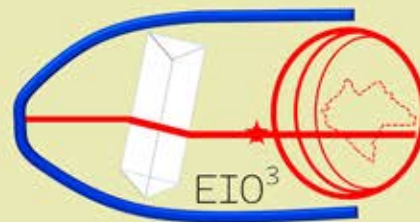




REVISTA
TECNOLOGÍA
DIGITAL

“Semillero de Investigadores”

ISSN: 2007-9400



Tercer encuentro de investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica

Ejemplar de divulgación

“Tecnología para la sociedad”

Índice LatIndex: Folio 23658

www.revistatecnologiadigital.com

Desde 2011

Volumen Número

14 1

Año 2024

REVISTA TECNOLOGÍA DIGITAL

CONSEJO EDITORIAL

Editor Principal. Dr. Jorge Luis Camas Anzueto

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

jcamas@tuxtla.tecnm.mx

Editor Invitado. Dr. Rubén Grajales Coutiño

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx

Editor Responsable.

Editorial Tecnología Didáctica®.

Dr. Héctor Guerra Crespo.

Registro del padrón de editores: 970-94054 de fecha 22-junio-2004.

Palenque 139 Col. ISSSTE, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.p. 29060, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

www.tecnologiadidactica.com

Autoridades

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

M.C. José Manuel Rosado Pérez

Director

Ing. María Delina Culebro Farrera

Subdirectora Académica

Número en colaboración.

Este número es una colaboración con el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en el marco de su 52 aniversario en el Tercer Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica (EIO³) celebrado el 21 y 22 de octubre de 2024. La revisión de artículos, edición y verificación de similitud se llevaron a cabo por el comité organizador del Encuentro de Investigación.

Revista Tecnología Digital.

Índice LatIndex: 23658.

ISSN: 2007-9400.

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Carretera Panamericana Km. 1080.

C.P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Departamento de Sistemas y Computación.

01-961-6150461 Ext. 319

www.revistatecnologiadigital.com

Revista Tecnología Digital. Año 14, Volumen 14, Número 1 de 22 de octubre de 2024 es una publicación anual on-line www.revistatecnologiadigital.com editada por Héctor Guerra Crespo oficinas en Palenque 139 Col. ISSSTE Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México C.P. 29060. correo-e hgcrespo@hotmail.com. Editor responsable: Héctor Guerra Crespo. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2014-022811040300-203 otorgado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. ISSN 2007-9400. Responsable de la última actualización de este número Dr. Héctor Guerra Crespo, Presidente del Consejo Editorial, Palenque 139 Colonia ISSSTE Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29060, fecha de la última modificación 22 de octubre de 2024.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del editor responsable.

Índice LatIndex: 23658.

Índice.

	Página.
Aplicación de la tecnología láser en agricultura.	 1
Caos en un sistema láser en configuración anillo unidireccional.	 11
Efecto del crecimiento de la cadena alquílica en la descomposición unimolecular de sustitutos de biodiésel.	 19
Electrofotónica: generando y manipulando luz y electricidad en un microchip.	 25
Eliminación de <i>E. coli</i> usando fotodinámica potenciada con nanoestructuras de oxígeno.	 35
Explorando la relación entre materiales y la excitación de plasmones de superficie.	 41
Fotónica integrada para el desarrollo de láseres y biosensores.	 47
Nanopartículas de carbón derivadas de flor de jamaica, para láseres pulsados de fibra óptica.	 53
Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez: Breve descripción de la fotónica	 65

Aplicación de la tecnología láser en agricultura.

Application of laser technology in agriculture.

Federico Antonio Gutiérrez Miceli* (1).
Tecnológico Nacional de México/I.T. Tuxtla Gutiérrez.
federico.gm@tuxtla.tecnm.mx.

Andrés León Zenteno (2), Tecnológico Nacional de México/I.T. Tuxtla Gutiérrez, m23271372@tuxtla.tecnm.mx.

Ana Martin Santos Espinoza (3), Tecnológico Nacional de México/I.T. Tuxtla Gutiérrez,
d13270770@tuxtla.tecnm.mx.

José Gregorio Joya-Dávila (4), Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), jose.joya@uabc.edu.mx.

Jorge Luis Camas-Anzueto (5), Tecnológico Nacional de México/I.T. Tuxtla Gutiérrez, jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

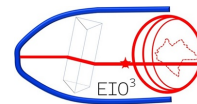
*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 06, 2024; aceptado en septiembre 23, 2024.

Resumen.

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica de como hoy en día la tecnología láser ha evolucionado como aplicación en la agricultura. Cabe mencionar que el problema social sobre la actúa población en el mundo que contempla un aproximado en el 2022 de 7,951 miles de millones es la alimentación. Por lo que es necesario exhortar a los líderes gubernamentales de cada país que inviertan en el desarrollo de nuevas tecnologías para el sector agroalimentario. La agricultura hoy en día es de vital importancia para el ser humano, ya que es necesario producir alimentos para cubrir con la exigencia en la seguridad alimentaria necesaria para el crecimiento demográfico sin control en el mundo. Para que un producto agrícola se desarrolle de forma óptima es necesario que se tenga un control en el cuidado de los suelos. Esto debido a que en el suelo se produce cerca del 95% de la producción de alimentos de todo el mundo. Sin embargo, en la agricultura es necesario asegurar la germinación de la semilla y que en el proceso del crecimiento del cultivo se tenga un control eficiente de la maleza para que la producción agrícola se incremente significativamente. En este que hacer, nos enfocamos en la tecnología láser que hoy en día esta cobrando como aplicación en la agricultura de precisión. De esta manera, el uso de láseres en la agricultura ha abierto nuevas posibilidades en la estimulación de semillas y en la mejora del control de malezas, proporcionando alternativas sostenibles frente a los métodos convencionales. Por lo que en este artículo se revisa los avances en el uso del láser para estas aplicaciones, destacando los ensayos realizados en cultivos como el maíz y el cacahuete en el estado de Chiapas. Se han obtenido resultados prometedores en cuanto a la eliminación eficiente de malezas y el aumento del rendimiento y la resistencia de los cultivos ante condiciones adversas como la sequía.

Palabras claves: Control de malezas, estimulación de semillas, láser.



Abstract.

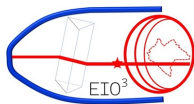
This paper presents a bibliographic review of how laser technology has evolved today as an application in agriculture. It is worth mentioning that the social problem facing the world's population, which will be approximately 7.951 billion in 2022, is food. Therefore, it is necessary to urge government leaders in each country to invest in developing new technologies for the agri-food sector. Agriculture is vital to humans today since it is required to produce food to meet the demand for food security necessary for uncontrolled population growth in the world. For an agricultural product to develop optimally, it is essential to have control over soil care because about 95% of the world's food production is produced in the soil. However, in agriculture, it is necessary to ensure seed germination and that there is efficient weed control in the process of crop growth so that agricultural production increases significantly. In this article, we focus on laser technology, which is currently gaining ground as an application in precision agriculture. Thus, using lasers in agriculture has opened up new possibilities in seed stimulation and improving weed control, providing sustainable alternatives to conventional methods. Therefore, this article reviews the advances in the use of lasers for these applications, highlighting the tests carried out on crops such as corn and peanuts in the state of Chiapas. Promising results have been obtained in terms of efficient weed elimination and increased yield and crop resistance to adverse conditions such as drought.

Keywords: Laser, seed stimulation, weed control.

1. Descripción de la conferencia.

Los láseres son dispositivos ópticos ampliamente utilizados en diversas áreas como la industria manufacturera, la medicina, el entretenimiento, los sensores y la biomedicina. Además, se ha encontrado aplicaciones emergentes en la agronomía. En el ámbito agrícola, la interacción de los fotones coherentes con las células vegetales ha sido objeto de numerosos estudios, lo que ha permitido desarrollar dispositivos innovadores para mejorar la productividad agrícola. Estableciendo como punto de partida el uso de láseres en la agricultura tal como en la estimulación de semillas para una germinación más rápida y la inhibición del crecimiento de malezas como una alternativa a los herbicidas químicos se procede a describir superficialmente esta tecnología. El avance en la tecnología de los láseres de diodo ha traído una notable mejora en las características ópticas de la luz que genera el láser. En los láseres de diodo ha evolucionado de tal manera que se pueden encontrar láseres cuya longitud de onda está desde el azul hasta el rojo e infrarrojo. Láseres de diodos con longitudes de onda de 680, 980 y 532 nm y potencias de 110, 250 y 75 mW, respectivamente, fueron empleados por Leila et al. (2013) para irradiar semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) homogeneizadas y esterilizadas, establecidas en condiciones salinas previamente a la irradiación, encontrando que los efectos de las distintas longitudes de onda de los láseres empleados tuvieron diferencias estadísticas significativas en germinación y rendimiento. Por otro lado, empleando un láser diodo de 980 nm con densidades de potencia de 15, 30 y 60 mW/cm² como tratamiento presiembra en semillas de trigo, Hernández (2010) encontraron que la bioestimulación láser incrementó e inhibió la longitud del coleóptilo y el sistema radicular; a los 15 mW/cm² causó una disminución de la longitud del coleóptilo a partir de los 30 s. A 60mW/cm² de exposición también produjo una disminución a los 15 s y en 30 y 60 s tendió a aumentar, para después volver a disminuir en 120 y 240 s. Semillas de leguminosa como el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de distintos ciclos productivos tratadas presiembra con láser de 408 nm y potencia de 150 mW expuestas a 18 regímenes de irradiación alternando 10 min de irradiación y 30 min sin irradiación durante 24 h, produjeron bioestimulación positiva y negativa, donde las semillas con mayor longitud de penetración óptica obtuvieron bioestimulación positiva en el porcentaje de germinación, incrementando su valor con respecto al control del 47% (Sánchez et al. 2015). Con diodos láser, fueron tratados y cultivados esquejes de sauce (*Salix viminalis*), variedad resistente a enfermedades y tolerante a insectos, radiados con diodo láser rojo (670 nm), bajo tres regímenes de irradiación de 30 s, Jakubiak & Gdowska (2013) encontraron que se acelera el crecimiento y se tiene un incremento de biomasa.

Es importante resaltar que el éxito en el establecimiento de un cultivo está vinculado a la optimización de las condiciones que favorecen la germinación de las semillas. Diversos estudios han demostrado que la estimulación láser proporciona energía adicional a las semillas, acelerando tanto su germinación como su emergencia (Podleśny and Podlesna, 2012). Además, señalan un incremento a la resistencia ante condiciones adversas, principalmente a distintos



tipos de estrés como radiación UV, sequía, frío, salinidad, presencia de metales pesados de plantas provenientes de semillas o de plantas expuestas a radiación láser. Por lo tanto, Esta técnica ofrece una ventaja competitiva al cultivo al reducir el tiempo de las etapas vegetativas y permitir que las plántulas superen más rápidamente a las malezas.

En cuanto al control de malezas, el uso de láseres ha mostrado resultados prometedores. Los láseres de diodo, por ejemplo, son especialmente útiles debido a su tamaño compacto y peso ligero en comparación con otros tipos, como los láseres de dióxido de carbono o de fibra óptica (Mwitta et al., 2022). Además, se ha explorado la posibilidad de emplear brazos robóticos equipados con láseres, capaces de dirigir con precisión el rayo a diferentes partes de la planta, lo que permite cubrir mayores áreas sin alterar el diámetro del rayo (Osadcuks et al., 2020). Esta tecnología podría ofrecer un método sostenible y eficiente para el manejo de malezas, disminuyendo la necesidad de herbicidas químicos que generan impactos negativos en el medio ambiente. Dos de las técnicas actualmente exploradas para eliminar la maleza en la producción agrícola es el flameo y la óptica. El flameo es una llama producida con gas propano para generar calor en la maleza rompiendo las células vegetales para que esta muera (Conozca El Flameo: Una Alternativa Para Reducir El Uso de Herbicidas En Zonas Agrícolas y Urbanas, 2020). El efecto del flameo en las plantas es: temperatura, tiempo de exposición, y tipo de energía. La técnica óptica para eliminar maleza utiliza luz láser de alta potencia. En este caso, utilizan 8 láseres de 150 W para que la luz pueda eliminar la maleza (Ruíz, 2023). Otro proyecto que se ha desarrollado en Europa es el de la compañía Welaser. De igual forma utiliza láser de CO₂ de alta potencia e inteligencia artificial para diferenciar la maleza del cultivo (Láser Para Eliminar Malas Hierbas de Los Cultivos, 2021). Cabe mencionar que la radiación láser en las plantas es capaz de eliminar la maleza en la agricultura. Esto debido a que los meristemos de las plantas no son capaces de aguantar radiación durante un determinado tiempo provocando así su inhibición en el crecimiento. Estos meristemos son tejidos de crecimiento responsables del incremento continuo del cuerpo de la planta y se encuentran localizados en los extremos o ápices de los órganos (tallos, raíces y hojas). La conservación de los meristemos y su capacidad para producir nuevos órganos distinguen a las plantas de los animales (Luna, 2010; Megías et al., 2017; Kitagawa & Jackson, 2019; Paddock, 2012).

2. Método elicitación de semillas.

2.1. Métodos.

La estimulación de semillas se lleva a cabo antes de la siembra, comenzando con la selección de semillas, eliminando aquellas que presenten imperfecciones y homogeneizando su tamaño. Posteriormente, se realizan pruebas para determinar la potencia y el tiempo de exposición adecuados al haz láser. En el Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales del TecNM, Campus Tuxtla Gutiérrez, se realizó un experimento en el que se evaluaron tres métodos de elicitación física: luz UV-C, campo magnético y láser, utilizando semillas de cacahuete como modelo de estudio. Para el presente trabajo, se exponen los hallazgos relacionados con el uso del láser.

Se utilizó un haz láser con una longitud de onda de 636 nm y una potencia de 120 mW, aplicado a una distancia de 15 cm durante 15 minutos. 24 horas después, dos grupos de semillas, uno tratado con láser y otro grupo de control sin tratamiento (con cuatro repeticiones de 100 semillas cada uno), fueron sembrados manualmente en un terreno agrícola en el municipio de Suchiapa, Chiapas. La distancia entre plantas fue de 30 cm, con surcos separados por 60 cm, colocando dos semillas por sitio. El suelo del terreno se caracterizó por ser arenoso y ligeramente ácido. Todas las labores agrícolas, incluida la siembra y cosecha, se realizaron manualmente, y la fertilización se hizo con 0.3 kg de vermicomposta por planta. La cosecha se llevó a cabo a los 105 días.

Las variables de respuesta incluyen cambios fenológicos y morfométricos en las vainas y semillas al momento de la cosecha, y se calcula el rendimiento de ambas variables. El análisis de los datos se realizó utilizando el software Statgraphics Centurion XVI (Statgraphics Technologies, Inc., 2024).

2.2. Desarrollo.

Los resultados obtenidos muestran que no hubo diferencias significativas en la fenología ni en el comportamiento morfométrico de las plantas provenientes de semillas irradiadas con láser en comparación con el control. Sin embargo,

se observará un aumento en el crecimiento vegetativo, evidenciado por un mayor índice de velocidad de emergencia en las plantas tratadas con láser, lo que indica una ventaja competitiva en las primeras etapas de desarrollo (Podleśny et al., 2012). Como se muestra en la Fig. 1, las plantas tratadas con láser presentaron una emergencia más rápida y un crecimiento más homogéneo, lo que puede reducir las diferencias entre individuos dentro del cultivo, mejorando la eficiencia del manejo agronómico.



Figura 1. Crecimiento de plantas de cacahuete siete días después de la siembra. A= Control, B= Irradiada con láser

En cuanto al rendimiento, las semillas cosechadas muestran un aumento en su biomasa. Grupos de 100 semillas indicaron que el tratamiento láser incrementó el peso en 6 g en comparación con el control, alcanzando una biomasa de 93 g, lo que representa un aumento significativo. Además, el rendimiento de vainas y semillas fue notablemente superior en las plantas del tratamiento láser, con un incremento del 32 % en vainas y del 24 % en semillas, en comparación con el grupo de control. Este aumento en la productividad puede estar relacionado con la capacidad del láser para mejorar la actividad fotosintética y el metabolismo de las plantas, tal como han reportado estudios previos sobre el impacto positivo del láser en la fisiología vegetal (Nadimi et al., 2021).

3. Inhibición del crecimiento de malezas.

3.1. Métodos.

La inhibición del crecimiento de arvenses se realizó con una máquina cortadora y grabadora de láser. La fuente láser de esta máquina es un tubo de dióxido de carbono (CO_2) que emite un haz de 10, 600 nm. Además, la máquina cuenta con una fuente de poder variable que entrega una potencia óptica máxima nominal de 40 W, y puede proporcionar fracciones porcentuales de esa potencia. Por su parte, los arvenses empleados se encontraban en una etapa fenológica de 2 hojas verdaderas, y contaban con un diámetro menor a 1 mm. La irradiación se aplicó en los tallos de las plantas, como se muestra en la Fig. 2, y se realizó con distintas configuraciones de potencia de salida y tiempo de exposición, del 11 al 15% y de 0.5 a 1.5 s, respectivamente. Después de cada iteración, se observó los cambios que presentaron los tallos y se hicieron anotaciones.

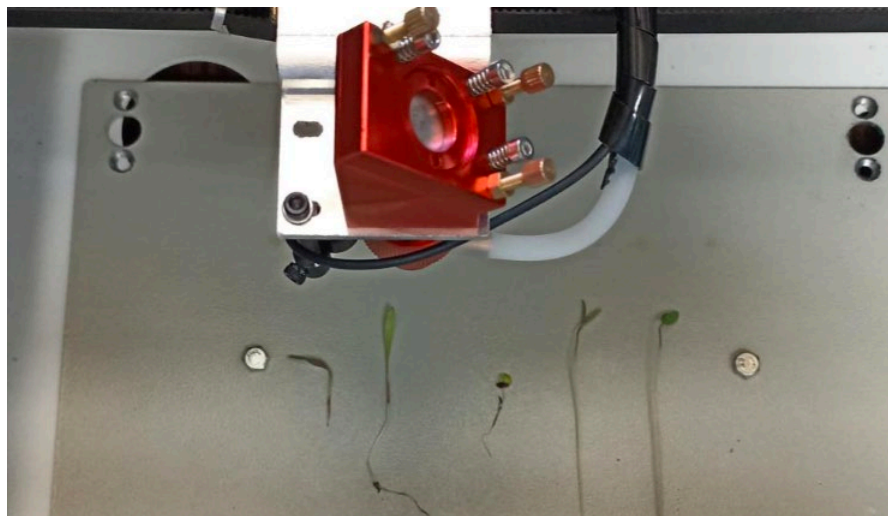


Figura 2. Arreglo experimental de la inhibición de arvenses con radiación láser.

3.2. Desarrollo.

La irradiación en los tallos proporcionó resultados interesantes. Se encontró que la potencia óptica mínima necesaria para causar un daño letal al tejido de la planta es de 8 W, indicado en la Fig. 3b. Sin embargo, en todas las otras configuraciones de potencia y tiempo de exposición, se pudo observar un daño en los tejidos, desde cambio en la pigmentación hasta reducción del diámetro del tallo, como se muestra en la Fig. 3a. El daño más grande se observó como carbonización, resultante de la evaporación de toda el agua contenida en las células. Los daños menores pueden, de igual forma, ser letales. En una planta sembrada en el suelo, una reducción en el diámetro de su tallo puede debilitar su resistencia estructural, causando que el tope de la planta se doble. Esto causaría estragos en el xilema y floema de la planta, pudiendo provocar que no se recupere y termine pereciendo.

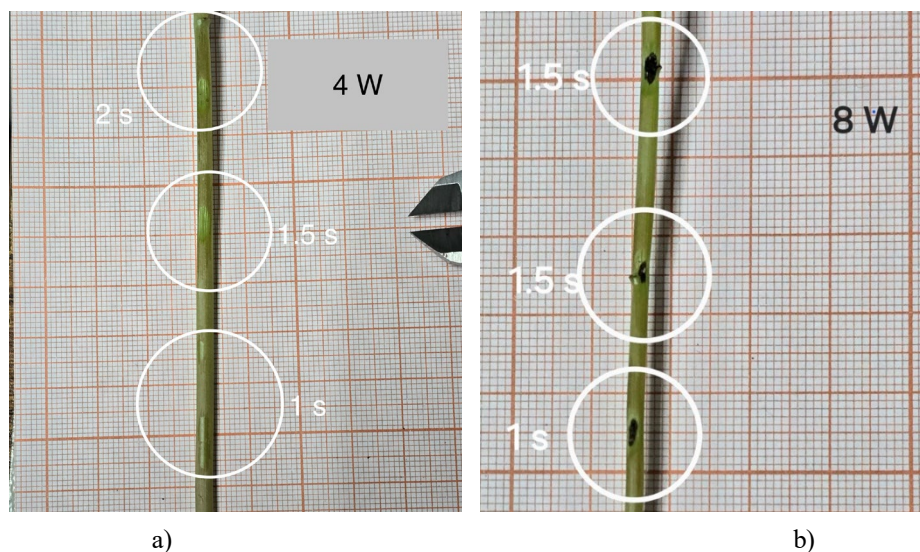
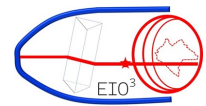


Figura 3. Daños ocasionados por la radiación láser sobre tallos de arvenses.



Conclusiones.

El uso de láseres en la agricultura ofrece una alternativa innovadora y sostenible para el control de malezas y la estimulación de semillas. Los resultados de los ensayos en Chiapas sugieren que esta tecnología puede mejorar significativamente el rendimiento de cultivos como el maíz y el cacahuete, reduciendo la dependencia de productos químicos y aumentando la resiliencia frente al cambio climático. A medida que la investigación en esta área continúe, el láser podría convertirse en una herramienta clave para la agricultura del futuro. Por otra parte, la radiación láser de alta potencia (1 W >) tiene la capacidad de generar lesiones a los tejidos vegetales de los tallos de las plantas. Debido a la interacción que tienen las moléculas del agua con la luz infrarroja del láser, existe un calentamiento en las células y tejidos, provocando los daños y lesiones mostrados anteriormente. En un futuro, se continuará con la investigación ampliando las especies de arvenses y las fuentes de luz láser.

Créditos.

Esta investigación fue financiada por el Tecnológico Nacional de México, a través del proyecto: 19876, titulado: Estimulación de semillas para promover cambios en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional en cacahuete y maíz cultivados en campo.

Referencias bibliográficas.

Conozca el flameo: una alternativa para reducir el uso de herbicidas en zonas agrícolas y urbanas. (2012).

<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2020/3/16/conozca-el-flameo-una-alternativa-para-reducir-el-uso-de-herbicidas-en-zonas-agricolas-y-urbanas.html>

Ferdosizadeh, L., Sadat-Noori. S., Zare, N., Saghafi, S. (2013). Assessment of Diode Laser Pretreatments on Germination and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Salinity Stress, *World Journal of Agricultural Research*. 2013, 1(1), 5-9. DOI: 10.12691/wjar-1-1-2

Hernandez, A.C., Dominguez, P.A., Cruz, O.A., Ivanov, R., Carballo, C.A., Zepeda B.R. (2010). Laser in agriculture, *International Agrophysics*, 24, 407-422. <http://www.international-agrophysics.org/pdf-106402-37251?filename=Laser%20in%20agriculture.pdf>

Jakubiak, M., Gdowska, K. (2013). INNOVATIVE ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY APPLICATIONS OF LASER LIGHT STIMULATION. *Енергетика і автоматика*. 3. 14-21. https://www.researchgate.net/publication/280574717_INNOVATIVE_ENVIRONMENTAL_TECHNOLOGY_APPLICATIONS_OF_LASER_LIGHT_STIMULATION.

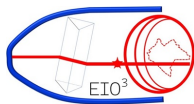
Kitagawa, M., & Jackson, D. (2019). Control of Meristem Size. *Annual Review of Plant Biology*, 70(Volume 70, 2019), 269–291. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-042817-040549/CITE/REFWORKS>

Láser para eliminar malas hierbas de los cultivos (2022).

<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/L%C3%A1ser-para-eliminar-malas-hierbas-de-los-cultivos.aspx>

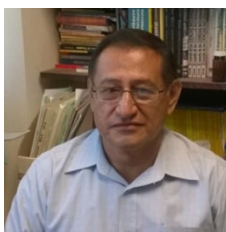
Luna, M. L., Giudice, G. E., Ramos Giacosa, J. P., Márquez, G. J. (2010). Plantas que burlan la muerte. *Museo*, 3(24), 68-74.

Megías Pacheco, M., Pombal Diego, M. A., Molist García, P. (2017). Atlas de Histología Vegetal y Animal. *Departamento de Biología Funcional y Ciencias de la Salud. Facultad de Biología. Universidad de Vigo*.

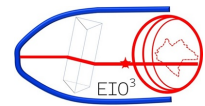


- Mwitta, C., Rains, G. C., & Prostko, E. (2022).** Evaluation of Diode Laser Treatments to Manage Weeds in Row Crops. *Agronomy*, 12(11).
- Nadimi, M., Sun, D. W., & Paliwal, J. (2021).** Recent applications of novel laser techniques for enhancing agricultural production. *Laser Physics*, 31(5), 053001.
- Osadčuks, V., Kostromins, A., Pecka, A., Koteļņecs, V., & Jaško, J. (2020).** Experimental efficiency evaluation of 445 nm semiconductor laser for robotized weed control applications. *Agronomy Research*, 18(Special Issue 2), 1380–1387.
- Paddock, A. (2012).** Controlling weeds with lasers. *Photonics media*.
https://www.photonics.com/Articles/Controlling_weeds_with_lasers/a50644#:~:text=The%20meristem%27s%20position%20is%20gauged,optimal%20effect%20on%20the%20target
- Podleśny, J., Stochmal, A., Podleśna, A. & Misiak, L. E. (2012).** Effect of laser light treatment on some biochemical and physiological processes in seeds and seedlings of white lupine and faba bean. *Plant Growth Regulation*, 67, 227-233.
- Podleśny, J., Podleśna, A. (2012).** The effect of high temperature during flowering on growth, development and yielding of blue lupine - barley mixture. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 10. 500-504.
https://www.researchgate.net/publication/281425684_The_effect_of_high_temperature_during_flowering_on_growth_development_and_yielding_of_blue_lupine_-_barley_mixture
- Ruiz, J. (2023).** Carbon Robotics combate las malezas con rayos láser. *Maquinac Global*.
<https://maquinac.com/2023/01/carbon-robotics-combate-las-malezas-con-rayos-laser/#:~:text=Carbon%20Robotics%20es%20una%20empresa,llamado%20Autonomous%20LaserWeeder%20Demo%20Unit>
- Sánchez-Hernández, G., Hernández-Aguilar, C., Domínguez Pacheco, F.A., Cruz-Orea, A., Perez-Reyes, M.C.J., Martínez, E.M. (2015).** The Optical Absorption Coefficient of Bean Seeds Investigated Using Photoacoustic Spectroscopy. *International Journal of Thermophysics*. 36: 835-843.
- Statgraphics Technologies, Inc. (2024).** Statgraphics Centurion XVI. Versión 16.1. Disponible en:
<https://www.statgraphics.com>

Biografía de los investigadores.



