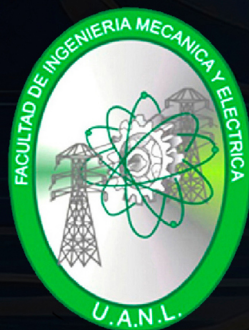


Ingenierías

ISSN 1405-0676

98



ENERO - JUNIO 2025, Volumen 28, No. 98

Ingenierías REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

- I
- 3 **Remoción del contaminante Bisfenol A en fase acuosa utilizando Bi_2WO_6 como fotocatalizador**
Magaly Y. Nava-Núñez, Paulina R. Soto-Álvarez, A. Martínez-de la Cruz
 - 15 **Análisis de sistemas de asistencia para la combustión en turbinas de gas - hidrógeno**
Eduardo Ugalde Mejía
 - 26 **Dos soluciones al problema de servosistemas**
Efrain Alcorta García
 - 31 **Efecto de los parámetros de impresión 3D en la resistencia mecánica del ABS**
Flor Yanhira Rentería-Baltiérrez, Jesús Gabino Puente-Córdova, Pedro Inés Loera-Martínez, Arlethe Yari Aguilar-Villarreal
 - 42 **Medio Siglo de Innovación: Nanotecnología y Telefonía Celular, Dos Pilares de la Era Moderna**
Alejandra I. Vallejo Martínez, Alexis J. Ortiz Ledezma, Roxana Berlanga Pérez, Leonardo Chávez-Guerrero
 - 53 **Colaboradores**
 - 55 **Información para colaboradores**
 - 56 **Código de ética**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



Ingenierías

Ingenierías, Vol. 28, N° 98, enero-junio 2025. Es una publicación semestral, editada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Domicilio de la Publicación: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450. Teléfono: +52 (81) 83294020 Ext. 5854, Fax +52 81 83320904. Editor responsable: Dr. Juan Antonio Aguilar Garib. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2011-101411064600-102, ISSN: 1405-0676. Número de certificado de licitud de título y contenido: 15,525, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Registro de marca ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial: En trámite. Impresa por: Desarrollo Litográfico S.A. de C.V., M. del Llano 924 Ote., Centro, Monterrey, Nuevo León, México, C.P. 64000. Fecha de terminación de impresión: 31 de enero de 2025. Tiraje: 800 ejemplares. Distribuido por: Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455.

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

Prohibida su reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Editor.

Impreso en México
 Todos los derechos reservados
 © Copyright 2025
 revistaingenierias@uanl.mx

DIRECTORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Dr. Santos Guzmán López
 Rector
 Dr. Juan Paura García
 Secretario General
 Dr. Jaime Arturo Castillo Elizondo
 Secretario Académico
 Dr. José Javier Villarreal Tostado
 Secretario de Extensión y Cultura
 Lic. Antonio Ramos Revillas
 Director de Editorial Universitaria

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Dr. Arnulfo Treviño Cubero
 Director
 Dr. Fernando Banda Muñoz
 Subdirector Académico
 Dr. Juan Antonio Aguilar Garib
 Editor responsable
 M.C. Cyntia Ocañas Galván
 Dr. Jesús G. Puente Córdova
 Redacción
 Gregoria Torres Garay
 Tipografía y formación
 Juan Pedro Carreón Luna
 Auxiliar
 M.A. José Luis Martínez Mendoza
 Diseño
 Ing. Cosme D. Cavazos Martínez
 Webmaster
 René de la Fuente Franco
 Impresor

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Dr. Mauricio Cabrera Ríos, Puerto Rico. UPRM / Dra. Ruth Kiminami, Brasil. UFSC, San Pablo / Dr. Juan Jorge Martínez Vega, Francia. Universidad de Toulouse III / Dr. Zarel Valdez Nava, Francia. UPS-INPT-LAPLACE-CNRS.

CONSEJO EDITORIAL MÉXICO

Dr. Benjamín Limón Rodríguez, FIC-UANL / Dr. José Rubén Morones Ibarra, FCFM-UANL / Dr. Ubaldo Ortiz Méndez, FIME-UANL / Dr. Félix Sánchez De Jesús, ICBI-UAEH / Dr. Ernesto Vázquez Martínez, FIME-UANL.

COMITÉ TÉCNICO

Dr. Efraín Alcorta García, FIME-UANL / Dr. Rafael Colás Ortiz, FIME-UANL / Dr. Jesús De León Morales, FIME-UANL / Dr. Virgilio Ángel González González, FIME-UANL / Dr. Carlos Alberto Guerrero Salazar, FIME-UANL / Dra. Oxana Vasilievna Karissova, FCFM-UANL / Dr. Francisco Eugenio López Guerrero, FIME-UANL / Dr. Roger Z. Ríos Mercado, FIME-UANL / Dr. Juan Ángel Rodríguez Liñán, FIME-UANL.

Remoción del contaminante Bisfenol A en fase acuosa utilizando Bi_2WO_6 como fotocatalizador

Magaly Y. Nava-Núñez, Paulina R. Soto-Álvarez, A. Martínez-de la Cruz

Universidad Autónoma de Nuevo León, CIIDIT, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, México

magaly.navanu@uanl.edu.mx, azael.martinezdl@uanl.edu.mx

RESUMEN

Los fotocatalizadores basados en bismuto han demostrado un excelente desempeño en procesos de oxidación avanzada para usos en remediación ambiental. Este estudio evalúa el efecto del tratamiento térmico durante la síntesis solvotermal de Bi_2WO_6 , en relación a sus propiedades fotocatalíticas para la eliminación de bisfenol A en fase acuosa. Los resultados indican que el tratamiento térmico a 400°C resultó en un incremento de la cristalinidad del Bi_2WO_6 , además de una mayor absorción de luz y una disminución en la recombinación de las cargas fotogeneradas, características que influyeron de manera positiva a la degradación de 90% de BPA medio acuoso.

PALABRAS CLAVE

Bi_2WO_6 , fotocatalisis, contaminantes endocrinos, bisfenol A.

