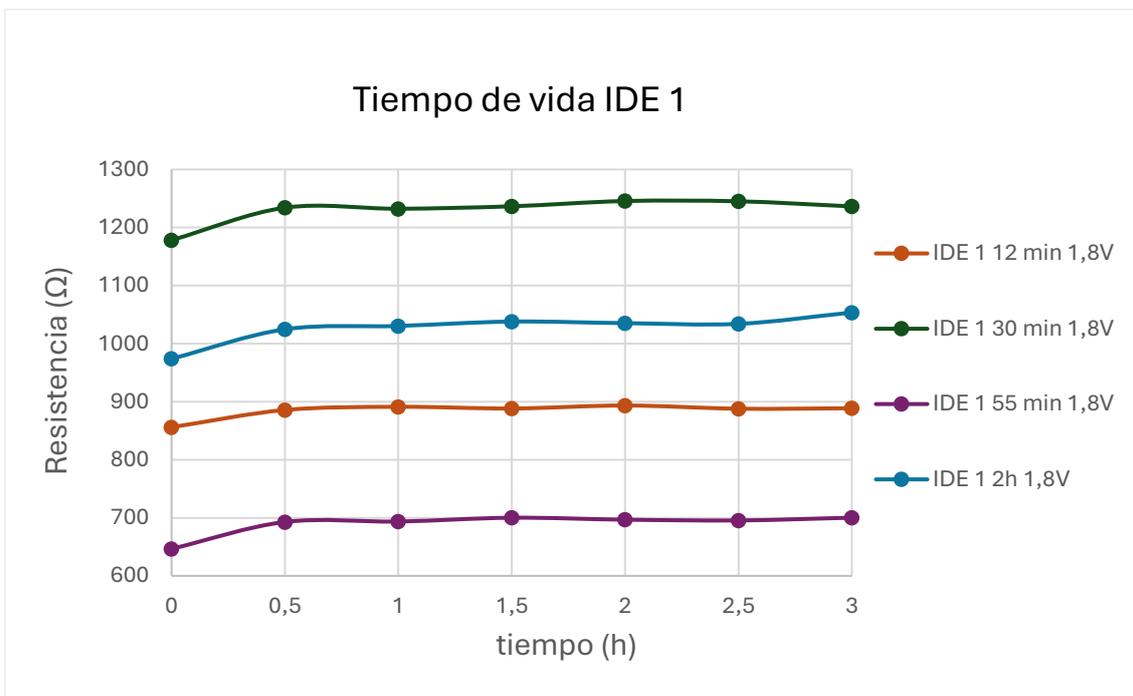


Figura 84. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

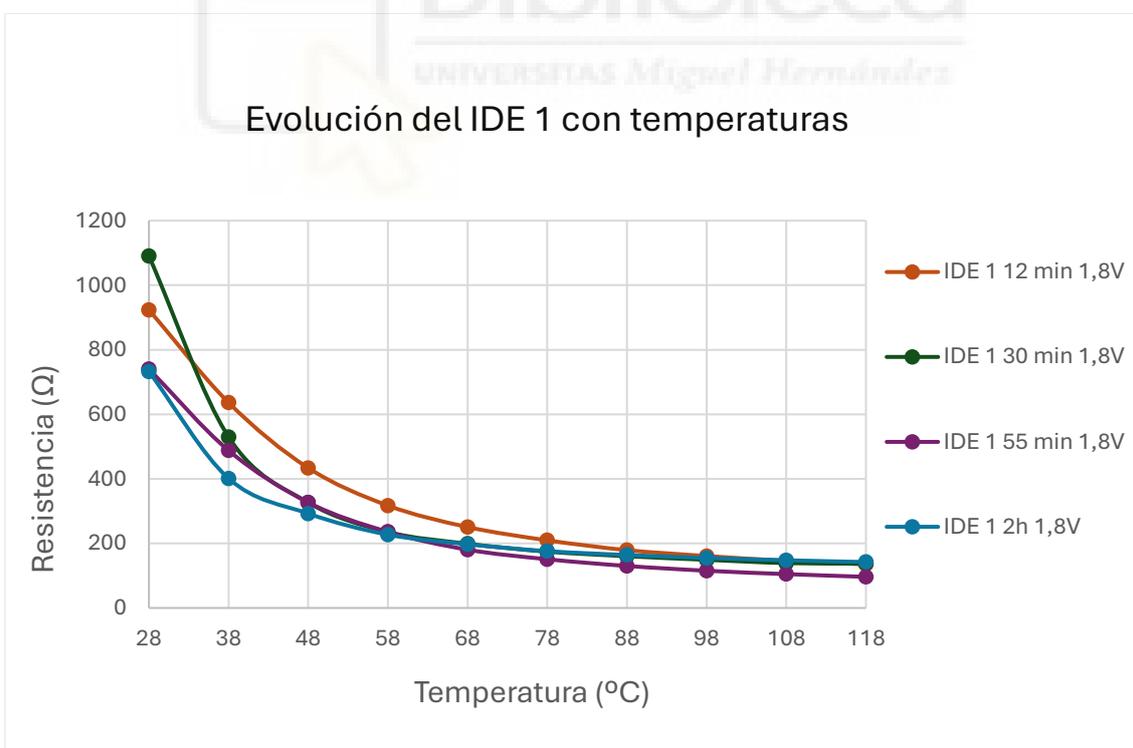


Figura 85. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

IDE 2

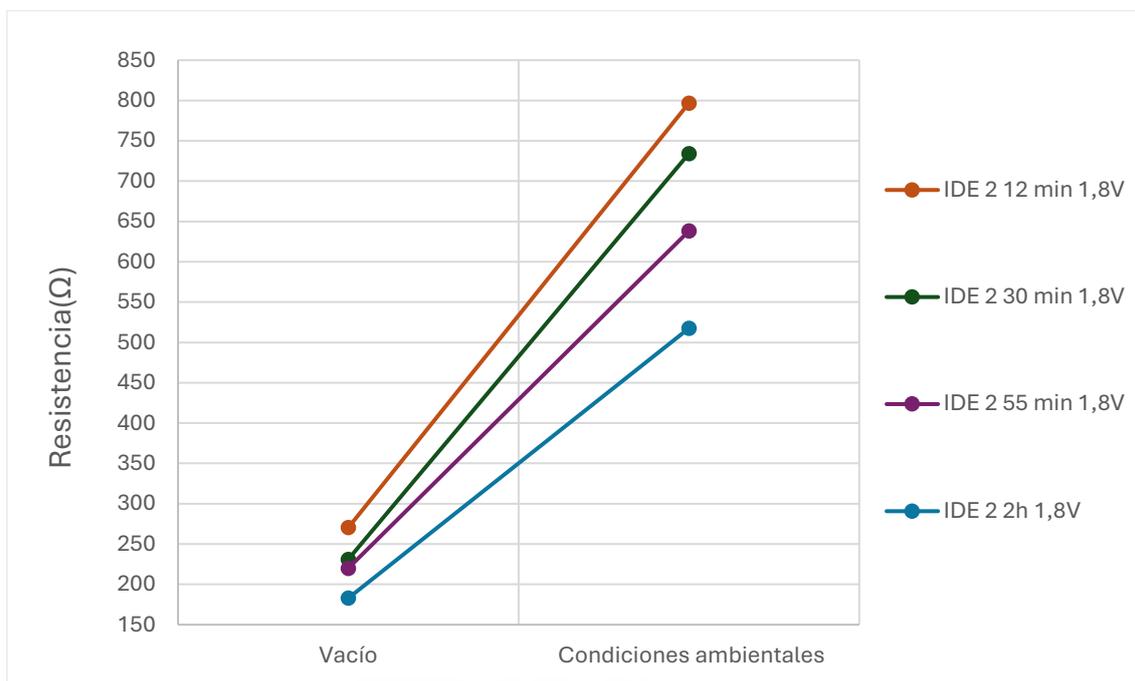


Figura 86. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

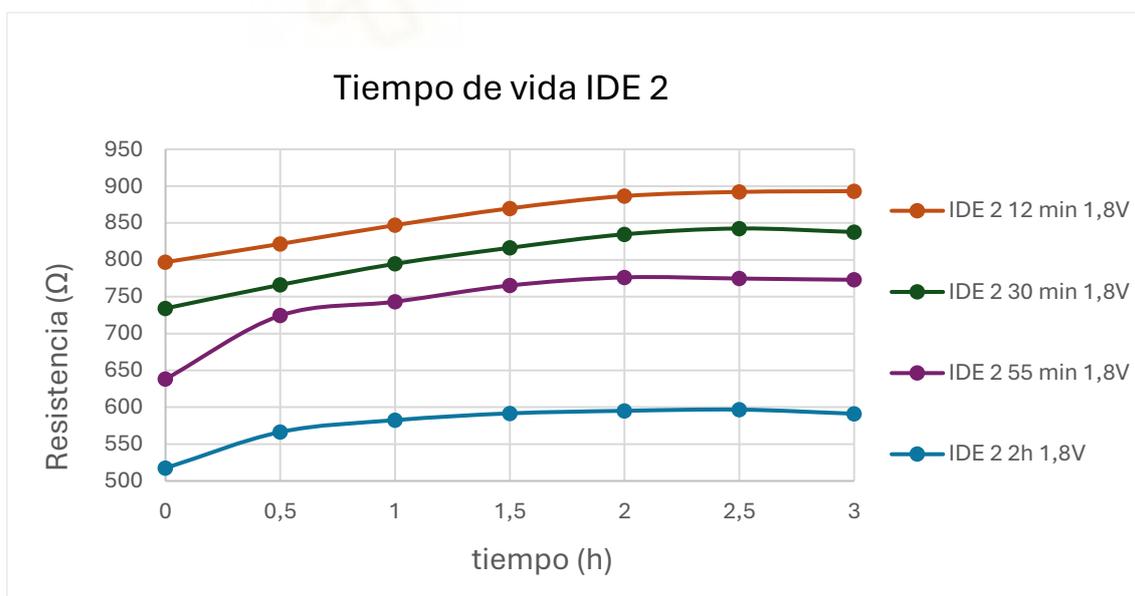


Figura 87. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

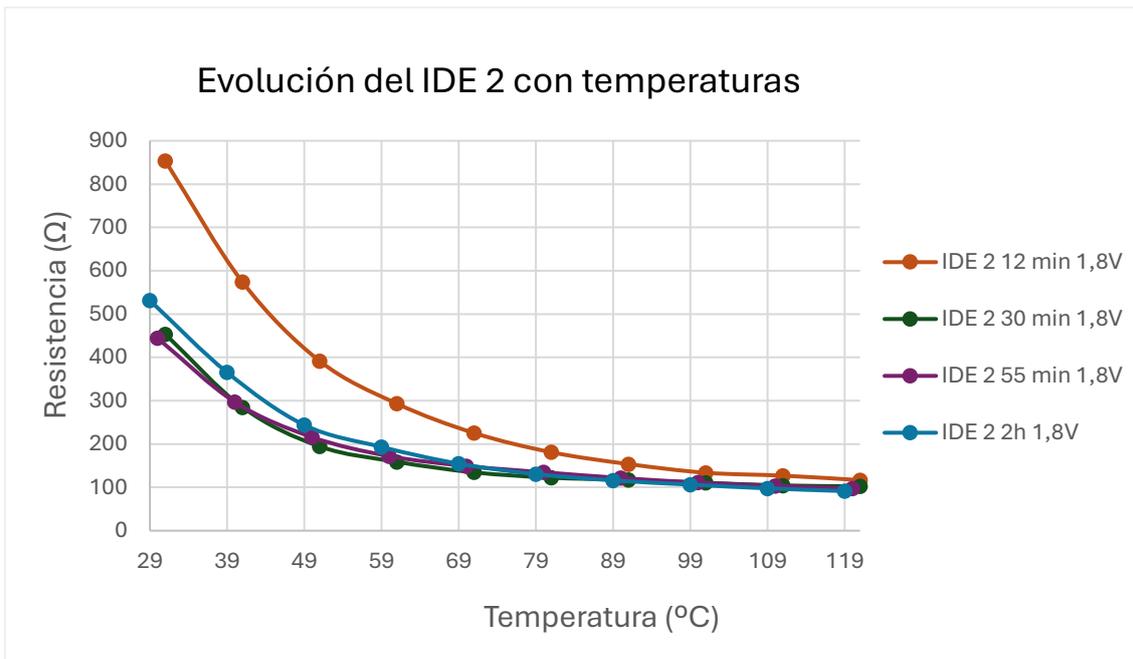


Figura 88. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

