



Caracterización de electrónica impresa y recubrimientos por tomografía de coherencia óptica

Characterization of printed electronics and coatings by optical coherence tomography

Presentación: 28/03/2022

Aprobación: 12/04/2022

Marcelo Sallese

Instituto de Física del Litoral (IFIS), Santa Fe, Argentina
marcelo.sallese@santafe-conicet.gov.ar

Pablo Tabla

Grupo de Fotónica Aplicada, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
ptabla@frd.utn.edu.ar

Eneas Morel

Grupo de Fotónica Aplicada, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
nmorel@frd.utn.edu.ar

Mónica Mosquera Ortega

Laboratorio de Biosensores y Bioanálisis. IQUBICEN-FCEN-UBA - Argentina
Departamento de Ciencias Básicas - Facultad Regional Pacheco, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
mmosquera@qb.fcen.uba.ar

Julia Fossati

Investigación y Desarrollo, Fundación Gutenberg, CABA, Buenos Aires - Argentina
id@fundaciongutenberg.edu.ar

Jorge Torga

Grupo de Fotónica Aplicada, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
jtorga@frd.utn.edu.ar

Resumen

La Fundación Gutenberg, a través del Instituto Argentino de Artes Gráficas, y el Grupo de Fotónica Aplicada de la Facultad Regional Delta, de la Universidad Tecnológica Nacional, se asociaron para trabajar en conjunto en el desarrollo de una nueva técnica óptica para ser aplicada en la caracterización de materiales impresos. En este marco, se llevó adelante

un proyecto de desarrollo tecnológico y social (PDTS) que se orientó a la aplicación de la tomografía de coherencia óptica, para la caracterización de tintas y recubrimientos, sobre diferentes sustratos flexibles, principalmente polímeros tipo PET y cartulina, de productos impresos mediante flexografía. Se presentan a continuación la introducción al tema y la motivación para generar este trabajo colaborativo, como así también la descripción de la técnica utilizada y los resultados obtenidos hasta el momento. Finalmente, se presentan las conclusiones con las perspectivas del desarrollo propuesto y los trabajos a futuro.

Palabras claves: electrónica impresa flexible, tomografía óptica coherente, tintas, papel, recubrimientos, flexografía, caracterización de materiales.

Abstract

Gutenberg Foundation - Argentine Institute of Graphic Arts and the Applied Photonics Group of the Delta Regional Faculty of the National Technological University, teamed up to work together in the development of a new optical technique to be applied in the characterization of printed materials. Within this framework, a PDTS project was carried out that was oriented to the application of optical coherence tomography (OCT) for the characterization of inks and coatings on different flexible substrates, mainly PET-type polymers and cardboard, products printed by flexography. The introduction to the topic and the motivation to generate this collaborative work are presented below, as well as the description of the technique used and the results obtained so far. Finally, the conclusions are presented with the perspectives of the proposed development and future work.

Keywords: flexible printed electronics, coherent optical tomography, inks, paper, coatings, flexography, material characterization.

Introducción

La impresión de componentes electrónicos, como los usados en “internet de las cosas” (*IoT*), requiere de procesos de caracterización de las capas de tintas depositadas sobre distintos sustratos, a fin de asegurar la consistencia de las variables eléctricas, en los dispositivos producidos. Con el fin de estudiar temas de interés dentro de esta temática, se inició un proyecto conjunto entre la Fundación Gutenberg (FG) y el Grupo de Fotónica Aplicada (GFA), de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional. La FG es un centro de educación e investigación de la Industria Gráfica y Afines que busca, mediante estos estudios, promover la generación de aplicaciones sustentables mediante técnicas aditivas de producción, en conjunto con otras instituciones. El GFA es un grupo de investigación con líneas de trabajo orientadas hacia la interferometría de baja coherencia y la nanofotónica.