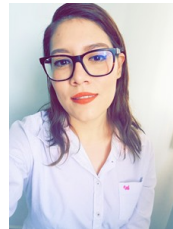
Dr. Federico Antonio Gutiérrez Miceli, Ingeniero Bioquímico en Productos Naturales. Tiene la Maestría en Ciencias en Biotecnología y el Doctorado en Ciencias con especialidad en Biotecnología. Ha impartido diversas asignaturas en licenciatura y posgrado. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (emérito), del Sistema Estatal de Investigadores (SEI, Chiapas) y profesor con Perfil deseable PRODEP. Actualmente, imparte clases en la licenciatura de Ingeniería Bioquímica, en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y en el Doctorado en Ciencias en Alimentos y Biotecnología. En los últimos cinco años ha dirigido 6 proyectos de investigación financiados por diversos organismos como CONACYT, Tecnológico Nacional de México (TecNM) y el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Ha graduado 12 doctores en ciencias, 30 maestros en ciencias y 52



ingenieros bioquímicos. En los últimos 3 años ha publicado 32 artículos en revistas indexadas, 5 artículos en revistas con arbitraje y 4 artículos de divulgación, 6 capítulos de libros, editor de un libro, co-autor de una patente registrada en México.



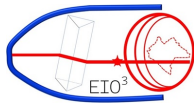
Ing. Andrés León Zenteno, Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Culhuacán, del Instituto Politécnico Nacional, en el año de 2021. Realizó movilidad internacional en Wrocław University of Science and Technology en la ciudad de Breslavia, Polonia durante el semestre enero – junio 2020. Actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, con el proyecto titulado Desarrollo de un Sistema Optomecatrónico para el Control de Malezas en Producción Agrícola.



M.C. Ana Martín Santos Espinoza, Ingeniero Bioquímico egresada del Instituto Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez, en el año de 2018, posteriormente estudió la Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica dentro del mismo instituto desarrollando el proyecto “Evaluación del efecto de fitonanopartículas en cultivos de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.): Un enfoque integral”. Actualmente cursa el Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, con el proyecto titulado “Bioestimulación de semillas de cacahuete con campo magnético, láser y luz UV-C. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores (SEI, Chiapas) en la categoría de Joven Investigador.



Dr. José Gregorio Joya Dávila. Docente e investigador del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Mi labor de investigación se centra en el mejoramiento genético participativo de genotipos de café y cultivos básicos, utilizando herramientas biotecnológicas para la propagación clonal de aquellos que presentan resistencia a plagas o enfermedades y tolerancia al estrés por déficit hídrico. Además, llevo a cabo estudios sobre el uso de priming y elicitación física (láser, UV) de semillas y plántulas con el fin de estimular su tolerancia a la sequía y el rendimiento en campo. Asimismo, evaluamos el uso de nanopartículas para el control de enfermedades.



Dr. Jorge Luis Camas Anzueto, es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte del CONAHCYT. Miembro honorífico del Sistema Estatal de Investigadores por el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas (ICTICH). Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG, Participó en la creación de la MCIM y del DCI del ITTG, además de la Licenciatura en Física y Matemática de la Facultad de Física y Matemática de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). Ha publicado más de 55 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 12 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 50 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX.

Caos en un sistema láser en configuración anillo unidireccional.

Chaos in a laser system in unidirectional ring configuration.

Juan Hugo García López* (1).

Laboratorio de Óptica, Sistemas Complejos e Innovación, Departamento de Ciencias Exactas y Tecnología, Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, Lagos de Moreno, 47463, Jalisco, México.

jhugo.garcia@academicos.udg.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en agosto 22, 2024; aceptado en septiembre 13, 2024.

Resumen.

Investigamos numéricamente la dinámica de un anillo de tres láseres de fibra dopada con erbio (EDLF) acoplados unidireccionalmente sin modulación de bombeo externo. Estudiamos el comportamiento del sistema utilizando un modelo de seis dimensiones que incluye las intensidades láser y las inversiones de población variando la fuerza de acoplamiento. Nuestro objetivo principal es comprender la evolución del sistema hacia el caos a partir de un equilibrio estable a medida que aumenta la fuerza de acoplamiento. El sistema sufre bifurcaciones de Hopf y toroide durante la transición al caos, y observamos la coexistencia de órbitas periódicas y caóticas dentro de rangos de acoplamiento específicos. Para un acoplamiento muy fuerte, esta biestabilidad se desvanece, lo que da lugar a un sistema monoestable con un solo ciclo límite, prometedor para aplicaciones que requieren pulsos láser cortos con una potencia máxima significativamente mejorada, especialmente en sistemas de comunicación óptica.

Palabras claves: Acoplamiento, anillo, dinámica, láser; multiestabilidad, red, sincronización.

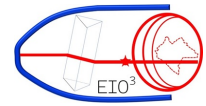
Abstract.

We numerically investigate the dynamics of a ring of three unidirectionally coupled Erbium-Doped Fiber Lasers (EDLFs) without external pump modulation. We study the system's behavior using a six-dimensional model that includes laser intensities and population inversions by varying the coupling strength. Our main goal is understanding the system's evolution towards chaos from a stable equilibrium as the coupling strength increases. The system undergoes Hopf and torus bifurcations during the transition to chaos, and we observe the coexistence of periodic and chaotic orbits within specific coupling ranges. For very strong coupling, this bistability vanishes, leading to a monostable system with a single limit cycle, promising for applications requiring short laser pulses with significantly enhanced peak power, especially in optical communication systems.

Keywords: Coupling, dynamics, laser, multistability, network, ring, synchronization.

1. Descripción de la conferencia.

Se presenta el estudio del modelo de un Láser de Fibra Dopado con Erblio (EDFL). Se muestran resultados del modelo, anillo de tres láseres acoplados unidireccionalmente, utilizando un sistema de ecuaciones diferenciales. Se presentan



resultados de la investigación sobre la dinámica del sistema, utilizando análisis de series temporales, diagramas de bifurcación, secciones de Poincaré, y el exponente de Lyapunov. Al final se presentan las conclusiones.

Para describir la dinámica de los EDFL bombeados por diodos, se emplea un enfoque de equilibrio de potencia, que explica la absorción de estado excitado (ESA) en el erbio a la longitud de onda de 1.5μm. Este enfoque también considera el promedio de la inversión de la población a lo largo de la fibra activa bombeada (De La Torre-Esqueda et al., 2023). Al incorporar estos factores, el modelo captura los mecanismos subyacentes que dan lugar a oscilaciones intrínsecas en el láser, incluso sin modulación externa, como se observa experimentalmente (Pisarchik et al., 2003, Jaimes-Reategui et al., 2004).

2. Métodos.

2.1 Modelo Láser.

Las ecuaciones de equilibrio para la potencia del láser intracavidad, denotada por la suma de las potencias de las ondas que se propagan dentro de una cavidad láser y la inversión de población promediada de átomos entre un nivel de energía superior por decaimientos por la emisión espontánea y estimulada es ampliamente conocida y descrita. Por lo anterior en este artículo únicamente se presentan un modelo láser simplificado adimensional, los detalles del estudio pueden ser encontrados en el trabajo de Barba-Franco et al. (2023) y De La Torre-Esqueda et al. (2023).

El sistema de ecuaciones que describe un láser de fibra dopado con erbio se muestra a continuación:

$$\frac{dx_1}{d\theta} = ax_1y_1 - bx_1 + c(y_1 + r_w) \quad (1)$$

$$\frac{dy_1}{d\theta} = -dx_1y_1 - (y_1 + r_w) + e \left\{ 1 - \exp \left[-\beta\alpha_0 L \left(1 - \frac{y_1 + r_w}{\xi_2 r_w} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

donde las variables (x_1, y_1) representan la intensidad láser y la inversión de población respectivamente. Para los coeficientes del sistema se emplearon los valores siguientes: $a=6.6207e+7$, $b=7.4151e+6$, $c=0.0163$ y $d=4.07633+3$, proporcionados del estudio de Esqueda de la Torre (2023). Con el fin de simular la dinámica de un láser real, utilizamos parámetros que son cercanos a los empleados en el estudio experimental de Pisarchik et al. (2003). Al resolver numéricamente el sistema de Ecs. (1) y (2) utilizando el método de Runge-Kutta de cuarto orden, generamos series temporales. La serie temporal correspondiente a esta elección de parámetros se ilustra en la Fig.1. Es relevante señalar que la solución de este sistema sin bombeo externo produce un punto fijo estable.

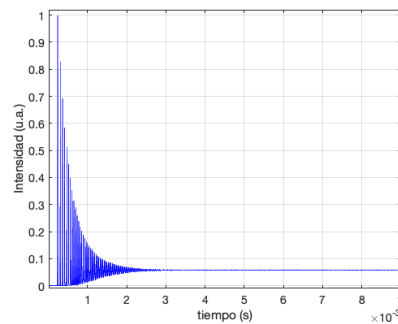


Figura 1. Serie temporal del LFDE, obtenida con las Ecs. (1) y (2).

2.2 Dinámica de un anillo de tres EDFL acoplados unidireccionalmente.

En este estudio, nos centramos en la configuración con acoplamiento unidireccional, como se muestra en la Fig. 2. Los láseres acoplados en anillo pueden conceptualizarse como un ciclo recurrente de interacciones según Alon, U. (2007). Incluso con solo tres osciladores, la red puede exhibir trece patrones de configuración distintos (Perlikowski et al.

2013), caracterizados por varias combinaciones de acoplamientos unidireccionales y bidireccionales. Cada láser actúa como esclavo y maestro simultáneamente. La dinámica del anillo de láseres estudiado se puede describir matemáticamente mediante dos ecuaciones diferenciales, donde x_j ($j = 1, 2, 3$) es la intensidad, mientras que y_j es la inversión de población para cada láser, como se muestran a continuación (Esqueda-De La Torre et al., 2023):

$$\frac{dx_j}{d\theta} = ax_jy_j - bx_j + c(y_j + 0.3075), \quad (3)$$

$$\frac{dy_j}{d\theta} = -dx_jy_j - (y_j + 0.3075) + P_{modj} \left\{ 1 - \exp \left[-18 \left(1 - \frac{y_j + 0.3075}{0.6150} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

$$P_{modj} = 506(1 + k(x_{j-1} - x_j)),$$

Donde k es el coeficiente de acoplamiento y P_{modj} actúa como el bombeo para el siguiente láser.

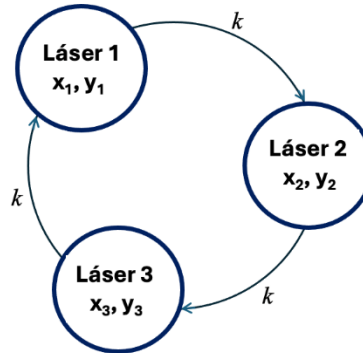


Figura 2. Diagrama esquemático de un anillo unidireccional de tres láseres acoplados difusivamente.

3. Desarrollo.

Utilizando la configuración de anillo para los tres láseres acoplados unidireccionalmente, por la simetría inherente, se encuentra que la dinámica de cada láser es idéntica. En la **Fig. 3**, se presenta el diagrama de bifurcación que muestra la amplitud máxima de un láser (x_1) y el exponente de Lyapunov en función de la fuerza de acoplamiento k . El escenario de bifurcación sigue la ruta de Landau, caracterizada por la transición de un equilibrio estable al caos a través de la cuasi-periodicidad a través de bifurcaciones sucesivas de Hopf (Borkowski et al., 2015a, Borkowski et al., 2015b). Este escenario revela que un atractor caótico emerge como un toroide tridimensional después de la tercera bifurcación de Hopf. Nuestro modelo, descrito por las Ecs. (3) y (4) exhiben un escenario similar, mostrando una transición a biestable con caos y punto fijo cuando se varía la fuerza de acoplamiento k llegando a un ciclo limite posteriormente.

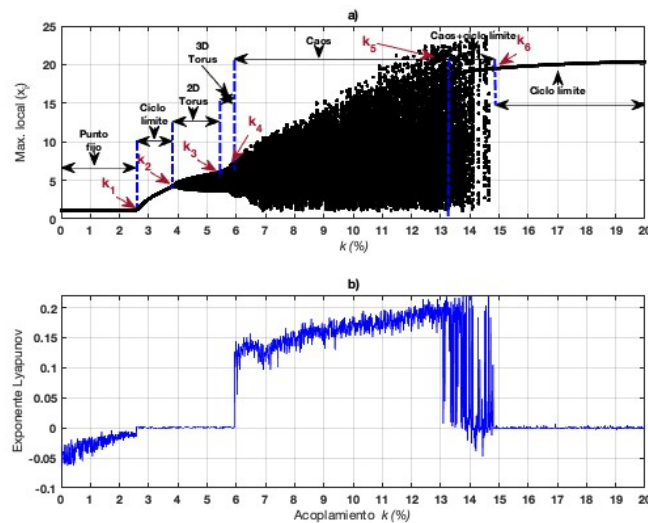


Figura 3. a) Diagrama de bifurcación de la intensidad láser y b) Exponente de Lyapunov como función del factor de acoplamiento (k).

En la **Fig. 4** se ilustran detalles de los regímenes dinámicos observados en la ruta caos iniciando desde un punto fijo estable hasta el caos, se presentan algunas series temporales y su respectiva sección de Poincaré. Utilizando a la para la **Fig. 3**, se observa que a medida que la fuerza de acoplamiento aumenta de $k = 0$ a $k_1 \approx 2.58$, el equilibrio se transforma en un ciclo límite (**Fig. 4 (a)**) en la bifurcación de Hopf, donde el mayor exponente de Lyapunov se aproxima a cero. El régimen periódico se mantiene dentro de una región relativamente pequeña de $2.58 < k < 3.81$. Luego, en $k_2 = 3.82$, el ciclo límite se transforma en un régimen cuasiperiódico (toroide 2D), como se muestra en la **Fig. 4 (b)**. La cuasi-periodicidad ocurre cuando el segundo exponente más grande de Lyapunov llega a cero. A medida que k se incrementa aún más, aparece un toroide 3D en $k_3 = 5.49$ (**Fig. 4 (c)**) cuando el tercer exponente de Lyapunov más grande se acerca a cero. Este régimen se observa para $5.49 < k < 5.83$. En $k_4 = 5.84$, el sistema se vuelve caótico (**Fig. 4 (d)**) cuando el mayor exponente de Lyapunov se vuelve positivo. Un aumento adicional en la fuerza de acoplamiento conduce a un ciclo límite estable en $k_6 > 14.81$ (**Fig. 4 (e)**) cuando el exponente de Lyapunov más grande se convierte en cero.

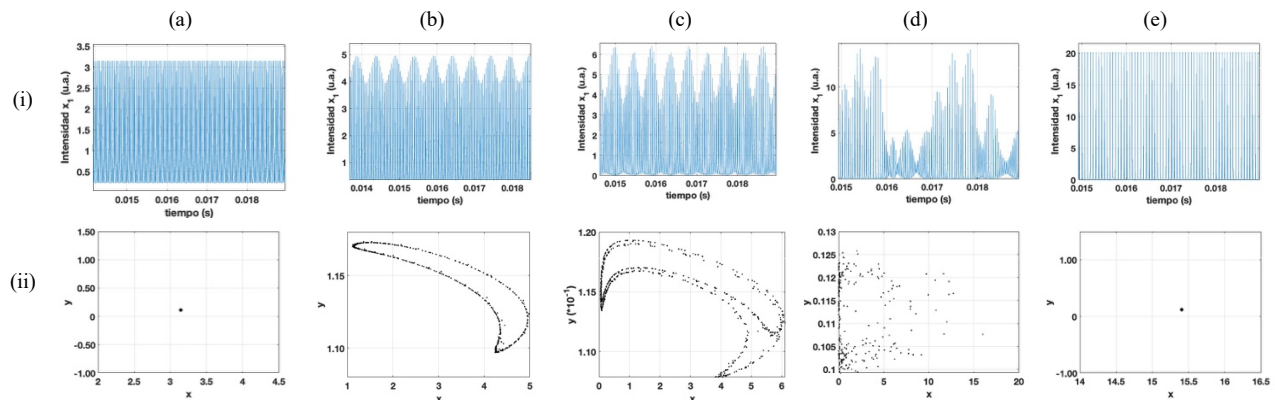


Figura 4. (i) Series Temporales y (ii) Secciones de Poincaré para (a) $k = 2.58$ (órbita periódica), (b) $k = 3.82$ (Toroide 2D), (c) $k = 5.49$ (Toroide 3D), (d) $k = 5.84$ (Caos) y (e) $k = 14.81$ (Ciclo límite).

Una característica interesante encontrada en los resultados es una onda rotante generada. Los modos oscilatorios en el anillo de láseres exhiben series temporales para la intensidad donde la única diferencia entre los osciladores láser es su fase, lo que resulta en cambios de fase en cada láser sucesivo. Esto produce una onda de fase que gira dentro del

anillo de LFDE. La dinámica de la onda rotante en el anillos de los láseres se representa en la **Fig. 5** para cuatro fuerzas de acoplamiento distintas: $k = 2.58$, $k = 3.82$, $k = 5.49$ y $k = 5.84$.

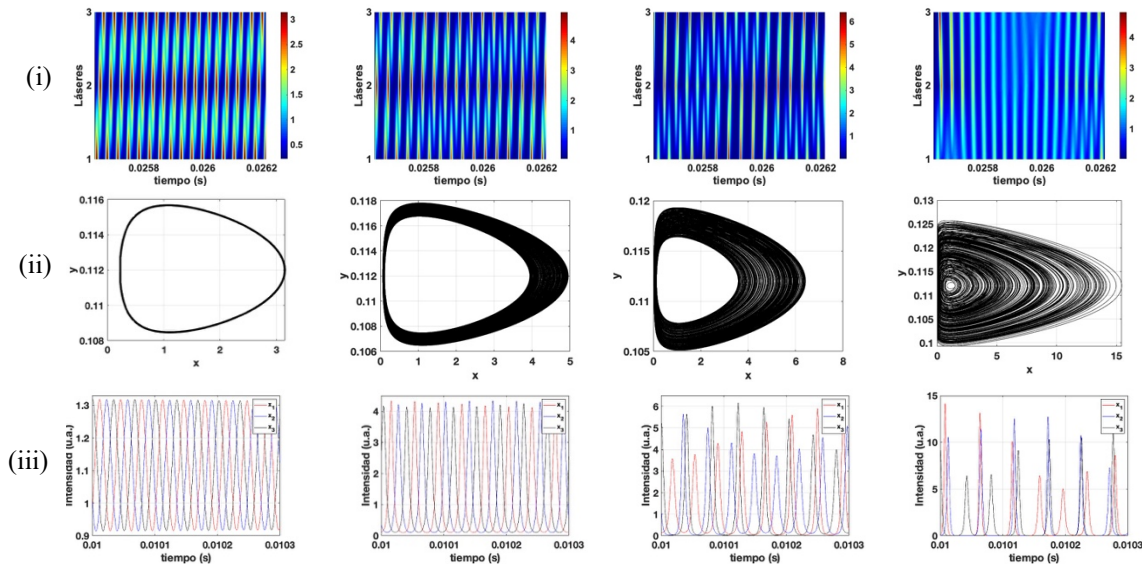


Figure 5. (i) Onda rotante, (ii) Espacio de fase y (iii) Series temporales para a) $k = 2.58$, b) $k = 3.82$, c) $k = 5.49$, y d) $k = 5.84$.

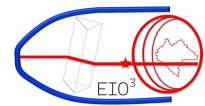
En la columna (i) de la **Fig. 5**, se presentan los patrones de series temporales de los tres láseres, mostrando franjas oblicuas que representan la onda rotate. Estas franjas indican la propagación de ondas de fase a lo largo del anillo. La columna (ii) de la misma figura ilustra los espacios de fase de los atractores correspondientes, que son iguales para todos los láseres debido a la simetría de la configuración. En particular, el tamaño del atractor aumenta a medida que aumenta la fuerza de acoplamiento. Las acercamiento de las respectivas series temporales de los tres sistemas láser se presentan en la columna (iii). Estas series temporales muestran la diferencia de fase entre los láseres como evidencia de la onda rotante.

Conclusiones.

Realizamos una investigación numérica sobre la dinámica de tres láseres EDFL acoplados unidireccionalmente en anillo, variando la fuerza de acoplamiento. Usamos un modelo matemático de seis ecuaciones diferenciales que considera la intensidad láser y la inversión de población. El análisis incluyó herramientas como diagramas de bifurcación y exponentes de Lyapunov para explorar la transición de punto de equilibrio estable a caos. Encontramos que, con un acoplamiento fuerte, la potencia máxima de los pulsos láser aumentó casi 20 veces por el bloqueo de fase, lo que tiene aplicaciones en sistemas de comunicación óptica. A pesar de que el estudio se limita a tres láseres, estos hallazgos son prometedores para posible aplicación a redes mayores, indicando nuevas oportunidades de investigación.

Créditos.

Trabajo de investigación del Cuerpo Académico Óptica, Sistemas Complejos e Innovación UDG-CA-1038, con los Drs. Jaimes-Reategui R. Huerta-Cuellar G. y José Octavio Esqueda de la Torre, quien obtuvo su grado de Doctor en Ciencias. Agradecemos el apoyo del proyecto 320597: Programa Presupuestario F003 CONACYT México Convocatoria “Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera. Modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022”.



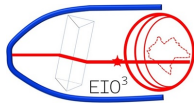
Referencias bibliográficas.

- Alon, U. (2007). Network motifs: theory and experimental approaches. *Nature Reviews Genetics*, 8, 450–461. <https://doi.org/10.1038/nrg2102>
- Barba-Franco, J., Romo-Muñoz, L., Jaimes-Reátegui, R., García-López, J., Huerta-Cuellar, G., & Pisarchik, A. (2023). Electronic equivalent of a pump-modulated erbium-doped fiber laser. *Integration*, 89, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2022.11.012>
- Borkowski, L., & Stefanski, A. (2015). FFT bifurcation analysis of routes to chaos via quasiperiodic solutions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2015/367036>
- Borkowski, L., Perlikowski, P., Kapitaniak, T., & Stefanski, A. (2015). Experimental observation of three-frequency quasiperiodic solution in a ring of unidirectionally coupled oscillators. *Physical Review E*, 91, 062906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.91.062906>
- Esqueda de la Torre, J. O., García-López, J. H., Jaimes-Reátegui, R., Huerta-Cuellar, G., Aboites, V., & Pisarchik, A. N. (2023). Route to chaos in a unidirectional ring of three diffusively coupled erbium-doped fiber lasers. *Photonics*. <https://doi.org/10.3390/photonics10070813>
- Pisarchik, A. N., Barmenkov, Y. O., & Kir'yanov, A. V. (2003). Experimental characterization of the bifurcation structure in an erbium-doped fiber laser with pump modulation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 39(12), 1567-1571.
- Perlikowski, P., Yanchuk, S., Wolfrum, M., Stefanski, A., & Kapitaniak, T. (2013). Dynamics of a large ring of unidirectionally coupled Duffing oscillators. In *Proceedings of the IUTAM Symposium on Nonlinear Dynamics for Advanced Technologies and Engineering Design* (pp. 63–72). Springer.
- Reátegui, R., Kir'yanov, A., Pisarchik, A., Barmenkov, Y. O., & Il'ichev, N. (2004). Experimental study and modeling of coexisting attractors and bifurcations in an erbium-doped fiber laser with diode-pump modulation. *Laser Physics*, 14(9), 1277-1281.

Biografía del investigador.



El Dr. **Juan Hugo García López**, nació en la ciudad de Comitán de Domínguez, Chiapas, México el 01 de Julio de 1973. En 2003 el Dr. García, obtuvo su **Doctorado en Ciencias** (Óptica) en el Centro de Investigaciones en Óptica A. C., posgrado reconocido en nivel competencia internacional, realizando su investigación doctoral en el Blackett Laboratory del Imperial College de la Universidad de Londres presentando su tesis sobre Láseres de estado sólido bombeados por diodos láser de alta potencia, obteniendo el reconocimiento de trabajo de grado “**LAUREADO**” por la Universidad de Guanajuato. El Dr. García obtuvo en 1999, la **Maestría en Ingeniería Eléctrica** (Instrumentación y Sistemas Digitales), en la Facultad de Ingeniería (FIMEE) de la Universidad de Guanajuato, posgrado también reconocido en nivel competencia internacional. Es miembro **SNII nivel I** del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores con No. 33760 y cuenta con reconocimiento de Profesor con **Perfil Deseable PRODEP** por la SEP, ambos desde el 2004, miembro del **Cuerpo Académico nivel Consolidado**, Óptica, Sistemas Complejos e Innovación, UDG CA-



1038, ha impartido más de 45 diferentes cursos de docencia. Cuenta con más de **65 artículos** con riguroso arbitraje, que tienen más de **550 citas**, ha participado en más de **50 congresos** o eventos académicos y tiene la coautoría y registro de las Patentes No. 311785 y No. 407815 en IMPI y No. P201930480 en OPEM. Desde el 2011 es **Profesor Investigador Titular C**, del 2009 al 2012 fue Jefe del Departamento y del 2012 al 2016 fue **Secretario Académico** del Centro Universitario de los Lagos de la Universidad de Guadalajara, es Jefe del Laboratorio de Óptica, Sistemas Complejos e Innovación de la Universidad de Guadalajara.

Efecto del crecimiento de la cadena alquímica en la descomposición unimolecular de sustitutos de biodiésel.

Effect of alkyl chain growth in the unimolecular decomposition of biodiesel substitutes.

Alfredo Quinto Hernández* (1).

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Calzada Tecnológico No. 27, Zacatepec, Morelos, 62780
alfredo.qh@zacatepec.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 22, 2024; aceptado en octubre 11, 2024.

Resumen.

El presente trabajo aborda la disociación unimolecular en fase gaseosa del Formiato de Etilo y Acetato de Etilo a 193 nm, usando Espectroscopia Translacional de Fotofragmentación (PTS) basada en radiación sincrotrón VUV. El Formiato de Etilo y Acetato de Etilo son sustitutos de biodiésel de cadena corta y saturada, los cuales se caracterizan por una estructura molecular análoga a la de los componentes “reales” del biodiésel. Se obtuvieron datos de Tiempo de Vuelo (TOF) para diversos fragmentos resultantes de las disociaciones unimoleculares de los ésteres de etilo. Los datos TOF fueron simulados para crear distribuciones de energía translacional ($P(E_T)$) que permitieron identificar canales de disociación primaria. Estos canales son comparados para explorar la complejidad de las reacciones, como resultado del crecimiento de la cadena alquímica entre el Formiato de Etilo y el Acetato de Etilo. Nuestro análisis permitió establecer que mientras en la disociación unimolecular del Formiato de Etilo se presentan reacciones simples de eliminación de Hidrógeno atómico, en el Acetato de Etilo se logran observar reacciones más complejas incluyendo una disociación sincrónica de tres cuerpos. Este tipo de reacciones son raramente vistas en la naturaleza.

Palabras claves: Biodiésel, fragmentación láser, radiación sincrotrón, reacciones unimoleculares.

Abstract.

