

Recibido 05 de diciembre de 2022. Aceptado 28 de marzo de 2023. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

# Diseño e Implementación de un Sistema de Medición Electromecánico de Películas Delgadas para Aplicaciones Fotovoltaicas

JULET MARCELA MÉNDEZ HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, MARIELY ISABEL LOEZA POOT<sup>1</sup>, ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ<sup>1\*</sup>, JUAN FRANCISCO REVELES ARREDONDO<sup>1</sup>, ADRIÁN HERNÁNDEZ PÉREZ<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, C.P. 36885, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/I. T Mérida. Av. Tecnológico Km 4.5 S/N, Mérida. C.P. 97118. México.

\*Autor de Correspondencia: noe.hernandez@ugto.mx

**RESUMEN** Este estudio describe el proceso de reconfiguración de una prueba de tensión uniaxial estándar para elementos flexibles de espesores inferiores a 1 mm, ASTM D882. Para ello un espécimen, compuesto por una película delgada conductora eléctrica que es depositada sobre un sustrato flexible, es reajustado dimensionalmente y tensionado con un dispositivo de sujeción diseñado para el caso. Implementando un sistema para la obtención de datos para el cálculo de deformaciones y resistividad eléctrica del espécimen. La información obtenida se utiliza para identificar el inicio de agrietamiento superficial en la película conductora, dicho criterio es conocido como “Crack Onset Strain”, COS. El material conductor eléctrico consiste en óxido de indio dopado con estaño, ITO, mientras que el sustrato es tereftalato de polietileno, PET. Los materiales fueron tensionados y medidos obteniendo que el valor máximo de COS es de  $0.4575 \pm 0.0676$  %. Con este resultado puede definirse la rigidez del ITO, y si esta favorece mecánicamente a la heteroestructura de dispositivos fotovoltaicos o electrónicos flexibles, considerando las condiciones de manipulación o ambientales a las cuales pueden someterse los dispositivos.

**PALABRAS CLAVE**— Integridad eléctrica, deformación, tensión uniaxial, prueba colineal de 4 puntos.

## I. INTRODUCCIÓN

La tercera generación de celdas solares fotovoltaicas se centra en el uso de películas delgadas orgánicas poliméricas y sustratos flexibles [1]–[3]. A su vez, la característica flexible se encuentra frecuentemente expuesta a recibir estímulos externos que alteren su microestructura provocando incluso el fallo del material si estos no son limitados. Tales perturbaciones son físicamente representadas por deformaciones mecánicas y pueden relacionarse directamente con su resistencia eléctrica [4]. Estudios han reportado la formación de patrones de grietas superficiales y deslaminaciones entre las películas delgadas que conforman al dispositivo, estos reportes mencionan que las grietas/fallos desencadenan interrupciones en la continuidad del transporte eléctrico del dispositivo, lo cual imposibilita su operación [5]–[7].

La relación mencionada se conoce como COS, y se obtiene mediante la conjunción de una prueba mecánica de tensión uniaxial y una prueba eléctrica colineal de 4 puntos. Matemáticamente se define utilizando la teoría de elasticidad y una correlación en la estabilidad eléctrica mediante las deformaciones unitarias experimentadas ( $\epsilon$ ) y la variación de su resistencia eléctrica instantánea entre su resistencia eléctrica inicial ( $R/R_0$ ), esto se presenta en la Ec. (1), donde, empleando una aproximación binomial se espera que la razón

de resistencias eléctricas se mantenga alrededor de la unidad a medida que la deformación incrementa. A su vez, la resistencia eléctrica es obtenida tomando como base la Ley de Ohm ( $V=IR$ ).

$$\frac{R}{R_0} = (1 - \epsilon)^2 \cong 1 \quad (1)$$

Para la prueba de tensión uniaxial se tomaron como referencia los estándares ASTM D882 e ISO 527 (tensión en películas delgadas poliméricas), ellos proponen un desplazamiento constante de 25 mm/min y dimensiones de especímenes de 254.0 x 25.4 mm<sup>2</sup>. Para la prueba de 4 puntas colineales la relación entre el tamaño del área de contacto (punta-película), la separación entre puntas y el dimensionamiento del espécimen son los criterios principales [8], [9]. Sin embargo, si se desea cumplir con las dimensiones proporcionadas por los estándares, una mayor cantidad de recursos, una alta modificación de parámetros de fabricación y nuevas caracterizaciones a las películas deben ser realizadas, ya que modificaciones a los procesos repercuten en su morfología final. Analizando lo anterior resulta contraproducente la elaboración de especímenes con dichas dimensiones, conociendo que el tamaño de un espécimen de laboratorio común es 25.4 x 25.4 mm<sup>2</sup>.

Partiendo de dichos obstáculos, este estudio describe la reconfiguración, ajuste, diseño e implementación de un sistema de introducción de desplazamientos y medición eléctrica de pequeño tamaño, que mantiene las relaciones de dimensión y adquisición de datos de los sistemas estándar, permitiendo el cálculo de las deformaciones y resistencia eléctrica, para la identificación del criterio COS en películas delgadas. Adicionalmente, su resultado posibilita el establecimiento de rangos óptimos de operación (para condiciones de trabajo) relacionados con dispositivos electrónicos o fotovoltaicos flexibles que posean al espécimen analizado en este estudio, el cual corresponde a una película delgada, semiconductor, semitransparente, de banda prohibida corta, ITO, que es altamente utilizada como electrodo (ánodo), depositada sobre un sustrato semitransparente flexible, PET.