El objetivo central del proyecto fue aplicar la técnica de “tomografía de coherencia óptica” (OCT) para obtener tomografías y topografías de tintas y recubrimientos impresos en polímeros como polietilentereftalato (PET), papel y cartulina, para su uso en la electrónica impresa, en particular. Con el propósito de alcanzar la caracterización de estos sistemas, se desarrolló un equipo -a escala laboratorio- que permitió obtener imágenes de distintos tipos de impresos, a partir de un barrido con un láser sobre la región de interés. Se desarrolló también un algoritmo computacional de reconstrucción de estas imágenes para su posterior procesamiento, de manera de poder obtener información relevante asociada,

fundamentalmente, a su topografía y a sus propiedades morfológicas, relacionadas con variables del proceso de impresión. Se trabajó en el desarrollo de un sistema de muestras patrón, empleando un equipo de medición comercial calibrado como sistema de referencia. Éste, luego, fue utilizado como método de comparación con el nuevo sistema desarrollado. Una vez finalizadas las etapas de construcción del equipo, se trabajó en el estudio de una serie de muestras, utilizando distintas tintas y soportes. Finalmente, se avanzó en la optimización del equipo y del método de procesamiento, mediante la comparación entre técnicas alternativas.

En paralelo, se realizaron una serie de acciones con el objetivo de fomentar la vinculación entre grupos de investigación, empresas e instituciones vinculadas con la electrónica impresa. En ese sentido la FG fue una pieza clave por la diversidad de vínculos que posee y por la visión amplia que tiene del tema. A nivel local, se realizaron una serie de reuniones de trabajo donde participaron además de la FG y GFA, el área de Micro y Nanotecnología del INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) e integrantes del área de desarrollo de productos de la Fundación Argentina de Nanotecnología (FAN). A lo largo de estas reuniones, se pudieron definir líneas de trabajo a futuro y mejoras en las líneas vigentes. Por otro lado, se ofrecieron diferentes charlas a empresas e instituciones y exposiciones en congresos (Mosquera et al, 2015; Sallese et al, 2017). También se tuvo contacto con grupos del exterior como *El Centro Galés de Impresión y Recubrimiento* (WCPC) (Sallese et al 2017b) y con grupos regionales como el *Centro en Investigación en Ensayos No-Destructivos* (CENES). Estas actividades resultaron ser muy enriquecedoras y establecieron una forma de trabajo muy interesante con múltiples opciones para mejorar la transferencia entre el sistema científico y las empresas. Si bien, en este caso, las actividades conjuntas no han continuado, finalizado el proyecto, han resultado una experiencia de gran valor para sus integrantes y para el resto de las personas involucradas. Muy especialmente, demostraron el valor de la vinculación como camino a seguir.

A continuación, se presenta una descripción de las técnicas y métodos utilizados. Se detallará el empleo de la flexografía como técnica de impresión de las muestras estudiadas y la “tomografía óptica coherente” (o tomografía de coherencia óptica -OCT) como una nueva propuesta para la caracterización de impresos y su aplicación, objetivo central de este proyecto.

DESARROLLO

Tomografía óptica coherente

La tomografía de coherencia óptica (OCT) es una técnica que permite obtener imágenes 3D de la superficie y del interior de los materiales. Surgió a partir de su antecedente cercano, la interferometría de baja coherencia, y en sus orígenes fue enfocada principalmente en aplicaciones en oftalmología y biomedicina (Drexler et al, 2015). Posteriormente, la técnica se utilizó en el área de los ensayos no destructivos y en la caracterización de materiales (Nemeth et al, 2013). En este proyecto, se trabajó en su implementación para la caracterización de impresos, a través de tomografías y topografías mediante un barrido con un láser, en la región de interés. El sistema experimental empleado utiliza una fuente de luz láser de gran ancho espectral (>60 nm) que es acoplada a una fibra óptica con un circulador que envía el haz hacia un portamuestra, con un diseño específico para este tipo de aplicaciones. Este portamuestra está montado en un sistema de traslación que permite hacer los barridos en el orden del cm². La luz reflejada se colecta con el mismo sistema óptico y es enviada al

detector. El esquema completo se muestra en la figura 1.