ABSTRACT

Bismuth-based photocatalysts have demonstrated exceptional performance in advanced oxidation processes for uses in environmental restoration. This study evaluates the effect of thermal treatment during the solvothermal synthesis of Bi_2WO_6 and its photocatalytic properties for the elimination of bisphenol A in the aqueous phase. The results indicate that a thermal treatment at 400°C brought about an increase in the crystallinity of Bi_2WO_6 , in addition to greater absorption of light and a reduction in the recombination of photogenerated charges, characteristics that positively influenced the degradation of 90 % BPA aqueous medium.

KEYWORDS

Bi_2WO_6 , photocatalysis, endocrine pollutants, bisphenol A.

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua potable en México es inadecuado e insuficiente, lo que puede afectar de manera notable a la salud pública y el medio ambiente. En México, la disponibilidad promedio anual *per cápita* pasó de 10,000 metros cúbicos en 1960 a 3,660 metros cúbicos en 2017. Para 2030, se espera que la disponibilidad de agua *per cápita* disminuya a menos de 3,000 metros cúbicos por año.¹ El acceso al agua potable es desigual en todas las regiones del país, y las zonas rurales y marginadas enfrentan mayores desafíos para proporcionar agua limpia y segura para la población. Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), solo el 81% de los habitantes del estado de Nuevo León tiene acceso a agua potable.² La falta de agua limpia y segura, provoca problemas de salud en la población, incluyendo enfermedades gastrointestinales y otras enfermedades como anemia, dengue, hepatitis, colera, etc.³ La contaminación del agua en Nuevo León ha aumentado debido a la descarga de aguas residuales contaminadas a ríos y cuerpos de agua. Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), solo un pequeño porcentaje de las aguas residuales del estado reciben el tratamiento adecuado antes de su descarga a los cuerpos de agua.

Las aguas residuales suelen contener contaminantes orgánicos, metales pesados, productos farmacéuticos, contaminantes endocrinos, etc. Entre los diversos contaminantes, el bisfenol A (BPA) ha atraído mucha atención porque es un contaminante orgánico y se considera un potencial disruptor endocrino. Se utiliza ampliamente como precursor del policarbonato utilizado en la producción de latas y materiales de embalaje de alimentos y bebidas. Actualmente, el BPA se encuentra en todas partes (aire, agua, etc.) en cantidades suficientes para ser medido mediante métodos analíticos modernos de ultratrazo (ng mL^{-1} y/o $\mu\text{g L}^{-1}$).⁴ Debido a que el BPA migra fácilmente de los envases de plástico a los alimentos y al agua, la exposición al BPA se produce principalmente a través de la ingestión.⁵ Las mayores concentraciones de BPA se encuentran principalmente en el agua potable y en las aguas residuales, y en menores cantidades en el aire y el polvo del ambiente. La tabla I presenta algunos datos estadísticos sobre las concentraciones de BPA encontradas en diversas investigaciones realizadas tanto en México como alrededor del mundo.

Tabla I. Concentraciones de BPA reportadas en trabajos de investigación nacionales e internacionales.

Caso de estudio	País	Concentración	Referencia
Concentración de BPA encontrado en cuerpo humano (orina)	Canadá	1.15 ng mL^{-1}	6
	USA	2.4 ng mL^{-1}	
Concentración de BPA en agua potable	Norte América	$<0.0001 \mu\text{g L}^{-1}$	7
	Europa	$<0.0002 \mu\text{g L}^{-1}$	
	Asia	$<0.0007 \mu\text{g L}^{-1}$	
Concentración de BPA en aguas residuales en Valle de Tula	México	$148\text{--}3750 \text{ ng L}^{-1}$	8
Concentración de BPA en medio acuático, Pearl River	China	$43.5\text{--}639.1 \text{ ng L}^{-1}$	9
Concentración de BPA en medio acuático, Bayou St. John	Usa	$1.9\text{--}158 \text{ ng L}^{-1}$	10
Concentración de BPA en medio acuático, Río Santa Catarina	México	$30 \mu\text{g L}^{-1}$	11

A pesar de que actualmente no está prohibido el uso del BPA, es claro que este compuesto favorece el incremento de enfermedades como la hipertensión, diabetes tipo II, mutagenicidad, afecciones cardíacas, y cáncer de próstata y seno inclusive en concentraciones muy bajas.¹² En 2023, expertos de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), fundamentados en los más recientes estudios científicos, evaluaron las recomendaciones respecto a la ingesta diaria tolerable (IDT) de BPA, disminuyéndolo a 0.2 nanogramos por kilogramo de peso corporal diariamente. Esta cifra es 20,000 veces inferior a la establecida en 2021, en respuesta al aumento de la exposición mundial al BPA y los severos impactos negativos que produce en la salud humana.

En la actualidad, los procedimientos convencionales para el tratamiento de aguas residuales no consiguen eliminar de manera eficaz el contaminante BPA, reportándose resultados de remoción del BPA inferiores al 10%. Por ende, en años recientes, una gran cantidad de investigaciones se han centrado en la eliminación del BPA del agua a través de tratamientos biológicos, tecnologías de membranas y procesos de oxidación avanzados (PAO's).⁷ Las PAO's son un grupo de tecnologías basadas en el proceso de eliminación de contaminantes mediante radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$).¹³ Entre estas tecnologías destaca la fotocatalisis heterogénea basada en materiales semiconductores. El

proceso operativo de la fotocatalisis heterogénea se basa en el uso de luz solar o lámparas para activar los fotocatalizadores. Si la energía incidente es suficiente y mayor que la correspondiente a la de la banda prohibida del semiconductor, los electrones de la banda de valencia pueden migrar a la banda de conducción dejando un hueco en la banda de valencia del semiconductor. Estos pares electrón-hueco tienen un tiempo de vida media de nano segundos para poder migrar hasta la superficie del semiconductor y poder reaccionar con las especies adsorbidas. En particular, los huecos reaccionan con el agua y/o iones OH^- generando radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) mientras que los electrones reaccionan con el oxígeno produciendo iones superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$). Los radicales hidroxilo y superóxido son las principales especies responsables de la eliminación de contaminantes debido a su fuerte habilidad de oxidación/reducción.¹⁴

Hasta el momento, diferentes óxidos semiconductores como TiO_2 , WO_3 , ZnO , Bi_2O_3 y CdS se han utilizado para eliminar BPA del agua, lo que demuestra el potencial de la tecnología de fotocatalisis para degradar este contaminante.¹⁵ En este trabajo se propone el uso de tungstato de bismuto (Bi_2WO_6), que es uno de los óxidos con estructura de Aurivillius más simple, que presenta absorción en la región visible del espectro solar.¹⁶ La preparación de la muestra se realizará mediante el método solvotermal seguido de un tratamiento térmico de la muestra.