## II. METODOLOGÍA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

### A. DIMENSIONES DE LOS ESPECÍMENES PARA UNA PRUEBA MECÁNICA ESTÁNDAR

Según la norma ASTM D882 [10], para tensión uniaxial de películas delgadas poliméricas, la geometría de un espécimen de película delgada polimérica no requiere de un concentrador de esfuerzos, es decir, es rectangular, hecho que minimiza la generación de esfuerzos y defectos en los bordes y sujeciones. Esta geometría cumple con la relación dimensional mínima 4:1 ( $Lm:H$ ) para área de medición y 1.5 ( $L/Lm$ ) para distancia de sujeción, donde  $Lm$  es la longitud de medición,  $H$  es el ancho total, y  $L$  la longitud total de la muestra, y su orientación es vertical. Partiendo de los datos conocidos se plantearon modificaciones a la orientación de los especímenes y su dimensión, manteniendo las condiciones de operación de la norma para especímenes considerablemente más pequeños. La orientación originalmente vertical se cambió a horizontal, permitiendo la cómoda introducción de las mediciones adicionales y se planteó como restricción de diseño la dimensión de un espécimen desarrollado en laboratorio, el cual posee un tamaño  $25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2$ , siendo entonces  $L = 25.4 \text{ mm}$ , lo cual se traduce en especímenes de  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$ , conforme a las relaciones dimensionales de la norma, con área de medición efectiva de  $16.9 \times 6.35 \text{ mm}^2$ . Una visualización de lo propuesto se presenta en la Fig. 1.

### B. INTRODUCCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO (AVANCE)

Con base en investigaciones previas, la deformación elástica para diversas películas delgadas no supera el 3%, por lo tanto, esta cifra fue empleada para determinar el desplazamiento máximo a inducir en los especímenes. Considerando que, las dimensiones para los especímenes fueron establecidas en  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$ , la introducción del desplazamiento debe proporcionarse de forma suave, progresiva y en una única dirección, se debe mantener un extremo fijo y uno móvil, y sus dimensiones globales deben permitir el posicionamiento del sistema sobre el porta objetivos de un microscopio para realizar seguimiento micrográfico, una herramienta de medición de uso común

(micrómetro) es seleccionada para proporcionar el avance, el cual se define según  $\epsilon_{max}/\text{Resolución mínima}$ , donde la deformación máxima está dada por  $\epsilon_{max} = 3L/100$ , y la Resolución mínima del micrómetro es de  $25.4 \mu\text{m}$ . Lo anterior equivale a, una deformación máxima de  $0.508 \text{ mm}$ , con 20 pasos de desplazamiento o avances de  $25.4 \mu\text{m}$  aplicados cada segundo.

### C. DISEÑO Y MANUFACTURA DE SUJECIONES

El micrómetro Mitutoyo Digimatic 293-831, con carrera de  $25.4 \text{ mm}$  y exactitud de  $25.4 \mu\text{m}$  en medición análoga fue empleado como fuente motriz y algunas de sus dimensiones como diámetro y longitud del husillo, diámetro y longitud del yunque, ancho y alto del marco en la posición del yunque, y ancho y alto del marco en la posición del husillo fueron tomadas como base para el diseño de las sujeciones, ver Fig. 2(a). Definiendo dimensiones y parámetros de entrada se diseñó el sistema de sujeción que mantiene un extremo fijo y uno móvil. Las sujeciones son posicionadas paralelas entre ellas empleando un sistema de riel y base. El extremo fijo posee dos contactos con el micrómetro los cuales aseguran su posición, mientras que, el extremo móvil se posiciona dentro del husillo del micrómetro permitiendo su rotación y asegurando su posición mediante un tope. El agarre de las áreas de contacto se logró mediante un sistema de mordazas dentadas, de fijación manual mediante tornillo y tuerca sin comprometer la integridad de las películas, esta permitió el ingreso y extracción de los especímenes de forma fácil y segura. El espacio abierto para adquisición de datos en cada paso de deformación se estableció manteniendo las zonas voluminosas que debían poseer las sujeciones hacia los extremos. El ensamblaje del diseño asistido por computadora, "Computer-aided design", CAD, para las sujeciones se presenta en la Fig. 2(b).

La manufactura de las sujeciones fue realizada con la impresora 3D Elegoo Mars y resina foto-polimérica de tipo ABS. La impresora conforma el diseño capa a capa desde una placa base ascendente mediante la polimerización por luz ultravioleta (longitud de onda de  $405 \text{ nm}$ ) de la resina con un avance en la dirección  $z$  de  $0.00125 \text{ mm}$ , finalizada la impresión la pieza virgen es curada durante 20 minutos con luz ultravioleta ( $405 \text{ nm}$ ) rigidizando el modelo, posteriormente, los residuos de resina son eliminados mediante un baño en alcohol isopropílico durante 30 minutos, la pieza es extraída de alcohol y dejada secar bajo luz ultravioleta, este procedimiento garantiza un acabado superficial fino.