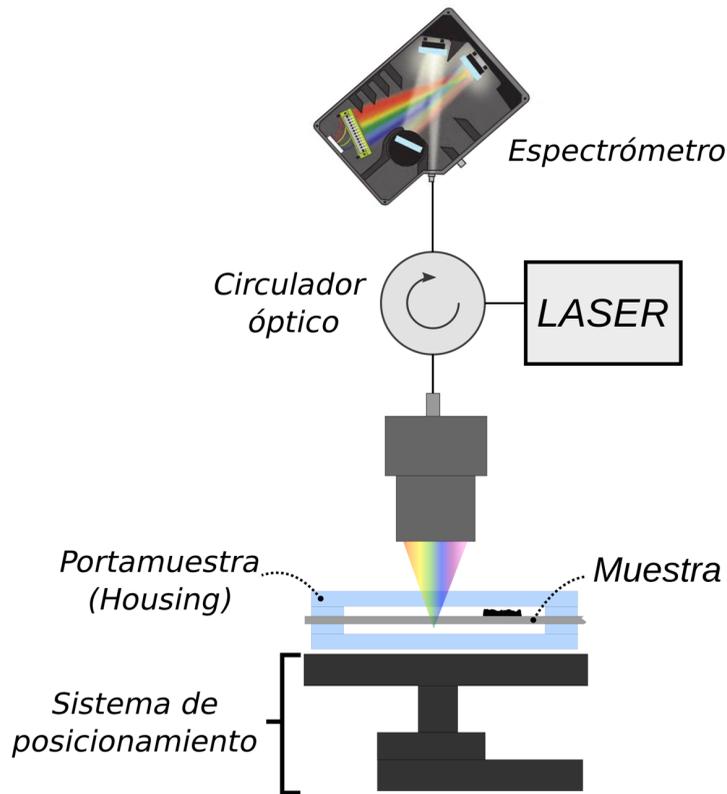


Figura 1: Esquema experimental utilizado con sus componentes principales.

El portamuestra consta de una base de apoyo y dos soportes que sostienen una superficie de referencia, este esquema ofrece varias mejoras con respecto a sistemas tradicionales (Morel et al, 2018). El sistema puede moverse en el plano perpendicular al haz incidente (plano x-y) con un sistema motorizado. La luz emitida por la fuente ingresa a la fibra óptica, es guiada hacia el circulador y luego hasta el cabezal óptico donde se enfoca sobre la muestra. Allí, se generan varios haces debido a la reflexión de la luz en las distintas interfaces. Por simplicidad sólo consideraremos el haz reflejado en la cara inferior de la superficie de referencia, cuya intensidad es I_R y, el haz reflejado en la superficie de la muestra, cuya intensidad es I_S . Ambas reflexiones interfieren y vuelven al circulador, para dirigirse hacia el detector. En este caso se emplea como detección un espectrómetro. Allí se adquiere la señal de interferencia, la que se puede representar de manera simplificada por la siguiente expresión:

$$I_D \approx I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S} \cos(\sigma) \quad (1)$$

Donde I_D es la intensidad total en el detector (espectrómetro) y σ es la diferencia de camino óptico (DCO) entre los haces I_R e I_S . Este parámetro σ permite obtener la topografía de la muestra en el caso de materiales opacos o la tomografía (interior de la muestra) en el caso de materiales transparentes y semitransparentes.

Ahora bien, durante el barrido, en la zona de interés y para cada punto medido en la muestra, se obtiene la señal de interferencia como la que se muestra en la figura 2. A partir de esa señal y aplicando un tratamiento, que utiliza la transformada de Fourier, es posible obtener el valor de σ en toda la zona medida.