The present work focuses on the unimolecular dissociations of Ethyl Formate and Ethyl Acetate at 193 nm in the gas phase, using VUV synchrotron radiation-based Photofragmentation Translational Spectroscopy (PTS). Ethyl Formate and Ethyl Acetate are short-chain and saturated biodiesel substitutes, whose molecular structure is analogous to that of the “real” biodiesel components. Time-of-Flight (TOF) data were recorded for the various fragments resulting from the unimolecular dissociations of the ethyl esters. The TOF data were simulated to construct translational energy distributions ($P(E_T)$) thus allowing identification of primary dissociation channels. Once compared, the $P(E_T)$ distributions allowed distinguish the complexity of such reactions, as a result of the alkyl chain growth between Ethyl Formate and Ethyl Acetate. Our analysis allowed us to establish that while the unimolecular dissociation in Ethyl Formate simple atomic Hydrogen elimination reactions occur, in Ethyl Acetate more complex reactions can be observed including a synchronous three-body dissociation. This type of reaction is rarely seen in nature.

Keywords: Biodiesel, laser fragmentation, synchrotron radiation, unimolecular reactions.

1. Descripción de la conferencia.

El uso ubicuo de combustibles fósiles ha tenido consecuencias negativas en el medio ambiente, y en particular en el cambio climático que enfrentamos actualmente. Esto nos ha llevado a plantear nuevas estrategias para producir energía limpia, renovable y sostenible. El biodiésel ha emergido como un potencial combustible para contribuir a satisfacer la demanda de energía con estas características deseables, dada su capacidad de reemplazo al diésel. Sin embargo, para hacer que el biodiésel sea un combustible competitivo y eficiente es necesario una comprensión detallada de los procesos químicos que ocurren durante su uso. Cualquier reacción química que involucre el biodiésel es compleja, debido a su tamaño y estructura electrónica molecular. La complejidad de las reacciones del biodiésel se asocia a los siguientes factores, pues el biodiésel

- 1) es una mezcla de ésteres metílicos o etílicos con cadenas largas de átomos de carbono, lo que induce múltiples reacciones, incluyendo reacciones de disociación unimolecular, oxidación, isomerización, polimerización, abstracciones y adiciones de hidrógeno atómico entre otras, (Westbrook et al., 2011),
- 2) presenta un alto contenido de oxígeno, así como insaturaciones y ramificaciones en sus componentes,
- 3) produce diversos precursores químicos reactivos en sus diferentes etapas de uso, desde descomposiciones unimoleculares a bajas temperaturas hasta la combustión que puede registrarse hasta 2600 K (Lu et al., 2011), y
- 4) tiene contacto instantáneo (o sus productos reactivos) con superficies metálicas del motor, lo que potencialmente inducen subsecuentemente a reacciones de corrosión, o producción de partículas como el hollín.

Este trabajo presenta información sobre las principales reacciones de disociación unimolecular en las moléculas “modelo” o sustitutos de biodiésel Formiato de Etilo y Acetato de Etilo (**Fig. 1**). Su menor peso molecular permite simplificar el estudio de los componentes saturados etílicos “reales” contenidos en el biodiésel. Así, la información resultante es relevante para explicar la química de disociación del biodiésel. La diferencia molecular entre Formiato de Etilo y Acetato de Etilo reside en el crecimiento de su cadena alquílica. Para inducir la disociación unimolecular de los ésteres se empleó una fotólisis a 193 nm en un ambiente libre de colisiones, usando PTS.

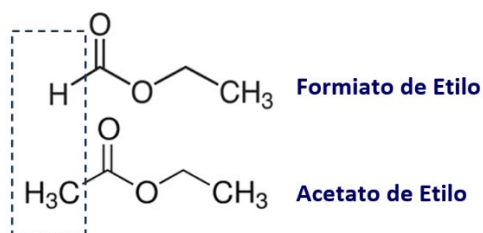


Figura 1. Estructura molecular del Formiato de Etilo y Acetato de Etilo. En el recuadro en líneas discontinuas se enfatiza el crecimiento de la estructura alquílica.

2. Métodos.

Los experimentos se llevaron a cabo en el *Chemical Dynamics Beamline 21A* del *National Synchrotron Radiation Research Center* (NSRRC) en Hsinchu, Taiwán. La fotodisociación de cada éster requirió la producción de su respectivo haz molecular supersónico. Para esto, se prepararon mezclas independientes de 10% de Formiato de Etilo en Helio y 10% de Acetato de Etilo en contenedores, para luego usarse para formar haces moleculares enfriados. Esto se logra al expandir los gases al vacío a través de una válvula pulsada con una contrapresión ~1000 Torr al ingresar a una cámara fuente (**Fig. 2**). La máquina de haces cruzados fue adaptada para la ejecución de experimentos de fotofragmentación utilizando una cámara fuente giratoria con un detector fijo. Una descripción de la máquina se encuentra disponible (Lin et al., 2002). El haz molecular cruza un láser de excímero de 193 nm no polarizado en ángulo de 90°. La potencia del láser se dosificó asegurando que los espectros TOF grabados no fueran resultado de procesos multifotónicos. Los fotofragmentos neutros viajaron 10.05 cm a través de dos cámaras separadas

con diferencia de presión antes de su ionización por un haz de radiación de sincrotrón VUV. Este haz se cruza en ángulo recto con el eje TOF en una cámara de ultra alto vacío. Los fotofragmentos ionizados fueron seleccionados de acuerdo a su relación masa-a-carga (m/z) por un filtro cuadrupolo de masa (QMF), antes de llegar a contarse por un detector Daly. Los tiempos de vuelo de los fotofragmentos ionizados se representan en diagramas TOF. Los datos experimentales TOF obtenidos se ajustaron usando métodos de convolución hacia adelante usando algoritmos vía los softwares PHOTRAN (Harich, 2003) o CMLAB3 (Harich, 1989).

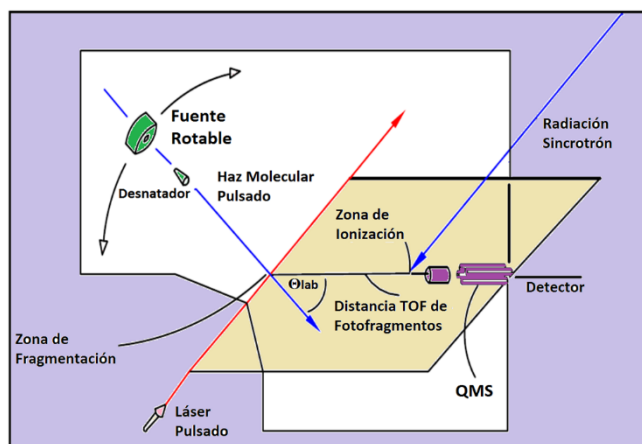


Figura 2. Experimento para la fotofragmentación por Espectroscopia Translacional de Fotofragmentación del Formiato de Etilo y Acetato de Etilo a 193 nm.

Ambos programas simulan los espectros TOF basados en propuestas de distribuciones de energía traslacional, $P(E_T)$, ingresadas por el usuario. Por conservación de energía fue posible la identificación de canales primarios de la fotofragmentación de las moléculas en Figura 1, estimando la Energía Traslacional E_T de la fotofragmentación,

$$E_T = h\nu_{\lambda=193\text{nm}} - D_0 - E_{\text{int}} \quad (1)$$

donde $h\nu_{\lambda=193\text{nm}} = 148.14$ Kcal/mol es la energía depositada en los ésteres para lograr la fragmentación, D_0 es la energía de disociación de los ésteres, y E_{int} es la energía interna de los fragmentos resultantes.

3. Desarrollo.

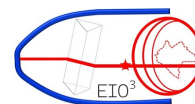
A. Fotofragmentación de Formiato de Etilo: Liberación de Hidrógeno atómico

El espectro TOF de $m/z=+1$ (H) a un ángulo de laboratorio $\Theta_{\text{lab}}=50^\circ$, se muestra en la **Fig. 3**, con una $h\nu_{\text{sincrotrón}}=16.83$ eV. Esta energía es relativamente superior a la energía de ionización de H, reportado en 13.59 eV (NIST Chemistry WebBook). El espectro TOF se ajustó de manera iterativa hasta que la curva de distribución de liberación de energía traslacional ($P(E_T)$) en el centro de masas fue construida (Figura 4). Para la reacción de liberación de hidrógeno atómico en ecuación (2)



donde $D_0=97.2$ Kcal/mol (Balla et al., 2017), es posible estimar que $E_T=50.94$ Kcal/mol, así coincidiendo con el resultado experimental de la **Fig. 4**. En esta figura se observa que la línea continua color verde cae en un valor de 52 Kcal/mol, identificándose así la reacción en ecuación (2).

B. Fotofragmentación de Acetato de Etilo: Disociación sincrónica de Tres cuerpos.



La reacción en ecuación (3), fue verificada como disociación sincrónica de 3 cuerpos,

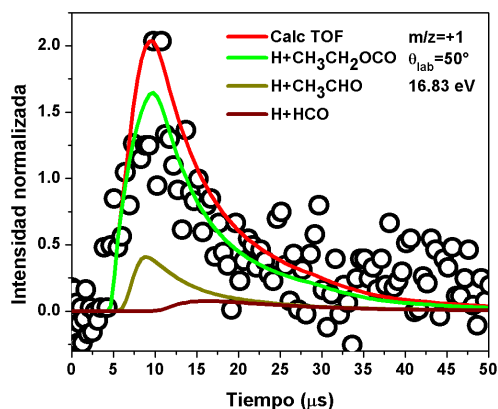
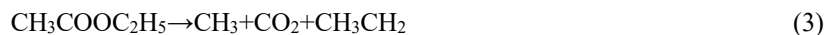


Figura 3. Espectro TOF para $m/z=+1$ (H). Los datos TOF se representan con círculos abiertos y el ajuste con línea color verde sugiera la presencia de la reacción en la ecuación (2).

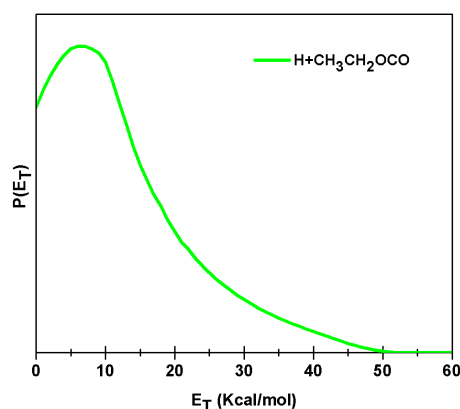


Figura 4. Distribución de energía Translacional del canal primario en ecuación (2) usando CMLAB3.

En la **Fig. 5** se muestran las distribuciones primarias de energía translacional $P(E_T)$ asociadas a los fragmentos a) $m/z=+15$, b) $m/z=+44$ y $m/z=+29$ provenientes de la disociación unimolecular del Acetato de Etilo. Estas distribuciones surgen para obtener una simulación completa de sus respectivos datos TOF (no mostrados aquí). Las liberaciones de energía translacional máxima $E_T^{\max}$ se han determinado en 12.5, 39 y 12.5 kcal/mol, para los fragmentos $m/z=+15$ (CH_3), $m/z=+29$ (CH_3CH_2), y $m/z=+44$ (CO_2); respectivamente. La adición de los valores máximos de E_T de cada fragmento permiten estimar un E_T total, equivalente a 64 kcal/mol, un valor bastante próximo a la energía translacional disponible esperado (78.14 kcal/mol), considerando el nivel de disociación energético D_0 situado en 70 kcal/mol (Hints et al., 1988). Este resultado es aceptable dada las condiciones experimentales presentadas en este trabajo y que no existe un valor teórico riguroso de tal disociación.

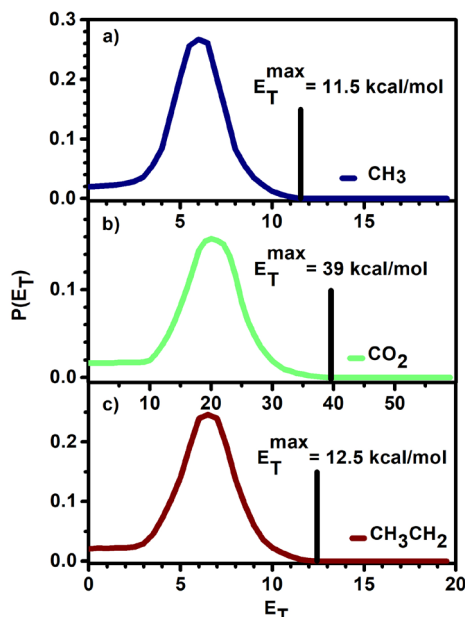
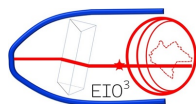


Figura 5. Distribuciones $P(E_T)$ para los fragmentos a) $m/z=+15$, b) $m/z=+44$ y c) $m/z=+29$, correspondientes a CH_3 , CO_2 y CH_3CH_2 .

Conclusiones.

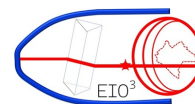
Se realizó un estudio de fotofragmentación del Formiato de Etilo y el Acetato de Etilo a 193 nm en condiciones libre de colisión, en el cual se logró determinar reacciones primarias de eliminación de hidrógeno atómico y de disociación sincrónica de tres cuerpos, respectivamente.

Créditos.

El autor agradece el apoyo financiero que el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) otorgó al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Zacatepec, en colaboración con la Universidad de Sonora, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y la Universidad de Oxford, bajo el Proyecto Ciencia de Frontera No. 549 489 para la realización del presente trabajo. Proyecto aprobado por el FORDECYT – PRONACES.

Referencias bibliográficas.

- Balla, R., Muthaiah B. and Arathala (2017).** *Experimental and RRKM Investigations on the Degradation of Ethyl Formate*. ChemPubSoc Europe, 2, 11603-11615.
- Harich, S. A. (2003).** *PHOTRAN*. University of California, Santa Barbara.
- Harich, S. A. (1989).** *CMLAB3, A program for forward convolution analysis of photodissociation*. University of California, Santa Barbara.
- Hints, E. J., Wodtke, A. M., Lee, Y. T. (1988).** *Infrared Multiphoton Dissociation of Ethyl and Methyl Acetate*. Journal of Physical Chemistry, 92, 5379-5387.



Lin, J. J., Chen, Y., Lee, Y. Y., Lee, Y. T., Yang, X. M. (2002). *Photodissociation dynamics of CH₃Cl at 157.6 nm: Evidence for CH₂($\tilde{X}^3B_1/\tilde{a}^1A_1$)+HCl product channels.* Chemical Physics Letters, 361, 374–382.

Lu, X., Han, D., & Huang, Z. (2011). *Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion model.* Progress in energy and combustion science, 37(6), 741-783.

NIST Chemistry WebBook. <http://webbook.nist.gov>

Westbrook, C. K., Naik, C. V., Herbinet, O., Pitz, W. J., Mehl, M., Sarathy, S. M., Curran, H. J. (2011). *Detailed chemical kinetic reaction mechanisms for soy and rapeseed biodiesel fuels.* Combustion and Flame, 158(4), 742-755.

Biografía del investigador.



Alfredo Quinto Hernández es Profesor-Investigador Titular “C” del Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Zacatepec. Obtuvo su grado de Doctor of Philosophy en la Universidad de California, Santa Barbara (Estados Unidos de América) y realizó Investigación Posdoctoral en el Departamento de Química de la Universidad de Oxford (Reino Unido). Ha sido investigador visitante en varios centros de investigación en Estados Unidos, Asia y Europa. Sus líneas de investigación se centran en la síntesis y descomposición de biocombustibles, determinación de su capacidad corrosiva, así como en la biorrefinación de desechos lignocelulósicos para la obtención de productos de alto valor agregado. Para esto utiliza técnicas basadas en Fotoquímica, Fotofísica, Termo/Electrocatalisis, Radiación Sincrotrón, Fisicoquímica Teórica Molecular y Ciencia de Corrosión. Actualmente su grupo de investigación realiza Proyectos de Investigación en Ciencia de Frontera financiados por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos (CCYTEM). Su contribución a la formación de Recursos Humanos incluye 1 Investigador en Repatriación CONAHCYT, 2 Investigadoras Posdoctorales CONAHCYT, 2 Tesistas Doctorales, 14 Tesistas de Maestría y 20 Tesistas de Licenciatura. Ha sido becario de la Academia Mexicana de Ciencias, la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia, UCMEXUS, *The Royal Society of London* y CONAHCYT. Actualmente es Investigador Nacional Nivel 1 del SNII – CONAHCYT. Ha sido distinguido con la *Newton International Fellowship de The Royal Society*, el *Graduate Dissertation Award* de la Universidad de California, Santa Barbara, y el Premio Nacional de la Juventud en Actividades Académicas otorgado por el Presidente de México.

Electrofotónica: generando y manipulando luz y electricidad en un microchip.

Electrophotonics: generating and manipulating light and electricity on a microchip.

Denise Estrada Wiese* (1).
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
denise.estrada@inaoe.mx.

Jomahi Enrique Zamudio Interian (2). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,
enrique.zamudio@inaoe.mx.

Alfredo A. González Fernández (3). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, aaglz@inaoe.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2024; aceptado en septiembre 30, 2024.

Resumen.

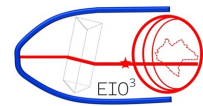
La electrofotónica (Ef), un área emergente que combina las ventajas de la microelectrónica y la fotónica integrada para generar, detectar y manipular fotones y electrones simultáneamente, ha permitido el desarrollo de dispositivos innovadores en un microchip de silicio que superen las deficiencias de los circuitos integrados convencionales. En este trabajo se aborda el desarrollo de un sistema Ef integrado formado por tres componentes principales: una fuente de luz basada en óxido de silicio rico en silicio (SRO), una guía de onda y un fotodetector; todos integrados monolíticamente en un microchip de Si. Se discuten los desafíos asociados, como la alta demanda de voltaje para la emisión de luz y la necesidad de reducir los costos de algunos procesos de fabricación del sistema Ef, en particular del recubrimiento de la guía de onda. Las soluciones que se presentan para abordar dichos retos destacan los avances recientes en la tecnología Ef proponiendo enfoques para optimizar su fabricación y rendimiento.

Palabras claves: Fotónica integrada, fuentes de luz monolíticas, guías de onda integradas microelectrónica, silicio.

Abstract.

Electrophotonics (Ef), an emerging field that combines the advantages of microelectronics and integrated photonics to simultaneously generate, detect, and manipulate photons and electrons, has enabled the development of innovative devices on a silicon microchip to overcome the deficiencies of conventional integrated circuits. This paper addresses the development of an integrated Ef system composed of three main components: a light source based on silicon-rich silicon oxide (SRO), a waveguide, and a photodetector, all monolithically integrated into a silicon microchip. The associated challenges are discussed, such as the high voltage demand for light emission and the need for cost reduction of certain manufacturing processes of the Ef system, particularly the waveguide cladding. The proposed solutions to these challenges highlight recent advancements in Ef technology and suggest approaches to optimize its fabrication and performance.

Keywords: Integrated photonics, integrated waveguides, microelectronics, monolithic light sources, silicon.



1. Introducción.

Los avances en la tecnología y el desarrollo de microchips, también llamados circuitos integrados, han llevado al progreso de innumerables aplicaciones para cubrir las necesidades crecientes de la sociedad actual. Desde los elementos más básicos de la microelectrónica, como los transistores, hasta sistemas más complejos, como las supercomputadoras, todos están regidos por los estándares de la tecnología CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) basada en uno de los materiales más abundantes de la Tierra, el silicio (Si). Actualmente, la evolución de la industria de los chips semiconductores se enfrenta a desafíos significativos como las limitaciones físicas en la miniaturización de los transistores y la demanda del aumento de densidad de estos en los circuitos integrados (Zhu et al., 2023). Algunos de estos problemas pueden ser abordados reemplazando el uso de electrones por fotones en los dispositivos abriendo así oportunidades para el campo de la fotónica integrada. Esta presenta notables ventajas como una mayor velocidad de transmisión de datos, menor pérdida de señal y mayor ancho de banda proveyendo diferentes funcionalidades a las de su contraparte electrónica. Sin embargo, la falta de compatibilidad con la tecnología CMOS existente y las dificultades para integrar todos los componentes en los circuitos fotónicos exhiben retos que llevan a la necesidad de desarrollar nuevas aproximaciones. Es así, que surge la Electrofotónica (Ef) como una solución que pretende aprovechar las ventajas de la electrónica y la fotónica integrada, combinando elementos de ambas áreas en un mismo chip de Si (Tang et al., 2023)(González-Fernández et al., 2016). Los sistemas o circuitos Ef se caracterizan por su carácter monolítico, i.e. todos sus elementos son integrados en un mismo sustrato de Si y fabricados mediante técnicas compatibles con CMOS, sin la necesidad de acoplar elementos fabricados por separado. Un sistema Ef básico se conforma por una fuente de luz, una guía de onda y un fotodetector, como se muestra en el esquema de la **Fig. 1**. Aquí, al aplicar un voltaje a la fuente de luz, por efecto de electroluminiscencia el material activo al ser excitado emite luz. Esta luz viaja a través de la guía de onda hasta ser transmitida hacia un fotodetector que transforma la luz en una corriente eléctrica. Al poner en contacto la superficie de la guía de onda con algún analito es posible utilizar este sistema Ef como un sensor, ya que la presencia del analito modifica la propagación de la luz desde la guía de onda hasta el fotodetector, cambiando en consecuencia la intensidad de la fotocorriente resultante. De esta manera es posible aprovechar las propiedades de la luz para generar, transmitir y detectar señales ofreciendo la oportunidad de realizar mediciones rápidas y no invasivas en tiempo real con dispositivos miniaturizados.

En nuestro grupo de investigación se ha desarrollado y fabricado ya un sistema Ef completo en un mismo chip de Si, compatible con la tecnología CMOS y se ha demostrado su aplicación como un sensor de índice de refracción y como detector de biomoléculas(González-Fernández et al., 2019)(Pérez-Díaz et al., 2023). Para lograrlo fue necesario superar una de las principales barreras para la fotónica en silicio: la carencia de un dispositivo emisor de luz basado en este elemento, dado su carácter de semiconductor de banda indirecta. Así, hemos creado una fuente de luz monolíticamente integrable basada en un material con nanoestructuras que presentan fenómenos cuánticos que resultan en emisión de luz. Este material se conoce como óxido de silicio rico en silicio (SRO por sus siglas en inglés) (González-Fernández et al., 2021). Para transmitir la luz, el emisor se acopla a una guía de onda formada por un núcleo de nitruro de silicio (Si_3N_4) y un recubrimiento de óxido de silicio (SiO_2), que a su vez conduce la radiación (luz) a un fotodetector, que consiste en un fotodiodo de unión pn, todo integrado en un mismo sustrato de Si. Sin embargo, a pesar de haber fabricado con éxito un sistema Ef todavía hay retos importantes que enfrentar. Uno de ellos tiene que ver con la fuente de luz, a la que se necesita aplicar altos valores de voltaje para lograr la emisión de luz, aumentando así los requerimientos energéticos del sistema. Para solventar esto se ha optado por diversas estrategias que incluyen: a) el uso de sustratos de Si texturizados para ayudar a promover la inducción de cargas en el material activo, el SRO (Pérez-Díaz et al., 2022) (Alarcón-Salazar et al., 2018); y b) el intercalado de capas de SRO con diferentes propiedades eléctricas y emisivas(Alarcón-Salazar et al., 2017). Actualmente estamos trabajando en aprovechar la combinación de ambas aproximaciones para reducir los voltajes necesarios para operar las fuentes de luz integradas y aquí se presentarán algunos de los resultados obtenidos hasta ahora.

Otro de los desafíos en los que se trabaja actualmente está enfocado en reducir costos y simplificar la fabricación del dispositivo Ef; en específico, del recubrimiento inferior de SiO_2 de la guía de onda. Para asegurar una comunicación eficiente entre los componentes del sistema Ef es fundamental lograr una integración en el mismo plano de la fuente y el núcleo de la guía, como mostrado en la **Fig. 2**. Por esta razón, el recubrimiento inferior de SiO_2 debe estar enterrado en el sustrato implicando la creación de una cavidad en el Si, la cual se rellena posteriormente con SiO_2 . Esto que suena tan simple representa un gran desafío tecnológico, ya que los métodos de fabricación comúnmente utilizados

pueden alterar la topografía del recubrimiento inferior, presentando desniveles, y afectando la transmisión de luz a través de toda la guía de onda causando pérdidas que, en consecuencia, perjudican el rendimiento del sistema Ef (ver Fig. 2).

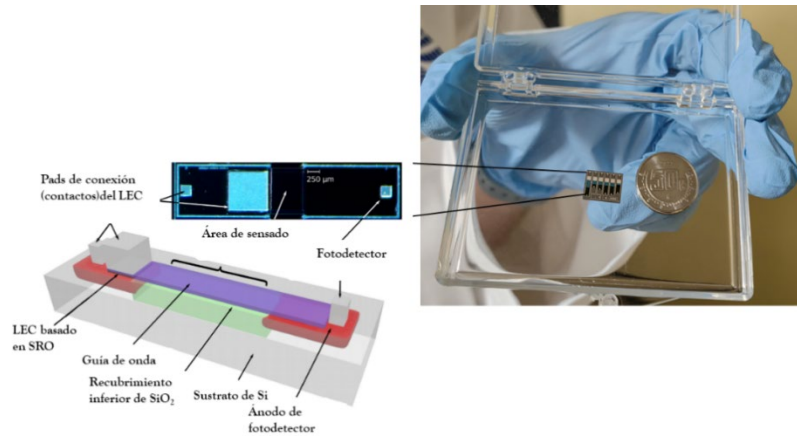


Figura 1. Esquema y fotografía de un sistema electrofotónico que ya se ha fabricado y demostrado su uso como sensor (González-Fernández et al., 2019).

Habitualmente se usan procesos de planarización costosos, como el pulido químico-mecánico, para eliminar los desniveles e imperfecciones generadas en la superficie del SiO_2 . Nosotros proponemos una metodología de planarización más sencilla, más económica y de fácil implementación en cualquier laboratorio de microelectrónica. Este consiste en un pulido mecánico fino (PM) que se logra mediante la interacción de tres elementos: una máquina pulidora, una almohadilla de pulido y una lechada de pulido (Interian, 2024). Los resultados que hemos alcanzado revelan la viabilidad de utilizar la metodología propuesta para obtener superficies planas en el recubrimiento inferior de una guía de onda integrada, estableciendo así una ruta simplificada para la subsecuente fabricación de la guía de onda y el sistema Ef completo.

Para lograr la producción de los sistemas Ef en un microchip son necesarios diversos procesos de microfabricación, mismos que se llevan a cabo en laboratorios especiales llamados “salas limpias”. En estos laboratorios se someten a los sustratos de Si, en forma de obleas, a diferentes procesos como el depósito de materiales, la fotolitografía para definir patrones, el grabado para remover material no deseado, la implantación de iones y procesos de dopado para modificar las propiedades eléctricas del Si u otros materiales. Después de una larga serie de procesos específicos siguiendo una estrategia de integración como la descrita en (González-Fernández et al., 2016) se logra la fabricación de un circuito Ef completo en un chip de Si. No obstante, para implementar los diferentes enfoques de mejora de los componentes individuales del sistema Ef, se fabrican y estudian por separado cada uno ellos, aunque el trabajo realizado tiene siempre en la mira el objetivo global de integrar todos los elementos optimizados en un sistema Ef completo. En este trabajo, presentamos los últimos avances en estos dos aspectos fundamentales de la fabricación de sistemas Ef integrados: la creación de emisores de luz que requieran menores voltajes para su funcionamiento, y la planarización del recubrimiento inferior de las guías de onda que permitan una mejor inserción y transmisión de la luz.