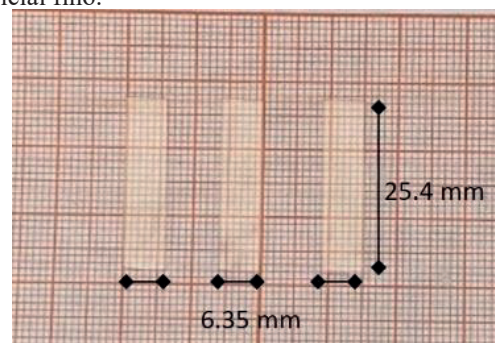


Fig. 1. Dimensiones de los especímenes.

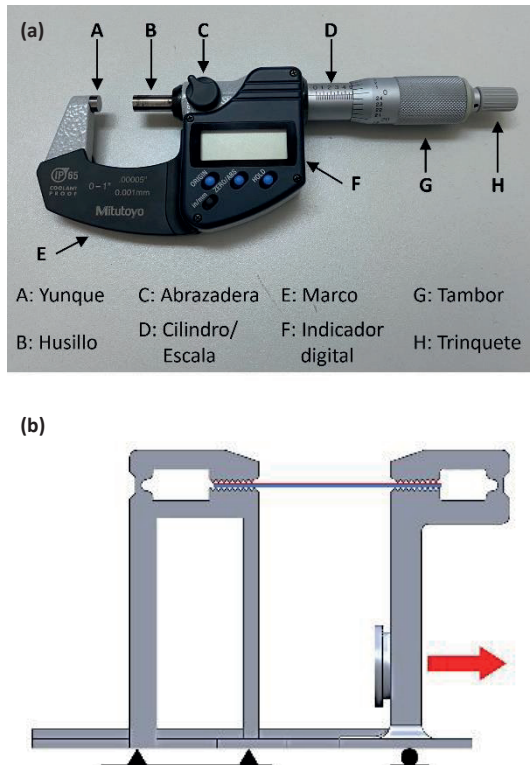


Fig. 2. Diseño de las sujeciones. (a) Partes del micrómetro, (b) CAD de las sujeciones.

#### D. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA COLINEAL DE 4 PUNTOS

Este procedimiento para medición de resistividad eléctrica en especímenes con área superficial cuadrada o redonda, consiste en la introducción de una corriente constante por un par de contactos eléctricos externos, y la medición de voltaje por un par de contactos eléctricos internos, ver Fig. 3(a). Como requisito, la separación entre contactos eléctricos ( $s$ ) debe ser uniforme y constante, además, si la superficie no posee las formas convencionales, como es el caso de la geometría de los especímenes de la Fig. 3(b), el valor obtenido debe multiplicarse por un factor de corrección geométrica proveniente de las relaciones dimensionales de área de medición  $a/b$ , donde  $a$  representa al largo y  $b$  al ancho, y la separación entre contactos eléctricos y el ancho de la película ( $b/s$ ) [11]–[13].

Para el caso de estudio, la separación entre puntas es de 2.5 mm, y su factor de forma (especímenes angostos) es de 0.9434. Adicionalmente, como una prueba de tensión conlleva el desplazamiento de los especímenes, 2 lotes de prueba fueron desarrollados, identificándose cada uno de ellos con las siglas L1 y L2. En el primero de ellos (lote 1, L1) la superficie de los especímenes mantiene su configuración básica, mientras que, en el segundo (lote 2, L2) un punto de tinta conductiva de plata con diámetro de 0.8 mm fue aplicado en cada zona de contacto con las puntas, contactos eléctricos, lo anterior se visualiza mediante los puntos centrales en la Fig. 3(b).

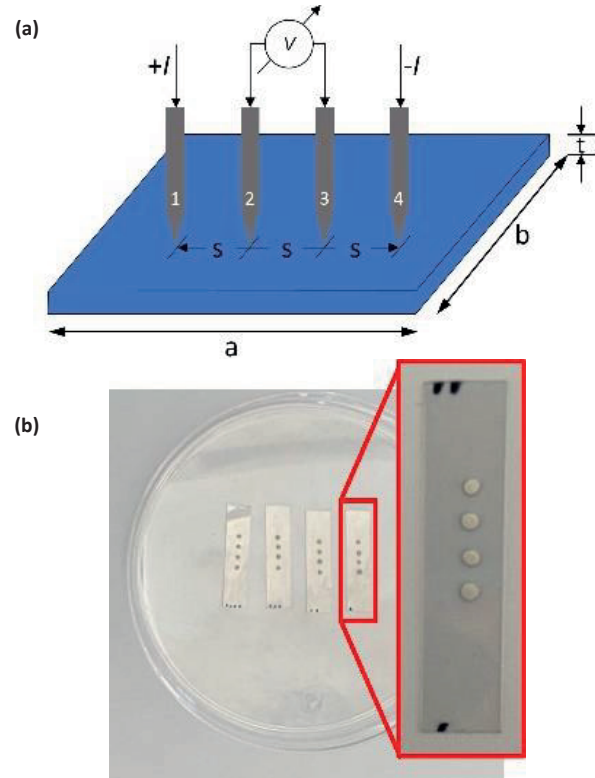


Fig. 3. Prueba colineal de 4 puntas. (a) Esquema; (b) Puntos de contacto sobre los especímenes del lote 2.