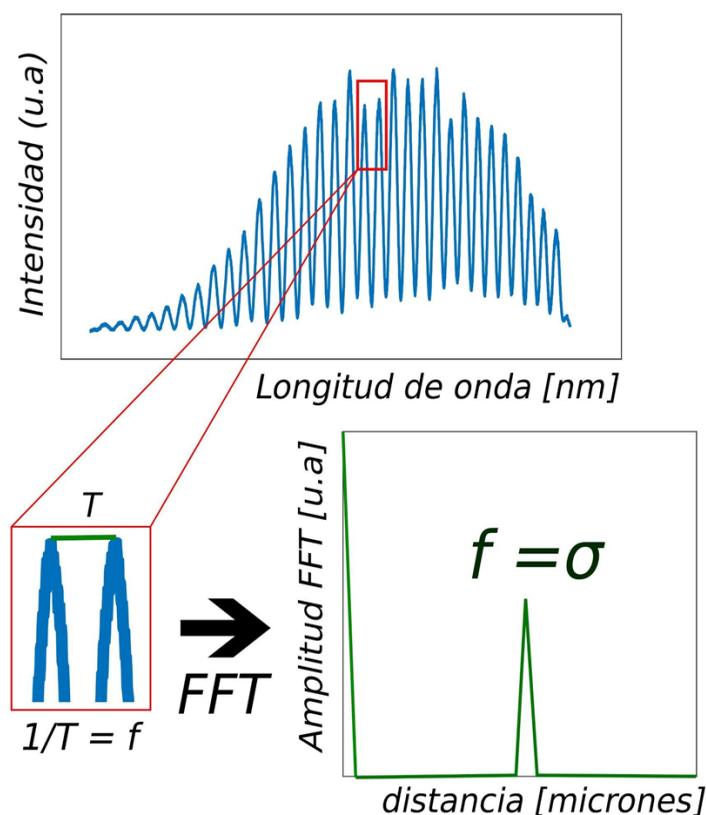


Figura 2: Detalle de la señal y su procesado para obtener primero la DCO en un punto para luego mapear la superficie.

El resultado que se obtiene es una secuencia de σ para todos los puntos medidos y mediante un algoritmo computacional se construye una imagen 3D que puede ser tanto de la superficie como del interior de la zona analizada, en función del material considerado.

Flexografía

La flexografía es una técnica de impresión de alta velocidad que utiliza una plancha flexible con relieve donde las zonas impresas están elevadas con respecto a las zonas no

impresas. Usualmente se utiliza en el sector de packaging y comunicación, no obstante, en los últimos años se han desarrollado nuevas aplicaciones entre las cuales ha surgido una de especial interés para este trabajo: la producción de electrónica impresa (Ferreira Cruz et al, 2018). En este caso, uno de los requerimientos de importancia es el control de las dimensiones y la estructura superficial de los impresos. Estos están caracterizados mediante: el espesor de la capa de tinta, la rugosidad superficial, la estructura de los bordes y el volumen depositado de tinta. El proceso de producción requiere del control de estos parámetros para una resolución espacial por debajo de los 10 μm . En la búsqueda de herramientas para avanzar en esta temática, se enfocó el trabajo en la medición de estos parámetros empleando la técnica de OCT en impresos simples (pistas lineales y formas rectangulares). Se utilizaron 3 tipos de tintas, dos conductivas y una aislante, y se ensayaron variantes en las dimensiones espaciales y el volumen depositado sobre el soporte, así como también en su vinculación con la resistencia eléctrica (Leppäniemi et al, 2015; Feng et al, 2018; Czajkowski et al, 2010).

RESULTADOS

En este punto se describen los resultados obtenidos en ensayos realizados con muestras impresas en los laboratorios de la FG y medidos con el equipo de OCT desarrollado en el GFA (figura 1). Como se mencionó anteriormente, el trabajo se orientó a evaluar las posibilidades del uso de esta técnica interferométrica para medir el espesor, rugosidad, forma de bordes y determinación de volumen de tintas, en elementos simples como pistas y áreas rectangulares, para aplicaciones en electrónica impresa y recubrimientos. Se buscó vincular estas medidas con la resistencia eléctrica del material, si bien el estudio de las propiedades eléctricas está fuera de los objetivos de este proyecto. Así, se realizaron mediciones en muestras con áreas impresas que van desde el mm^2 hasta varios cm^2 , sobre diversos sustratos (PET, papel y cartulina) y bajo parámetros de pre-prensa e impresión compatibles con las prácticas estándar de la industria.