EXPERIMENTAL

Síntesis de Bi_2WO_6

El fotocatalizador Bi_2WO_6 se preparó mediante un proceso de síntesis solvotermal siguiendo los pasos que se esquematizan en la figura 1. En una primera etapa, se prepararon disoluciones de las sales de nitrato de bismuto ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y tungstato de sodio ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con una concentración de 0.1 M en etilenglicol. Posteriormente, 50 mL de la disolución $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fueron añadidos mediante goteo 50 mL a 100 mL de la disolución de $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, manteniendo una agitación vigorosa durante 5 minutos para enseguida transferir la disolución resultante a un reactor autoclave donde fue elevada la temperatura a 148 °C y mantenida así durante 24 h. Una vez transcurrido el tiempo de reacción el material se separó por filtración y se lavó tres veces con agua destilada y tres veces con etanol para posteriormente secarse en una estufa a 70 °C durante 24 h. Adicionalmente, las muestras en polvo fueron tratadas térmicamente a 400 °C durante 6 h. La muestra preparada de Bi_2WO_6 fue etiquetada como $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$, mientras que la muestra tratada térmicamente se etiquetó como $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$.

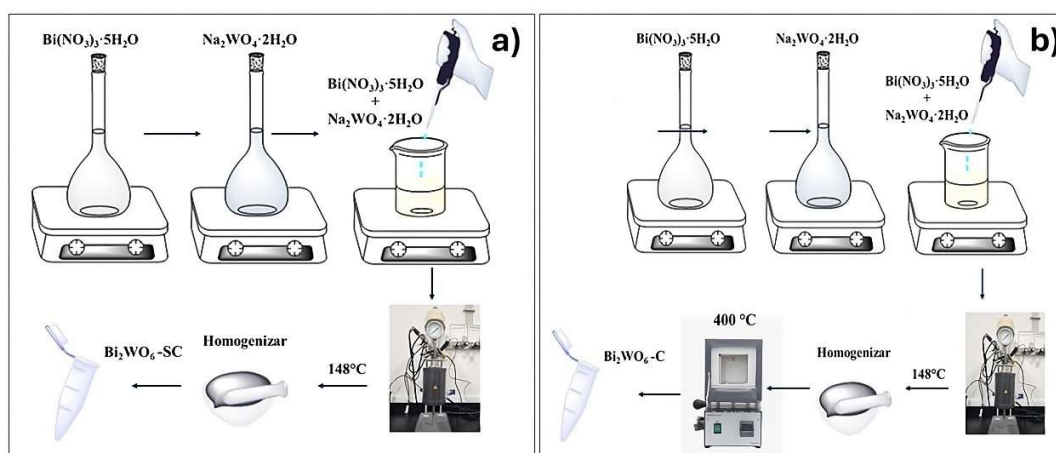


Fig. 1. Esquema de preparación del fotocatalizador Bi_2WO_6 por la técnica solvotermal a) muestra sin tratamiento térmico y b) muestra tratada térmicamente a 400 °C.

Caracterización

Las muestras en polvo de Bi₂WO₆ se caracterizaron física y químicamente utilizando diferentes técnicas experimentales. El análisis de difracción de Rayos-X en polvo se realizó utilizando un difractómetro de rayos-X (Bruker D8 Advance) con una radiación Cu-K α ($\lambda=1.54$ Å). El análisis morfológico se realizó mediante un microscopio electrónico de barrido (FEI NOVA NanoSEM 200). Las propiedades ópticas se evaluaron con un espectrofotómetro de reflectancia difusa (Agilent Technologies Cary 4500) y finalmente los espectros de fotoluminiscencia se obtuvieron utilizando un espectrofotómetro (LS55) usando una longitud de onda de excitación de 400 nm.

Evaluación fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de las muestras de Bi₂WO₆ se evaluó mediante la degradación del contaminante Bisfenol A (BPA) en fase acuosa. Para ello se utilizó un reactor fotocatalítico con capacidad de 250 mL equipado con un sistema de recirculación y control de la temperatura del agua. Se emplearon 200 mg del fotocatalizador en polvo, los cuales se añadieron en una solución de 200 mL de Bisfenol A con una concentración de 8 ppm. Antes de dar inicio al proceso de irradiación, la muestra se dejó en obscuridad durante 60 minutos para alcanzar el equilibrio de adsorción-desorción del contaminante con el fotocatalizador. Una vez transcurrido este tiempo, se encendió la lámpara de Xenón de 6,000K operando a una potencia de 35 W, la cual fue utilizada como fuente de irradiación. De manera periódica se tomaron alícuotas de 5 mL de solución, las cuales fueron centrifugadas y posteriormente filtradas usando un filtro PTFE de 0.22 μ m. El seguimiento de la variación de concentración de BPA de las muestras se monitoreó mediante la absorbancia de su banda característica a 276 nm, utilizando un espectrofotómetro de UV-Vis (modelo Agilent Technologies, Cary 5000). Finalmente, el porcentaje de degradación final de BPA fue calculado empleando la fórmula (1):

$$\text{Degradación de BPA (\%)} = \left[\frac{C_i - C_f}{C_i} \right] * 100 \quad (1)$$