#### E. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Cada uno de los lotes definidos (L1 y L2), constó de 4 especímenes (dimensión de  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$ ) cortados de una misma muestra (dimensión de  $25.4 \times 25.4 \text{ mm}^2$ ), e identificados como  $LxEy$ , el valor de  $x$  cambia para cada lote según 1 o 2, mientras el valor de  $y$  cambia para cada espécimen de 1 a 4. Todos los especímenes de cada lote fueron empleados para realizar la validación del sistema de tensión uniaxial horizontal. Previo a su prueba cada muestra fue lavada mediante baño ultrasónico durante 480 s con una secuencia de agentes como agua con jabón neutro, alcohol metílico y alcohol etílico, con un retiro de exceso mediante agua destilada entre un agente y otro, luego de los lavados cada muestra fue secada con aire y almacenada. Las dimensiones finales de las muestras corresponden a  $25.4 \times 6.35 \text{ mm}^2$  con una tolerancia dimensional de  $\pm 1\%$ . Para realizar las pruebas cada muestra fue posicionada y fijada con las sujeciones diseñadas.

Una descripción detallada de la Fig. 4 corresponde a, Fig. 4(a) para el conjunto de elementos para el sistema de medición eléctrica, Fig. 4(b) para el montaje de las sujeciones en el micrómetro, Fig. 4(c) para el sistema de adquisición de 4 puntas, y Fig. 4(d) para el montaje del sistema de sujeción/medición en el microscopio. El estado superficial de las muestras fue medido empleando el microscopio óptico, incorporado en el Durómetro SINOWON, con ampliación de 100x y 400x. Mientras que, empleando la fuente Keithley 2450 y el aditamento de 4 puntas, la resistencia de las películas fue adquirida en tiempo real, aplicando una corriente constante de 1 nA. El procedimiento descrito fue repetido para cada muestra y los resultados obtenidos fueron



analizados para reconocer el comportamiento de las películas ante la presencia de perturbaciones externas como la deformación introducida y su punto de fallo, es decir, donde deja de cumplirse la relación de la Ec. (1).

Posteriormente, fue desarrollada la prueba de tensión, aplicando los 20 pasos de deformación de 25.4  $\mu\text{m}$  cada uno, cumpliéndose con la deformación del 3%. Posteriormente al posicionamiento de cada espécimen y 10 s antes de iniciar la introducción del desplazamiento es iniciada cada medición eléctrica, de estos valores se extrajo la resistividad inicial, pasado este tiempo se introducen los desplazamientos y se capturan 15 mediciones eléctricas por segundo. Al aplicarse el último paso de desplazamiento se captura el estado superficial de cada espécimen y de igual forma al retirarse el desplazamiento.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El trabajo presentado describió la reconfiguración de una prueba de tensión uniaxial estándar y su combinación con mediciones eléctricas para la definición de un criterio de fallo superficial para películas delgadas. El proceso reconfigurado disminuyó las dimensiones de los especímenes empleados y continuó hasta el diseño de un sistema de sujeción, introducción de desplazamiento y adquisición eléctrica también reducido. Dado que al dispositivo motriz empleado para la introducción del avance no se le agregó un control de giro digital el mínimo avance incorporado correspondió a 0.0254 mm/s, esto debido a la exactitud analógica, por lo tanto, el avance puede ser reducido hasta la exactitud digital (1  $\mu\text{m}$ ) si al tambor se le acondiciona un control.

Los datos de deformación uniaxial, resistividad eléctrica en el plano y las capturas del estado superficial para los 2 lotes de prueba fueron agrupados, graficados y analizados para identificar el punto de inflexión o criterio COS de cada espécimen y así definir su valor para la geometría desarrollada. En la Fig. 5(a) se presentan resultados para los 4 especímenes del lote 1 (L1E1, L1E2, L1E3 y L1E4), lote sin alteración superficial, mientras que en la Fig. 5(b) se presenta la curva de deformación ( $\epsilon$ ) contra variación de la resistividad eléctrica ( $R/R_0$ ), que aplica la interpretación gráfica para determinación del COS en el espécimen 3, L1E3.

Como se observa en la Fig. 5(b) esta inicia con una sección incremental en la cual la variación de la resistencia crece a partir de la unidad, para analizar su crecimiento una regresión lineal es aplicada, posteriormente se aprecia una sección cuyos valores rondan alrededor de 1.78  $\Omega/\Omega$ , prolongándose hasta que la deformación unitaria alcanza un valor aproximado de 0.0127 mm/mm, a partir de allí se aprecia el crecimiento súbito de la variación de la resistencia, es en ese instante donde el contacto eléctrico con la película se ha perdido y los contactos eléctricos registran un incremento en el voltaje. Lo anterior puede apreciarse en la Fig. 6, donde se presenta el efecto de levantamiento y remoción de material ocasionada por el arrastre de las puntas sobre la película, como se observa la marca creada por el arrastre, se encuentra entre el paso de desplazamiento 5 y 6.