En lo que sigue y a modo de ejemplo, se presentan mediciones de muestras generadas en la FG utilizando flexografía con tintas a base grafito y nanotubos de carbono, y un recubrimiento (barniz) en sustratos flexibles de PET, papel autoadhesivo y cartulina. También se analizó la posibilidad de extender estas medidas en impresos trama-dos, donde en trabajos preliminares se observaron buenos resultados con respecto a la resistencia.

El desarrollo propuesto permitirá la introducción de tecnologías como OCT que hasta el momento no son aplicadas a la industria en el país, propiciando así un producto de alto valor agregado y la formación de recursos humanos especializados.

Estimación de topografía de tinta conductiva impresa sobre polímeros

En este caso, se muestran los resultados de la topografía obtenida en un sector de una pista de conducción eléctrica impresa, realizada por flexografía, en polímero de 100 μm de espesor y utilizando tinta de base de grafito. El lote de muestras fue impreso con una máquina Mark Andy 830, con tres pasadas y empleando trama en el fotopolímero.

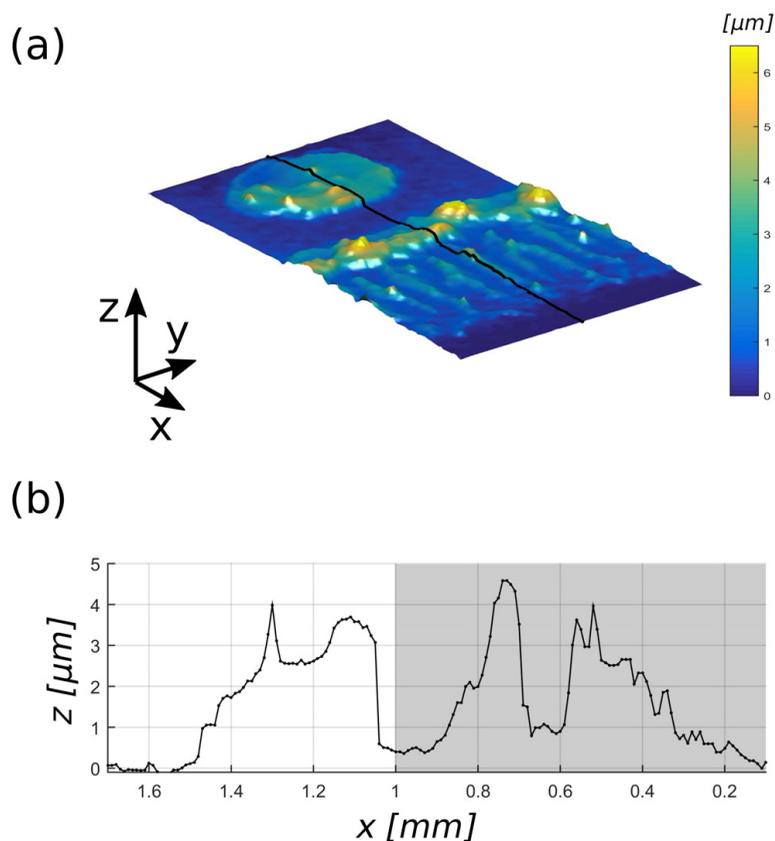


Figura 3: Imágenes reconstruidas a partir de los datos medidos por OCT. (a) Imagen 3D donde se muestra la topografía de la tinta. Se indica en línea continua el perfil mostrado en (b) Perfil identificando con sombreado gris la zona con tinta.

Se realizó un barrido en una porción de la muestra de 0,8 mm x 1,5 mm. Luego del procesamiento de la señal, se reconstruye una imagen con algoritmos de desarrollo propio, donde se obtienen resultados como el de la figura 3. A partir de estas imágenes, se pueden obtener características de la superficie con algoritmos. Actualmente, se sigue trabajando en éstos, para obtener la rugosidad 2D, el volumen de picos y valles, el volumen depositado de tinta, entre otros. También es posible analizar perfiles lineales, como el indicado en la figura 3b y la obtención de parámetros de la rugosidad lineal, la altura de picos, la profundidad de valles y estudios de bordes.