Donde: C_i representa la concentración inicial y C_f la concentración final de BPA después cinco horas de irradiación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras preparadas se caracterizaron mediante difracción de rayos-X en polvo para identificar la formación de la fase cristalina. Los patrones de difracción de las muestras Bi₂WO₆-SC y Bi₂WO₆-C son presentados en la figura 2. Se observó que todas las líneas de difracción de las muestras pudieron ser correctamente indexadas con la fase ortorrómbica de tungstato de bismuto (Bi₂WO₆) según la tarjeta PDF 39-0256. No se observaron líneas de difracción adicionales, lo que indicó la pureza del material dentro del alcance de la técnica DRX utilizada. Además, se pudo apreciar que las líneas de difracción de la muestra tratada térmicamente fueron notablemente más intensas y delgadas que las de la muestra sin calcinar (Bi₂WO₆-SC) lo cual permite concluir una mayor cristalinidad de la muestra Bi₂WO₆-C. Según algunos informes, una mayor cristalinidad reduce los defectos cristalinos que sirven como centros de recombinación de pares de electrones y huecos, por lo cual la actividad fotocatalítica puede verse mejorada.¹⁷

Finalmente, el efecto de la temperatura también influyó en el crecimiento de los cristales, proporcionando suficiente energía para que los granos más pequeños creciera y formaran cristalitas de mayor tamaño.¹⁸ Este efecto se corroboró al establecer el tamaño de cristal, el cual se calculó a partir del pico de difracción principal utilizando la ecuación de Scherrer. El tamaño de cristal fue de 16 nm para la muestra tratada térmicamente lo que supera al tamaño de cristal de 7 nm obtenida para la muestra sin tratamiento térmico.

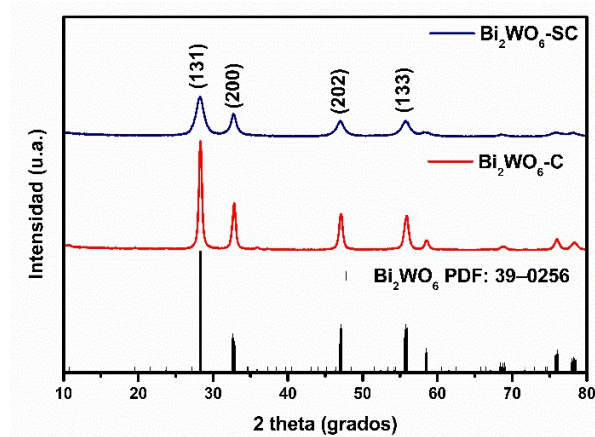


Fig. 2. Patrones de difracción de rayos-X de las muestras de Bi_2WO_6 -SC y Bi_2WO_6 -C.

La morfología de las muestras de Bi_2WO_6 se observó mediante análisis de microscopía electrónica de barrido. En la figura 3 se presentan las micrografías obtenidas para las muestras con y sin tratamiento térmico a $400\text{ }^\circ\text{C}$. En la muestra de Bi_2WO_6 -SC se observó que la morfología consistió en nanopartículas de aglomerados sin una forma definida y con tamaños heterogéneos de partícula con valores en torno a 0.5 a $1\text{ }\mu\text{m}$, figura 3a. Por otro lado, se observó una morfología esférica más definida para la muestra Bi_2WO_6 -C, donde el tamaño de los aglomerados aumentó por efecto de la calcinación y alcanzó un tamaño de partícula de $5\text{ }\mu\text{m}$ como se muestra en la figura 3b.

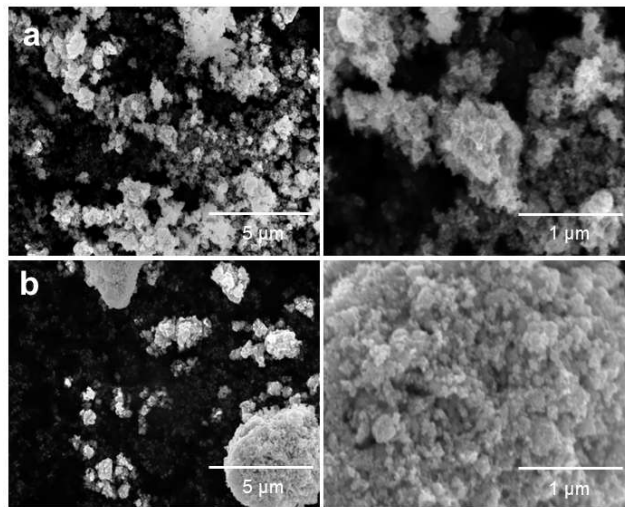


Fig 3. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de las muestras de: a) Bi_2WO_6 -SC y b) Bi_2WO_6 -C.

Los espectros de absorción de UV-Vis de las muestras de Bi_2WO_6 -SC y Bi_2WO_6 -C se presentan en la figura 4a. Los bordes de absorción de ambas muestras fueron similares, pero se puede ver que la longitud de onda de absorción de la muestra Bi_2WO_6 -C está ligeramente desplazado hacia longitudes de onda mayor en comparación con la muestra sin calcinar. Dado que el Bi_2WO_6 es un semiconductor de transición óptica indirecta, el valor de ancho de la banda prohibida se puede estimar a partir del gráfico Tauc que se muestra en la figura 4b. Para hacer esto, la línea recta del gráfico debe extrapolarse hasta el eje x. En este caso, los valores de energía de banda prohibida calculados para las muestras Bi_2WO_6 -SC y Bi_2WO_6 -C fueron de 2.73 y 2.57 eV , respectivamente. Estos resultados evidencian una notable disminución del ancho de banda prohibida del Bi_2WO_6 -C, que podría estar relacionada con el tratamiento térmico que recibió la muestra, puesto que se incrementó el grado de cristalinidad y

orden atómico del material semiconductor. Por lo tanto, esta modificación en el ancho de banda prohibida de la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$ puede mejorar la actividad fotocatalítica, dado que pueden fotogenerar más cargas para participar en el proceso fotocatalítico.