IDE 3

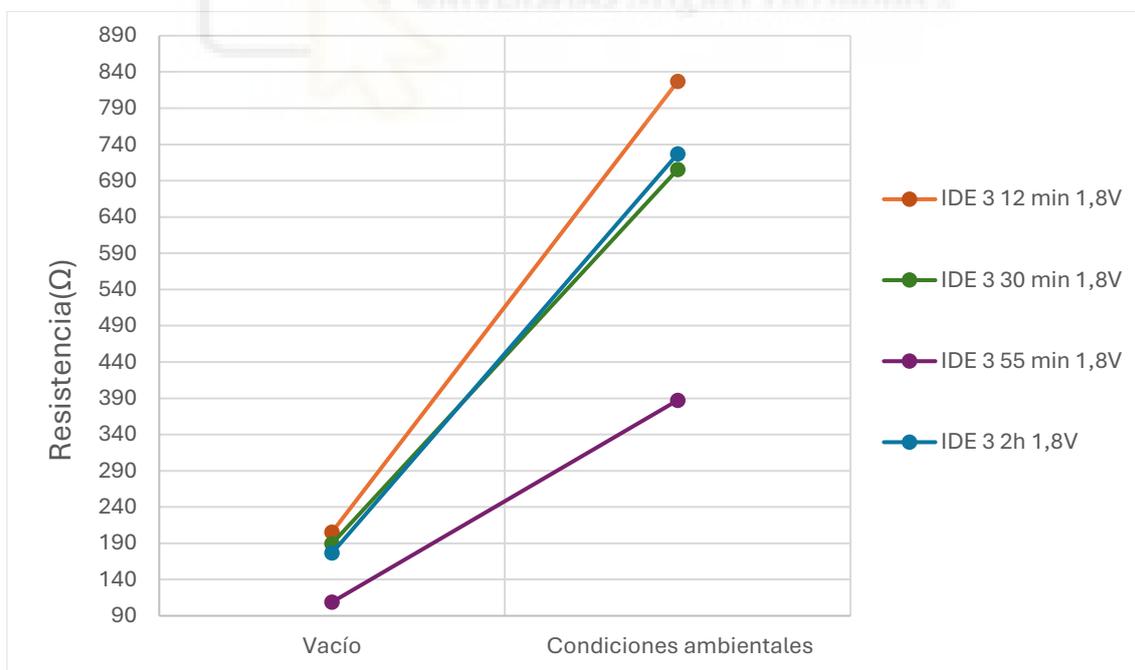


Figura 89. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

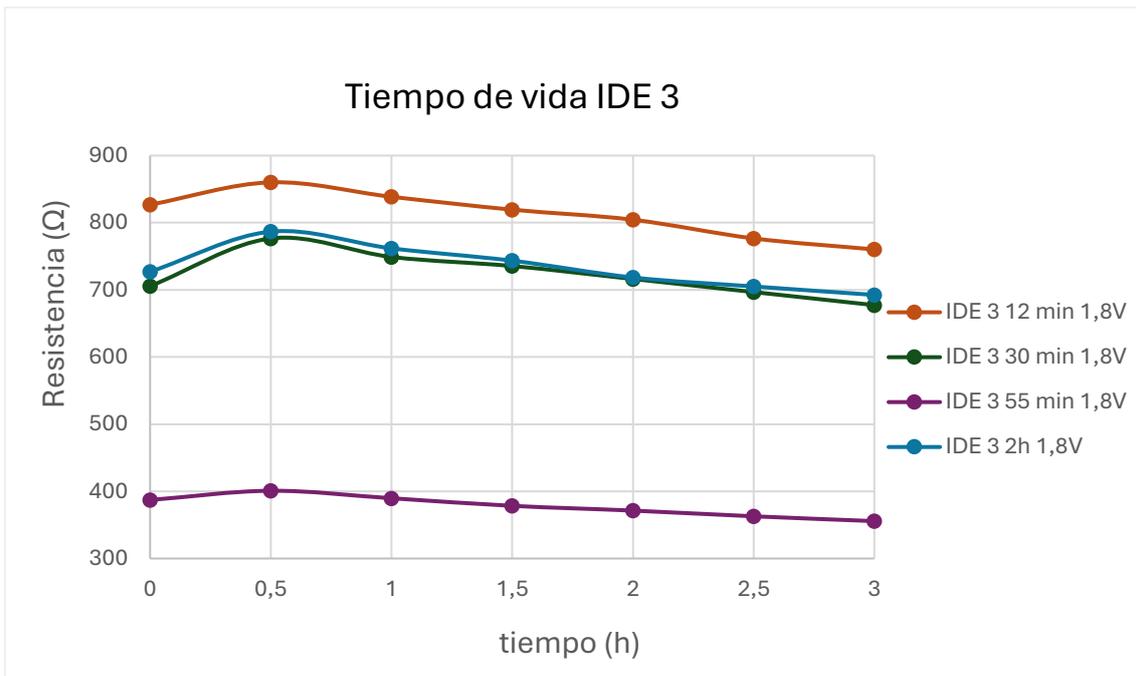


Figura 90. Gráfica de tiempo de vida. IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

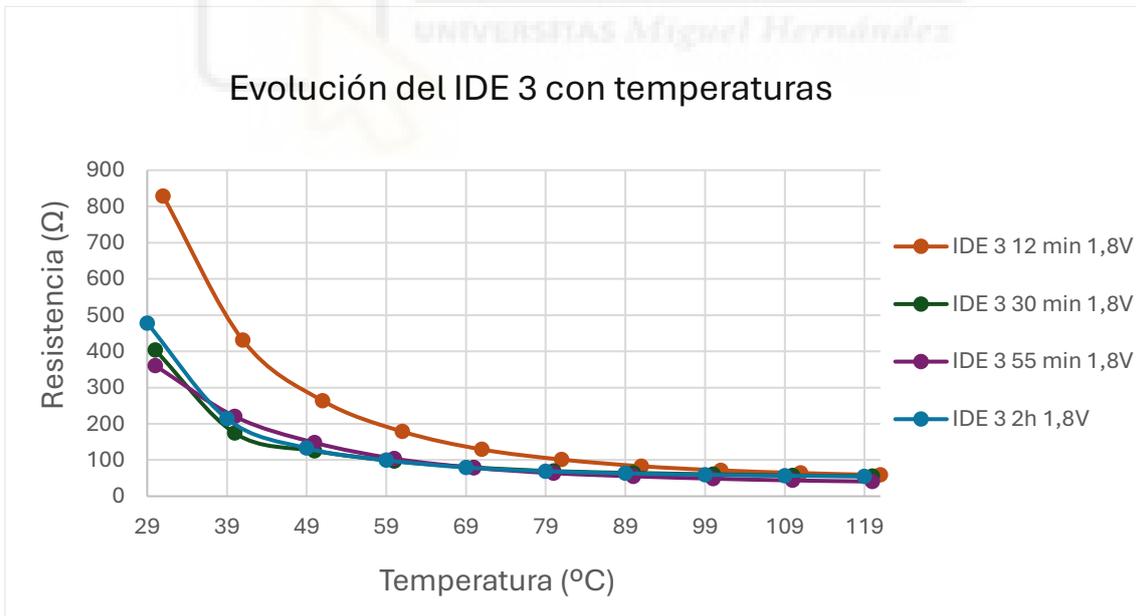


Figura 91. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 3, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.A – “100% vol PEDOT: PSS”)

Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O, 0 V”