Fig. 4. Elementos de la prueba de tensión uniaxial horizontal. (a) Montaje experimental; (b) Sujeciones y sistema motriz; (c) 4 Puntas colineales; (d) Montaje en microscopio.

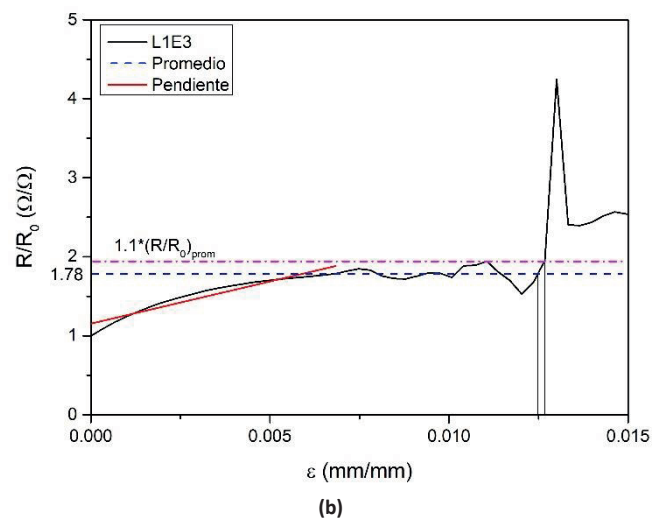
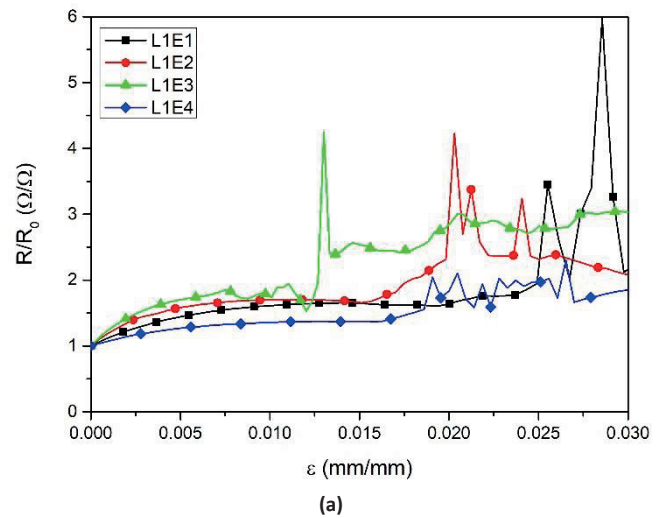


Fig. 5. Curvas de resistencia contra deformación. (a) 4 Especímenes del lote 1; (b) Especimen 3, L1E3.

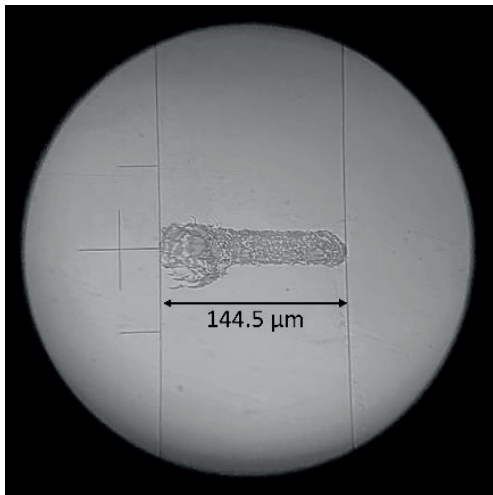


Fig. 6. Remoción de la película delgada por parte del contacto con las puntas ampliación 400X.

Por otra parte, en la Fig. 7 se presentan resultados para los 4 especímenes del lote 2 (L2E1, L2E2, L2E3 y L2E4), lote con puntos de tinta de plata en la superficie, mientras que en la Fig. 8 se presenta la curva de deformación ( $\epsilon$ ) contra variación de la resistencia eléctrica ( $R/R_0$ ) correspondiente al espécimen 2, L2E2.

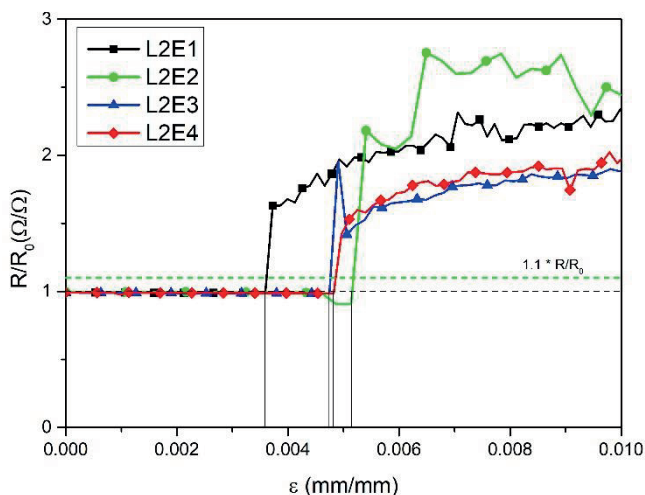


Fig. 7. Curvas de resistencia contra deformación para los 4 especímenes del Lote 2.