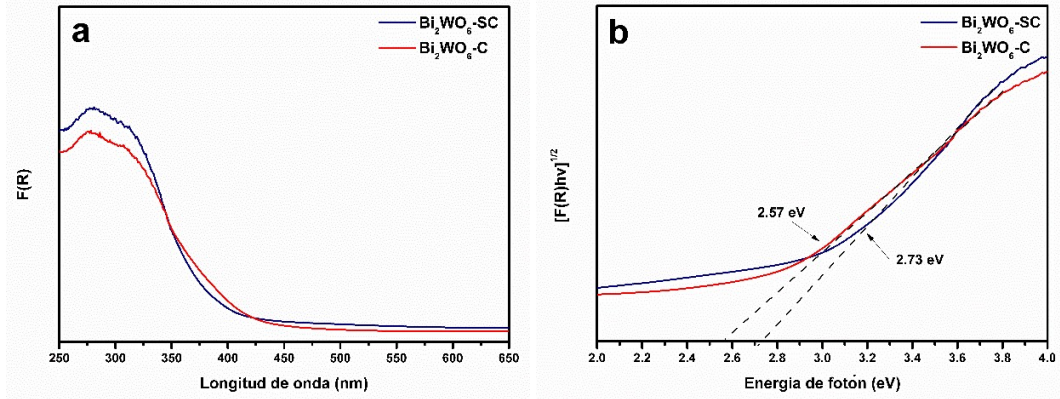


Fig 4. a) Espectros de reflectancia difusa UV-Vis y b) Gráfico Tauc de las muestras de $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$.

La recombinación de las cargas fotogeneradas es otro factor importante que influye en la eficiencia fotocatalítica. Según la literatura, hay una estrecha correlación entre el espectro de emisión de fotoluminiscencia y la actividad fotocatalítica de los materiales semiconductores. La Figura 5 presenta los espectros de fotoluminiscencia (PL) obtenidos para las muestras $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$. A partir de estos espectros se puede apreciar una disminución significativa en la intensidad del espectro PL de la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$, en comparación con la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$. Este resultado señala que la emisión por transición entre los orbitales Bi 6s y O 2p (E_{VB}) y el orbital vacío W 5d (E_{CB}) disminuyó considerablemente en la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$, lo que indica una reducción en la recombinación de electrones y huecos.¹⁹ Por ende, se podría presuponer una eficiencia fotocatalítica superior en la muestra tratada térmicamente.

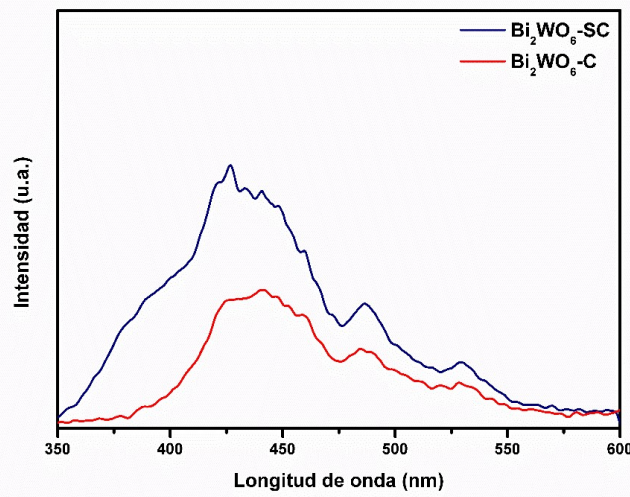


Fig 5. Espectros de fotoluminiscencia de las muestras de $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$.

La actividad fotocatalítica de las muestras $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$ fue evaluada en la reacción de degradación del contaminante Bisfenol A (BPA). La evolución de la concentración en función del tiempo de irradiación con la lámpara utilizando los materiales sintetizados es mostrada en la figura 6. Previo al encendido de la lámpara, el sistema fue mantenido en la oscuridad por 60 minutos para asegurar alcanzar el equilibrio de adsorción-desorción de la molécula del contaminante en la

superficie del fotocatalizador. El porcentaje de reducción de la concentración de BPA debido al proceso de adsorción fue del 16 y 11% para las muestras de $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$, respectivamente como se aprecia en la figura 6a. Después de 5 horas de irradiación con luz visible, los materiales utilizados como fotocatalizadores $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$ promovieron la degradación fotocatalítica del BPA en 84% ($\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$) y 90% ($\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$), figura 6b. La mayor actividad fotocatalítica observada en la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$ en comparación con la muestra sin calcinar se puede atribuir a las mejora de sus propiedades físicas y químicas, que inciden en la actividad fotocatalítica, después del tratamiento térmico. Primero, se observó una mayor cristalinidad en el patrón de difracción de Rayos-X de la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$, lo cual sugiere que una mayor actividad fotocatalítica. Seguidamente, la energía de banda prohibida de la muestra de $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$ disminuyó, aumentando así su capacidad de absorción de luz visible. Además, el espectro de fotoluminiscencia de esta muestra se redujó significativamente en comparación con la muestra $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$, lo que permite inferir una disminución de la recombinación de los pares electrón-hueco fotogenerados.

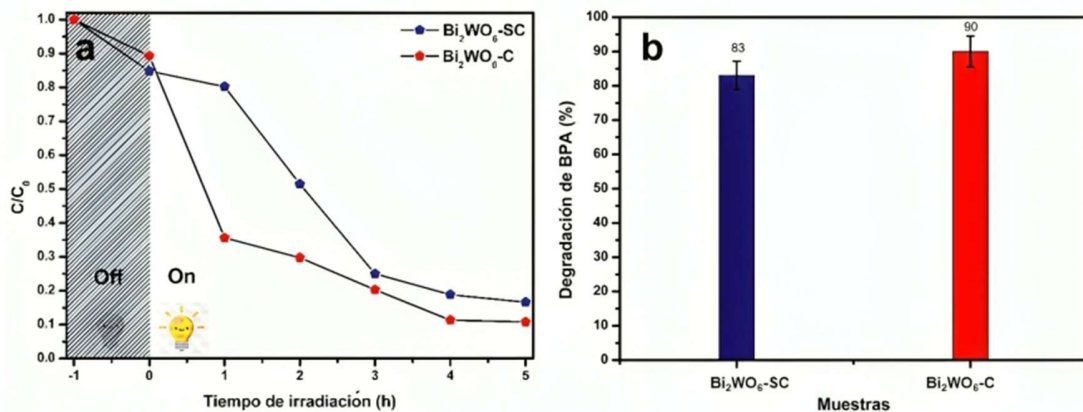


Fig 6. Evolución de la concentración de BPA en función del tiempo de irradiación y b) Degradación de BPA (%) cuando las muestras $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-SC}$ y $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-C}$ fueron utilizadas como fotocatalizador.