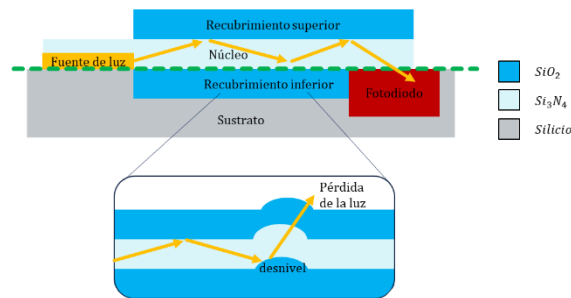
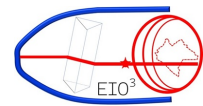


Figura 2. Esquema de la guía de onda en el sistema Ef conformada por un núcleo de Si_3N_4 y un recubrimiento superior e inferior de SiO_2 . En el diagrama inferior se muestra como un desnivel en la superficie del recubrimiento inferior puede causar pérdidas de la luz en el sistema Ef, mostrando la necesidad de planarizar la superficie para lograr una eficiente transmisión de la luz.

2. Fuentes de luz integrables.

2.1 Métodos.

La estructura de la fuente de luz integrable en un sistema Ef tiene la forma de un Capacitor Emisor de Luz (LEC, por sus siglas en inglés), donde una o múltiples capas de SRO son fabricadas sobre un sustrato de Si. Este material puede ser obtenido mediante depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD), y requiere un tratamiento térmico para lograr la formación de nanopartículas de Si en el SRO. La presencia de estas nanopartículas en el material induce centros radiativos responsables de la emisión de luz en un dispositivo LEC cuando una corriente pasa a través del SRO. Es posible fabricar capas de SRO con diferentes características en un mismo proceso de LPCVD al cambiar la relación entre gases precursores (óxido nítrico y silano), obteniendo, por ejemplo, capas con una mayor concentración de exceso de Si, lo que resulta en una mayor conductividad eléctrica en comparación con capas de SRO que tengan un menor exceso de Si. Las de comparativamente menor exceso, sin embargo, suelen presentar propiedades emisivas mayores. Entonces, al alternar capas de SRO con diferentes propiedades se pueden aprovechar determinadas características (mayor emisión, o mayor conductividad), para obtener una estructura total del LEC que balancee estas (Alarcón-Salazar et al., 2017).

En la **Fig. 3** se muestra un esquema del LEC completo donde en el reverso del sustrato de Si y sobre el SRO se deposita una capa de Aluminio (Al) como contactos posterior y superior respectivamente. Al aplicar un voltaje entre los contactos los portadores de carga son transportados a través del SRO, donde excitan a su paso diversos centros radiativos promoviendo la emisión de luz en el material. A este fenómeno se le llama electroluminiscencia (EL). Una estrategia que exploramos para obtener EL a menores voltajes es el texturizado de la superficie del sustrato. Si mediante este proceso se generan estructuras relativamente afiladas en dicha superficie, y se usa una polarización adecuada, es posible aprovechar la acumulación del campo eléctrico en los picos de Si para lograr una mejor inyección de portadores hacia el SRO y obtener así más emisión de luz a menores voltajes. El texturizado del sustrato de Si se puede obtener mediante diversas técnicas como el grabado por iones reactivos (RIE) o el grabado químico asistido por metal (MACE) (Pérez-Díaz et al., 2022).

2.2 Respuesta electro-óptica de los LECs.

La emisión EL en los LECs surge cuando se polariza positivamente el dispositivo con respecto al sustrato de Si (si es tipo p) induciendo una corriente eléctrica desde el sustrato hacia el SRO donde son excitados diversos centros radiativos. Estos se refieren a sitios en la estructura del SRO (defectos, impurezas o inclusiones) donde se facilita la recombinación de electrones y huecos, produciendo así la emisión de luz. Con el flujo de una corriente a través del SRO los electrones son excitados a niveles de energía permitidos más altos introducidos por los centros radiativos. Estos electrones luego regresan a sus estados de energía base, y durante este proceso, liberan la diferencia de energía en forma de fotones, que corresponde a luz visible que podemos observar al encender un LEC con una compuerta de

poli Si semi-transparente, como el mostrado en la **Fig. 4**. Dependiendo de la energía que tengan estos fotones es que podemos ver como emiten los LECs de un color u otro. De hecho, en un material como el SRO, donde los centros radiativos son diversos y de diferente naturaleza, es posible que haya emisión de varios colores simultáneamente, abarcando desde el azul hasta el infrarrojo cercano.

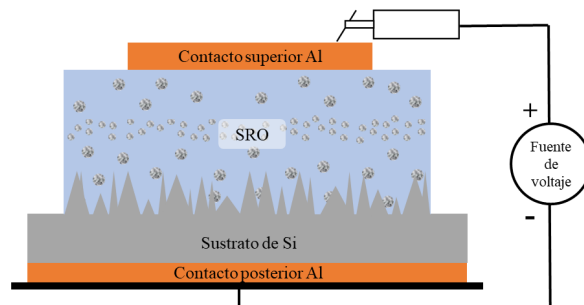
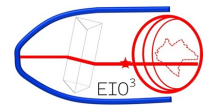


Figura 3. Esquema transversal del capacitor emisor de luz (LEC) formado por una o múltiples capas de SRO sobre un sustrato de Si texturizado. En los extremos superior y posterior se depositan contactos de Aluminio.

Si se mide la intensidad de la luz emitida de cada color (o bien, cada longitud de onda) se pueden obtener espectros de emisión EL como los mostrados en la **Fig. 4**. Aquí, se pueden apreciar tres LECs fabricados con SRO de diferentes características y se muestran como varían sus espectros de EL, mostrando la influencia del contenido de exceso de Si en el SRO en el color de la emisión. En la misma **Fig. 4** también están representados espectros de emisión de fotoluminiscencia (PL) (mismos símbolos y colores, pero más tenues). Este efecto es similar al de EL, con la diferencia de que los centros radiativos son excitados con luz de alta energía (ultravioleta normalmente), en vez de una corriente eléctrica. Los espectros de PL sirven para entender la naturaleza de la emisión, i.e. identificar cuales centros radiativos son excitados para lograr la emisión de luz de una o varias longitudes de onda específicas y se utilizan comúnmente como un método de caracterización de materiales fotoluminiscentes. La luz que se puede observar y medir cuando se hace EL debe pasar por la compuerta semitransparente que permite la excitación eléctrica. Esta influye, a través de su transmitancia, en los espectros que puede apreciar el observador. Sin embargo, se ha encontrado en trabajos previos que las emisiones EL y PL en el SRO son muy similares en su origen, ya que se atribuyen a la excitación de los mismos centros radiativos (Gonzalez-Fernandez et al., 2013).

Como ya se mencionó antes, el principal problema al que nos enfrentamos con los LECs son los altos voltajes que ocupan para emitir luz. Una manera equivalente de representar el voltaje aplicado (V_a) a un material de espesor d es mediante la medida del campo eléctrico ($E = V_a/d$). Históricamente, los primeros LECs que se lograron fabricar requerían de valores alrededor de 10 MV/cm para emitir luz (Fernández et al., 2010). Posteriormente, se implementó la estrategia de incorporar capas alternantes de SRO con diferentes concentraciones de Si para mejorar las propiedades conductivas y emisivas de los LECs con lo que se logró disminuir los valores del campo eléctrico aplicado a un rango de 3 MV/cm a 9 MV/cm (Alarcón-Salazar et al., 2017). Otra aproximación que se exploró para mejorar la inyección de portadores hacia el SRO consistió en utilizar sustratos de Si texturizados, con la cual se necesitaron sólo magnitudes entre 3 MV/cm y 7 MV/cm en comparación de los 6 MV/cm a 8.5 MV/cm requeridos con sustratos lisos (González-Fernández et al., 2021) (Alarcón-Salazar et al., 2018). A pesar de lograr una disminución considerable en el campo eléctrico aplicado a los LECs los requerimientos de energía para operarlos siguen siendo altas. Por ello hemos desarrollado un enfoque que combina el uso de multicapas de SRO y de los sustratos texturizados, siguiendo una configuración como la mostrada en la **Fig. 3**. Las primeras pruebas no tuvieron la respuesta esperada, ya que se encontró que el arreglo de las multicapas de SRO no era el idóneo para cubrir adecuadamente los picos de Si en el sustrato y lograr una mejor inyección de portadores hacia las capas de SRO más emisivas. Sin embargo, recientemente, hemos logrado una mejora significativa en esta dirección al asegurar una total cobertura de los picos de Si con la primera capa de SRO de mayor emisión; seguida de una capa de SRO de mayor conductividad y repitiendo la estructura para obtener un total de cuatro capas de SRO alternantes. Para conseguir esto fue necesario estudiar la rugosidad de los sustratos texturizados mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y encontramos que los LECs fabricados con sustratos que presentaban mayor rugosidad tenían un porcentaje de reducción de voltaje de operación del 70% con respecto a



dispositivos fabricados sobre sustratos lisos. Esto implica que los valores de campo eléctrico necesarios para emitir luz en estos nuevos LECs son de solamente 2.1 MV/cm acercándonos cada vez más hacia dispositivos emisores de luz integrables con requerimientos bajos de energía expandiendo así las posibles aplicaciones de los LECs.

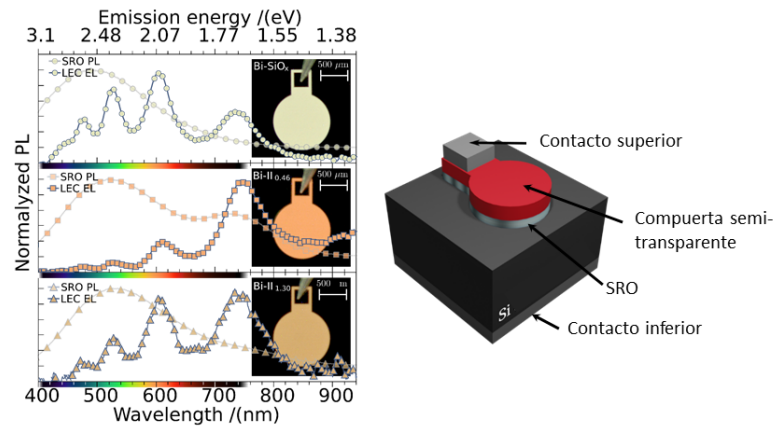


Figura 4. Emisión de luz de LECs de diferentes SRO mostrando las compuertas iluminadas en distintos colores y los espectros de PL de SRO respectivos. A la derecha está esquematizado la estructura y forma de un LEC básico.

3. Planarización de recubrimiento inferior de la guía de onda.

3.1 Métodos.

Para estudiar la planarización del recubrimiento inferior de una guía de onda integrable en un sistema Ef se fabricaron primero cavidades en el sustrato de Si y se rellenaron con SiO_2 . Este proceso (ver **Fig. 5**) comienza con el depósito de una capa de Si_3N_4 donde se definen ventanas con litografía para el subsecuente grabado de Si utilizando KOH. Después, la cavidad es parcialmente llenada mediante un crecimiento de SiO_2 térmico y se termina de llenar mediante el depósito de SiO_2 por la técnica de depósito químico en fase vapor a presión atmosférica (APCVD). Esta combinación de técnicas para el llenado de la cavidad se utiliza para subsanar los problemas que surgen al usar únicamente los métodos individuales; por ejemplo, la aparición del conocido efecto llamado “pico de pájaro” en el crecimiento térmico (Campbell, 2008) o la formación de grietas en el depósito por APCVD de películas de espesores mayores a 1 μm .

Posterior al llenado de la cavidad se desarrolló una metodología de planarización. Con esta se busca pulir mecánicamente la superficie para lograr finalmente un recubrimiento inferior de una guía de onda sin desniveles, de modo que sea más eficiente en la inserción y transmisión de luz en un sistema Ef. Para lo anterior se utilizó una máquina de pulido Strasbaugh (modelo 6DAD-DC) que realiza la rotación, un movimiento traslacional y ejerce presión con una almohadilla de pulido de poliuretano de alta densidad sobre la muestra. Para lograr un efecto abrasivo durante el movimiento se introduce una lechada de pulido formada por nanopartículas abrasivas de óxido de Cerio u óxido de Aluminio disueltas en isopropanol.

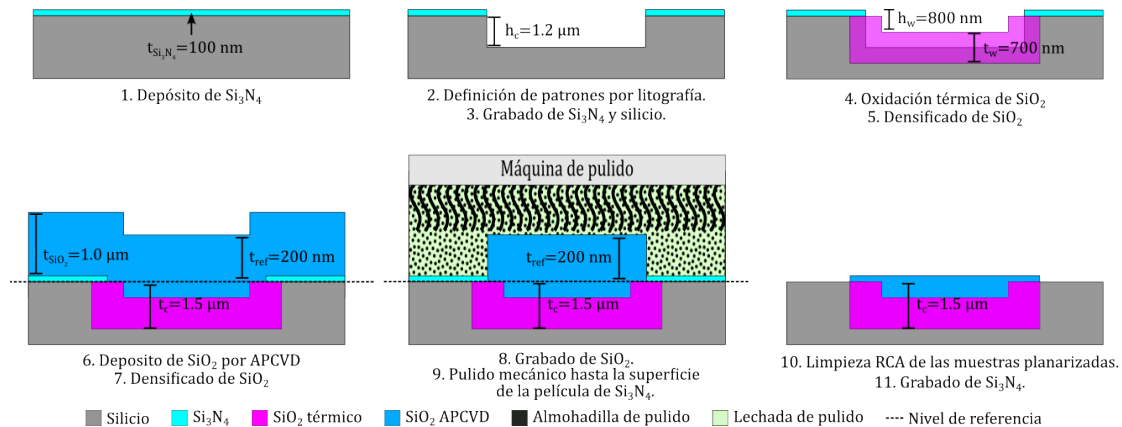
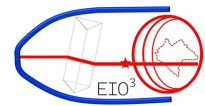


Figura 5. Diagrama esquemático del proceso de fabricación empleado para la creación, el llenado con SiO₂ de una cavidad de Si (Interian, 2024) y planarización mediante un pulido mecánico fino para obtener el recubrimiento inferior de una guía de onda integrada en un sistema Ef.

3.2 Resultados del llenado de cavidades en Si y método de planarización.

Las cavidades fabricadas para albergar al recubrimiento inferior de la guía de onda de un sistema Ef fueron obtenidas al remover, mediante un grabado húmedo con KOH, 1.2 μm del Si expuesto en las ventanas de la capa de Si₃N₄ (ver paso 2 de Fig. 5). Después, las cavidades fabricadas fueron parcialmente llenadas con 700 nm de SiO₂ por medio de una oxidación térmica en un ambiente de vapor de agua, conocida como una oxidación húmeda. En este proceso el SiO₂ crece a partir del Si del sustrato, lo que causa un aumento de la profundidad de las cavidades, en nuestro caso de 1.2 μm a 1.5 μm (ver paso 4 en Figura 5). En trabajos previos se ha estudiado por simulaciones el espesor mínimo que debe tener el recubrimiento inferior de la guía de onda en el sistema Ef para evitar pérdidas hacia el sustrato de Si. Aquella medida corresponde a 1.5 μm de profundidad de la cavidad, misma que, después de la oxidación húmeda, se encuentra cubierta por una capa uniforme de 700 nm de SiO₂ térmico. Sin embargo, el proceso anterior introduce un efecto conocido como “pico de pájaro” en la interfaz Si/SiO₂/Si₃N₄, provocado por las tensiones generadas debido a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica de estos materiales (Campbell, 2008). Este “pico de pájaro” resulta en un primer desnivel que rompe con la planaridad de la superficie del recubrimiento inferior. Finalmente, el llenado de las cavidades se completó al depositar 1 μm de SiO₂ por APCVD y para mejorar la calidad de los SiO₂ depositados se sometieron las muestras a un recocido térmico, lo que fomentó la reordenación atómica dentro del SiO₂ logrando así la reducción de defectos como vacancias o impurezas atrapadas. Posteriormente se tomaron imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar el llenado adecuado de las cavidades. En la Fig. 6 se muestra una imagen SEM de una cavidad rellena de SiO₂ donde se observan desniveles altos y bajos indicados a partir de una línea imaginaria que utilizamos como referencia para indicar el nivel hasta donde se busca aplanar la superficie mediante la planarización.

Recordemos que es necesario remover los desniveles mencionados para lograr fabricar una guía de onda plana y promover una inyección eficiente de la luz en el sistema Ef. Con ese fin implementamos la secuencia de planarización del recubrimiento inferior de la guía de onda esquematizada a partir del paso 8 de la Fig. 5. Se comenzó enmascarando las superficies de las cavidades usando litografía y con un grabado húmedo se removieron los desniveles altos. Con este paso se redujeron las dimensiones del SiO₂ a pulir y, por tanto, disminuyeron los tiempos de operación del pulido mecánico. El pulido mecánico es un proceso capaz de desbastar los desniveles de una superficie a través de las interacciones físicas que existen entre la muestra y los tres elementos que lo conforman: la máquina de pulido, la almohadilla de pulido y la lechada de pulido. Para lograr un proceso óptimo estudiamos la influencia de estos tres elementos en los resultados de la planarización y encontramos lo siguiente: La máquina de pulido regula dos parámetros, la presión ejercida sobre la oblea y la velocidad relativa de rotación entre la muestra y el soporte de la máquina. A mayor presión o velocidad, mayor será la razón de pulido. Por su parte, la almohadilla de pulido juega un papel importante según su dureza. Las almohadillas más duras permiten una planarización más global, mientras que las más blandas aseguran un mayor contacto con la superficie de la muestra. Asimismo, son las encargadas de retener



y distribuir uniformemente la lechada de pulido durante el proceso. La lechada de pulido es una suspensión coloidal con partículas abrasivas de tamaños y formas específicas y encontramos que, la razón de pulido incrementa con el tamaño de las partículas y su concentración en la lechada.

La planaridad de la superficie del recubrimiento inferior depende en gran medida de las condiciones y parámetros utilizados durante la planarización. En este estudio, las condiciones óptimas que encontramos incluyeron el uso de almohadillas de poliuretano de alta densidad y lechadas de pulido compuestas de isopropanol con partículas de óxido de Aluminio. Las razones de pulido obtenidas fueron de aproximadamente 50 nm/min para el SiO₂ y 15 nm/min para el Si₃N₄. Utilizando estas condiciones se lograron pulir satisfactoriamente todos los desniveles que presentaban las muestras, como se puede apreciar en la Figura 6 (derecha). Como resultado de todo el proceso, se logró obtener un recubrimiento inferior de la guía de onda completamente planarizado, listo para su integración en el sistema Ef.

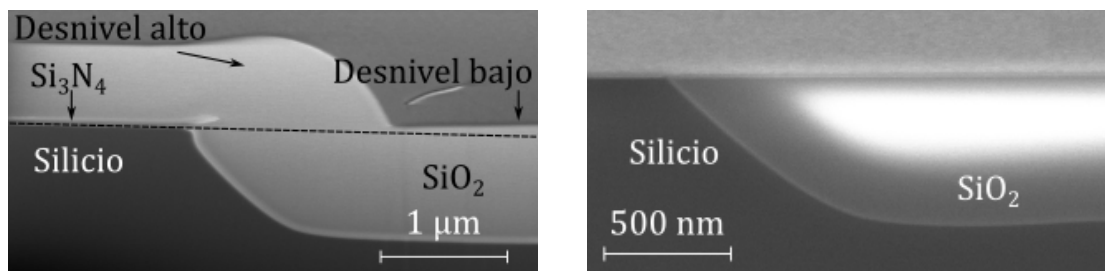


Figura 6. Imágenes SEM de los resultados experimentales del llenado de las cavidades con SiO₂ (izquierda) y de la planarización del recubrimiento inferior de la guía de onda para un sistema Ef (derecha). La línea punteada indica el nivel de referencia de la planaridad buscada.

Conclusiones.

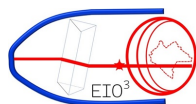
Los resultados presentados en este trabajo ayudan a demostrar que la integración monolítica de elementos fotónicos en obleas de silicio, utilizando materiales y técnicas compatibles con la tecnología de fabricación de circuitos microelectrónicos, es viable para integrarlos en circuitos convencionales. Se muestran avances en la superación de algunos de los desafíos más importantes, como la reducción de los voltajes necesarios para la emisión de luz en fuentes basadas en silicio y la optimización de la planarización en los procesos de fabricación de las guías de onda, esenciales para minimizar las pérdidas de señal.

Las estrategias de reducción del voltaje de encendido permitieron operar emisores de luz integrados con la aplicación de campos tan bajos como 2.1 MV/cm, lo que habilita el diseño de dispositivos con voltajes de encendido entre 5 V y 15 V, valores perfectamente manejables en circuitos integrados. Además, los resultados indican que es factible emplear técnicas de bajo costo para fabricar elementos necesarios para la adecuada transmisión de la luz generada, gracias a la obtención de una superficie planar sin desniveles significativos, lo que facilita la integración del recubrimiento inferior de una guía de onda en el mismo plano en el que se fabrican los emisores de luz.

Estos dos avances representan pasos importantes hacia el desarrollo de una tecnología viable y de bajo costo para la integración monolítica de sistemas capaces de trabajar simultáneamente con luz y electrones, todo ello en un mismo sustrato de silicio y mediante un único proceso de fabricación.

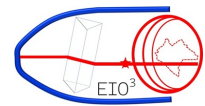
Créditos.

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca de maestría otorgada.



Referencias bibliográficas.

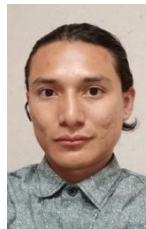
- Alarcón-Salazar, J., Vásquez-Agustín, M. A., Quiroga-González, E., Zaldívar-Huerta, I. E., & Aceves-Mijares, M. (2018). *Comparison of light emitting capacitors with textured and polished silicon substrates towards the understanding of the emission mechanisms*. Journal of Luminescence, 203(June), 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.06.060>
- Alarcón-Salazar, J., Zaldívar-Huerta, I. E., Morales-Sánchez, A., Domínguez, C., Pedraza-Chávez, J., & Aceves-Mijares, M. (2017). *Enhancing emission and conduction of light emitting capacitors by multilayered structures of silicon rich oxide*. Sensors and Actuators, A: Physical, 265, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.08.047>
- Campbell, S. A. . (2008). *Fabrication engineering at the micro and nanoscale*. Oxford University Press.
- Fernández, A. A. G., Mijares, M. A., Sánchez, A. M., & Leyva, K. M. (2010). *Intense whole area electroluminescence from low pressure chemical vapor deposition-silicon-rich oxide based light emitting capacitors*. Journal of Applied Physics, 108(4). <https://doi.org/10.1063/1.3465335>
- González-Fernández, A. A., Aceves-Mijares, M., Pérez-Díaz, O., Hernández-Betanzos, J., & Domínguez, C. (2021). *Embedded silicon nanoparticles as enabler of a novel cmos-compatible fully integrated silicon photonics platform*. Crystals, 11(6). <https://doi.org/10.3390/cryst11060630>
- González-Fernández, A. A., Hernández-Montero, W. W., Hernández-Betanzos, J., Domínguez, C., & Aceves-Mijares, M. (2019). *Refractive index sensing using a Si-based light source embedded in a fully integrated monolithic transceiver*. AIP Advances, 9(12). <https://doi.org/10.1063/1.5130780>
- González-Fernández, A. A., Juvert, J., Aceves-Mijares, M., & Domínguez, C. (2016). *Monolithic Integration of a Silicon-Based Photonic Transceiver in a CMOS Process*. IEEE Photonics Journal, 8(1). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2505144>
- Gonzalez-Fernandez, A. A., Juvert, J., Aceves-Mijares, M., Llobera, A., & Dominguez, C. (2013). *Influence by layer structure on the output EL of CMOS compatible silicon-based light emitters*. IEEE Transactions on Electron Devices, 60(6), 1971–1974. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2258158>
- Interian, J. E. Z. (2024). *Planarización del recubrimiento inferior de una guía de onda planar sobre un sustrato de silicio*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Pérez-Díaz, O., Estrada-Wiese, D., Aceves-Mijares, M., & González-Fernández, A. A. (2023). *Functionalization of a Fully Integrated Electrophotonic Silicon Circuit for Biotin Sensing*. Biosensors, 13(3). <https://doi.org/10.3390/bios13030399>
- Pérez-Díaz, O., González-Fernández, A. A., & Aceves-Mijares, M. (2022). *Study of silicon rich oxide light emitter capacitors using textured substrates by metal assisted chemical etching*. Journal of Luminescence, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119054>
- Tang, Y., Luo, Q., Chen, Y., & Xu, K. (2023). *All-Silicon Photoelectric Biosensor on Chip Based on Silicon Nitride Waveguide with Low Loss*. Nanomaterials, 13(5). <https://doi.org/10.3390/nano13050914>
- Zhu, F., Xu, P., & Zong, J. (2023). *Moore's Law: The potential, limits, and breakthroughs*. Applied and Computational Engineering, 10(1), 307–315. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/10/20230038>



Biografía de los investigadores.



La **Dra. Denise Estrada Wiese** es licenciada en Ciencias (Física) por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos; maestra en Ciencias (Física) por la Universidad Nacional Autónoma de México y Doctora en Ciencias (Física) por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Realizó un postdoctorado en el Instituto de Materiales de Barcelona en España donde trabajó en el diseño y fabricación de estructuras fotónicas 1-D. Posteriormente se incorporó como investigadora en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona para desarrollar microgeneradores termoeléctricos basados en Silicio. Desde 2021 es Investigadora Titular A en la Coordinación de Electrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica enfocando su investigación en el desarrollo de dispositivos fotónicos basados en silicio para aplicaciones en sistemas electrofotónicos. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1 del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT).



El **Mtro. Jomahi Enrique Zamudio Interian** obtuvo su título de Ingeniero en el Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México, en 2021. Posteriormente, continuó su formación académica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), donde completó su maestría en 2024. Actualmente, es candidato a doctor en la misma institución. Su investigación se enfoca en la integración de la electrónica y la fotónica, contribuyendo al desarrollo de dispositivos de vanguardia basados en estructuras fotónicas de silicio, con aplicaciones innovadoras en sistemas electrofotónicos.



El **Dr. Alfredo González Fernández** es licenciado en Ciencias de la Electrónica por la Universidad Autónoma de Puebla; Maestro en Ciencias con especialidad en Microelectrónica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE); y Doctor en Nanociencias por la Universidad de Barcelona. Trabajó como investigador en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona, España; fue Investigador Asociado en el grupo de Nanofotónica de la Universidad de Saint Andrews, Escocia; ha sido Marie Curie Fellow de la Unión Europea, y pertenece al padrón de expertos del área de Micro y Nanociencias y Tecnologías de la Comisión Europea. Actualmente desarrolla sus labores de investigación en el INAOE, México, siendo Investigador Nacional Nivel 2 del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) del mismo país. Sus principales líneas de interés se relacionan con las micro y nanotecnologías para la integración de fotónica y electrónica en plataformas de silicio, con particular énfasis en aplicaciones de sensado y biosensado.