Muestras de tinta conductiva sobre papel

En este segundo ejemplo, se muestra la caracterización de un papel impreso con tinta a base de nanotubos de carbono (NTC). Impresión estudiada por presentar mejores propiedades conductivas que aquella realizada con tintas a base de grafito. La muestra se obtuvo en flexografía soportada en papel autoadhesivo, con una zona impresa de 2,5 mm de ancho. En este caso, las imágenes obtenidas muestran cómo es posible identificar, a partir de la implementación de OCT, la región donde está presente la tinta (donde

el láser es absorbido) del sustrato (zona papel). De esta manera es posible diferenciar la zona impresa de la zona del sustrato, tal como exhibe la imagen reconstruida de la muestra en la figura 4a. En la figura 4b se muestra el detalle del perfil ampliado observándose el resultado de los picos en el impreso y pudiendo extraer la rugosidad de la tinta sobre el sustrato.

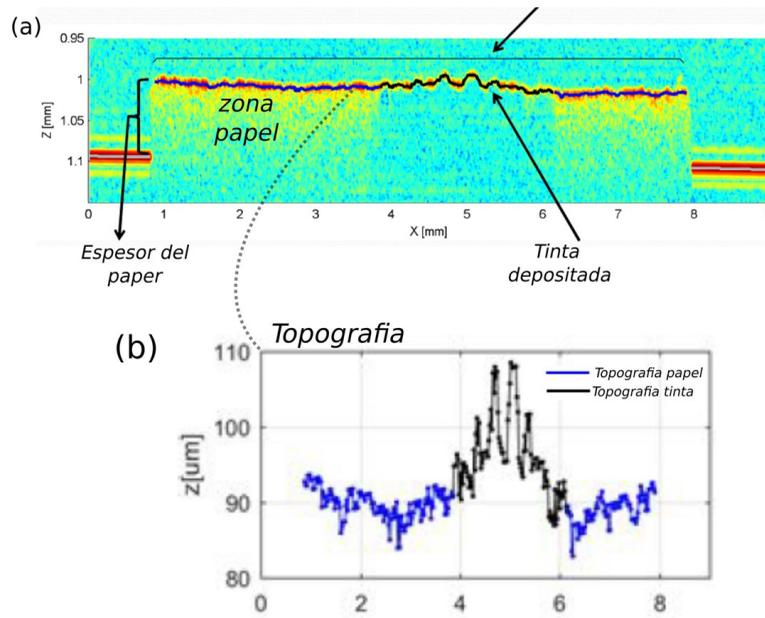


Figura 4: Imágenes obtenidas aplicando la técnica de OCT. a) Perfil de la muestra. b) Detalle del perfil identificando la zona con tinta (color negro) y sin tinta (color azul)

Medición de barniz sobre cartulina

Como último ejemplo se presentan resultados en la caracterización de un barniz impreso sobre cartulina. El objetivo en este caso es estimar el espesor de la capa de barniz, monitorear la rugosidad tanto en el barniz como en el soporte (figura 5).

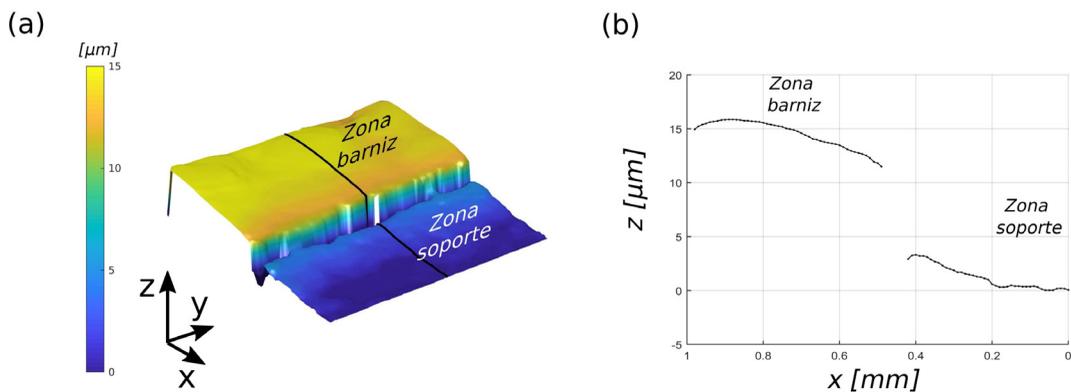


Figura 5: Imágenes reconstruidas a partir de datos medidos con OCT. (a) Topografía de la muestra de barniz. (b) Perfil indicando el espesor de la capa de barniz.