El mecanismo de degradación fotocatalítica de contaminantes en medio acuoso está regido por la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) como los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$), así como por los electrones (e^-) y los huecos (h^+) fotogenerados. Para identificar las principales especies involucradas en el mecanismo de degradación del contaminante BPA se añadieron diferentes sustancias químicas con la capacidad de actuar de secuestradores de las especies altamente reactivas. Para ello se utilizó el yoduro de potasio (KI), isopropanol (IPA) y p-benzoquinona (PBQ) como agentes secuestrantes de huecos, radicales hidroxilo y superóxido. Los resultados presentados en la figura 7 demuestran que la adición de yoduro de potasio y p-benzoquinona, disminuyeron ligeramente el porcentaje de degradación de BPA, sin embargo un cambio más importante se observó cuando el IPA se añadió al sistema. En este caso, bajo las mismas condiciones de medición, el porcentaje de degradación de BPA se redujó hasta un 73%. Por lo tanto, a partir de estos resultados se puede inferir que durante el proceso de degradación de BPA son los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) las principales especies que participan en su mecanismo de degradación.

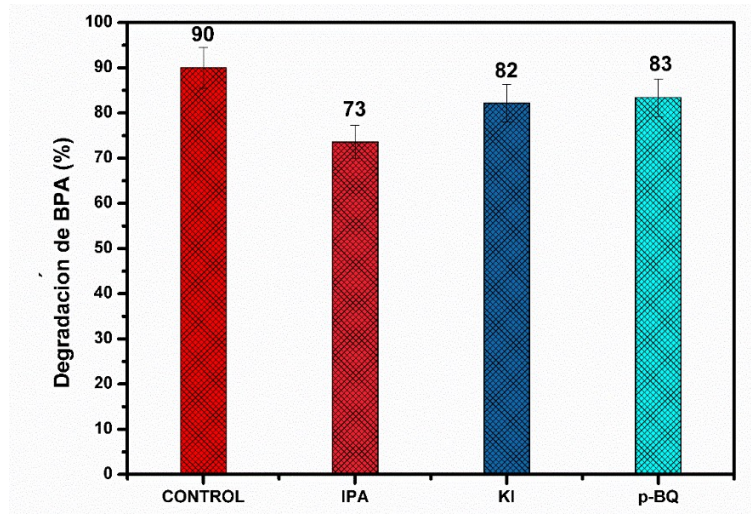


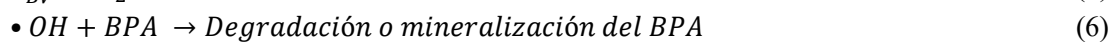
Fig 7. Influencia de los agentes secuestrantes en la degradación del contaminante BPA utilizando Bi₂WO₆-C como fotocatalizador.

Para conocer más aspectos del mecanismo de degradación de BPA, se calcularon las banda de valencia y conducción del fotocatalizador Bi₂WO₆-C y Bi₂WO₆-SC, empleando las siguientes ecuaciones (2-3):

$$E_{BC} = X - E_c - 0.5E_g \quad (2)$$

$$E_{BV} = E_{BC} + E_g \quad (3)$$

Donde E_{BC} y E_{BV} son los potenciales en los bordes de la banda de conducción y de la banda de valencia del fotocatalizador, X representa la electronegatividad (6.2 eV, para Bi₂WO₆),²⁰ E_c es la energía de los electrones libres en la escala del hidrógeno (4.5 eV) y E_g es el ancho de la banda prohibida determinado por espectroscopía de UV-Vis. Según este estudio, los potenciales de los bordes de la banda de conducción y valencia para las muestras Bi₂WO₆-C y Bi₂WO₆-SC son +0.41 (eV) y +2.98 (eV) y +0.33 (eV) y +3.06(eV), respectivamente. Los bordes de la bandas resultantes se esquematizan en la figura 8. Según estos resultados, la formación de iones superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$) no está favorecida durante el proceso fotocatalítico bajo irradiación de luz visible, dado que el potencial del borde de conducción de las muestras Bi₂WO₆-C y Bi₂WO₆-SC es +0.41 y +0.33 (eV) los cuales son mucho más positivos que -0.33 (eV) requerido para la generación de $\bullet\text{O}_2^-$. Por otro lado, es evidente que el potencial de formación de huecos en la banda de valencia para las muestras Bi₂WO₆-C y Bi₂WO₆-SC (+2.98 y 3.06 eV) es suficientemente mayor que el potencial H₂O/ $\bullet\text{OH}$ (+2.72 eV), por lo que los huecos absorbidos pueden reaccionar con el H₂O para formar radicales $\bullet\text{OH}$.²¹ Estos resultados son consistentes con los experimentos con los agentes secuestrantes, donde la especie dominante en el mecanismo de degradación de BPA son los radicales $\bullet\text{OH}$. Por tanto, con base en estos resultados se puede concluir que el mecanismo de reacción de la degradación de BPA viene dado por las siguientes ecuaciones (4-6):



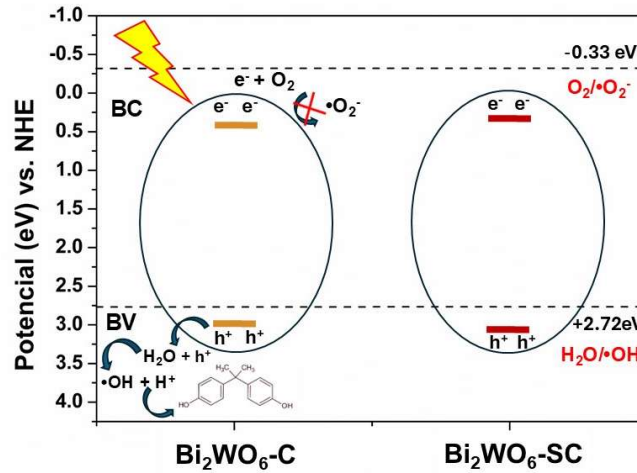


Fig 8. Diagrama de estructura de bandas de la muestra Bi₂WO₆-C.