Eliminación de *E. coli* usando fotodinámica potenciada con nanoestructuras de oxígeno.

Elimination of *E. coli* using photodynamic enhanced by oxygen nanostructures.

Mireya Estefany Márquez López (1).
CINVESTAV-Monterrey, Parque PIIT, Autopista al Aeropuerto km. 9,5, Apodaca, NL. México.
mireya.marquez@cinvestav.mx.

Alberto Daniel Ortega Zambrano (2). Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC, 27606, USA, aldaox@hotmail.com.

Hilda Mercado Uribe* (3). CINVESTAV-Monterrey, Parque PIIT, Autopista al Aeropuerto km. 9,5, Apodaca, NL. México, hmercado@cinvestav.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 05, 2024; aceptado en octubre 18, 2024.

Resumen.

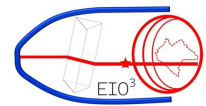
*La inactivación fotodinámica es un método alternativo que se basa en el uso de una molécula fotosensible que es irradiada a una longitud de onda apropiada en un ambiente con oxígeno molecular. Esto permite la generación de especies reactivas de oxígeno capaces de dañar y eliminar microorganismos. En el presente trabajo investigamos el efecto de la adición de nanoestructuras de oxígeno obtenidas mediante un aparato fabricado en el CINVESTAV-Unidad Monterrey, con el propósito de potenciar la generación de oxígeno singlete y la consecuente fotoinactivación de la bacteria *E. coli*. El resultado fue una potenciación de 58 veces en la reducción de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) con respecto al caso tradicional.*

Palabras claves: *E. coli*, fotoinactivación, oxígeno singlete.

Abstract.

*Photodynamic inactivation is an alternative method based on the use of a photosensitive molecule which is exposed at an appropriate wavelength in an environment with molecular oxygen. This allows the generation of reactive oxygen species capable of damaging and eliminating microorganisms. In the present work, we investigated the effect of the addition of oxygen nanostructures obtained by a device manufactured at CINVESTAV-Monterrey to enhance the generation of singlet oxygen and the consequent photoinactivation of the *E. coli* bacteria. The result was an enhancement of 58 times in the reduction of Colony Forming Units (CFU) respect to the traditional case.*

Keywords: *E. coli*, photoinactivation, singlet oxygen.



1. Descripción de la conferencia.

La resistencia antimicrobiana (RAM) se origina por mutaciones de las bacterias en respuesta al uso de fármacos. La RAM representa una amenaza considerable para la salud humana a nivel mundial. Se estima que, en el año 2050 alrededor de 10 millones de personas perderán la vida por esta causa, que también costará un gasto aproximado de 100 billones de dólares a la economía mundial (O'Neill J., 2016). Por ello, es una necesidad urgente investigar e implementar métodos alternativos que sean capaces de inactivar microorganismos patógenos, y que a su vez tengan menos potencial para desarrollar nuevas resistencias. Una de estas alternativas es la inactivación fotodinámica (IFD) (Comini, L, 2010 & Mariam, M., 2016).

La IFD se basa en el uso de una molécula fotosensible que es irradiada a una longitud de onda apropiada en un ambiente con oxígeno molecular en donde se encuentra el cultivo celular bajo estudio. La molécula excitada decae a su estado basal, y en este proceso puede interactuar con el oxígeno molecular ocasionando la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Las ROS inducen daños en biomoléculas esenciales, como proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Una de las ROS más citotóxica es el oxígeno singlete (Cieplik, F., 2014).

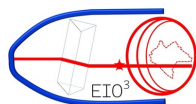
Diversos grupos de investigación han enfocado sus esfuerzos en el área de IFD sintetizando nuevas moléculas fotosensibilizadoras, o modificando otras ya estudiadas (Tingting H. & Zhengdi W., 2021). Sin embargo, hasta la fecha no se ha prestado atención a trabajar con el oxígeno molecular. Este estudio se basa en producir un aumento en la concentración del oxígeno molecular en cultivos de *E. coli*, lo que podría desencadenar a su vez, un incremento en la generación de oxígeno singlete y, en consecuencia, la potenciación de la fotoinactivación. Para llevar a cabo este objetivo, los cultivos fueron incubados con azul de metileno (MB) y expuestos a luz roja. En otro experimento similar, antes de la irradiación, se adicionaron al cultivo nanoestructuras de oxígeno, que consisten en estructuras amorfas que involucran moléculas huésped en configuraciones mediadas por agua. El proceso de elaboración de éstas contempla el uso de un aparato diseñado y construido en el Grupo de Laboratorio del Dr. Carlos Ruiz del CINVESTAV-Monterrey (Jaramillo-Granada, y col. 2022). Posteriormente, se evaluó el incremento en la generación de oxígeno singlete, y se demostró su efecto en la fotoinactivación de la *E. coli*.

2. Métodos.

La cepa utilizada en este proyecto fue la *E. coli* K12- MG1655. El protocolo para el cultivo de esta bacteria ha sido estandarizado ya por nuestro grupo de laboratorio (Ortega-Zambrano y col. 2022). El fotosensibilizador usado fue el azul de metileno, preparado en solución stock estéril a una concentración de 100 μ M en PBS, a partir de otra a 46.9 mM. Las muestras sin nanoestructuras de oxígeno estuvieron conformadas por dos grupos controles y un experimental. Cada uno preparados en alícuotas de 2 mL. El primero de los controles (control PBS) consistió en una mezcla de 900 μ L de PBS y 100 μ L de bacterias preparadas. El segundo (control fotosensibilizador) formado por 900 μ L de solución de azul de metileno y 100 μ L de bacterias preparadas. El grupo experimental fue constituido por 900 μ L de la solución con fotosensibilizador y 100 μ L de bacterias preparadas.

Las muestras con nanoestructuras de oxígeno estuvieron constituidas por grupos similares a los anteriores, ajustando las concentraciones de cada componente, PBS, bacterias y nanoestructuras. En ambos casos se realizaron tres experimentos independientes y por triplicados.

La medición de oxígeno singlete se llevó a cabo en cajas de Petri de 35 x10 mm. Tanto para este proceso, como para las irradiaciones de las muestras, se utilizaron arreglos optoelectrónicos implementados en trabajos previos en nuestro grupo de investigación (Ortega-Zambrano y col. 2022). Al concluir este último, se realizaron cultivos de bacterias por el método de vertido en caja, para poder determinar cuántas colonias sobrevivieron al proceso de irradiación.



3. Resultados.

En las **Figs. 1 y 2** se presentan los resultados de la fotoinactivación con y sin nanoestructuras de oxígeno. La adición de las nanoestructuras de oxígeno a la muestra evidenció un aumento casi inmediato en la generación de oxígeno singlete al ser expuesto a la luz roja. El uso de nanoestructuras de oxígeno produce una potenciación en la fotoinactivación de 58 veces más que el caso tradicional.

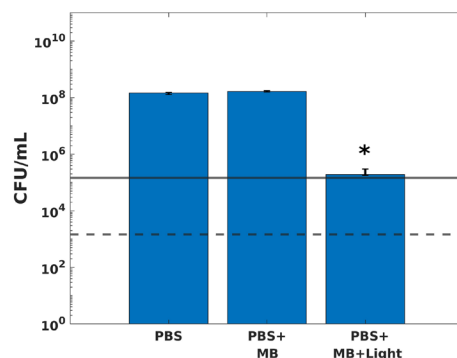


Figura 1. Fotoinactivación de *E. coli* con MB. Las primeras dos barras representan a los controles, PBS y fotosensibilizador ($10 \mu\text{M}$), respectivamente. La tercera barra la fotoinactivación de la bacteria. La línea continua representa una reducción de $3 \log_{10}$, y la línea punteada una reducción de $5 \log_{10}$, $n=3$. $*p < 0.05$.

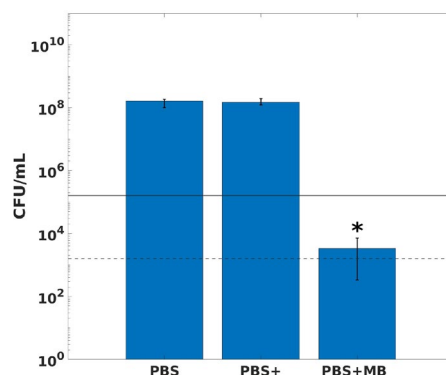


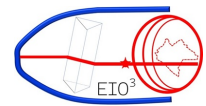
Figura 2. Fotoinactivación de *E. coli* con nanoestructuras de oxígeno y MB. Las primeras dos barras corresponden a los controles, PBS y fotosensibilizador ($10 \mu\text{M}$), respectivamente. La tercera es la fotoinactivación de la bacteria con nanoestructuras. La línea continua representa una reducción de $3 \log_{10}$ y la punteada una reducción de $5 \log_{10}$. $*p < 0.05$.

Conclusiones.

La fotoinactivación de *E. coli* mediante luz roja, azul de metileno y nanoestructuras de oxígeno adicionadas al cultivo celular, produce un efecto potenciador de 58 veces más que el caso tradicional.

Créditos.

El autor agradece al CONAHCyT México por el financiamiento del proyecto A1-S-8125.



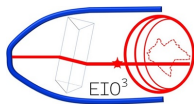
Referencias bibliográficas.

- Cieplik, F. y col. (2014)** *Antimicrobial photodynamic therapy for inactivation of biofilms formed by oral key pathogens*. *Frontiers in Microbiology*. 5 (2014), 1-17.
- Comini, L. R. & Núñez, S. (2010)** *Fotosensibilizadores naturales activos en terapia fotodinámica*. Bitácora digital, FCQ, UNC. 1-3.
- Márquez, M. E. (2023)**. *Fotoinactivación de Escherichia coli potenciada con nanoestructuras de oxígeno* (Tesis de maestría). CINVESTAV-Monterrey, México.
- Jaramillo-Granada, Reyes-Figueroa & Ruiz-Suárez, J.C. (2022)** *Xenon and krypton dissolved in water form nanoblobs: No evidence for nanobubbles*. *Physical Review Letters*, 094501.
- Mariam M. A. & col. (2016)** *Important cellular targets for antimicrobial photodynamic therapy*. *Applied Microbial and Cell Physiology*, 100(17), 7679-7688.
- O'Neill J. (2016)** *Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations*. *Medicine, Environmental Science*, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36259397>.
- Ortega-Zambrano, D., Fuentes-López, D. & Mercado-Urbe, H., (2022)** *Photoinactivation of Escherichia coli using five photosensitizers and the same number of photons* *Journal of Innovative Optical Health Sciences* 15(6), DOI: 10.1142/S1793545822400107.
- Tingting, H. & Zhengdi W. (2021)** *Recent advances in innovative strategies for enhanced cancer photodynamic therapy*. *Theranostics* 11(7), 3278-3300.

Biografía de los investigadores.



Mireya Estefany Márquez López, Estudiante de Doctorado en Ingeniería y Física Biomédicas del CINVESTAV-Monterrey. Es miembro del grupo experimental de la Dra. Hilda Mercado, y su trabajo se ha centrado en usar métodos novedosos para potenciar el efecto de la fotodinámica, como el uso de nanoestructuras de oxígeno. Realizó sus estudios de Maestría en Ingeniería y Física Biomédicas en la misma institución, y la licenciatura en Física en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.



Alberto Daniel Ortega Zambrano, Doctor en Ingeniería y Física Biomédicas del CINVESTAV-Monterrey. Realizó sus estudios de doctorado en el grupo de la Doctora Hilda Mercado. Se especializó en Fotodinámica de bacterias y células de cáncer. Realizó sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Biomédica, y de Maestría en Ingeniería en Electrónica y Computación en el CUCEI, de la Universidad de Guadalajara. Actualmente se encuentra haciendo una estancia posdoctoral en la Universidad de Carolina del Norte.



Hilda Josefina Mercado Uribe, Doctora. en Física, trabaja en el CINVESTAV-Unidad Monterrey desde el 2006. Es egresada del Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato. Sus líneas de investigación son el estudio de la hidratación de biomoléculas y la fotodinámica en microorganismos patógenos y células cancerígenas. Ha graduado 6 estudiantes de doctorado, 14 de maestría y 6 de licenciatura. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 2.

Explorando la relación entre materiales y la excitación de plasmones de superficie.

Exploring the relationship between materials and surface plasmon excitation.

Sergio de la Cruz Arreola* (1).
Universidad Politécnica de Chiapas.
sdelacruz@upchiapas.edu.mx.

Perla Yazmín Sevilla-Camacho (2). Universidad Politécnica de Chiapas. psevilla@upchiapas.edu.mx.

Bianca Y. Perez Sariñana (3). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. bianca.perez@unicach.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 30, 2024; aceptado en octubre 18, 2024.

Resumen.

En este trabajo se explora la relación entre la eficiencia de excitación de los plasmones-polaritones de superficie (PPS) y el material del acoplador. Se presentan resultados para una geometría optimizada, mostrando la dependencia de la eficiencia de excitación y la permitividad compleja del material. Hemos encontrado que la plata y el oro tienen la eficiencia más alta y más estable en un amplio rango de longitudes de onda.

Palabras claves: Eficiencia, excitación, geometría, plasmones polaritones de superficie.

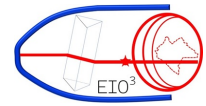
Abstract.

This work explores the relationship between the efficiency of excitation of surface plasmon-polariton (SPP) and the material of the coupler. Results are presented for an optimized geometry, showing the dependency of efficiency on the material's complex permittivity. We have found that silver and gold have the highest and most stable efficiency on a wide range of wavelengths.

Keywords: Efficiency, excitation, geometry, surface plasmon-polaritons.

1. Descripción de la conferencia.

Los plasmones-polaritones de superficie (PPS) son ondas electromagnéticas evanescentes propagándose a través de una interfaz metal-dieléctrico, éstos han atraído gran atención en las áreas de física, química, biología y ciencia de materiales debido a su confinamiento y su intensificación del campo debajo del límite de difracción lo cual lo hace prometedor en aplicaciones como sensores, celdas solares, imagen de superresolución, circuitos optoelectrónicos y más (Wang, 2019). Sin embargo, a pesar de los avances en esta área, la excitación de los PPS aún permanece como uno de los grandes retos debido principalmente a su naturaleza evanescente, la cual requiere acoplar la mayor cantidad de luz incidente a los PPS. Se puede encontrar investigación relacionada con el acoplamiento de luz a PPS a través de prismas, pero éstos no resultan prácticos para estructuras micro o nanométricas. En este sentido, es deseable una



estructura compacta que excite de manera eficiente los PPS en espacios compactos para poder integrarlos posteriormente a circuitos plasmónicos o diversas aplicaciones nanométricas (Ding,2019).

Además de la geometría del acoplador, otro factor importante es el tipo de material. En los últimos años se han propuesto materiales alternativos para reemplazar a los metales nobles como la plata y el oro (Naik, 2013). Para explorar la influencia de los materiales en la excitación de los PPS, usamos una estructura optimizada y calculamos la eficiencia de excitación como función de la permitividad del material.

2. Teoría.

Los cálculos numéricos están basados en el formalismo de la ecuación integral (Maradudin, 1997) que ha sido ampliamente usado para problemas de esparsamiento electromagnético bidimensional y estudios de acoplamiento de luz a PPS (de la Cruz Arreola, 2023). Cuando un haz incidente interactúa con una estructura superficial, parte de la energía incidente es reflejada, otra parte es absorbida y bajo ciertas circunstancias puede ser acoplado a los PPS. Definimos la eficiencia de excitación como el cociente entre la potencia que tiene el PPS y la potencia del haz incidente. La geometría considerada está ilustrada en la Fig. 1 y está basada en cálculos realizados previamente (De la Cruz, 2012).

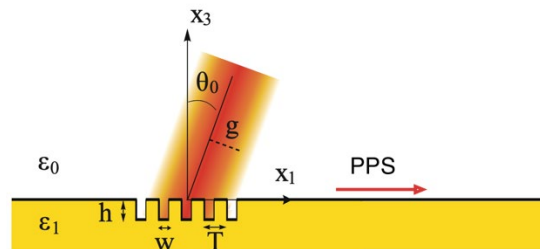


Figura 1. Perfil de la geometría del acoplador.

3. Resultados.

Los cálculos de la eficiencia de excitación como función de la parte real e imaginaria de la permitividad son presentados en la Fig. 2.

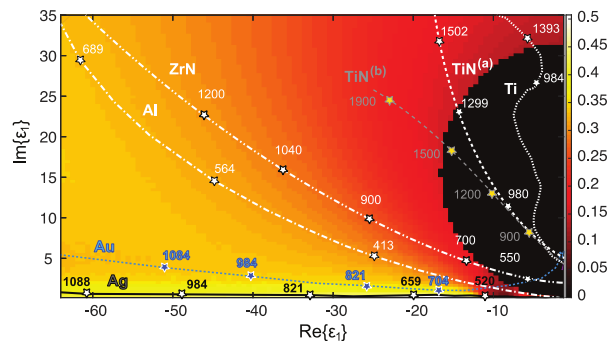
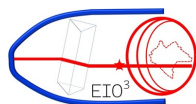


Figura 2. Eficiencia de acoplamiento como función de la parte real e imaginaria de la permitividad.

En la Figura 2 podemos observar la eficiencia de acoplamiento de una estructura de 5 canales como función de la parte real e imaginaria de la permitividad. Además, en la parte más baja del mapa se encuentran las eficiencias más altas, correspondientes a la Plata (Ag) y Oro (Au). En el mapa, el rango de la permitividad permite explorar varios materiales



como Titanio (Ti), Nitruro de Titanio (TiN), Nitruro de Zirconio (ZrN), Aluminio (Al) que han sido propuestos como alternativas para la Ag y Au.

Conclusiones.

En resumen, hemos presentado un estudio numérico de la influencia del material en la excitación de PPS. Encontramos que la plata y el oro son los materiales que tienen una mayor eficiencia de excitación y se mantienen constantes para un rango de longitudes de onda de aproximadamente 500 nm a 1080nm, es decir, una estructura de Ag o Au puede ser utilizada para experimentos con distintas longitudes de onda sin que afecte notablemente su eficiencia. Materiales como Ti, TiN, ZrN y Al presentan una eficiencia menor al 25%.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por la invitación al ciclo de conferencias y por las facilidades proporcionadas.

Referencias bibliográficas.

- de la Cruz Arreola, S., Méndez, E. R., Pérez-Sariñana, B. Y., Robles Ocampo, J. B., & Sevilla Camacho, P. Y. (2023). Influence of material parameters on the optical excitation of surface plasmon polaritons. *Plasmonics (Norwell, Mass.)*, 18(2), 503–509. doi:10.1007/s11468-022-01769-7
- de la Cruz, S., Méndez, E. R., Macías, D., Salas-Montiel, R., & Adam, P. M. (2012). Compact surface structures for the efficient excitation of surface plasmon-polaritons. *Physica Status Solidi. B, Basic Research*, 249(6), 1178–1187. doi:10.1002/pssb.201100757
- Ding, F., & Bozhevolnyi, S. I. (2019). A Review of Unidirectional Surface Plasmon Polariton Metacouplers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics: A Publication of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 25(3), 1–11. doi:10.1109/jstqe.2019.2894067
- Maradudin, A. A., Michel, T., McGurn, A. R., & Méndez, E. R. (1990). Enhanced backscattering of light from a random grating. *Annals of Physics*, 203(2), 255–307. doi:10.1016/0003-4916(90)90172-k
- Naik, G. V., Shalaev, V. M., & Boltasseva, A. (2013). Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 25(24), 3264–3294. doi:10.1002/adma.201205076
- Wang, S., Zhao, C., & Li, X. (2019). Dynamical manipulation of surface plasmon polaritons. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 9(16), 3297. doi:10.3390/app9163297

Biografía de los investigadores.



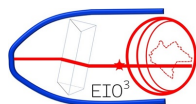
Sergio de la Cruz Arreola, originario de Pijijiapan, Chiapas. Se formó académicamente en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional, donde completó la Licenciatura en Física y Matemáticas y una Maestría en Física. Posteriormente, realizó su Doctorado en Óptica en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en Baja California. Actualmente, es miembro del Cuerpo Académico de Energía y Sustentabilidad (CAES), del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) y del Sistema Estatal de Investigadores en la categoría VI. Se desempeña como docente en la Universidad Politécnica de Chiapas, donde imparte clases en la carrera de Ingeniería en Energía, la Maestría en Energías Renovables y el Doctorado en Ingeniería. Su experiencia se extiende a la dirección de tesis de maestría y doctorado, así como a la supervisión de proyectos de postdoctorado. Colabora con diversas instituciones académicas y de investigación, incluyendo la Universidad de Sonora, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER) y el Laboratorio de Frío y de Sistemas Térmicos y Energéticos del Conservatorio Nacional de Artes y Oficios (LAFSET-CNAM) en París, Francia. Su investigación se enfoca principalmente en el ámbito teórico-numérico, abordando temas como la interacción de luz con nanoestructuras, la influencia de nanoestructuras en celdas solares, análisis energético de edificios y estudios sobre la radiación solar.



Dra. Perla Y. Sevilla Camacho, se formó académicamente en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, donde completó la Licenciatura en Ingeniería Electrónica. Posteriormente, realizó su Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya. Y finalmente, cursó sus estudios de Doctorado en Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro. Actualmente la Dra. Sevilla se desempeña como Profesora de Tiempo Completo de la Universidad Politécnica de Chiapas adscrita al programa de Ingeniería Mecatrónica, donde ha demostrado un total compromiso con la formación de profesionistas, recibiendo en diversas ocasiones reconocimientos a su desempeño docente. Así también, ha contribuido sustancialmente en la investigación, rubro donde se ha desempeñado de manera destacada, perteneciendo al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde el año 2013, actualmente se encuentra en la categoría del nivel 1. Así como también es miembro del Sistema Estatal de Investigadores del estado (SEI) de Chiapas en la categoría VI, como Investigador (a) (científico o tecnólogo) Honorífico. Fue galardonada con la medalla al mérito estatal en desarrollo tecnológico e innovación 2022, por parte del Gobierno de Chiapas. La Dra. Sevilla ha publicado 34 artículos en revistas internacionales indizadas y arbitradas. Actualmente, posee 416 citas y un índice h 12. En desarrollo tecnológico destaca con 6 proyectos, que se integraron en paquetes tecnológicos transferibles. Estos desarrollos han sido donados a empresas 100% chiapanecas, a las cuales les han proporcionado grandes beneficios. Ha dirigido y codirigido tesis de maestría y doctorado, trabajos terminales de licenciatura y diversos proyectos de Estadías con estudiantes de nuestro programa académico. Ha sido responsable técnico de 2 proyectos financiados de CONAHCyT: Convocatoria de Ciencia Básica 2015 y Convocatoria de Ciencia de Frontera 2023. Perteneció al núcleo básico de profesores de la Maestría en Energías Renovables y del Doctorado en Ingeniería de la UPChiapas. Es miembro del Cuerpo Académico de Energía y Sustentabilidad (CAES), el cual se encuentra en estatus de “en consolidación”. Además, cuenta con Reconocimiento PRODEP 2024-2027. Ha participado en diversas conferencias de foros de reconocido prestigio nacional e internacional, dentro y fuera del país, promoviendo a nuestro estado e institución.

Las líneas de investigación y de desarrollo tecnológico de interés son:

- Procesamiento digital de señales.
- Algoritmos inteligentes para detección y monitoreo de procesos.
- Instrumentación electrónica y sistemas embebidos.



Dra. Bianca Y. Perez Sariñana, Egresada de la Universidad Politécnica de Chiapas donde obtuvo Licenciatura en Ingeniería en Energía, estudió Maestría y doctorado en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Fue profesora fue Profesora de tiempo completo del programa académico de Ingeniería en Energía del 2015 al 2021, así como también fue directora del programa académico de Ingeniería en Energía y coordinadora de la Maestría en Energías Renovables de la Universidad Politécnica de Chiapas del 2020 al 2021. De 2021 a 2023 fue profesora del programa educativo de Ingeniería en Energía de la Universidad Autónoma del Carmen. Actualmente es Coordinadora de la Ingeniería en Energías Renovables del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de una UNICACH. Ha sido observadora del CACEI y evaluadora en revistas científicas. Ha realizado trabajos en Colaboraciones con el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, la Universidad Nacional de Colombia, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas en Madrid España. Autora de 15 artículos publicados, 1 libro relacionados al tema de Producción de Biogás, 1 capítulo de libro en el tema Producción de Bioetanol a partir de café y 5 desarrollos tecnológicos. También es Investigadora Nacional Nivel I y miembro del Sistema Estatal de Investigadores en la Categoría VI-Honorífico.

Fotónica integrada para el desarrollo de láseres y biosensores.

Integrated photonics for the development of lasers and biosensors.

Gloria Verónica Vázquez García* (1).
Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.
gvvazquez@cio.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 25, 2024; aceptado en octubre 12, 2024.

Resumen.

En la actualidad existe una tendencia a la miniaturización de componentes, es aquí donde las guías de onda ópticas tienen un papel fundamental ya que son los bloques básicos de dispositivos integrados. En esta plática se mencionan algunas aplicaciones de la fotónica integrada y se presenta el trabajo que hemos realizado sobre el desarrollo de microcomponentes ópticos basados en guías de onda en cristales activos y vidrios. Las principales motivaciones han sido el desarrollo de láseres compactos y sensores integrados; en particular, nuestro interés se centra en la posibilidad de detectar muestras biológicas en cantidades muy pequeñas.

Palabras clave: Escritura láser, fotónica integrada, implantación iónica, láseres, sensores.

Abstract.

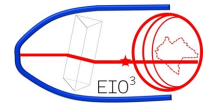
Nowadays there is a trend towards the miniaturization of components, where optical waveguides play a fundamental role as the basic blocks of integrated devices. In this talk a few applications of integrated photonics are presented as well as our work regarding the development of optical microcomponents based on waveguides in crystals and glasses. The main motivation has been the development of compact lasers and sensors; particularly, our interest resides on the possibility to detect small volumes of biological samples.

Keywords: Ion implantation, integrated photonics, laser writing, lasers, sensors.

1. Descripción de la conferencia.

La fotónica integrada consiste en la miniaturización de componentes, donde se pueden realizar diferentes funciones en un material con un volumen muy pequeño. La luz se puede generar, derivar, filtrar, modular, multiplexar, detectar en este mismo material. Los circuitos electrónicos son reemplazados por circuitos fotónicos debido a la velocidad de la luz con respecto a la de los electrones, de tal manera que la información se puede procesar de una manera mucho más rápida y la cantidad de información que se procesa es mucho mayor (Hunsperger, 2009).

Los bloques básicos de la fotónica integrada son las guías de onda ópticas, las cuales se forman con un material cuyo índice de refracción es mayor al medio que lo rodea. El índice de refracción es una medida de cuánto se reduce la velocidad de la luz en un medio. El grosor de una guía de onda es mucho menor que el grosor de un cabello. Existen diferentes tipos principales de guías de acuerdo a su geometría: a) las guías de onda planas, las cuales están formadas



por un sándwich de material donde el confinamiento de la luz se da en una sola dirección; b) las guías angostas, que pueden tener una sección transversal cuadrada o rectangular principalmente y el confinamiento de la luz se da en dos direcciones; y c) las fibras ópticas, las cuales tienen una sección transversal circular y están compuestas de un núcleo de mayor índice de refracción que el revestimiento que lo rodea. La **Fig. 1** muestra estos tipos de guías.