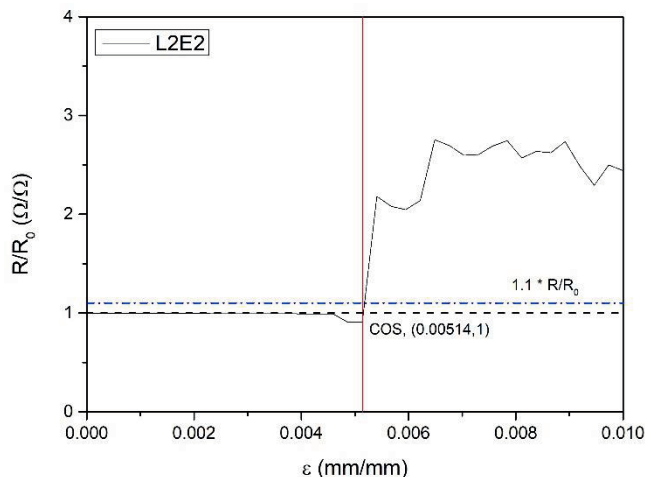


Fig. 8. Determinación del COS para el espécimen 2, L2E2.

En la Fig. 8 la curva deformación contra la variación de la resistividad eléctrica, correspondiente al espécimen 3, presenta un comportamiento diferente al presentado en la Fig. 5, donde el valor eléctrico se mantiene en la unidad hasta que abruptamente se aleja de su estabilidad. Con ese comportamiento es posible el cálculo del criterio COS para los especímenes del lote. Adicionalmente, un criterio de aceptación establecido en +10% del valor eléctrico es propuesto para compensar retardos o errores en la adquisición. A partir de la superación de este criterio se considera que ha iniciado el fallo en el dispositivo (formación y propagación de grietas), esto es visible cuando para la corriente constante aplicada el valor de voltaje adquirido incrementa drásticamente, incrementando a su vez la resistencia eléctrica (Ley de Ohm).

La curva de la Fig. 8 cumple con el planteamiento de la aproximación binomial con valores que rondan la unidad  $1 \Omega/\Omega$ , prolongándose hasta que la deformación unitaria alcanza un valor aproximado de  $0.0051 \text{ mm/mm}$ , a partir de allí se aprecia el crecimiento súbito de la variación de la resistencia, es en ese instante donde la continuidad eléctrica de la película se ha perdido y por tanto los contactos eléctricos registran el aumento súbito. Como puede apreciarse en las curvas de la Fig. 7, el comportamiento del L2E1 difiere respecto a los demás especímenes (el cambio abrupto surge a valores menores de deformación), pero, a pesar de esta diferencia, es posible la identificación del COS. Se presenta como resultado general para el lote 2, L2 un criterio COS de  $0.0046 \pm 0.0007 \text{ mm/mm}$  representado también como  $0.4575 \pm 0.0676 \%$ .

En la Fig. 9(a) se presenta una captura del estado superficial de la película delgada manteniendo el último paso de desplazamiento, las líneas verticales apreciables corresponden a las grietas ocasionadas por la superación de la deformación límite (criterio COS), apreciándose claramente como las grietas se han formado, crecido y propagado por la superficie de la película delgada. Si a partir de la formación de grietas presentadas el extremo móvil se sigue desplazando, el incremento de la deformación ensanchará las grietas y se propagarán por la superficie de la película en forma longitudinal formando el patrón de grietas conocido como patrón cuadrícula (signo de fallo total en la continuidad de la película), ver Fig. 9(b). El espécimen presentado en la Fig. 9(a) corresponde al L2E3.

Contrastando los resultados eléctricos para ambos lotes de prueba (L1 y L2), es evidente la diferencia entre la linealidad inicial de la relación corriente deformación. La adición de los puntos de plata mejora significativamente la adquisición de datos. Para todos los especímenes del lote 1 no se observa la linealidad de la aproximación binomial (alrededor de 1), por tanto, esta configuración no representa un óptimo contacto para la adquisición del COS. Caso contrario es el del lote 2, donde las gráficas confirman que la linealidad se mantiene a medida que incrementa el desplazamiento, lo cual conduce a un adecuado cálculo del criterio COS. La remoción de material ocasiona mediciones erróneas, a medida que se introduce el avance de la prueba de tensión, pues el cambio en la diferencia de potencial

adquirida se relaciona mayoritariamente con la pérdida de contacto entre las puntas y la película semiconductor, pues en su lugar, hace contacto con el sustrato. Es decir, la remoción interfiere en la continuidad del material y evita la obtención de datos para el seguimiento electromecánico de la creación de grietas.