Temperatura de secado de la capa del polímero: 120 °C.

Tiempo de secado de la capa del polímero: indicado en la leyenda de la gráfica.

Tiempo durante el cual se extrae atmósfera mediante bomba: 5 minutos.

Voltaje aplicado: no se aplica

Tiempo durante el cual se aplica campo eléctrico: no se aplica campo eléctrico.

IDE 1

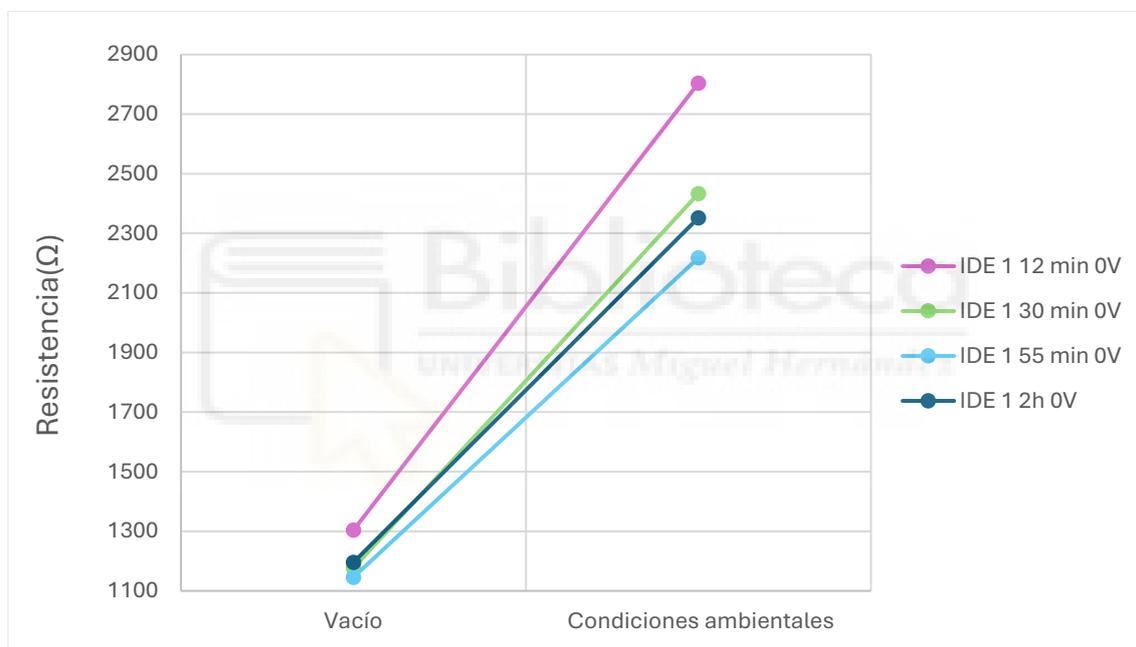


Figura 92. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 0 V.
(Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