En este trabajo se presentan dos dispositivos fotónicos, los láseres y los sensores basados en guías de onda; los primeros tienen potenciales aplicaciones en las comunicaciones, terapia médica de baja intensidad e iluminación, entre otras. Los segundos basan su motivación en el desarrollo de sensores compactos para la detección de sustancias biológicas que puedan ser usados en el diagnóstico de enfermedades.

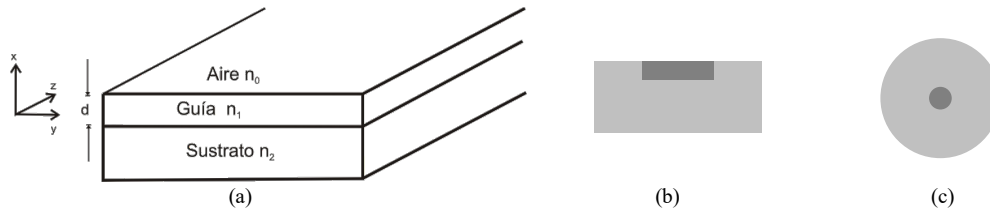


Figura 1. Tipos de guías de onda: (a) plana, (b) angosta, (c) fibra óptica. Las regiones más oscuras en (b) y (c) tienen mayor índice de refracción que las zonas menos oscuras.

2. Métodos.

2.1 Láseres de guía de onda.

Hemos fabricado láseres de guías de onda planas y angostas en cristales y vidrios dopados con tierras raras tales como Nd:YAG, Nd:YVO₄, Yb:YAG y Er:Yb:silicato utilizando la técnica de implantación iónica mediante un acelerador Peletrón del Instituto de Física de la UNAM; mediante esta técnica se hace incidir un haz de iones (H^+ , He^+ , C^{2+} , Cu^+) en el material a energías del orden de MeV provocando ionización y colisiones nucleares que resultan generalmente en una reducción de la densidad del material y, por ende, una reducción del índice de refracción al final de la trayectoria de los iones (*ie.* a una profundidad de unas cuantas micras). La guía de onda se forma entonces entre el aire o región superior de bajo índice y la región de menor índice producida por la implantación, ver **Fig. 2**.

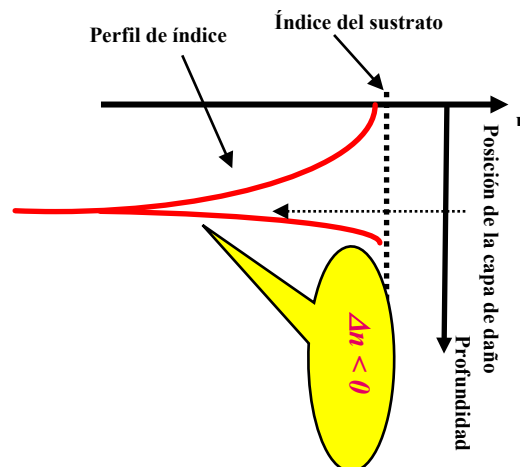


Figura 2. Perfil de índice de refracción de una guía de onda fabricada por implantación iónica.

Para observar las propiedades de las guías de onda, medimos la forma en que se propaga la luz, la forma como cambia el índice de refracción generando las guías, cuánta luz se pierde, se absorbe o se emite, así como realizamos pruebas de la emisión láser en las guías (Flores-Romero, et al, 2007; Sánchez-Morales, et al, 2009). Para dichas pruebas se utiliza un láser cuya longitud de onda de operación sea fuertemente absorbida por los iones de tierras raras y para formar la cavidad láser al cristal o vidrio se le depositan en sus extremos películas delgadas que actúan como espejos, un espejo de entrada con alta reflectividad y un espejo de salida con reflectividad un poco menor al 100%.

2.2 Sensores de guía de onda.

Hemos fabricado dispositivos fotónicos para sensado mediante la técnica de escritura láser en vidrios de portaobjetos y sustratos de sílice fundida. La generación de las guías de onda se logra enfocando un láser de femtosegundos mediante un objetivo de microscopio en la muestra, de manera que se deposita energía en cada pulso ultracorto provocando cambios de índice de refracción en el material. Utilizamos dos configuraciones principalmente: a) guía de onda embebida, en este caso el haz láser se enfoca en el interior del sustrato y la guía de onda se genera directamente en la región escrita; b) guía de onda superficial, en donde el haz se enfoca sobre la superficie del sustrato y se remueve material generando dos ranuras de bajo índice de refracción separadas cierta distancia, de manera que la guía de onda se forma entre este par de ranuras. Un esquema de estas dos configuraciones se muestra en la **Fig. 3**.

Particularmente, se fabricaron interferómetros Mach-Zehnder (IMZ), los cuales constan de un canal de entrada el cual se divide en dos brazos que se unen nuevamente en un canal de salida. Al hacer incidir luz en el IMZ se obtiene un patrón de interferencia a la salida. Si se deposita alguna sustancia (analito) sobre uno de los brazos del IMZ (brazo de sensado) se generará un cambio de índice de refracción entre dicho brazo y el segundo brazo (brazo de referencia) que se puede medir en términos de un corrimiento en longitud de onda en el espectro de transmisión del IMZ. Se realizó una prueba de sensado de temperatura con una variación de 30 °C a 75 °C en pasos de 15 °C. Una segunda prueba se llevó a cabo para detectar urea disuelta en agua ultrapura a varias concentraciones.

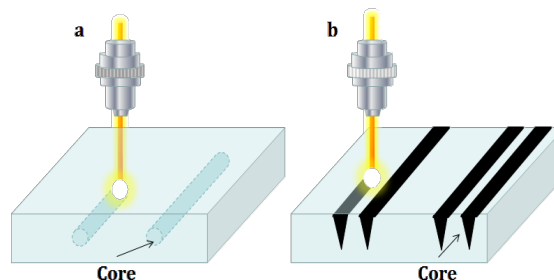


Figura 3. Configuraciones utilizadas para fabricar guías de onda por escritura láser: a) guías embebidas, b) guías superficiales (*Core* es la guía de onda).

3. Desarrollo.

3.1 Láseres de guía de onda.

La **Fig. 4** muestra imágenes obtenidas mediante microscopio de guías planas obtenidas mediante implantación iónica. Se puede observar con un contraste de color la zona de daño generada por los iones, separando la región de la guía del resto del sustrato. La energía de implantación define el grosor de la guía, en la imagen 1 la guía de onda se obtuvo con una energía mayor con respecto a la guía de la imagen 2.

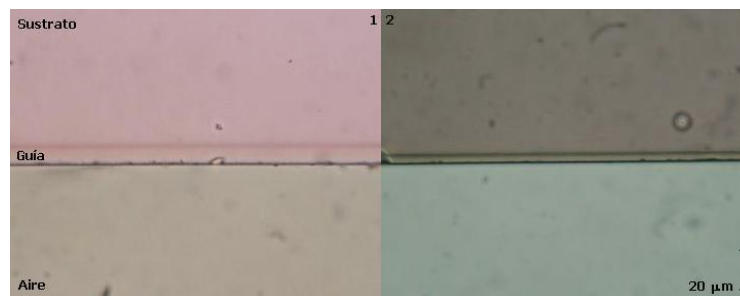
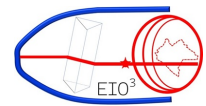


Figura 4. Imágenes de microscopio de guías de onda planas fabricadas con diferentes energías: 1) 5 MeV, 2) 1 MeV.

La **Fig. 5a** muestra una imagen de microscopio de guías angostas con 3 anchos, (a) 10, (b) 15 y (c) 20 μm , obtenidas usando una mascarilla de níquel-cobalto durante la implantación. Las secciones transversales de las guías se pueden observar en la interfaz entre el aire y el sustrato con los 3 anchos. La **Fig. 5b** muestra la forma como se propaga la luz en las guías de onda, a la cual se le llama modos de propagación, ya que la luz se comporta como una onda electromagnética. Dependiendo del ancho de la guía se pueden observar de uno a tres modos de propagación, llamados TEM (transversal electromagnético).

Los láseres desarrollados emiten en el infrarrojo cercano y las potencias de salida son del orden de mW, por lo que pueden ser usados en comunicaciones, terapia médica de baja intensidad e iluminación mediante conversión de la luz infrarroja a visible.

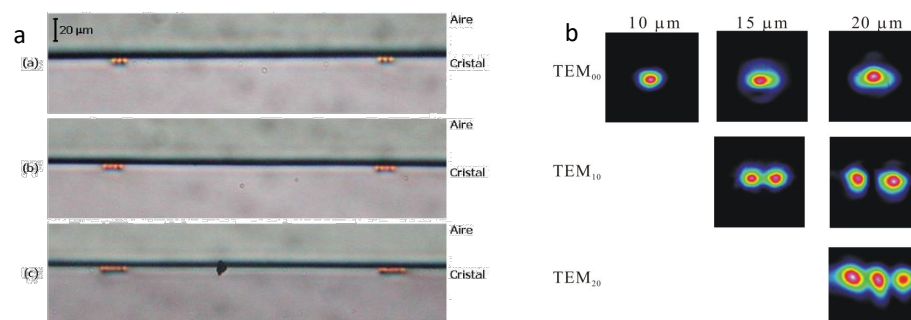


Figura 5. a) Imagen de la sección transversal de guías angostas, b) modos de propagación en las guías.

3.2 Sensores de guía de onda.

Para las pruebas de sensado de variación en temperatura se obtuvo el espectro de transmisión del IMZ que se muestra en la **Fig. 6a**. Los corrimientos en longitud de onda obtenidos entre 30 °C y 75 °C son muy pequeños, de manera que al graficar dichos corrimientos en función de la temperatura, se obtiene una sensibilidad de $\sim 54 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (un picómetro es la billonésima parte de un metro), ver **Fig. 6b** (Tapia-Licon, et al, 2023), la cual es comparable a valores obtenidos para IMZ fabricados en silicio mediante litografía, sin embargo, en nuestro trabajo tenemos la ventaja de poder fabricar el dispositivo en 3D mediante la escritura láser directa con pulsos de femtosegundos.

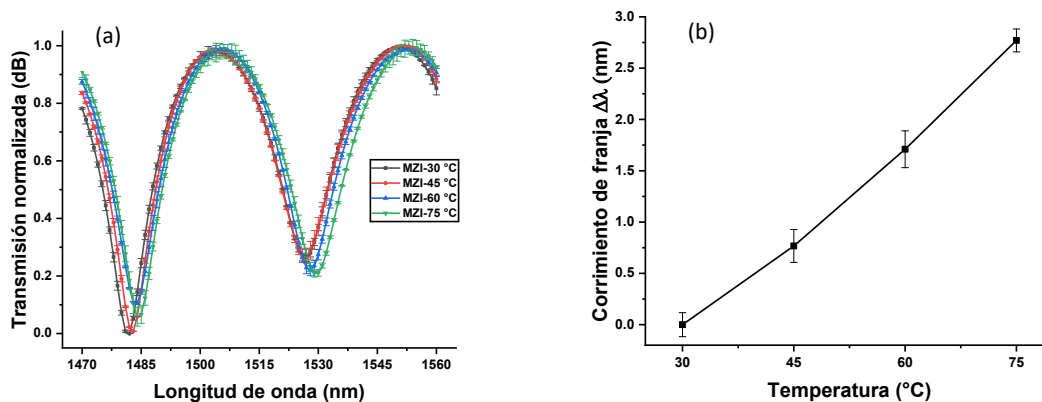


Figura 6. (a) Espectro de transmisión del IMZ a diferentes temperaturas, (b) corrimiento de la longitud de onda en función de la temperatura.

Con respecto a las pruebas de concentraciones de urea, la **Fig. 7a** muestra los espectros de transmisión del IMZ variando la concentración desde 1×10^{-15} M hasta 0.1 M. La **Fig. 7b** presenta la respuesta del corrimiento de la longitud de onda en función de la concentración, con la cual se obtiene una sensibilidad de 0.43 nm/M (un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro). Es interesante notar que se logró un límite de detección bajo, 0.42 pM (Tapia-Licon, et al, en revisión), esto es, la mínima concentración que es posible detectar.

Como trabajo futuro, buscamos poder integrar estos IMZ con fibras ópticas y canales microfluídicos para desarrollar dispositivos optofluídicos compactos que puedan ser usados para la detección de analitos tales como glucosa y colesterol y así poder contribuir al diagnóstico de enfermedades.

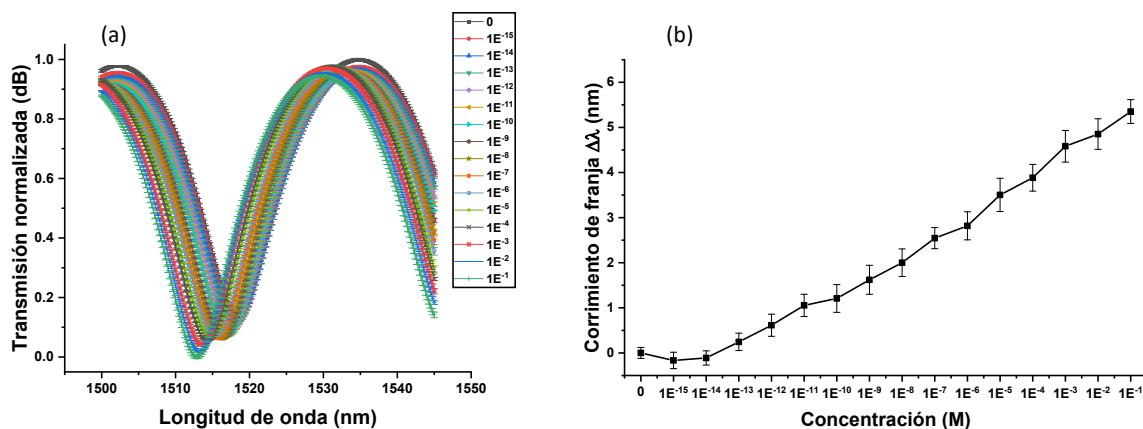
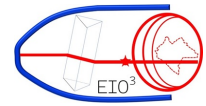


Figura 7. (a) Espectro de transmisión del IMZ a diferentes concentraciones de urea, (b) corrimiento de la longitud de onda en función de la concentración de urea.

Conclusiones.

La fotónica integrada permite el desarrollo de dispositivos compactos que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones, tales como comunicaciones, sensado, medicina e industria. En particular, se pueden diseñar láseres basados en guías de onda dependiendo de los requerimientos de longitud de onda de operación, potencia y régimen continuo o pulsado. Por otro lado, los sensores compactos tienen un gran potencial para la detección de analitos, lo cual es crítico en el diagnóstico de enfermedades. La ventaja de estos sensores es que son portátiles y pueden ser llevados al lugar donde se encuentra el paciente, de manera que se pueda comenzar con un tratamiento tras el diagnóstico en caso de detectar alguna anomalía.



Créditos.

Se agradece el financiamiento otorgado por el CONAHCYT mediante el proyecto CF-376135 para el desarrollo de dispositivos fotónicos de sensorado.

Referencias bibliográficas.

Flores Romero, E. et al (2007). *Laser emission in proton-implanted Nd:YAG channel waveguides.* Optics Express, 15, 17874-17880.

Hunsperger, R. G. (2009). *Integrated Optics Theory and Technology*, Springer.

Sánchez Morales, M. E. et al (2009). *Laser emission in Nd:YVO₄ channel waveguides at 1064 nm.* Applied Physics B 94, 215-219.

Tapia-Licona, L. A. et al (2023). *Design and fabrication of Mach-Zehnder interferometers in soda-lime glass for temperature sensing applications,* Applied Optics 62, 1214-1220.

Tapia-Licona, L. A. et al (en revisión). *Unbalanced Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser direct writing for sensing of urea concentrations via evanescent field interaction.* Enviado a Optics and Laser Technology.

Biografía del investigador.



Gloria Verónica Vázquez García realizó sus estudios de doctorado en la Universidad de Sussex, Reino Unido, con el tema de investigación: “Advances in quality of optical waveguides in Nd:YAG and LiNbO₃” y obtuvo el grado en Agosto de 2000. Actualmente es investigadora titular en el Centro de Investigaciones en Óptica en León, Gto. Su trabajo de investigación está relacionado con la fabricación, caracterización y aplicaciones de dispositivos fotónicos integrados. Obtuvo el nombramiento Nivel I en el SNI de 2001 a 2007 y Nivel II a partir de enero de 2008.

Nanopartículas de carbón derivadas de flor de jamaica, para láseres pulsados de fibra óptica.

Carbon nanoparticles derived from roselle flower for pulsed fiber lasers.

Romeo Emmanuel Nuñez Gomez* (1).
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec.
romeo.ng@zacatepec.tecnm.mx.

Alfredo Olarte Paredes (2). Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec,
alfredo.op@zacatepec.tecnm.mx.

Gilberto Anzueto Sánchez. (3) Centro de Investigaciones en Óptica, gilberto.anzueto@cio.mx.

Areli Marlen Salgado Delgado (4). Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec,
areli.sd@zacatepec.tecnm.mx.

René Salgado Delgado (5). Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Zacatepec,
rene.sd@zacatepec.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en agosto 02, 2024; aceptado en septiembre 20, 2024.

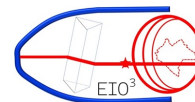
Resumen.

En este trabajo, se presentan los resultados de la obtención de nanopartículas de carbón a través de un proceso de síntesis verde de flor de jamaica deshidratada, en condiciones de temperatura controlada y su aplicación directa en la generación de láseres pulsados de fibra óptica. Las nanopartículas de carbón obtenidas fueron caracterizadas y posteriormente depositadas en la punta de un empalme mecánico tipo FC e integradas a la cavidad de un láser de fibra óptica dopado con erbio en configuración de anillo. Al aumentar gradualmente la potencia de bombeo en la cavidad, se obtiene un régimen de emisión pulsado de tipo Q-switch, que opera con tasas de repetición de pulsos ópticos, que van desde 12.25 kHz hasta 27.33 kHz. La longitud de emisión láser se establece en 1562.244 nm, con una relación señal-ruido óptica por arriba de 50 dB. Datos característicos del régimen pulsado como la duración de los pulsos, la potencia de emisión y su energía son presentados y analizados. Estos resultados proporcionan un análisis del desempeño del láser bajo diferentes condiciones de bombeo, destacando el potencial de las nanopartículas de carbón obtenidas a través de síntesis verde y su capacidad para generar pulsos en láseres de fibra óptica.

Palabras claves: Láseres de fibra óptica, láseres pulsados, nanopartículas de carbón.

Abstract.

This work presents the results of obtaining carbon nanoparticles through a green synthesis process using dehydrated hibiscus flowers under controlled temperature conditions, and their direct application in the generation of pulsed fiber optic lasers. The obtained carbon nanoparticles were characterized and subsequently deposited on the tip of an FC-type mechanical splice, then integrated into the cavity of an erbium-doped fiber laser in a ring configuration. As the



pump power in the cavity was gradually increased, a Q-switching pulsed emission regime was achieved, operating with optical pulse repetition rates ranging from 12.25 kHz to 27.33 kHz. The laser emission wavelength was set at 1562.244 nm, with an optical signal-to-noise ratio exceeding 50 dB. Key data from the pulsed regime, such as pulse duration, emission power, and energy, are presented and analyzed. These results provide an analysis of the laser's performance under different pumping conditions, highlighting the potential of the carbon nanoparticles obtained through green synthesis and their ability to generate pulses in fiber optic lasers.

Keywords: Carbon nanoparticles, fiber optic lasers, pulsed lasers

1. Introducción.

Las nanopartículas de carbón son una clase de nanomateriales, que han ganado una atención significativa en los últimos años debido a sus propiedades ópticas únicas, especialmente su luminiscencia, biocompatibilidad y facilidad de síntesis (Oliveira & Alves, 2022). Estas estructuras con diámetros generalmente menores a 10 nanómetros, compuestas predominantemente de carbono y, en algunos casos, otros elementos no metálicos. La investigación sobre las nanopartículas de carbono ha experimentado un crecimiento continuo desde su descubrimiento, las nanopartículas de carbono también poseen propiedades electrónicas derivadas de un fenómeno conocido como confinamiento cuántico (Lim et al., 2015). Esto les confiere un estatus intermedio entre los semiconductores convencionales y las moléculas discretas.

Están compuestos exclusivamente de carbono, lo que les permite ser sintetizados a partir de una amplia gama de materiales orgánicos. Su baja toxicidad, solubilidad en agua y biocompatibilidad son características destacadas. A diferencia de las nanopartículas de carbono inorgánicas, que pueden presentar ciertos riesgos tóxicos, estas nanopartículas de carbono son seguras y, al estar formadas por carbono, poseen propiedades estructurales y electrónicas únicas que las diferencian de otras nanopartículas (Surana & Bhattacharya, 2023). Son candidatos ideales para aplicaciones biomédicas y monitoreo ambiental en sistemas láser avanzados. Estudios recientes han demostrado la efectividad de sensores ópticos y biosensores, mostrando su potencial en diversos campos (Cai et al., 2022; Yu et al., 2019; Zhang et al., 2022).

Incorporarlas en láseres han demostrado ser un nanomaterial prometedor, actuando como absorbedor saturable en la producción de láseres con emisión pulsada. En este sentido, se han desarrollado láseres pulsados de vanadato de gadolinio, el cual emplea nanopartículas (puntos cuánticos de carbón) de alta calidad para producir trenes de pulsos de hasta 1.13 MHz (Liu et al., 2017). En el caso de láseres de fibra óptica, se han obtenido nanopartículas de carbón a raíz de la carbonización de la mecha de velas convencionales. En este caso, se obtuvo un régimen pulsado Q-switch con una tasa de repetición máxima de 73.3 kHz. (Sohail et al., 2023)

Este estudio tiene como objetivo explorar el potencial de las nanopartículas de carbón sintetizadas a partir de la hoja seca de flor de jamaica y su implementación como absorbedor saturable en el contexto de láseres pulsados de fibra dopados con erbio. Las nanopartículas se obtuvieron siguiendo la metodología del reciente trabajo de Rojas-Valencia (Rojas-Valencia et al., 2021). Al investigar su impacto en la dinámica y el rendimiento del láser, contribuimos a la comprensión de cómo los nanomateriales basados en carbono pueden mejorar la funcionalidad de los dispositivos fotónicos, promoviendo el camino para futuras innovaciones en la tecnología láser.

2. Métodos.

El proceso de obtención de las nanopartículas de carbón se basa a partir de síntesis verde, derivado del proceso de carbonización de hojas secas de flor de Jamaica. La flor de Jamaica empleada en este trabajo se adquirió en comercios locales, como muestra la **Fig. 1a**. El proceso de síntesis se describe de la siguiente forma: se pesaron 10 gramos de flor seca, las cuales fueron colocadas dentro de un crisol y llevadas al interior de una mufla. La temperatura de la mufla se fijó a 200 °C, a presión ambiental. Para este caso, se realizaron 4 muestras distintas, cambiando la variable del tiempo de exposición, que va de 1,2,3 y 4 horas, con el objetivo de analizar su impacto en la funcionalización y propiedades

de las nanopartículas. Posteriormente, una vez que la muestra carbonizada se ha enfriado a temperatura ambiente (ver **Fig. 1b**), se coloca dentro de un mortero con el objetivo de macerar y reducir su tamaño hasta obtener un polvo muy fino, tal como se observa en la **Fig. 1c**. Se toman y pesan aproximadamente 0.1 gr del polvo y se disuelven en 10 mL de agua destilada, agitando la vigorosamente hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, la mezcla se deposita en tubos falcon y se llevan la centrifugadora a una velocidad de rotación de 4500 rpm y una temperatura de 23 °C durante 30 minutos. Finalmente, previo a su almacenamiento, a la mezcla se le aplica un proceso de depuración con filtros que tienen un tamaño de poro de 0.22 μm (**Fig. 1d**). Este proceso se realiza para filtrar las nano partículas y eliminar aglomerados, impurezas o fragmentos derivados del proceso de síntesis que pudieran presentar tamaños mayores.



Figura 1. a) flor de jamaica seca, obtenida en comercio local, b) proceso de carbonización, c) maceración y obtención de polvo fino de carbón, d) filtrado de las nanopartículas de carbón.

Una de las características principales de las nanopartículas de carbón, es la emisión de fluorescencia en el visible cuando estas son excitadas con luz en el rango del ultravioleta (UV). En este experimento, una vez que las muestras fueron filtradas y almacenadas, se les irradió con una fuente de luz UV para observar y confirmar si las partículas obtenidas presentan esta característica visible, lo que asegura la formación de las nanopartículas y su proceso de funcionalización. En la **Fig. 2**, se observan las 4 muestras obtenidas bajo luz UV, emitiendo fluorescencia particularmente en el color verde, lo que confirma la premisa previa.



Figura 2. a) nanopartículas de carbón bajo luz UV emiten fluorescencia en el color verde.

Las muestras obtenidas fueron caracterizadas mediante espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR), utilizando un espectrómetro Pekin Elmer Spectrum Two. El análisis se realizó en un rango espectral de 4000 a 580 cm^{-1} , lo que permitió evaluar de manera precisa las interacciones moleculares y la estructura química de los materiales. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar el proceso de funcionalización en función de la temperatura de exposición, lo que facilita la identificación de los grupos funcionales presentes en las muestras.

Las muestras analizadas fueron extraídas de los polvos finos generados tras el proceso de carbonización, lo que proporciona información valiosa sobre los cambios estructurales y químicos inducidos durante este proceso. Este análisis es crucial para comprender cómo la temperatura de exposición influye en la modificación de las propiedades químicas y funcionales de los materiales. La **Fig. 3** muestra los resultados obtenidos de la prueba FTIR.

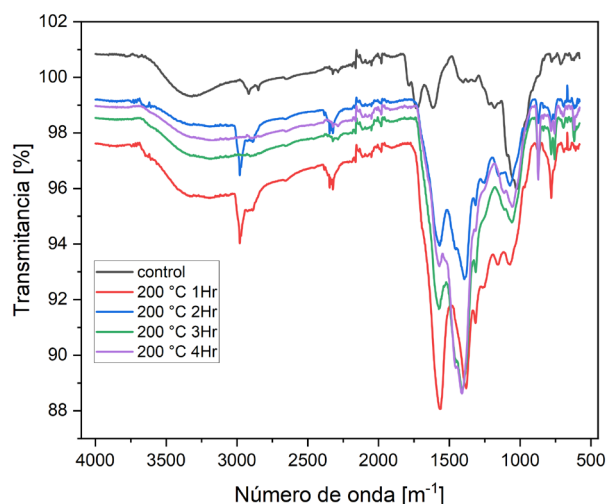


Figura 3. FTIR de las nanopartículas de carbón, bajo condiciones de temperatura a 200 ° C y exposiciones de 1 a 4 hrs.