A partir de estos datos, se puede obtener un valor del espesor promedio de la capa de barniz y un análisis de la forma superficial del impreso. A partir del análisis de perfiles, como se muestra en la figura 5b, es posible extraer información estructural relevante en este tipo de impresos, permitiendo optimizar el proceso de impresión empleado.

Prototipo industrial

Dentro de los objetivos de este proyecto se planteó el desarrollo de un prototipo industrial de bajo costo, con un interferómetro de diseño propio, con su electrónica de control y de barrido, con el software de procesamiento y con el sistema de detección. Se buscó desarrollar un equipo industrial de bajo costo que permita obtener imágenes, como las que se muestran en los puntos anteriores, con una resolución espacial en el orden del micrón y que logre cubrir áreas en el orden del cm^2 .

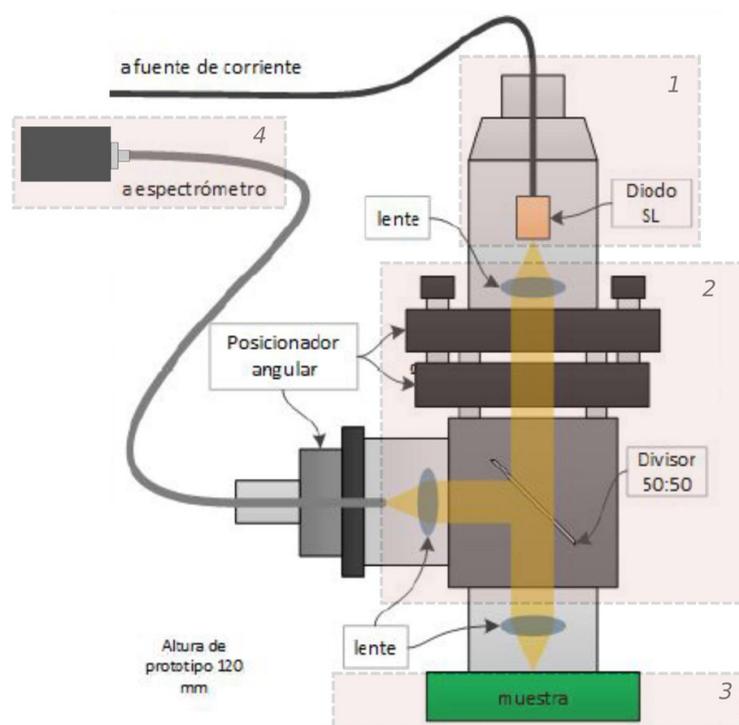


Figura 6: Esquema del prototipo industrial. Se indican las partes que lo componen.

Este primer prototipo que se muestra en la figura 6 fue construido con un diseño en cuatro módulos:

1. Fuente de luz, un diodo superluminiscente (SLED) en el infrarrojo (@ 840 nm), con un ancho espectral de 60 nm y una potencia de 10 mW.
2. Interferómetro de una sola rama, de diseño propio, a partir de un conjunto de lentes para enfocar la luz que interactúa con la muestra y propiciar la señal óptica en el detector.
3. Cabezal que incluye el plano de referencia y que permite optar por un sistema de

barrido basado en una plataforma de traslación en dos ejes, en el plano perpendicular a la dirección del haz de luz. O bien, instalar en línea, donde se mueva la muestra a caracterizar.

4. Sistema de detección basado en un espectrómetro (comercial por el momento), con un software de procesamiento, con algoritmos de diseño propio. Este esquema apunta a un equipo que podría ser utilizado en control de calidad o *in situ* como control de producción.