Los materiales base Bi₂WO₆ han demostrado una excelente actividad fotocatalítica para la degradación de contaminantes orgánicos como el BPA. Los estudios en la literatura indican que las concentraciones de BPA eliminados a través del proceso de fotocatalisis varían entre 5-20 ppm y las eficacias de degradación oscilan entre el 80-100%, siendo considerablemente superior a la eliminación obtenida por métodos convencionales. No obstante, la actividad fotocatalítica depende del uso de diferentes tipos de lámparas, la concentración del contaminante, la existencia de agentes dopantes, la preparación de fotocatalizadores compuestos, los métodos de síntesis utilizados, entre otros factores. Específicamente, en este trabajo, el empleo de Bi₂WO₆ después un tratamiento térmico demostró una excelente actividad fotocatalítica en degradación de BPA bajo la irradiación de luz visible mediante una lámpara de baja intensidad (35 W), como se puede observar en la tabla II.

Tabla II. Comparación de la actividad fotocatalítica lograda con materiales de base Bi₂WO₆ para la degradación de BPA.

Fotocatalizador	Condiciones experimentales	Degradación BPA (%)	Referencia
Bi ₂ WO ₆	Concentración inicial: 20 ppm Tipo de lámpara: Xenón 800W Gramos fotocatalizador: 1.0 gr L ⁻¹ Tiempo de reacción: 60 min pH=10	95.6	22
Bi ₂ WO ₆ /BiOI@Ag ₃ P O ₄	Concentración inicial: 20 ppm Tipo de lámpara: Xenón 300W Gramos fotocatalizador: 1 gr L ⁻¹ Tiempo de reacción: 120 min pH=7	97.6	23
GO dopado con BiOI/Bi ₂ WO ₆	Concentración inicial: 10 ppm Tipo de lámpara: Xenón 500W Gramos fotocatalizador: 0.5 gr L ⁻¹ Tiempo de reacción: 6 hr pH=7	81	24

Tabla II (Continuación). Comparación de la actividad fotocatalítica logradas con materiales de base Bi₂WO₆ para la degradación de BPA.

Fotocatalizador	Condiciones experimentales	Degradación BPA (%)	Referencia
Cu ₂ S/RGO/Bi ₂ WO ₆	Concentración inicial: 20 ppm Tipo de lampara: Lampara LED Gramos fotocatalizador: 1 gr L ⁻¹ Tiempo de reacción: 40 min	91%	25
Este trabajo	Concentración inicial: 8 ppm Tipo de lampara: Xenón 35 W Gramos fotocatalizador: 1 gr L ⁻¹ Tiempo de reacción: 5 hr	90	---

CONCLUSIONES

A través de un método solvotermal fue posible sintetizar Bi₂WO₆ de manera directa. La muestra tratada térmicamente a 400°C mostró mayor cristalinidad, ancho de banda prohibida más estrecho y menor recombinación de electrones y huecos fotogenerados. Todas estas propiedades incidieron directamente en el aumento de la actividad fotocatalítica para la degradación del contaminante BPA en fase acuosa (90%). Mediante experimentos con agentes secuestrantes y el cálculo de los bordes de las bandas de conducción y valencia fue posible determinar que la degradación del contaminante BPA estuvo determinada principalmente por los radicales hidróxilo (•OH). Los resultados obtenidos con la muestra Bi₂WO₆-C permiten proponer al material como un candidato con potencial de aplicación práctica en el tratamiento de aguas residuales.

REFERENCIAS

1. “Conagua, Semarnat. Estadísticas del agua en México . Ediciones 2007”.
2. “PLAN HÍDRICO NUEVO LEÓN 2050.”
3. A. Abera Mitiku, “Water Pollution: Causes and Prevention.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344591948>.
4. Zhu, Z., & Zuo, Y., “Bisphenol A and other alkylphenols in the environment - occurrence, fate, health effects and analytical techniques”. *Advances in Environmental Research*, (2013), 2(3), 179–202. <https://doi.org/10.12989/aer.2013.2.3.179>.
5. Ohore, O. E., & Songhe, Z., “Endocrine disrupting effects of bisphenol A exposure and recent advances on its removal by water treatment systems. A review”. *Scientific African*, (2019), 5, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00135>.
6. Genuis, S. J., Beesoon, S., Birkholz, D., & Lobo, R. A., “Human excretion of bisphenol A: Blood, urine, and sweat (BUS) study”. *Journal of Environmental and Public Health*, (2012), 2012, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2012/185731>.
7. Arnold, S. M., Clark, K. E., Staples, C. A., Klecka, G. M., Dimond, S. S., Caspers, N., & Hentges, S. G., “Relevance of drinking water as a source of human exposure to bisphenol A”. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, (2013), 23(2), 137–144. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.66>.
8. Gibson, R., Durán-Álvarez, J. C., Estrada, K. L., Chávez, A., & Jiménez Cisneros, B., “Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico”. *Chemosphere*, (2010), 81(11), 1437–1445. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.006>.