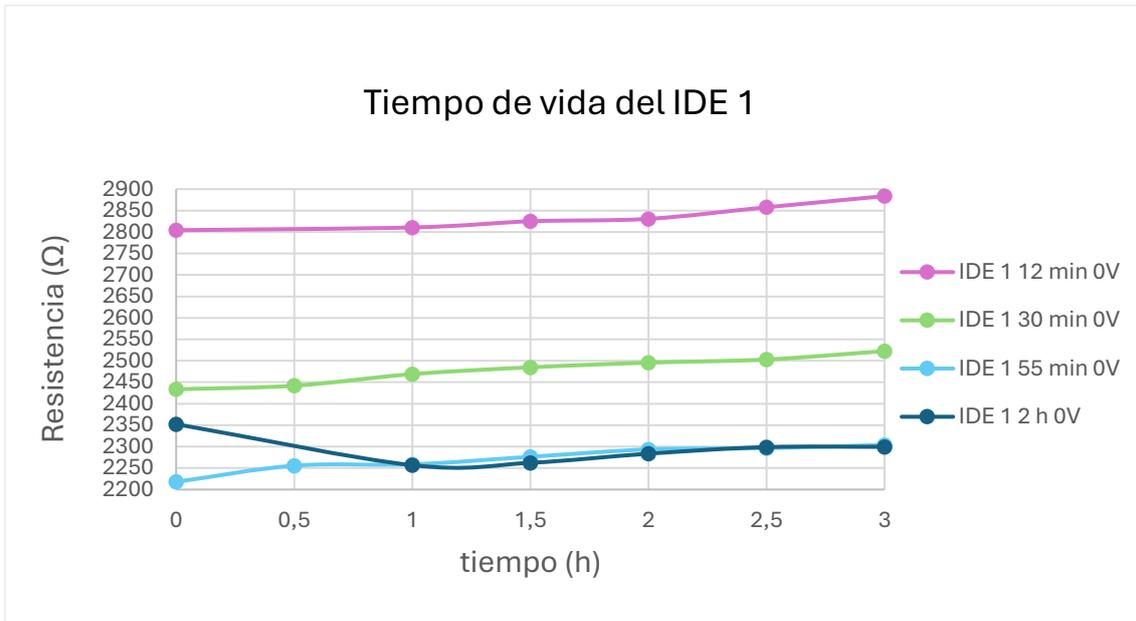


Figura 93. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

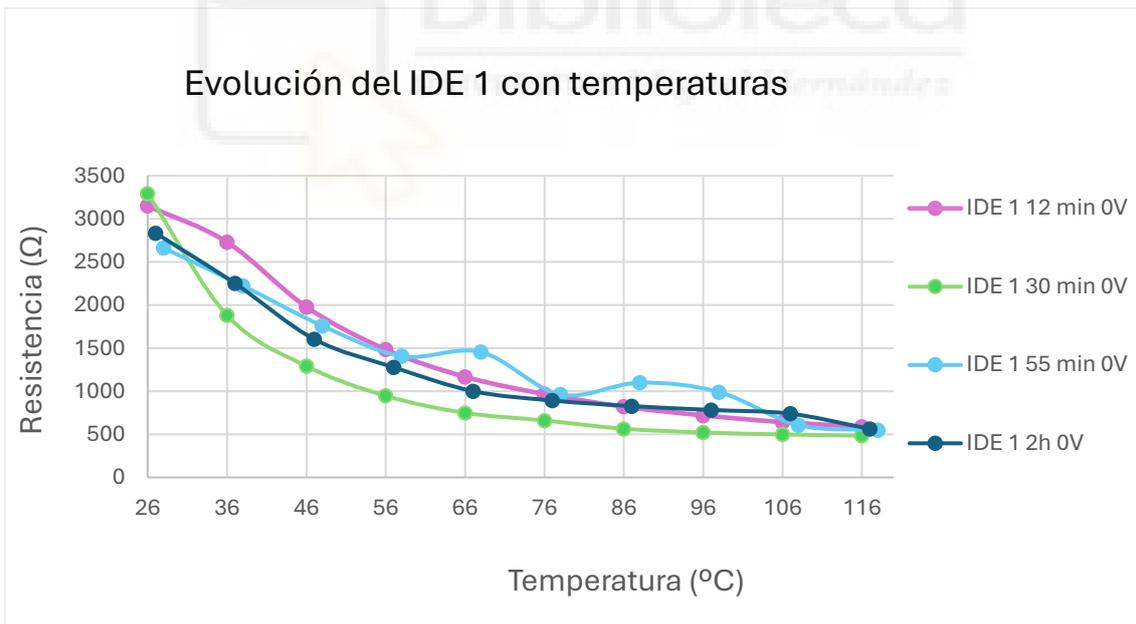


Figura 94. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

IDE 2

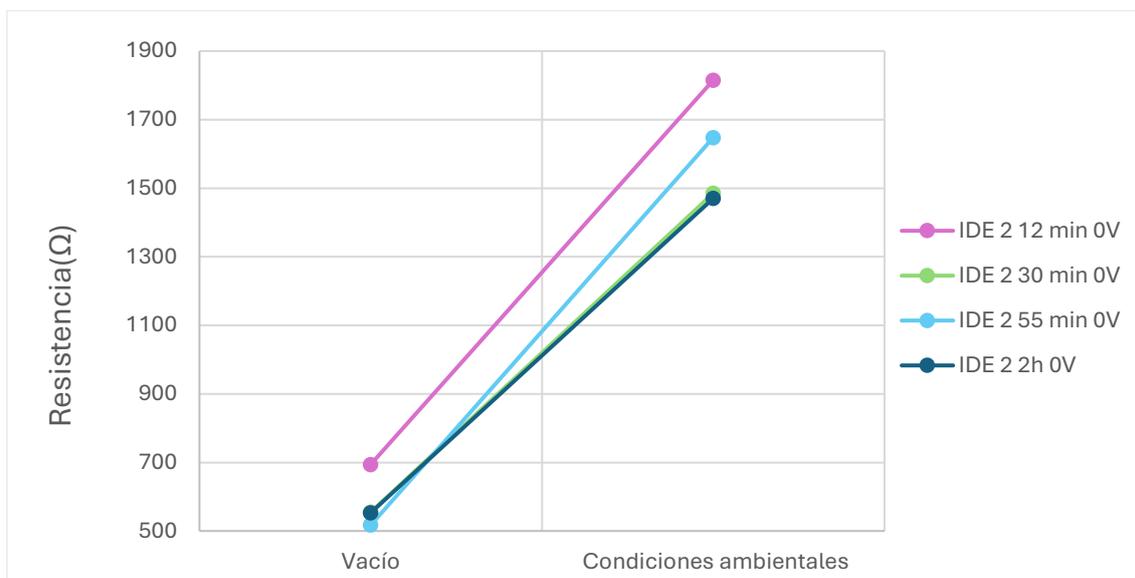


Figura 95. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – "75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O")