La presencia de varios grupos funcionales clave se muestra por el análisis del espectro FTIR de las nanopartículas de carbón. La banda a 3367 cm^{-1} indica el estiramiento del grupo -OH, lo que indica que hay hidroxilos en la superficie, que son esenciales para la estabilidad de las soluciones acuosas. Las señales a 2982 cm^{-1} y 1422 cm^{-1} están relacionadas con las vibraciones de enlaces C-H, lo que indica que durante la carbonización hay restos de compuestos alifáticos no completamente descompuestos. La señal de 2348 cm^{-1} se asocia con CO_2 , que puede haber sido adsorbido o generado

durante el proceso de síntesis. Además, la señal a 1579 cm^{-1} indica la presencia de estructuras aromáticas, que son cruciales para las propiedades electrónicas y ópticas de las nanopartículas de carbón. Las señales a 1064 cm^{-1} indican grupos C-O o C-O-C relacionados con éteres o alcoholes, que contribuyen a la funcionalización superficial. Finalmente, las bandas a 874 cm^{-1} y 776 cm^{-1} confirman la existencia de anillos aromáticos, fundamentales para la estabilidad estructural y las propiedades ópticas.

La **Fig. 4** muestra el esquema de fabricación del dispositivo óptico basado en nanopartículas de carbón. Se utilizó fibra óptica monomodo (single mode fiber, SMF-28) acoplada a un empalme mecánico tipo FC, lo cual permite una conexión con la cavidad láser. Las nanopartículas, sintetizadas a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas, fueron extraídas mediante una micropipeta para ser depositadas en la punta del empalme en un proceso de goteo controlado. Este método de deposición permite obtener una capa homogénea de nanopartículas. Se realizaron múltiples ciclos de goteo, seguidos de un secado parcial entre cada aplicación, asegurando así la formación de un recubrimiento uniforme que maximiza la interacción entre la luz y las nanopartículas.

El dispositivo fue integrado dentro de la cavidad láser de fibra óptica, donde su principal función es explotar las propiedades de absorción saturable de las nanopartículas de carbón. Este dispositivo, una vez integrado en la cavidad láser, permite que la luz generada en su interior interactúe repetidamente con las nanopartículas depositadas.

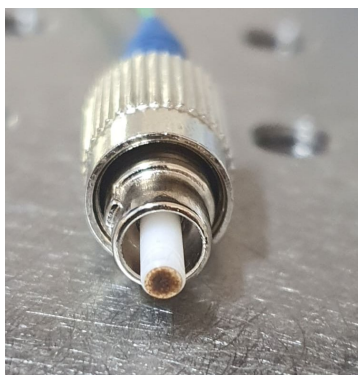


Figura 4. Punta de empalme mecánico, preparada con el depósito de nanopartículas de carbón mediante goteo.

3. Desarrollo.

3.1 Implementación de la cavidad láser.

Para la generación de emisión pulsada, se propuso una cavidad láser de fibra óptica dopada con erbio en configuración de anillo, como se muestra en la **Fig. 5**. Está formada por un diodo láser de bombeo, con emisión a 980 nm , el cual es la fuente de excitación de la fibra dopada con erbio y se conecta a la cavidad a través de un multiplexor por división de longitud de onda (wavelength division multiplexer, WDM) de 2 canales a 980 nm y 1550 nm . La salida se empalma a la fibra activa que tiene una longitud aproximada de 2 m . Las nanopartículas de carbón depositadas en el empalme mecánico, funcionan como el elemento de absorción saturable y son colocadas a la salida de la fibra dopada con erbio. Un acoplador de salida 70/30, se conecta a la cavidad para extraer y analizar el 30% de la señal que va directamente al monitoreo simultáneo de la emisión espectral con un analizador óptico espectral OSA y los pulsos ópticos a través de un fotodetector de alta velocidad, analizados en un osciloscopio. El 70% de la señal restante pasa a través de un aislador para retroalimentar la cavidad y amplificar la señal láser. Un aislador es colocado entre la salida del acoplador y la entrada del puerto de 1550 nm del WDM, para asegurar la operación en una sola dirección de la señal láser. Finalmente, la cavidad en anillo se cierra colocando un controlador de polarización, esto para manipular los estados de polarización de la señal dentro de la cavidad.

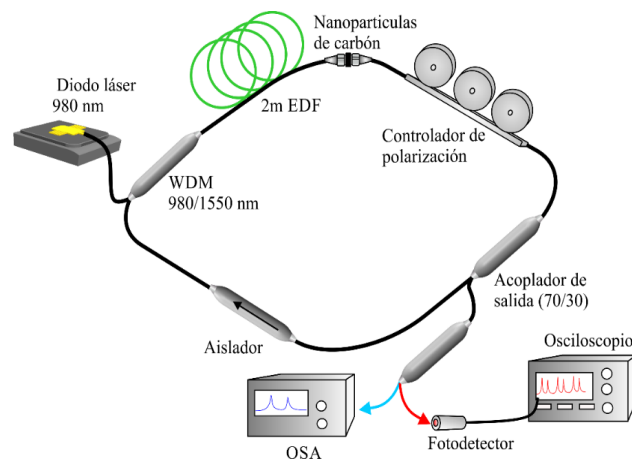
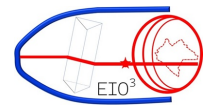


Figura 5. Esquema experimental de la cavidad del láser de fibra óptica dopado con erbio, para la monitorización espectral y temporal.

En un láser de fibra óptica pasivo tipo Q-switch, la modulación de los pulsos se lleva a cabo mediante la variación gradual de la potencia de bombeo. Este proceso provoca un incremento progresivo en la tasa de repetición de los trenes de pulsos ópticos, así como una disminución gradual de la duración de los mismos. Este comportamiento es el resultado de la saturación del material o dispositivo de absorción, que regula la acumulación de energía en la cavidad del láser. A medida que se alcanza un umbral crítico de saturación, se permite la emisión de pulsos más cortos y más frecuentes.

El umbral de emisión láser se monitorea a un valor de 38 mW de potencia. En la **Fig. 6** se puede observar que la emisión láser se establece a una longitud de onda de 1567.244 nm, para un valor de 43.8 mW de potencia óptica de bombeo. La señal láser presenta una relación señal a ruido de 50.16 dB. De la **Fig. 5**, es posible observar que la señal presenta la oscilación de modos adyacentes, los cuales se amplifican debido a que se tiene una cavidad de funcionamiento libre, la cual no contiene filtros para mantener la señal con una finesa espectral. Para estas condiciones de bombeo, el régimen pulsado aun no es observable.

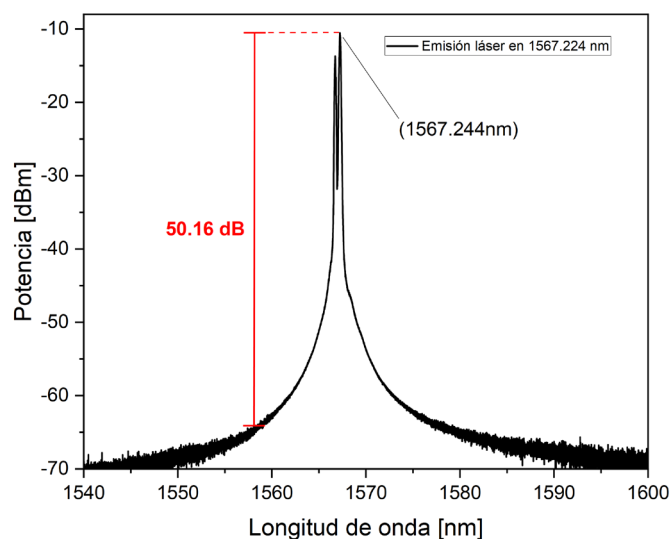


Figura 6. Emisión láser establecida en 1567.244 nm, con una relación señal a ruido de 50.16 dB.

3.2 Resultados del láser pulsado.

Incrementando gradualmente la potencia de bombeo a 52.2 mW, el régimen continuo desaparece y el régimen pulsado supera su umbral, es entonces cuando los trenes de pulsos ópticos son observables por medio del osciloscopio. A medida que la intensidad del campo óptico aumenta, la capacidad de absorción de las nanopartículas disminuye, permitiendo que se transmita una mayor cantidad de luz a través del medio. Este mecanismo habilita la formación de trenes de pulsos ópticos. En la **Fig. 7a** se muestran los trenes de pulsos que presentan una frecuencia de 12.26 kHz. Para los bombeos de 67.81 mW, 91.66 mW y 139.46 mW se obtienen tasas de repetición de pulsos de 15.76 kHz, 20.85 kHz y 27.33 kHz. Estos tres trenes de pulsos se demuestran en la **Fig. 7b-7d** respectivamente, de los cuales se puede observar la estabilidad, así como su uniformidad, indicando su operación de forma eficiente.

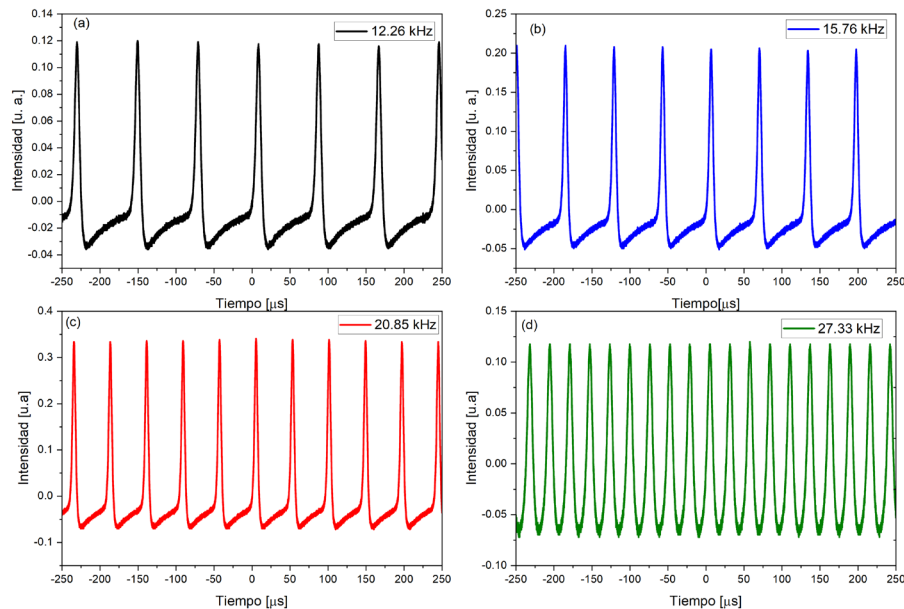


Figura 7. a) repetición de pulsos a 12.26 kHz, b) tasa de repetición a 15.76 kHz, c) tren de pulsos a 20.85 kHz y d) máxima tasa de pulsos obtenida a 15.76 kHz.

Bombeando la cavidad con un valor superior a 139.46 mW, el régimen pulsado desaparece y el sistema entra nuevamente en un régimen de emisión continua. Este comportamiento se debe a la saturación de las nanopartículas de carbón, las cuales son sometidas a una intensidad de bombeo que excede su umbral de saturación. A medida que las nanopartículas son bombeadas intensamente, no pueden recuperar sus propiedades absorbentes de forma efectiva, lo que provoca una pérdida de modulación en la intensidad del láser y, por ende, la desaparición de los pulsos. En este punto, las nanopartículas ya no generan pulsos, ya que han alcanzado un nivel de saturación donde la tasa de absorción es mínima o nula. Este fenómeno se conoce como bleaching (decoloración), en el cual el material ya no puede seguir modulando la intensidad de la luz debido a la ocupación total de sus niveles energéticos.

Por otra parte, el tiempo de duración de los pulsos presenta un decremento a medida que la velocidad de repetición de los pulsos se incrementa, con valores que van de 6.86 μs a 4.1 μs para los valores de bombeo previamente indicados. El comportamiento de la tasa de repetición de pulsos, así como la duración o ancho de los pulsos en función de la potencia óptica de bombeo se puede apreciar en la gráfica de la Fig. 8. En ella se observa el comportamiento propio de un láser pulsado Q-switch en el cual, a medida que la tasa de repetición incrementa (línea negra con puntos), la duración del pulso disminuye (línea roja con puntos).

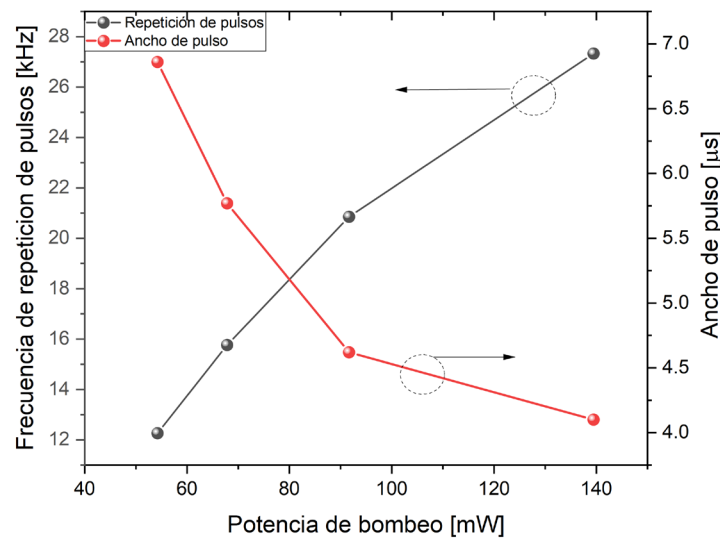
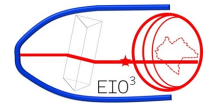


Figura 8. Respuesta en tasa de repetición de pulsos y ancho de pulso en función de la potencia óptica de bombeo.

En la **Fig. 9** se presenta la potencia óptica promedio en el régimen pulsado y también los resultados de la estimación del comportamiento de energía del tren de pulsos, en función del incremento en la potencia de bombeo y de la longitud de onda de emisión láser a 1567.244 nm. A través de un medidor de potencia óptica se obtuvo que la emisión pulsada tiene un valor de 17.6 μW e incrementa gradualmente de forma lineal a un valor máximo de 145 μW . En el caso de la energía de los pulsos, frecuentemente se estima dividir la potencia promedio por la tasa de repetición de pulsos, válido para repetición de pulsos baja. Esta estimación varía de 1.39 nJ a un valor máximo de 5.3 nJ para 27.33 kHz.

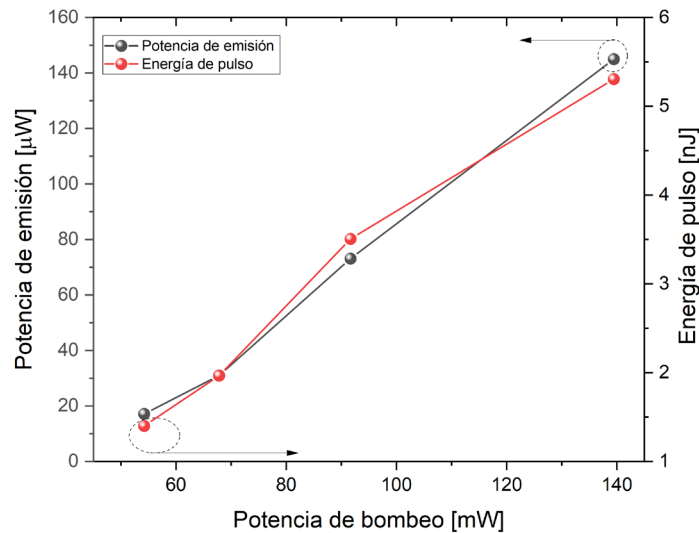
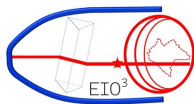


Figura 9. Respuesta de la potencia de bombeo y a energía de los pulsos, en función de la potencia óptica de bombeo para el régimen pulsado.

Finalmente, los resultados presentados en este trabajo demuestran la capacidad y potencial de las nanopartículas de carbón para producir láseres pulsados en el régimen pulsado Q-switch. Una de las ventajas de esta propuesta es el proceso de síntesis verde, el cual genera los menores impactos al medio ambiente además de la baja toxicidad de las nanopartículas.



Conclusiones.

En conclusión, los resultados obtenidos en este estudio destacan el potencial innovador de las nanopartículas de carbón sintetizadas de manera sostenible a partir de flor de jamaica deshidratada. La integración de estas nanopartículas en un láser de fibra óptica dopado con erbio ha demostrado su capacidad para mejorar el rendimiento de la emisión pulsada, logrando tasas de repetición de pulsos ópticos que varían entre 12.25 kHz y 27.33 kHz, con una longitud de emisión láser establecida en 1562.244 nm. La relación señal-ruido óptica superior a 50 dB, junto con las características de duración de pulso y potencia de emisión presentadas, subrayan la efectividad de las nanopartículas en la generación de pulsos láser. Estos hallazgos resaltan el uso de materiales derivados de procesos de síntesis verde no solo como una alternativa sostenible, sino también como un componente clave en la optimización de láseres de fibra óptica para diversas aplicaciones tecnológicas.

Créditos.

El autor agradece a CONAHCYT por el apoyo otorgado mediante Estancias Posdoctorales por México 2022(1) para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México.

Referencias bibliográficas.

- Cai, Y., Zhang, J., Zhang, M., Wang, M., & Zhao, Y. (2022). *The optical fiber sensing platform for ferric ions detection: A practical application for carbon quantum dots*. Sensors and Actuators B: Chemical, 364(April), 131857. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131857>
- Lim, S. Y., Shen, W., & Gao, Z. (2015). *Carbon quantum dots and their applications*. Chemical Society Reviews, 44(1), 362–381. <https://doi.org/10.1039/c4cs00269e>
- Liu, S., Wang, Q., Wang, K., Yao, Y., Zhang, H., Ren, T., Yin, Z., Du, F., Zhang, B., & He, J. (2017). *Two-photon saturable absorption properties and laser Q-switch application of carbon quantum dots*. Optics Letters, 42(19), 3972. <https://doi.org/10.1364/ol.42.003972>
- Oliveira, T. L., & Alves, A. K. (2022). *Carbon Quantum Dots*. In Engineering Materials. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86901-4_4
- Rojas-Valencia, O. G., Regules-Carrasco, M., Hernández-Fuentes, J., Germán, C. M. R. S., Estrada-Flores, M., & Villagarcía-Chávez, E. (2021). *Synthesis of blue emissive carbon quantum dots from Hibiscus Sabdariffa flower: Surface functionalization analysis by FT-IR spectroscopy*. Materialia, 19(August), 101182. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101182>
- Sohail, M., Zhang, C., Ahmed, R., Asghar, H., Ali Khan, S., Zamin Khan, N., Chen, T., Aslam. Baig, M., & Wang, Z. (2023). *Carbon nanoparticles (CNPs) as a saturable absorber for a passively Q-switched erbium (Er³⁺) doped fiber laser*. Optics and Laser Technology, 160(November 2022), 109046. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.109046>
- Surana, K., & Bhattacharya, B. (2023). *Carbon quantum dots*. In Nanomaterials for sustainable energy applications (pp. 147–159). CRC Press.
- Yu, S., Ding, L., Lin, H., Wu, W., & Huang, J. (2019). *A novel optical fiber glucose biosensor based on carbon quantum dots-glucose oxidase/cellulose acetate complex sensitive film*. Biosensors and Bioelectronics, 146(August), 111760. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111760>

Zhang, Y., Ding, L., Zhang, H., Wang, P., & Li, H. (2022). *A new optical fiber biosensor for acetylcholine detection based on pH sensitive fluorescent carbon quantum dots.* Sensors and Actuators B: Chemical, 369(May), 132268. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132268>

Biografía de los investigadores.



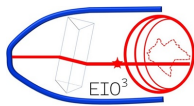
Romeo Emmanuel Nuñez Gomez, Ingeniero Electromecánico del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas con opción terminal en el área eléctrica. Posdoctorante en el IT de Zacatepec. Desarrolla investigación en fibras ópticas, láseres de fibra láseres pulsados basados en fibra óptica. Candidato a investigador.



Alfredo Olarte Paredes, Profesor-investigador de Tecnológico Nacional de México (TNM) campus Zacatepec, en el área de ingeniería electromecánica y posgrado en la maestría de ciencias de la ingeniería y el doctorado en ciencias de la ingeniería en las líneas de investigación de ingeniería y tecnología de los materiales y materiales en ingeniería sustentable. Cuerpo académico de diseño y caracterización de nanomateriales. Investigador nivel I



Gilberto Anzueto Sanchez, Dr. en Ciencias (Óptica) por el Centro de investigaciones en Óptica (2007) Maestro en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Guanajuato (2003). Ingeniero en Electrónica graduado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (2001). Investigador Asociado del Centro de Investigaciones de Óptica. Sus intereses de investigación actuales incluyen la metrología óptica y el láser de fibra. Investigador nivel II.



Areli Marlen Salgado Delgado. Profesor-Investigador del IT de Zacatepec. Doctora en Ciencias en Polímeros. Su trayectoria profesional está orientada hacia el estudio de los biomateriales, la ingeniería de biomateriales y la ciencia de biomateriales. Tiene un especial interés en la ingeniería de polímeros y desarrollo de nuevos polímeros. Investigadora nivel 1.



René Salgado Delgado. Doctorado en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Profesor investigador de tiempo completo en el IT de Zacatepec. Su investigación. Intereses en el estudio de biopolímeros para la creación de materiales compuestos con desechos agroindustriales. Investigador nivel I

Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez: Breve descripción de la fotónica.

National Technological Institute of Mexico Campus Tuxtla Gutiérrez: Brief description of photonics.

Jorge Luis Camas Anzueto* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Rubén Grajales Coutiño (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx.

Rocío Meza Gordillo (3), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx.

José Antonio Hoyo Montaña (4), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Hermosillo,
jose.hoyom@hermosillo.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 09, 2024; aceptado en septiembre 24, 2024.

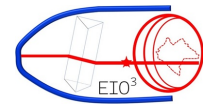
Resumen.

En este artículo se redacta una visión de lo que es la fotónica como área importante en el desarrollo tecnológico del Estado de Chiapas. La fotónica se encuentra relacionado fuertemente con conocimiento relacionado con la óptica ya que utiliza la interacción de la luz con la materia, a través de la manipulación y control en la generación y detección de luz. La fotónica en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez inicia con destellos a partir del 2005. Hoy en día es una realidad que la fotónica está presente en el Estado de Chiapas como un área de oportunidad para desarrollar tecnología de alta precisión en áreas como la ingeniería civil, agricultura, medioambiente, química y medicina. Las instituciones que ofrecen esta oportunidad de ofrecer desarrollo de tecnología en fotónica son el Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH).

Palabras claves: Fibra óptica, fotónica, óptica, sensor de fibra óptica.

Abstract.

This article reviews photonics as an important area in the technological development of the State of Chiapas. Photonics is closely related to knowledge related to optics since it uses the interaction of light with matter through manipulation and control in the generation and detection of light. Photonics in the Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez began with flashes from 2005. Today, it is a reality that photonics is present in the State of Chiapas as an area of opportunity to develop high-precision technology in areas such as civil engineering, agriculture, environment, chemistry, and medicine. The institutions that offer this opportunity to provide technology development in photonics are the National Technological Institute of Mexico campus Technological Institute of Tuxtla Gutiérrez, the Autonomous University of Chiapas (UNACH, by its acronym in Spanish), and the University of Sciences and Arts of Chiapas (UNICACH, by its acronym in Spanish).



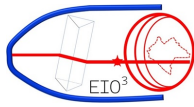
Keywords: Fiber optic, sensor Photonic, optic, optical fiber.

1. Introducción.

La fotónica como una definición general se puede describir como una ciencia que investiga la interacción de la luz con la materia considerando las diferentes propiedades que ofrece la luz con la finalidad de estudiar la forma en que la luz se genera y se detecta para manipular y aprovechar la energía y la información que los fotones transportan. La evolución de la fotónica ha impactado en avances tecnológicos en la vida humana, ofreciendo grandes oportunidades de desarrollo tecnológico, científico y económico. Hoy en día, es necesario continuar con la motivación en el desarrollo de la fotónica para ir cubriendo las necesidades del ser humano. Por lo que en la actualidad, se necesita de técnicas avanzadas en el procesamiento de imágenes médicas y endoscopia, sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad de transmisión, ancho de banda y calidad en el envío de señales a través de fibra óptica, desarrollo de celdas fotovoltaicas de alto rendimiento para elevar la eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica, investigación de nuevos materiales para mejorar la calidad en la generación de nuevas fuentes de luz donde se involucra a los diodos emisores de Luz (LEDs), procesamiento de materiales con láseres de alta potencia para cumplir con los desafíos mundiales en energía, agricultura, comunicaciones y salud, entre otros muchos. Como ejemplo del alcance de la fotónica en el desarrollo de ciencia se encuentra en la física de partícula que necesita de sensores ópticos desarrollados con materiales avanzados para la detección de partículas. Además, la química analítica necesita de estos sensores ópticos como instrumentos ópticos para determinar características importantes en la interacción de la luz con la materia. Otro equipo de interés muy importante es el Sincrotrón que genera Radiación de Sincrotrón que es utilizado para observar intrínsecamente a la materia con gran precisión, lo cual permite descubrir nuevos productos farmacéuticos conociendo la composición química a través de determinar los átomos y en qué estado se encuentran. Los microscopios de la actualidad ofrecen una oportunidad en la medicina y la ciencia en la toma de imágenes a nivel nanométrico ofreciendo detalles que antes no se tenía acceso. O los láseres de alta potencia que inducen condiciones extremas en la materia para estudiar su comportamiento. En los años recientes, las principales economías del mundo, como los Estados Unidos de América, el Reino Unido, Alemania y Canadá, han reconocido a la óptica y la fotónica como tecnologías clave en su desarrollo futuro (secretaría de economía, 2016). Esto abre la oportunidad en México para el desarrollo de la fotónica y tomar el liderazgo en Latinoamérica como País eje. Importante destacar que, en 2018, se propuso reformar la Ley de Ciencia y Tecnología para incorporar, como bases de una política de Estado que sustente la integración del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, la óptica y la fotónica como tecnologías esenciales para el desarrollo futuro de México en materia económica, educativa, científica, tecnológica y de innovación (Cámara de Diputados, 2018). La propuesta se llevó a cabo en la cámara de diputados y motiva a los investigadores que nos encontramos realizando investigación y desarrollo tecnológico en Fotónica en las diferentes regiones del País a continuar en este camino emocionante de la Ciencia y Tecnología. Sin embargo, uno de los principales problemas a lo que se encuentra un investigador que hace ciencia y desarrollo tecnológico en fotónica es la adquisición de equipo especializado por el alto costo y el acercamiento que no existe entre la industria y los grupos de investigación. Describiendo más específicamente la evolución de la fotónica en el Estado de Chiapas, se ha encontrado que ha sido lento por la falta de conocimiento de la amplia oportunidad que ofrece en las aplicaciones importantes en áreas regionales de interés como la agricultura, salud, energía renovable, medio ambiente y hoy en día más aún en el monitoreo de estructuras civiles dado que Chiapas es considerada a nivel Nacional como una zona sísmica activa. Esto conlleva a que se debe continuar y superar los desafíos de la falta de infraestructura tecnológica avanzada y la necesidad de mayor financiamiento para la investigación. Con todo esto, en el Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez se ha venido desarrollando sensores ópticos y sensores de fibra óptica para aplicaciones en medio ambiente, así también aplicación de la tecnología láser en el control de maleza y en la estimulación de semillas para lograr una eficiente germinación.