CONCLUSIONES

Este proyecto demostró con éxito la posibilidad de utilizar la técnica de OCT para la caracterización de materiales con aplicaciones en la electrónica impresa. La implementación de esta técnica ha permitido el desarrollo de una configuración interferométrica nueva. Esta mostró muy buenos resultados para la electrónica impresa y abre nuevas posibilidades para otro tipo de aplicaciones y procesos. Asimismo, en la investigación se consolidó el uso y la aplicación de algoritmos de reconstrucción de imágenes, para la caracterización de superficies. También, se realizó un primer desarrollo de un prototipo industrial, para ser aplicado en salas de control de calidad o con la idea de implementarse en máquinas *in situ*. Finalmente, cabe remarcar que la riqueza y el éxito del proyecto no vino dada solo por los aportes técnicos sino, muy especialmente, por los beneficios de los proyectos asociativos, en los cuales se vincula la academia, la ciencia y la tecnología, y la industria nacional. La experiencia ha resultado muy enriquecedora y, concluida esta primera etapa, nos estimula a iniciar una segunda fase, siguiendo la línea propuesta por los proyectos PDTs.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer el apoyo recibido a las siguientes instituciones: Fundación Gutenberg, Universidad Tecnológica Nacional, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Consejo Interuniversitario Nacional, Comisión Nacional de Energía Atómica.

REFERENCIAS

Mónica Mosquera, Julia Fossati, Pablo Tabla, Eneas Morel, Jorge Torga (2015). Impresión y caracterización por interferometría de baja coherencia de impresos conductivos en flexografía. Primer Workshop sobre Tintas Conductivas y electrónica impresa funcional, Encuentro NanoMercosur, Octubre 6 -8, 2015, Bs. As., Argentina.

Sallese, M., Torga, J., Morel, E., Tabla, P. (2017). Medición de espesor por técnicas ópticas para asegurar el color. Noveno Foro de Color, Fundación Gutenberg, Buenos Aires, Argentina.

Marcelo D. Sallese, Pablo Tabla, Eneas Morel, Jorge Torga, Mónica Mosquera, Julia Fossati (2017b). Optical method for the measurement of thickness and the profile of printed conductive inks in flexographic production machines. WCPC Annual Technical Conference and Exhibition, Noviembre 2016, Swansea, Reino Unido.

Sílvia Manuela Ferreira Cruz, Luís A. Rocha and Júlio C. Viana (2018). Printing technologies on flexible substrates for printed electronics. In Flexible Electronics, InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76161>

Wolfgang Drexler and James G. Fujimoto, editors (2015). Optical Coherence Tomography. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06419-2>

Alexandra Nemeth, Gunther Hanneschlager, Elisabeth Leiss, Karin Wiesauer, and Michael Leitner (2013). Optical coherence tomography – applications in non- destructive testing and evaluation. In Optical Coherence Tomography, InTech. <https://doi.org/10.5772/53960>

Eneas Morel, Jorge R. Torga, Pablo M. Tabla and Marcelo Sallese (2018). Reduction of measurement errors in OCT scanning. In Ole Bang and Adrian Podoleanu, editors, 2nd Canterbury Conference on OCT with Emphasis on Broadband Optical Sources, SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2282108>

Jaakko Leppäniemi, Olli-Heikki Huttunen, Himadri Majumdar, and Ari Alastalo (2015). Flexography-printed In_2O_3 semiconductor layers for high-mobility thin-film transistors on flexible plastic substrate. *Advanced Materials*, 27(44):7168–7175. <https://doi.org/10.1002/adma.201502569>

Xiaobing Feng, Rong Su, Tuomas Happonen, Jian Liu and Richard Leach (2018). Fast and cost-effective in-process defect inspection for printed electronics based on coherent optical processing. *Optics Express*, 26(11):13927. <https://doi.org/10.1364/OE.26.013927>

Jakub Czajkowski, Tuukka Prykäri, Erkki Alarousu, Jaakko Palosaari, and Risto Myllylä (2010). Optical coherence tomography as a method of quality inspection for printed electronics products. *Optical Review*, 17(3):257–262. <https://doi.org/10.1007/s10043-010-0045-0>