Si los resultados del COS obtenidos para los especímenes del lote 2 de PET recubierto con ITO (espesor de 130 nm) son contrastados con investigaciones similares, puede observarse que, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado. Una comparación parcial puede realizarse con los resultados de Hengst *et al.* [14] donde, para espesores de ITO sobre PET que varían entre 200 nm y 2000 nm, el COS se encuentra entre 0.3% y 0.7%. La comparación parcial se debe a la diferencia de espesores de ITO para cada estudio. Sin embargo, también se menciona que se atribuye mayor densidad de grietas en la superficie a los espesores de ITO más gruesos, es decir el COS decrece con el aumento del espesor, aunque debe tomarse en consideración la desviación para cada caso [15].

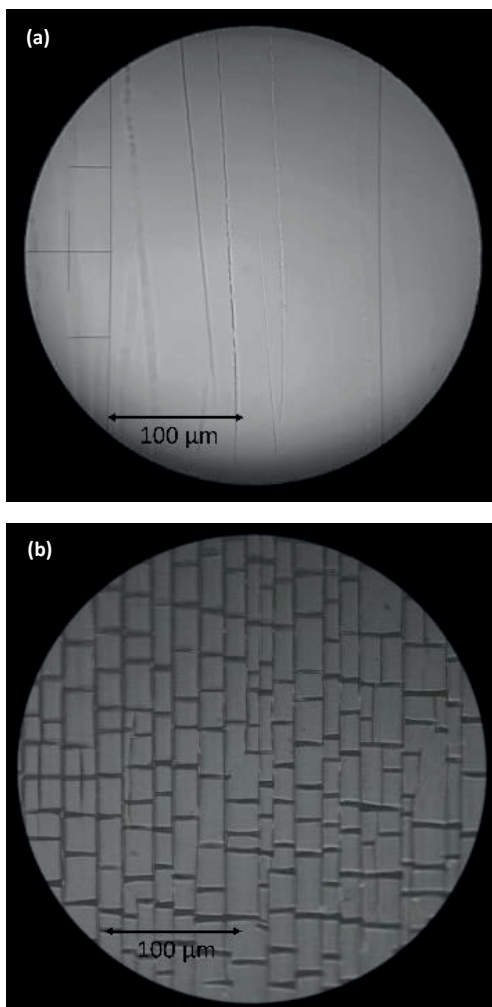


Fig. 9. Visualización del COS. (a) Inicio de la propagación de grietas en el espécimen tensionado 400x; (b) Patrón cuadrícula del espécimen 400x.

#### IV. CONCLUSIONES

La implementación del dispositivo de sujeción enfatizó el uso de procesos modernos de manufactura, pues las pequeñas dimensiones requeridas y el trabajo en paralelo con la medición eléctrica lo solicitaban. Tras la realización de pruebas se confirmó la validez del dispositivo de avance pues este cumplió con su propósito de diseño, el cual consiste en tensionar uniformemente un espécimen mientras una diferencia de potencial es adquirida por el sistema eléctrico.

Analizando los resultados se ratifica que, los puntos de tinta de plata garantizan la integridad de la superficie, impidiendo la penetración de las puntas de contacto eléctrico en la película delgada semiconductor y por consiguiente se evita su remoción, lo cual conduce a una adecuada adquisición de datos y un adecuado cálculo del criterio COS. Dato que, en comparación con investigaciones similares, se asemeja a lo esperado, garantizando que los resultados obtenidos bajo el procedimiento diseñado e implementado son reproducibles

Finalmente, a medida que se describe el proceso se expresa que, el correcto cálculo del COS depende de una adecuada adquisición de datos y resolución de la fuente. Siendo la adquisición quien tiene la mayor cantidad de variables a controlar, pues la reducción de efectos de derivación resistiva en el cableado, alineación, posicionamiento de las puntas, y contacto uniforme con la superficie evitan significativamente errores en las líneas de alimentación de corriente eléctrica y en la medición de voltaje, tareas asignadas respectivamente a las puntas externas (1 y 4) e internas (2 y 3) del modelo de 4 puntas empleado.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Yan and B. R. Saunders, "Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells," *RSC Adv*, vol. 4, no. 82, pp. 43286–43314, Sep. 2014, doi: 10.1039/C4RA07064J.
- [2] S. Khalid, M. Sultan, E. Ahmed, and W. Ahmed, "Third-generation solar cells," *Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy*, pp. 3–35, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-821346-9.00019-5.
- [3] N. L. Muttumthala and A. Yadav, "Role of Semiconductors in Various Renewable Energy Systems," pp. 139–146, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-9280-2\_17.
- [4] M. J. Cordill, O. Glushko, and B. Putz, "Electro-Mechanical Testing of Conductive Materials Used in Flexible Electronics," *Front Mater*, vol. 3, p. 22, Feb. 2016, doi: 10.3389/fmats.2016.00011.
- [5] Y. Shen, Z. Feng, and H. Zhang, "Study of indium tin oxide films deposited on colorless polyimide film by magnetron sputtering," *Mater Des*, vol. 193, p. 108809, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.MATDES.2020.108809.
- [6] X. Chen and S. Liu, "Mechanical testing and analysis of polymer based flexible solar cell and full cell packaging," in *ICEPT-HDP 2011 Proceedings - 2011 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, Aug. 2011, pp. 1138–1142. doi: 10.1109/ICEPT.2011.6067028.
- [7] Q. Yan, L. Yan, X. Pang, L. Qiao, Y. Su, and K. Gao, "Crack initiation stress measurement of hydrogen-induced cracking with small tapered specimen method," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 814, p. 141228, May 2021, doi: 10.1016/J.MSEA.2021.141228.
- [8] T. Chommaux *et al.*, "In situ electrical and mechanical study of Indium Tin Oxide films deposited on polyimide substrate by Xe ion beam sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 741, p. 139035, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.TSF.2021.139035.