2. Aplicación de la fotónica en Chiapas.

La fotónica como área importante en el Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Tuxtla es una realidad. La fotónica se ha desarrollado dentro de los Posgrados Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica



(MCIM) y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI), ambos con reconocimiento en el Sistema Nacional de Posgrado del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). En el DCI se ha propuesto como línea de Investigación principal Fotónica y Electrónica. La descripción de la línea Fotónica y Electrónica proporciona la oportunidad de realizar investigación aplicada de frontera en áreas innovadoras como la fotónica, la fotoquímica y la espectroscopía de materiales emergentes que interactúan con la luz. Estas tecnologías tienen aplicaciones en la generación de luz, absorción y desarrollo de sistemas sensitivos como sensores ópticos o de fibra óptica, así como en administración y uso eficiente de energía. Además, desempeñan un papel crucial en la configuración del futuro de la tecnología, permitiendo el desarrollo de dispositivos más rápidos, eficientes y versátiles. A continuación, se describe algunas de las aplicaciones realizadas en nuestra Institución que han sido publicadas en revistas científicas de arbitraje rigurosos indexadas en la Journal Citation Report (JCR) y otros índices. Dentro de estas aplicaciones se enlistan el amplificador óptico como medio activo en láseres de fibra óptica, Salud, medición de parámetros químicos y físicos, monitoreo de la salud estructural y agro-fotónica.

1. Amplificador óptico:

i) Diseño de un amplificador de alta ganancia utilizando fibra dopada con Erblio para estudiar fenómenos no lineales.

En este trabajo se presentaron resultados de una configuración de un amplificador óptico de alta ganancia elaborado a partir de fibra dopada con erbio. Su propósito es la amplificación de pulsos de baja potencia provenientes de diodos láser. El amplificador óptico fue construido con dos etapas de amplificación. La primera etapa utilizó una configuración reflexiva donde una señal se amplifica dos veces en la misma EDF. La segunda etapa funcionó como un amplificador de alta potencia. Finalmente, se logró que la amplificación de un pulso de entrada de 1.5 mW se obtuviera un pulso de 70 W en la salida.

ii) Amarre de la longitud de onda de la emisión de un diodo láser con retroalimentación distribuida para un amplificador de fibra óptica dopada con Erblio en configuración reflectiva.

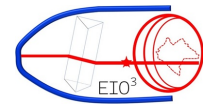
Se propuso un diseño electrónico confiable y exitoso de un control de la temperatura para amarrar automáticamente la longitud de onda de un láser de diodo de retroalimentación distribuida (Distributed FeedBack, DFB) y se demostró que mejora la eficiencia de un amplificador de fibra dopado con erbio. Se construyó utilizando un termistor de un enfriador comercial para monitorear la temperatura en el láser de diodo DFB. El DFB fue modulado por un generador de pulsos como señal de entrada del Amplificador. El tiempo de estabilización de amarre de la longitud de onda a fue de 100 s. El esquema de bloqueo de longitud de onda proporcionó minimizando la emisión espontánea amplificada.

iii) Nuevo enfoque para mediciones indirectas de corriente alterna basado en la interrogación de un láser de fibra.

En este artículo se demostró una alternativa novedosa para medir la corriente alterna de manera indirecta, con tecnología de fibra óptica. En este caso se utilizó la interrogación de un láser de fibra dopado con Erblio. El principio de funcionamiento se basa en la detección de la temperatura de un cable eléctrico AWG-22 causada por el efecto Joule. La transferencia de calor entre una rejilla de Bragg de fibra que actúa como sensor y el cable eléctrico modula la intensidad de la potencia de salida óptica del láser de fibra. La variación de la intensidad del láser de fibra es causada por el proceso de superposición de longitudes de onda en el láser de fibra. La ventaja de la alternativa propuesta es la medición de la corriente CA a través de la potencia óptica del láser de fibra. El incremento lineal de la potencia de salida óptica en función de la temperatura permite la medición de la corriente CA, lo que es una ventaja sobre otros métodos.

iv) Nuevo enfoque para mediciones indirectas de corriente alterna basado en la interrogación de un láser de fibra.

En este artículo se demostró una alternativa novedosa para medir la corriente alterna de manera indirecta, con tecnología de fibra óptica. En este caso se utilizó la interrogación de un láser de fibra dopado con Erblio. El principio de funcionamiento se basa en la detección de la temperatura de un cable eléctrico AWG-22 causada por el efecto Joule. La transferencia de calor entre una rejilla de Bragg de fibra que actúa como sensor y el cable eléctrico modula la intensidad de la potencia de salida óptica del láser de fibra. La variación de la intensidad del láser de fibra es causada por el proceso de superposición de longitudes de onda en el láser de fibra. La ventaja de la alternativa propuesta es la medición de la corriente CA a través de la potencia óptica del láser de fibra. El incremento lineal de la potencia de salida óptica en función de la temperatura permite la medición de la corriente CA, lo que es una ventaja sobre otros métodos.



2. Salud:

i) Diseño de un mouse óptico facial para pacientes que presentan discapacidad parapléjica:

En este trabajo se presentó un diseño de un Mouse Óptico Facial con una interfaz electrónica basada en dispositivos optoelectrónicos, utilizando un microcontrolador con módulo Universal Serial Bus (USB). Se implementó un dispositivo y un software con interfaz de conexión para acceder a una computadora a las personas con discapacidades motrices severa en extremidades superiores, en especial las que presentan cuadriplejía. En este contexto se propuso un diseño de un dispositivo optomecánico capaz de ajustarse a los diferentes contornos faciales.

ii) Enfoque para la estimación de la eficiencia de filtración de mascarillas faciales de consumo mediante termografía. Durante la pandemia de COVID-19 fue necesario el uso de cubrebocas, sin embargo, no todos presentaban la calidad estándar necesaria para evitar la transferencia del virus de una persona a otra. De aquí nace la necesidad de estudiar los cubre bocas para evaluar la calidad de filtración. Se desarrolló un método de estimación basado en el procesamiento de imágenes térmicas, para la adquisición de imágenes de distribución de calor y se construyó un sistema de imágenes termográficas. Con un modelo de aprendizaje profundo se midió el porcentaje de fuga de cada cubre boca. Los resultados obtenidos de esta investigación revelaron que la efectividad de la filtración dependía de la pérdida de calor a través del material de fabricación.

iii) Estrategias de diseño basadas en la caracterización de LED UV-C para mejorar la inactivación de Escherichia coli.

La desinfección del agua potable es necesaria hoy en día, por lo que desarrolló una lámpara LED UV-C diseñada para la desinfección eficaz del agua, abordando como problema principal la baja eficiencia cuántica y el autocalentamiento significativo debido a las corrientes de funcionamiento elevadas que reducen el rendimiento del LED. El estudio evaluó el potencial de desinfección contra bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Salmonella*. Los resultados indican una inactivación exitosa de *E. coli* dentro de medios de agar y una notable supresión del crecimiento en medios de cultivo de Mueller-Hinton, como se confirmó a través de mediciones de densidad óptica.

3. Medición de parámetros químicos (medioambiente):

i) Medición remota de Ozono en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas con técnica espectroscopia por absorción óptica diferencial.

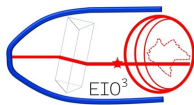
Se presentó una un sistema de monitoreo remoto de contaminantes basado en espectroscopia por absorción óptica diferencial pasiva, logrando detectar trazas de contaminantes presentes en la atmósfera. La longitud de alcance con este método fue de aproximadamente 2.9 km lineal, determinando la concentración de ozono presente en la zona de estudio.

ii) Sensor de fibra óptica para la medición de nitrato en agua potable utilizando como compuesto sensible la lofina.

Se realizó la caracterización la Lofina utilizada como capa sensible para medir el nitrato en el agua potable. La caracterización espectral se llevó a cabo en el rango de longitud de onda de 300 a 1100 nm y se demostró que la Lofina se puede utilizar como un sensor de fibra para la detección de nitrato en el agua potable. La medición de nitrato fue en el rango entre 1 mg/l y 70 mg/l con un tiempo de respuesta fue de 20 ms y el tiempo de recuperación de 40 ms.

iii) Capa sensible a base de lofina e hidróxido de calcio para la detección de oxígeno disuelto en agua.

Considerando los resultados de la lofina como un compuesto sensible a nitrato, se había demostrado que la lofina al ser mezclado con una base fuerte podría interactuar con el oxígeno, se procedió a investigar su comportamiento con el oxígeno disuelto en el agua. La capa sensible fue elaborada con Lophine e hidróxido de calcio, la cual dio como resultado dos formas de medición: (a) la magnitud de la absorbancia óptica, y (b) el desplazamiento batocrómico del pico de absorción en función del oxígeno disuelto. La magnitud de la absorbancia se relacionó con la concentración de oxígeno disuelto en agua pura con éxito, y se observó en el rango de longitud de onda de 400 a 1100 nm. Este resultado permitió la medición mediante el uso de un fotodetector para medir la potencia óptica en función del oxígeno disuelto. Se encontró que la capa sensible tiene un pico de absorción alrededor de 319 nm, y el desplazamiento batocrómico fue de 24 nm. El tiempo de respuesta y recuperación fue de 87 ms y 89 ms respectivamente.



iv) *Nuevo biosensor de arsénico POLA obtenido a partir de una célula biorreportera de E. coli modificada genéticamente.* Se había demostrado que se pueden medir parámetros químicos en agua, sin embargo, se tenía que unos de los elementos naturales que a altas concentraciones en el agua es dañino para el ser humano. Por lo que se investigó un nuevo vector denominado vector total POLA (*VtP*), que detecta arsenito como señal de entrada y tiene un amplificador de señal para expresar una proteína fluorescente verde como respuesta. Este vector funciona en la bacteria *E. coli* K-12 y se demostró que la señal de fluorescencia a 530 nm del biosensor de arsénico vivo aumenta linealmente con el tiempo transcurrido en función a la concentración de arsenito. Se realizó un experimento para determinar la respuesta cinética del biosensor bacteriano en función de la concentración de arsenito durante 12 h, que confirmó que el desarrollo del nuevo vector produce una respuesta lineal bien definida como fluorescencia. Se realizó una prueba preliminar en la que el biosensor bacteriano se acopló a una fibra óptica con el fin de investigar la posibilidad de su integración como biosensor de fibra óptica en un futuro cercano.

4. Medición de parámetros físicos (medio ambiente):

i) *Medición de la viscosidad del biodiesel mediante un viscosímetro óptico.*

En su momento, se había iniciado con la generación de biodiesel como un combustible de origen natural para evitar contaminación ambiental. Entonces, se propuso una técnica no invasiva para la medición de la viscosidad del biodiesel utilizando un viscosímetro de bola descendente modificado, así como tecnología óptica. La viscosidad se midió de 28 a 70 °C, que es de interés para determinar la calidad del biodiesel. Se encontró que el viscosímetro óptico de bola descendente ofrece una resolución de una medición de viscosidad de ± 0.039 mPa s con un error relativo de 1.47933%.

ii) *Instrumentación de la refracción de la luz para medir el índice de refracción de líquidos transparentes.*

En este trabajo se propuso instrumentar el fenómeno óptico de la refracción de la luz con la finalidad de medir el índice de refracción (IR) de líquidos transparentes en función de la temperatura. En la refracción se puede observar que un cambio de ancho en un objeto de referencia en un líquido transparente se produce por la refracción de la luz. Se utilizó procesamiento de imágenes para medir el ancho del objeto utilizando una imagen de un microscopio digital. El instrumento midió el índice de refracción en un rango de 15 °C a 100 °C con una precisión de 10–4%.

iii) *Demostración de la mejora de la sensibilidad de un sensor de temperatura de fibra óptica utilizando la longitud de onda de máxima absorción de la lófina.*

La temperatura es un parámetro que se necesita tener controlada en muchos aspectos de medición. Por lo que se investigó un sensor de fibra óptica que presentó mayor sensibilidad que los sensores electrónicos actuales. Se realizó un estudio espectroscópico de la lófina y se encontró que el espectro de absorción se encontraba en el rango de longitud de onda de 290 a 375 nm. Además, se estudió la dependencia de la absorbancia de la lófina en función de la temperatura. Se construyó un sensor de temperatura de fibra óptica utilizando una fuente óptica con una longitud de onda de 365 nm para mejorar la sensibilidad. La sensibilidad en esta longitud de onda se comparó con las sensibilidades de las longitudes de onda infrarrojas.

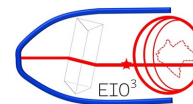
iv) *Sensor de temperatura de fibra óptica que utiliza una configuración de estructura de fibra sin núcleo recubierta con material termocrómico.*

Continuando con la investigación en el desarrollo de sensores de fibra óptica para medir la temperatura, se propuso una configuración que está constituida como una fibra óptica sin núcleo. El sensor de fibra óptica propuesto presentó una sensibilidad de -0,08895 dB/°C en un rango de temperatura de 27°C a 63°C. La respuesta del sensor se caracterizó y validó con un sensor de temperatura electrónico comercial.

v) *Optical fiber pH sensor based on a multimode interference device with polymer overlay.*

La medición del pH es importante porque muchos procesos químicos y biológicos solo pueden ocurrir a ciertos niveles de acidez o alcalinidad. La tecnología de fibra óptica presenta una alternativa en la medición de pH al ser diseñada como sensor. En este caso, se propuso un sensor de pH de fibra óptica basado en una estructura de interferencia multimodal. El elemento sensible transductor utiliza una pieza de fibra sin núcleo recubierta con una mezcla de clorhidrato de polialilamina y ácido poliacrílico mediante un método de autoensamblaje capa por capa modificado.

vi) *Película compuesta de PEDOT:PSS/PVA como medio sensible para sensor de pH en fibra óptica.*



Con la finalidad de incrementar la sensibilidad de un sensor de fibra óptica para la medición del pH y explorar el rango de medición se propuso un nuevo material que actuara como elemento sensible. El elemento sensible es una película compuesta PEDOT:PSS/PVA que exhibió sensibilidad a valores de pH bajos en el rango de 1–7 pH. La adición de PVA fue importante para el proceso de adhesión a la superficie de la fibra óptica. La morfología de los polímeros PEDOT:PSS permitió la caracterización a estímulos de pH que se basaron en la transmisión de potencia óptica generada a partir de la interacción de la luz que se propaga en el núcleo de la fibra óptica y la sección de fibra óptica recubierta con la película sensible.

5. Monitoreo de la salud estructural:

i) Configuración sencilla de un sensor de fibra óptica para medir la deflexión en vigas de concreto.

En este trabajo se propone una configuración sencilla de un sensor de fibra óptica utilizado para medir la deflexión en vigas de hormigón. Este sensor de fibra óptica incluye poleas con una ranura para generar una pérdida drástica constante en la fibra óptica y se caracterizó en función de tres diámetros de polea en una base metálica de fabricación casera. Se encontró que la pérdida óptica está relacionada con la deflexión de la viga de concreto. El sensor de fibra óptica se validó en una viga de hormigón en tiempo real utilizando un actuador de carga variable de 50 toneladas.

ii) Demostración experimental del efecto Vernier óptico mediante la conexión en cascada de fibras ópticas monomodo cónicas.

El efecto Vernier ha demostrado que incrementa la sensibilidad de un sensor de fibra óptica. Se estudió efecto Vernier óptico mediante la conexión en cascada de fibras ópticas monomodo cónicas (SMF28). Las fibras ópticas cónicas se ajustaron a un par de interferómetros de fibra Mach-Zehnder con rangos espectrales libres ligeramente diferentes. Esto fue aplicado como un sensor de fibra óptica para medir desplazamiento/curvatura en estructuras civiles.

iii) Demostración de la mejora del rendimiento de un sensor de desplazamiento de fibra óptica mediante el uso del efecto Vernier armónico óptico mediante la conexión en cascada de fibras ópticas cónicas monomodo.

Dada la oportunidad de obtener mayor sensibilidad en la medición de desplazamientos micrométricos, se propuso mejorar un sensor de fibra óptica utilizando el efecto Vernier. En este caso se utilizaron fibras cónicas y se ajustaron a un par de interferómetros de fibra Mach-Zehnder en serie. La medición del armónico de primer orden del efecto Vernier se logró incrementar la sensibilidad en la medición de desplazamiento milimétricos.

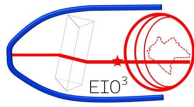
iv) Enfoque para mejorar la sensibilidad de un sensor de fibra de desplazamiento Mach-Zehnder utilizando el método de integración diferencial de espectro y el filtro en una configuración de doble paso.

Continuando con la mejora de la sensibilidad en la medición de desplazamiento se presentó un sensor de desplazamiento de fibra Mach-Zehnder que utiliza un método de análisis alternativo conocido como integración diferencial espectral junto con una configuración experimental que permite el doble paso de luz a través del mismo punto del sensor. Este enfoque incrementó la sensibilidad, logrando el doble del orden de magnitud que se obtiene típicamente con un interferómetro de fibra Mach-Zehnder. Se demuestra que este método podría emplearse como un sensor de fibra óptica para medir micro-desplazamientos. El resultado establece que para rangos cortos que requieren una resolución satisfactoria, el método es significativamente más efectivo, aumentando la sensibilidad en una configuración de doble paso.

6. Agro-fotónica:

i) Método óptico para estimar el contenido de clorofila en las hojas de las plantas.

Chiapas por ser un Estado de la República con diversidad de flora y fauna, es considerado como un laboratorio natural donde se pueden estudiar muchos aspectos importantes para conservar el ecosistema y evitar la contaminación. Por ello, la fotónica juega un papel importante en desarrollar tecnología para el procesamiento y medición de parámetros en plantas y animales para investigar y realizar muestreos para el aprovechamiento en la agricultura. Por lo que, se realizó un nuevo enfoque basado en visión por computadora para estimar el contenido de clorofila en una hoja de planta utilizando reflectancia y transmitancia como parámetros ópticos base. Se capturan imágenes de la parte superior e inferior de la hoja y se estima el contenido de clorofila mediante regresión lineal donde las entradas son la reflectancia y la transmitancia de la hoja. El desempeño del método propuesto para la estimación del contenido de clorofila se comparó con un espectrofotómetro y un medidor de desarrollo de análisis de suelos y plantas (SPAD). La estimación



del contenido de clorofila se realizó para *Lactuca sativa* L., *Azadirachta indica*, *Canavalia ensiforme* y *Lycopersicon esculentum*. La precisión alcanzada fue del 91% para cultivos como *Azadirachta indica*, donde el valor de clorofila se obtuvo utilizando el espectrofotómetro. Adicionalmente, fue posible lograr una estimación del contenido de clorofila en la hoja cada 200 ms con una cámara de bajo costo y un arreglo óptico simple.

ii) Cámara inteligente basada en FPGA para estimaciones precisas de clorofila.

Por otro lado, para proporcionar un dispositivo portátil adecuado para la estimación de clorofila en cultivos alimentarios a gran escala, se implementó un arreglo óptico y una formulación algorítmica dentro de una red de cámaras inteligentes basada en una matriz de puertas programables en campo (FPGA). Los resultados experimentales demostraron en términos de precisión y velocidad de procesamiento el 97% de precisión, brindando estimaciones de clorofila rápidas (cerca de 5 ms por estimación).

iii) Detección de defectos en la cáscara del huevo mediante un sistema de visión para garantizar la incubación en la producción avícola.

La avicultura en el Estado de Chiapas es de mucha importancia, ya que ofrece atención al sector alimentario de las diferentes regiones de nuestro País. Uno de los problemas que se tiene en la producción avícola son las deformaciones que presenta un huevo al ser incubada, ya que no asegura el nacimiento del ave. Por lo que se propuso detectar los defectos en huevos de aves de corral con tecnología óptica y procesamiento de imagen. El sistema de visión se basa en la detección de defectos mediante el escaneo de un patrón láser de luz estructurada e imágenes, resaltando los cambios en la geometría como resultado de la deformación de las transiciones láser generadas al escanear la superficie del huevo. Luego, las imágenes se analizan para obtener puntos equidistantes a lo largo de la curva y se evalúan creando una interpolación spline cúbica. La interpolación permite la extracción de características métricas descriptivas para observar la disparidad entre curvas, ilustrando los defectos mediante la realización de una interposición de gráficos. Con este sistema se logró una eficiencia del 97,5% durante la evaluación de 150 muestras de huevos. Esta técnica se puede aplicar para detectar huevos corrugados, arrugados, con granos, con formas irregulares y deformes.

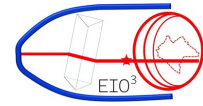
iv) Viabilidad de la termografía de fase pulsada para la estimación de la humedad.

La deshidratación de productos agrícolas ofrece a los agricultores la oportunidad de conservar sus productos por más tiempo y, al mismo tiempo, obtener más ganancias de ellos. Sin embargo, tradicionalmente, la calidad de los productos deshidratados se ha determinado utilizando métodos invasivos, por ejemplo, a través de mediciones manuales con un calibrador Vernier y un micrómetro. Sin embargo, las mediciones manuales tienen su mayor debilidad en el monitoreo de líneas de producción continuas y, por eso, a menudo se requiere una metodología eficiente para estimar la humedad en productos deshidratados. Este estudio tuvo como objetivo explorar la viabilidad de la termografía pulsada para estimar el contenido de humedad de los productos agrícolas en el proceso de secado. La muestra se sometió a un pulso de calor y una cámara infrarroja observó su reacción a través del tiempo; luego, se generó una curva característica a partir de la secuencia de imágenes capturadas. Esta curva relaciona el contenido de humedad con la respuesta al pulso de calor.

v) Análisis del comportamiento de los corderos mediante un modelo predictivo de CNN y una sola cámara.

Una aplicación importante en el seguimiento de objetos es el análisis del comportamiento de los animales para estimar su estado de salud. Se propuso una metodología para analizar el comportamiento de los corderos desde un enfoque basado en un modelo predictivo y aprendizaje profundo, utilizando una sola cámara RGB. En primer lugar, se diseñó e implementó una arquitectura para el seguimiento de corderos utilizando CNN. En segundo lugar, se diseñó un modelo predictivo para el reconocimiento del comportamiento animal. De acuerdo con los resultados experimentales sobre el conjunto de datos utilizado, la precisión fue del 99,85% para detectar actividades de corderos, y para el modelo predictivo propuesto, una precisión media fue del 83,52% para detectar estados anormales.

Finalmente, si se desea consultar a profundidad los temas que aquí se han descrito de forma general y superficial se puede consultar en la referencia (Camas, 2024).



Conclusiones.

Se ha descrito los trabajos más relevantes que se han llevado a cabo en el Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez. Estos trabajos han sido desarrollados en los Posgrados de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, a través de tesis de Maestría y Doctorado. La finalidad de este artículo de divulgación no fue de comparar resultados entre artículos, sino dar una clasificación como aplicación de la fotónica y dar a conocer a la comunidad las áreas de oportunidad que se pueden obtener con el aprovechamiento entre las diferentes áreas de la Ingeniería y de la Ciencia con la fotónica y electrónica de precisión.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado año con año a nuestra Institución. En este caso a los proyectos con No. 20593.24-P y 20598.24-P.

Referencias bibliográficas.

Cámara de Diputados, 2018.

<http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2018/Marzo/10/5069-Propone-diputada-incorporar-optica-y-fotonica-como-tecnologias-esenciales-para-el-desarrollo-de-Mexico>.

Camas Anzueto, Jorge Luis, 2024. <https://scholar.google.com/citations?user=0MlwGy0AAAAJ&hl=es>.

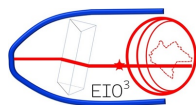
Secretaría de Economía, Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica, 2016.

<https://mexicanphotoniccluster.org/wp-content/uploads/2022/10/2016-12-09-MPI-TRM-Hacia-un-Me%CC%81xico-ma%CC%81s-Brillante-1.pdf>

Biografía de los investigadores.



Dr. Jorge Luis Camas Anzueto, es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte del CONAHCYT. Miembro honorífico del Sistema Estatal de Investigadores por el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas (ICTICH). Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG, Participó en la creación de la MCIM y del DCI del ITTG, además de la Licenciatura en Física y Matemática de la Facultad de Física y Matemática de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). Ha publicado más de 55 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 12 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 50 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX.



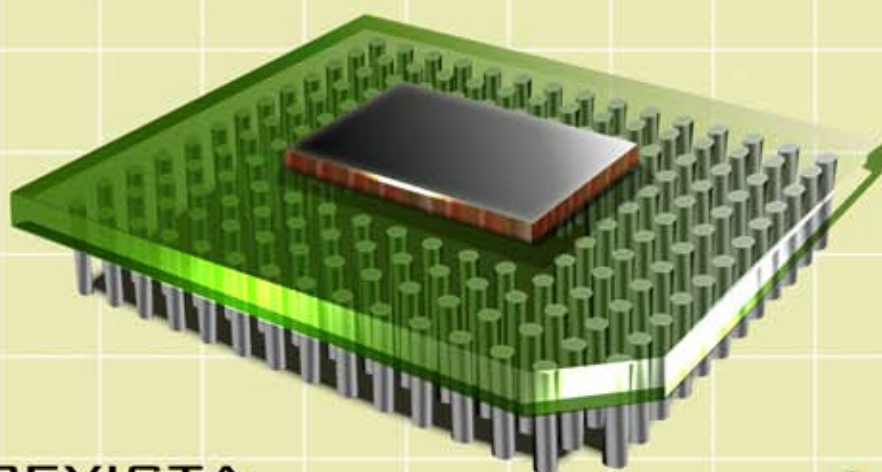
Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez, Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó dos estancias Postdoctorales en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I. Sus investigaciones están dirigidas a la optoelectrónica, a los sensores de fibra óptica, al desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados ajustables a múltiples longitudes de onda. Actualmente, es profesor-investigador en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



Rocío Meza Gordillo, Química Farmacobióloga por la Universidad Veracruzana, Doctora en Ciencias con Especialidad en Química Orgánica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN-Unidad Zacatenco. Premio Chiapas en Ciencias 2011 otorgado por el Gobierno del Estado de Chiapas, Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 2, además del Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Chiapas, nivel Honorífico desde el 2011 y profesora con Perfil deseable PRODEP. En los últimos cinco años ha dirigido 8 proyectos de investigación financiados por diversos organismos como el Tecnológico Nacional de México, el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas. En cuanto a la formación de recursos humanos, la Dra. Meza ha graduado a 4 doctores, 12 maestros y 15 ingenieros bioquímicos. En la actualidad es directora de dos tesis de doctorado y 2 de maestría. En materia de publicaciones en revistas indexadas, en los últimos 3 años participó como co-autora de 21 artículos y autora de 15, además de 1 título de patente de modelo de utilidad otorgada.



José Antonio Hoyo Montaña nació en Mexicali, Baja California, México, en 1964. Obtuvo la licenciatura en ingeniería industrial y electrónica por el Instituto Tecnológico de Hermosillo, en 1989, y los grados de M.C. y D.C. con especialidad en electrónica de potencia por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), en 2000 y 2005, respectivamente. Desde 2005, es profesor a tiempo completo tiempo completo en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo. Sus intereses de investigación incluyen control digital de sistemas electrónicos de potencia, automatización de edificios e iluminación de estado sólido.



REVISTA
TECNOLOGÍA
DIGITAL

www.revistatecnologiadigital.com