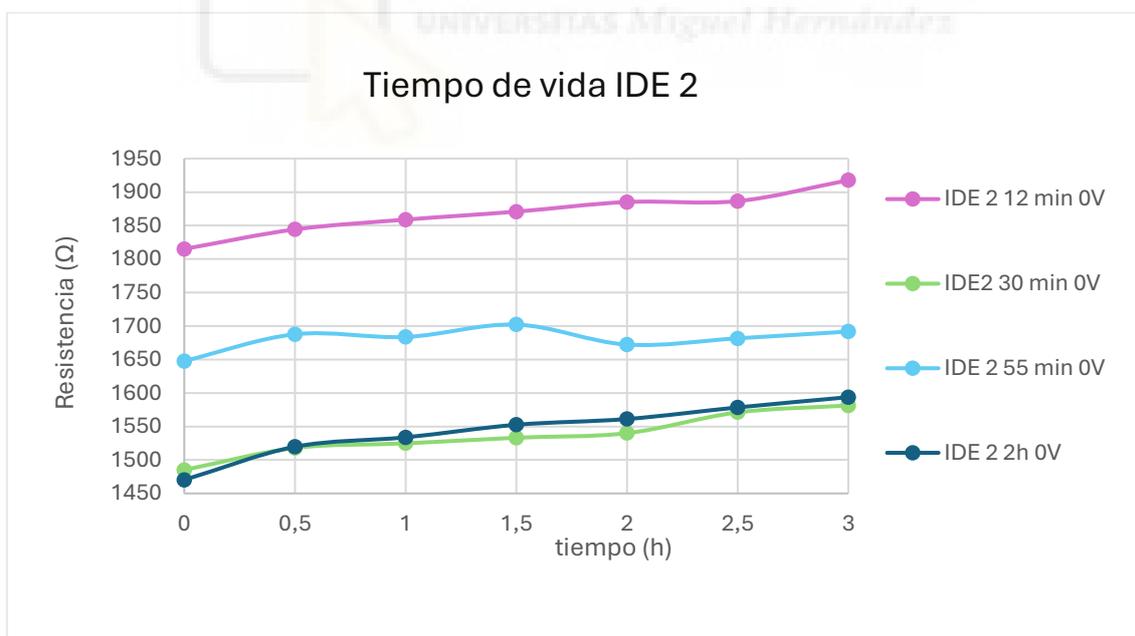


Figura 96. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – "75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O")

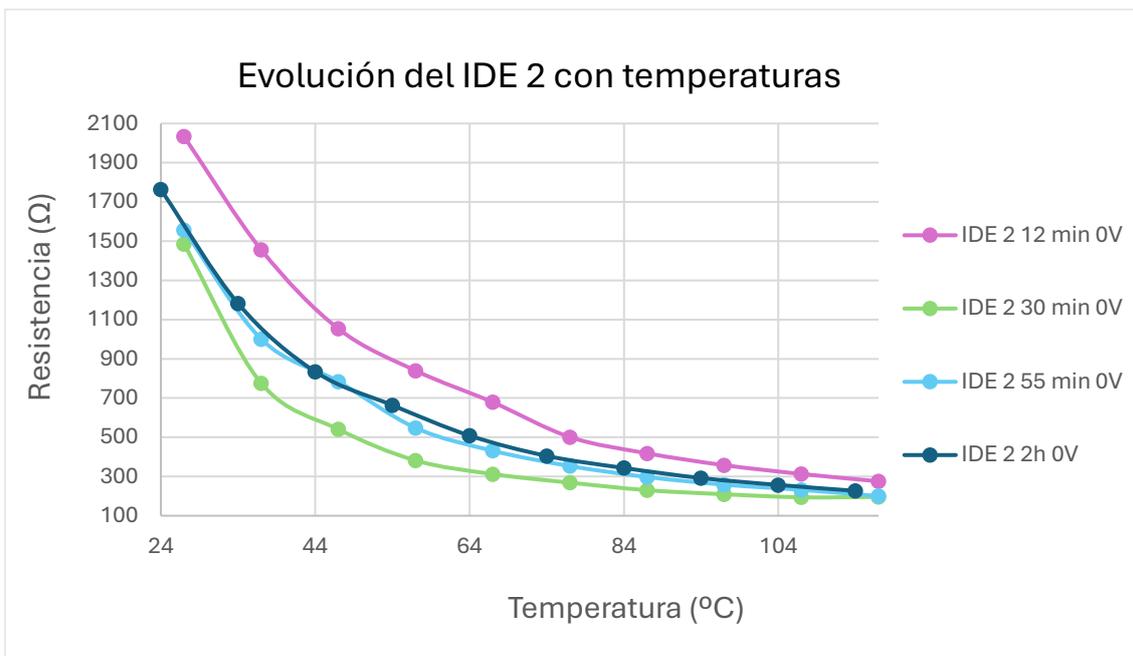


Figura 97. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 0 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)



Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O, 1,8 V”

Temperatura de secado de la capa del polímero: 120 °C.

Tiempo de secado de la capa del polímero: indicado en la leyenda de la gráfica.

Tiempo durante el cual se extrae atmósfera mediante bomba: 5 minutos.

Voltaje aplicado: 1,8V

Tiempo durante el cual se aplica campo eléctrico: indicado en la leyenda de la gráfica.

IDE 1

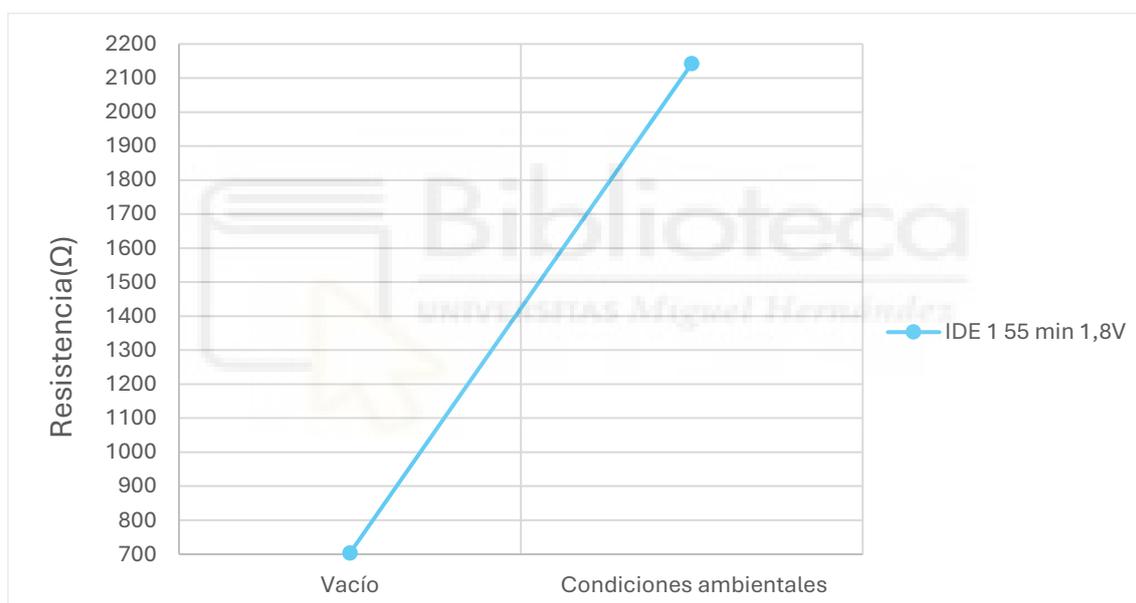


Figura 98. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 1,8 V.
(Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