- [9] M. Farooq, A. Ansarifar, and X. Bao, "A study into crack initiation and growth in peroxide-cured silica-filled polybutadiene rubber vulcanisate under a cyclic loading condition," *Journal of Rubber Research*, vol. 24, no. 1, pp. 69–75, Mar. 2021, doi: 10.1007/S42464-020-00074-4.
- [10] ASTM International, "ASTM D882-18, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting," *Annual Book of ASTM Standards, 08.01, Plastics (1), C177-D1600*. West Conshohocken, PA, pp. 1–12, 2018. doi: 10.1520/D0882-18.
- [11] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe," *Bell System Technical Journal*, vol. 37, no. 3, pp. 711–718, 1958, doi: 10.1002/J.1538-7305.1958.TB03883.X.
- [12] P. Kreiml *et al.*, "Electro-mechanical behavior of Al/Mo bilayers studied with in situ straining methods," *Thin Solid Films*, vol. 665, pp. 131–136, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.tsf.2018.07.054.
- [13] M. Naftaly *et al.*, "Sheet Resistance Measurements of Conductive Thin Films: A Comparison of Techniques," *Electronics 2021, Vol. 10, Page 960*, vol. 10, no. 8, p. 960, Apr. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS10080960.
- [14] C. Hengst *et al.*, "Mechanical properties of ZTO, ITO, and a-Si: H multilayer films for flexible thin film solar cells," *Materials*, vol. 10, no. 245, pp. 1–11, 2017, doi: 10.3390/ma10030245.
- [15] C. Peng, Z. Jia, D. Bianculli, T. Li, and J. Lou, "In situ electro-mechanical experiments and mechanics modeling of tensile cracking in indium tin oxide thin films on polyimide substrates," *J Appl Phys*, vol. 109, no. 10, p. 103530, May 2011, doi: 10.1063/1.3592341.

## BIOGRAFÍAS



**JULET MARCELA MÉNDEZ HERNÁNDEZ** Es Maestra en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato, México (2018), e Ingeniería Mecánica por Universidad Industrial de Santander, Colombia (2014). Actualmente es estudiante de último año del programa Doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. Sus líneas de investigación/trabajo involucran la caracterización mecánica y eléctrica de películas delgadas semiconductoras relacionadas con celdas solares fotovoltaicas orgánicas flexibles, mediante métodos convencionales y no convencionales de la mecánica.



**MARIELY ISABEL LOEZA POOT** Es egresada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, donde obtuvo el grado de Doctora en Ciencias en la Especialidad de Física Aplicada en 2020. A lo largo de su formación se ha dedicado a la síntesis, impurificación y desarrollo de materiales semiconductores en forma de película delgada y su aplicación en la fabricación de prototipos de celdas solares fotovoltaicas. Actualmente realiza una estancia posdoctoral CONACYT en la DICIS de la Universidad de Guanajuato con un enfoque en la fabricación de celdas solares poliméricas.



**ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ** Es profesor Titular A adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. En el 2012 obtuvo el grado de Doctor en Tecnología Avanzada por el Instituto Politécnico Nacional, y de 2013 a 2015 realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN. Actualmente realiza investigación en el área de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, con un enfoque hacia el desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en celdas solares fotovoltaicas y la modificación superficial de materiales metálicos. Ha impartido clases a nivel licenciatura y posgrado, y dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado.



**JUAN FRANCISCO REVELES ARREDONDO** Es Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato, México (2014). Actualmente es profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. Sus áreas de investigación son el Diseño y la Manufactura, enfocándose principalmente en procesos de manufactura tales como: Conformado de láminas, conformado de plásticos, fundición, manufactura aditiva y bruñido. En el área de diseño analiza el comportamiento estructural y térmico de geometrías reticulares tales como las denominadas TPMS.



**ADRIÁN HERNÁNDEZ PÉREZ** Es profesor-investigador del departamento de Ciencias de la Tierra del Tecnológico Nacional de México/L.T. Mérida. Obtuvo su grado de doctor en ciencias en el Centro de Investigación Científica de Yucatán en el año 2012. Ha sido Investigador Nacional Nivel 1 desde el año 2013 a la fecha, y ha publicado 15 artículos científicos en las áreas de mecánica de fractura, mecánica de materiales compuestos, celdas solares, nanomateriales e impresión tridimensional. Actualmente trabaja en el modelado y caracterización mecánica de celdas solares y materiales compuestos textiles.