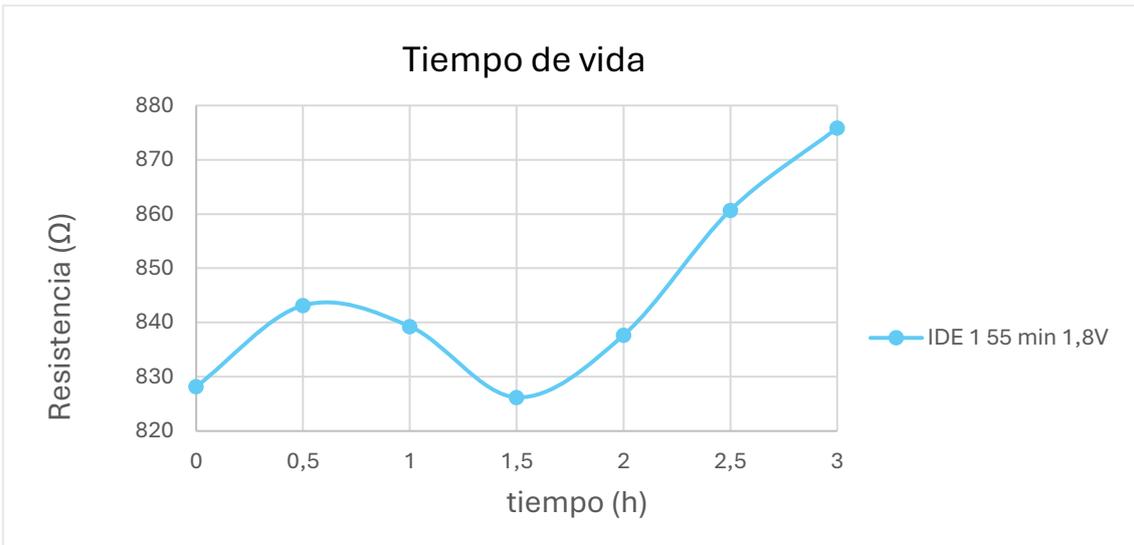


Figura 99. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

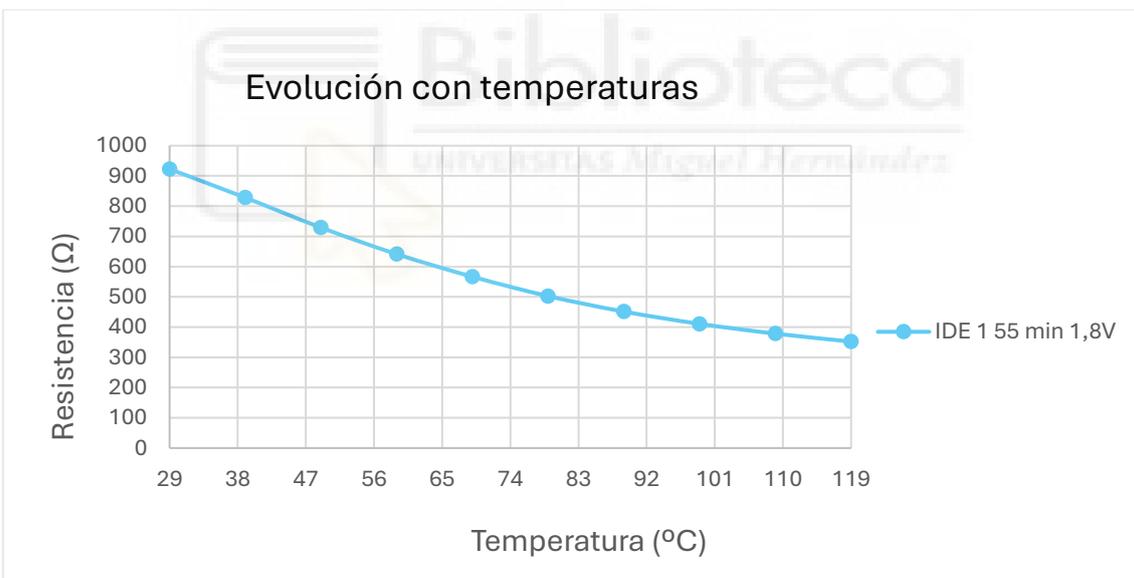


Figura 100. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 1,8 V. (Ensayo tipo 1.B – “75% vol PEDOT: PSS + 25% vol H₂O”)

Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”

Temperatura de secado de la capa del polímero: 50 °C.

Tiempo de secado de la capa del polímero: 12 minutos aproximadamente.

Tiempo durante el cual se extrae atmósfera mediante bomba: 5 minutos.

Voltaje aplicado: indicado en la leyenda de la gráfica.

Tiempo durante el cual se aplica campo eléctrico: 12 minutos aproximadamente.

IDE 1

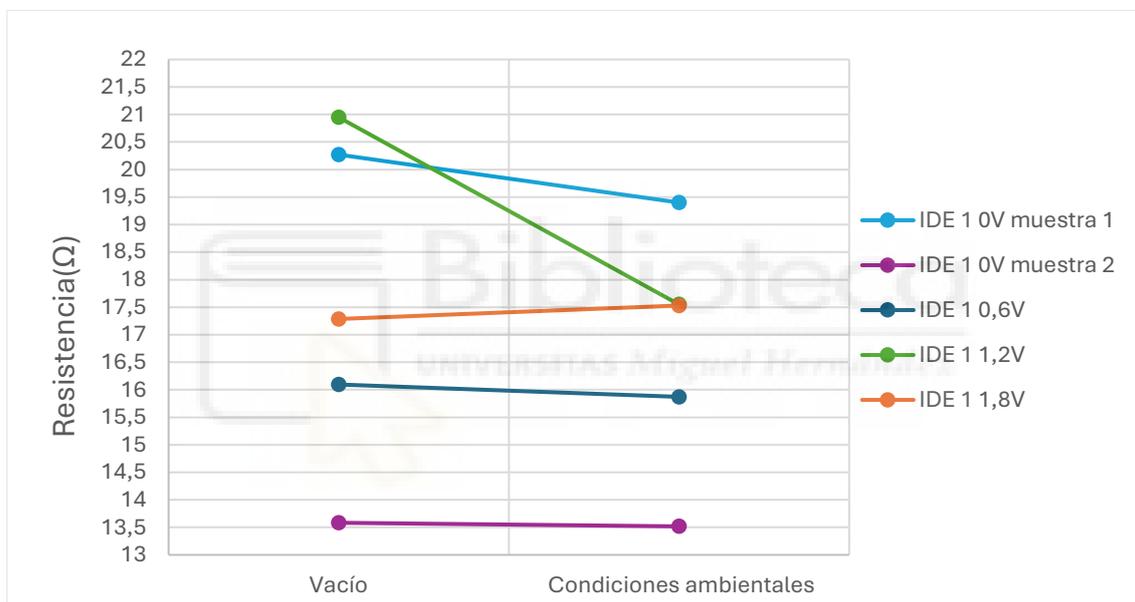


Figura 101. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 1, 0 V; 0,6 V; 1,2 V; 1,8 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

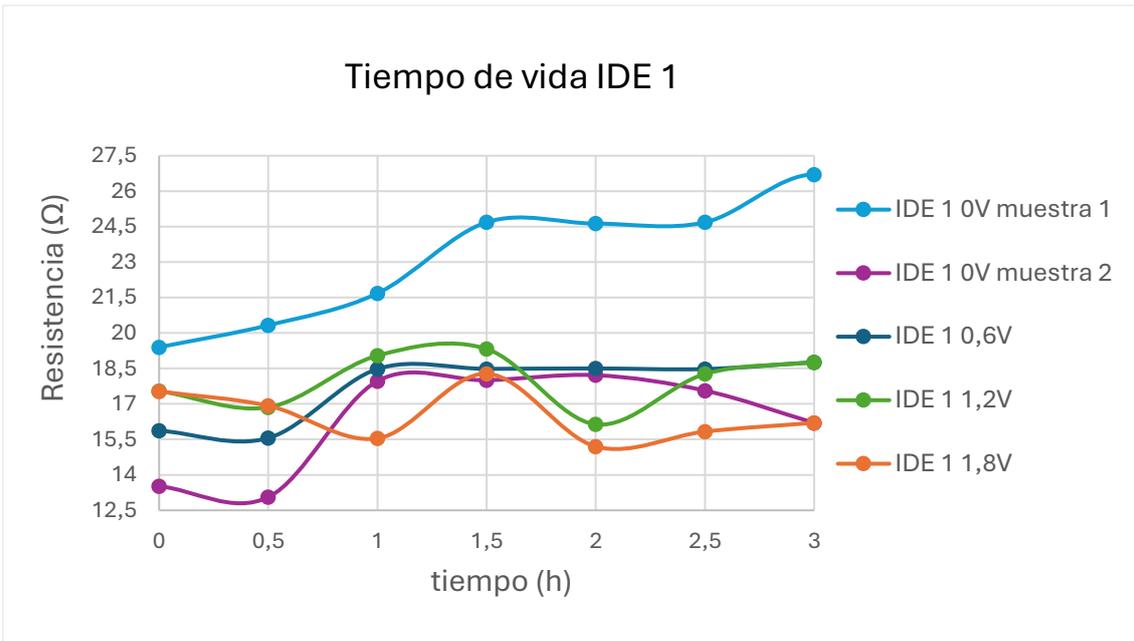


Figura 102. Gráfica de tiempo de vida. IDE 1, 0 V; 0,6 V; 1,2 V; 1,8 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

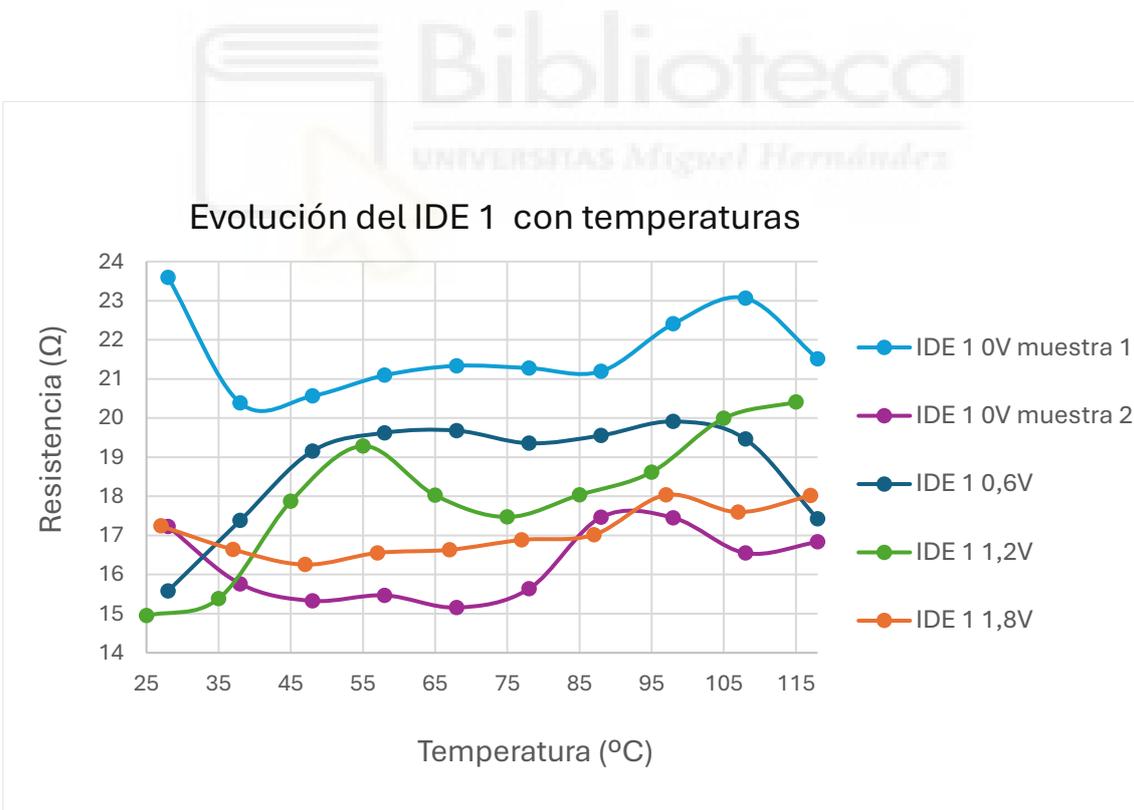


Figura 103. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 1, 0 V; 0,6 V; 1,2 V; 1,8 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

IDE 2

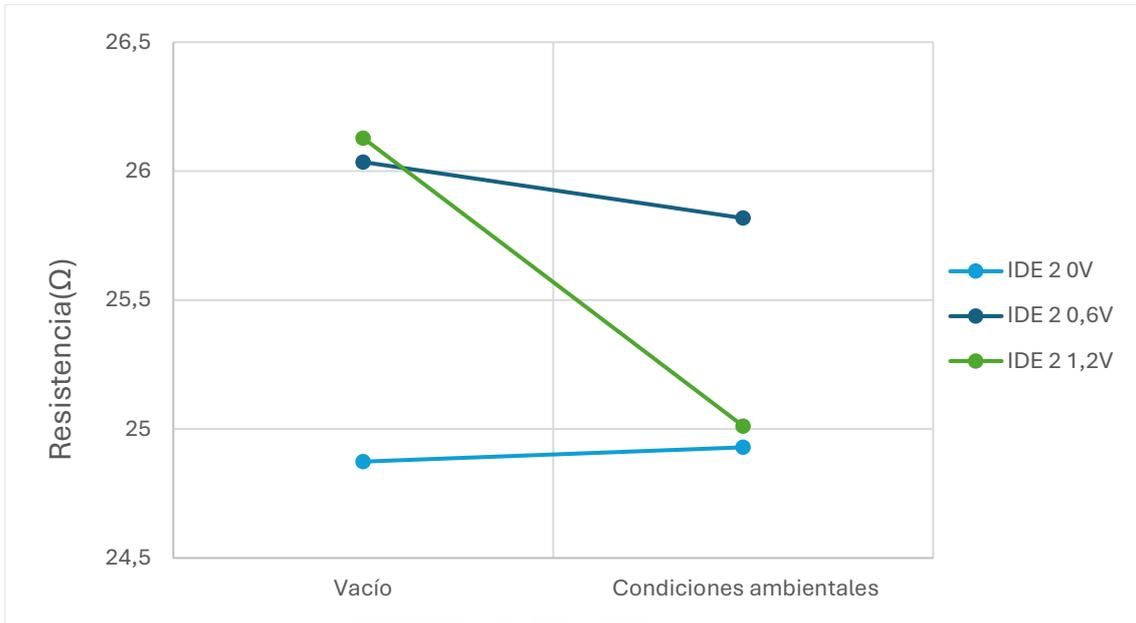


Figura 104. Gráfica de vacío vs condiciones ambientales. IDE 2, 0 V; 0,6 V; 1,2 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)



Figura 105. Gráfica de tiempo de vida. IDE 2, 0 V; 0,6 V; 1,2 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

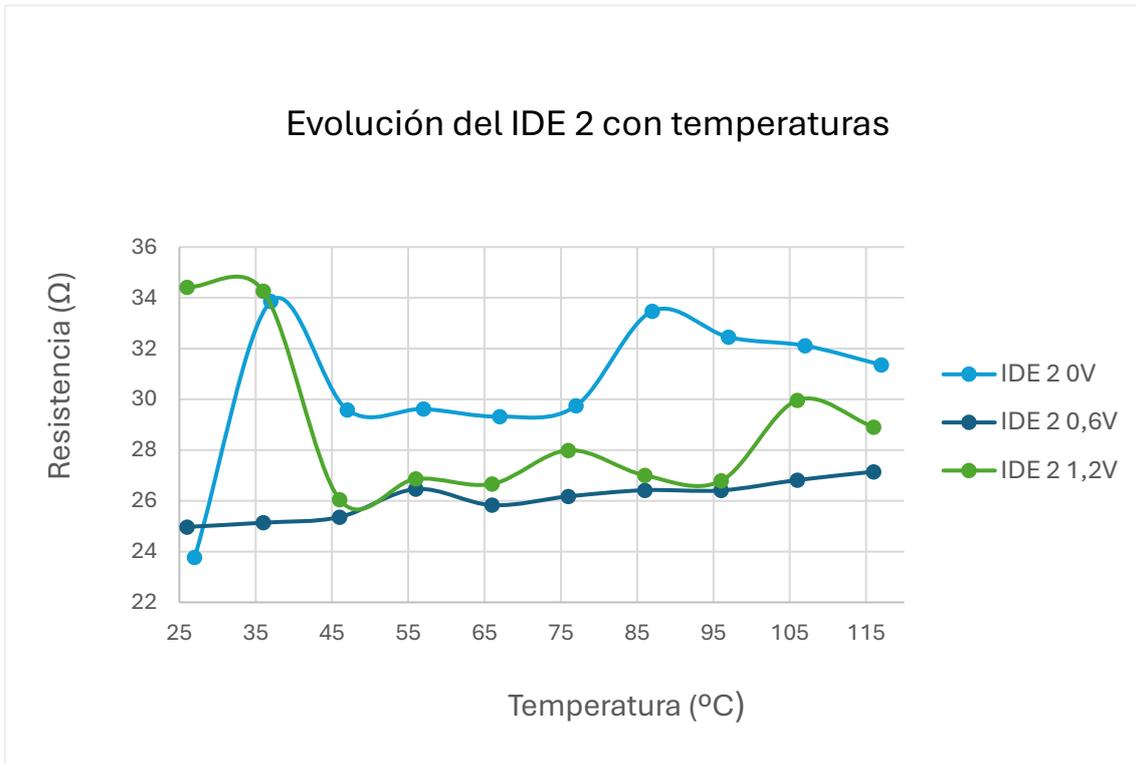


Figura 106. Gráfica de evolución con temperaturas. IDE 2, 0 V; 0,6 V; 1,2 V. (Ensayo tipo 1.C – “95% vol PEDOT: PSS + 5% vol DMSO”)

UNIVERSITAS Miguel Hernández

6. BIBLIOGRAFÍA

1. M. S. Mahajan, D. M. Marathe, S. S. Ghosh, V. Ganesan and J. V. Sali. Changes in in-plane electrical conductivity of PEDOT:PSS thin films due to electric field induced dipolar reorientation. *RSC Advances*. **2015**, 5, 86393-86401.
2. N. A. Shahrim, Z. Ahmad, A. W. Azman, Y. F. Buys and N. Sarifuddin. Mechanisms for doped PEDOT:PSS electrical conductivity improvement. *Materials Advances*. **2021**, 2, 7118-7138.
3. J. C. Ferrer, J. L. Alonso and S. Fernández de Ávila. Electrical characterization of photodetectors based on poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) layers. *Sensors*. **2014**, 14, 4484-4494.
4. J.Y. Kim, J.H. Jung, D.E. Lee and J. Joo. Enhancement of electrical conductivity of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) by a change of solvents. *Synthetic Metals*. **2002**, 126, 311–316.
5. F.A.R. Silva, L.M. Silva, A.M. Ceschin, M.J.A. Sales, S.G.C. Moreira and C.E. Viana. KDP/PEDOT:PSS mixture as a new alternative in the fabrication of pressure sensing devices. *Applied Surface Science*. **2008**, 255, 734–736.
6. J. Ouyang, C. Chu, F. Chen, Q. Xu and Y. Yang. High-Conductivity Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrene sulfonate) Film and Its Application in Polymer Optoelectronic Devices. *Advanced Functional Materials*. **2005**, 15, 203-208.
7. A. J. Stapleton, S. D. Yambem, A. H. Johns, R. A. Afre, A. V. Ellis, J. G. Shapter, G. G. Andersson, J. S. Quinton, P. L. Burn, P. Meredith and D. A. Lewis. Planar silver nanowire, carbon nanotube and PEDOT:PSS nanocomposite transparent electrodes. *Science and Technology of Advanced Materials*. **2015**, 16, 025002.
8. A. Mohammad, Inamuddin and S. Hussain. Poly (3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) Zr(IV) phosphate composite cation exchanger : sol-gel synthesis and physicochemical characterization. *Ionics*. **2015**, 21, 1063-1071.
10. Y. Xia and J. Ouyang. PEDOT:PSS films with significantly enhanced conductivities induced by preferential solvation with cosolvents and their application in polymer photovoltaic cells. *Journal of Materials Chemistry*. **2011**, 21, 4927-4936.
11. M. Asplund, E. Thaning, J. Lundberg, A.C. Sandberg-Nordqvist, B. Kostyszyn, O. Inganäs and H. von Holst. *Biomedical Materials*. **2009**, 4, 045009.

12. L. B. Groenendaal, G. P. Zotti, Pierre-Henri Aubert, S. M. Waybright and J.R. Reynolds. Electrochemistry of Poly(3,4-alkylenedioxythiophene) Derivatives. *Advanced Materials*. **2003**, *15*, 855 – 879.
13. G. Heywang and F. Jonas. Poly(alkylenedioxythiophene)s—new, very stable conducting polymers. *Advanced Materials*. **1992**, *4*, 116-118.
14. S. Kirchmeyer and K. Reuter. Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Journal of Materials Chemistry*. **2005**, *15*, 2077–2088.
15. S. Kuan, Z. Shupeng, L. Pengcheng, X. Yijie, Z. Xiang, D. Donghe, Isikgor Furkan Halis and Ouyang Jianyong. Review on Application of PEDOTs and PEDOT:PSS in Energy Conversion and Storage Devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. **2015**, *26*, 4438-4462.
16. L. B. Groenendaal, F. Jonas, D. Freitag, H. Pielartzik, and J. R. Reynolds. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and It's Derivatives: Past, Present, and Future. *Advanced Materials*. **2000**, *12*, 481-494.
17. M. J. Donahue, A. Sanchez-Sanchez, S. Inal, J. Qu, R. M. Owens, D. Mecerreyes, G. G. Malliaras and D. C. Martin. Tailoring PEDOT Properties for Applications in Bioelectronics. *Materials Science and Engineering R*. **2020**, *140*, 100546.