9. Gong, J., Huang, Y., Huang, W., Ran, Y., & Chen, D., “Multiphase partitioning and risk assessment of endocrine-disrupting chemicals in the Pearl River, China”. *Environmental Toxicology and Chemistry*, (2016), 35(10), 2474–2482. <https://doi.org/10.1002/etc.3419>.
10. Boyd, G. R., Palmeri, J. M., Zhang, S., & Grimm, D. A., “Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine disrupting chemicals (EDCs) in stormwater canals and Bayou St. John in New Orleans, Louisiana, USA”. *Science of the Total Environment*, (2004), 333(1–3), 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.018>.
11. Cruz-López, A., Dávila-Pórcel, R. A., de León-Gómez, H., Rodríguez-Martínez, J. M., Suárez-Vázquez, S. I., Cardona-Benavides, A., Castro-Larragoitia, G. J., Boreselli, L., de Lourdes Villalba, M., Pinales-Munguía, A., Silva-Hidalgo, H., de la Garza, R., & del Socorro Espino-Valdes, M., “Exploratory study on the presence of bisphenol A and bis(2-ethylhexyl) phthalate in the Santa Catarina River in Monterrey, N.L., Mexico”. *Environmental Monitoring and Assessment*, (2020), 192(8). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08446-4>.
12. Han, C., & Hong, Y. C., “Bisphenol A, Hypertension, and Cardiovascular Diseases: Epidemiological, Laboratory, and Clinical Trial Evidence”. *Current Hypertension Reports*, (2016), 18, 2, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11906-015-0617-2>.
13. Shekoohiyan, S., Rahmania, A., Chamack, M., Moussavi, G., Rahmanian, O., Alipour, V., & Giannakis, S., “A novel CuO/Fe₂O₃/ZnO composite for visible-light assisted photocatalytic oxidation of Bisphenol A: Kinetics, degradation pathways, and toxicity elimination”. *Separation and Purification Technology*, (2020), 242, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116821>
14. Koe, W. S., Lee, J. W., Chong, W. C., Pang, Y. L., & Sim, L. C., “An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane”. *Environmental Science and Pollution Research*, (2020), 27(3), 2522–2565. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07193-5>.
15. Hunge, Y. M., Yadav, A. A., Khan, S., Takagi, K., Suzuki, N., Teshima, K., Terashima, C., & Fujishima, A., “Photocatalytic degradation of bisphenol A using titanium dioxide@nanodiamond composites under UV light illumination”. *Journal of Colloid and Interface Science*, (2021), 582 Parte B, 1058–1066. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.08.102>.
16. Zhu, Z., Wan, S., Zhao, Y., Qin, Y., Ge, X., Zhong, Q., & Bu, Y., “Recent progress in Bi₂WO₆-Based photocatalysts for clean energy and environmental remediation: Competitiveness, challenges, and future perspectives”. *Nano Select*, (2021), 2(2), 187–215. <https://doi.org/10.1002/nano.202000127>.
17. Kominami, H., Murakami, S. Y., Kato, J. I., Kera, Y., & Ohtani, B., “Correlation between some physical properties of titanium dioxide particles and their photocatalytic activity for some probe reactions in aqueous systems”. *Journal of Physical Chemistry B*, (2002), 106(40), 10501–10507. <https://doi.org/10.1021/jp0147224>.
18. Nagyné-Kovács, T., Shahnazarova, G., Lukács, I. E., Szabó, A., Hernadi, K., Igricz, T., László, K., Szilágyi, I. M., & Pokol, G., “Effect of pH in the hydrothermal preparation of Bi₂WO₆ nanostructures”. *Materials*, (2019), 12, 1728, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma12111728>.
19. Zhang, K., Wang, J., Jiang, W., Yao, W., Yang, H., & Zhu, Y., “Self-assembled Perylene Diimide Based Supramolecular Heterojunction with Bi₂WO₆ for Efficient Visible-Light-Driven Photocatalysis”. *Applied Catalysis B: Environmental*, (2018). 232, 175–181. [doi:10.1016/j.apcatb.2018.03.059](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.03.059).
20. Wang, B., Yang, H., Xian, T., Di, L. J., Li, R. S., & Wang, X. X., “Synthesis of Spherical Bi₂WO₆ Nanoparticles by a Hydrothermal Route and Their Photocatalytic Properties”. *Journal of Nanomaterials*, (2015), 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/146327>.

21. Waehayee, A., Pongsawakul, C., Ngoipala, A., Phonsuksawang, P., Jiamprasertboon, A., Wannapaiboon, S., Nakajima, H., Butburee, T., Suthirakun, S., & Siritanon, T., “Promoting superoxide generation in Bi₂WO₆ by less electronegative substitution for enhanced photocatalytic performance: an example of Te doping”. *Catalysis Science and Technology*, (2021), 11(18), 6291–6304. <https://doi.org/10.1039/d1cy00739d>.
22. Wang, C., Zhang, H., Li, F., & Zhu, L., “Degradation and mineralization of bisphenol a by mesoporous Bi₂WO₆ under simulated solar light irradiation”. *Environmental Science and Technology*, (2010), 44(17), 6843–6848. <https://doi.org/10.1021/es101890w>.
23. Chu, Y., Miao, B., Zheng, X., & Su, H., “Fabrication of flower-globular Bi₂WO₆/BiOI@Ag₃PO₄ photocatalyst for the degradation of bisphenol A and cefepime under sunlight: Photoelectric properties, degradation performance, mechanism and biodegradability enhancement”. *Separation and Purification Technology*, (2021), 272, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118866>.
24. Mengting, Z., Kurniawan, T. A., Yanping, Y., Avtar, R., & Othman, M. H. D., “2D Graphene oxide (GO) doped p-n type BiOI/Bi₂WO₆ as a novel composite for photodegradation of bisphenol A (BPA) in aqueous solutions under UV-vis irradiation”. *Materials Science and Engineering C*, (2020), 108,1–32. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110420>.
25. Peng, L., Zhang, R., Lei, Q., Luo, J., & Wang, P., “A comparison study of the Bi₂WO₆ based composite photocatalysts for the degradation of bisphenol A (BPA) under visible-light irradiation”. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, (2023), 103(11), 2464–2479. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1893710>.

Análisis de sistemas de asistencia para la combustión en turbinas de gas – hidrógeno

Eduardo Ugalde Mejia

Universidad Aeronáutica en Querétaro, Maestría en Ingeniería Aeroespacial
10598@soyunaq.mx

RESUMEN

Este artículo aborda el impacto de suministrar calor y especies activas en condiciones adiabáticas y estándar sobre la operabilidad y desempeño de sistemas de combustión de premezcla en turbinas de gas capaces de quemar gas hidrógeno. La transformación de un sistema energético basado en energías renovables a través de propuestas de desarrollo tecnológico tiene un impacto potencial hacia la descarbonización. Este estudio evalúa numéricamente y analíticamente cómo la estabilidad dinámica, autoignición, "flashback", "blow-off" del quemador y el desempeño en turbinas de gas estacionarias será afectado Aero-termodinámicamente por la integración de tecnologías de asistencia en la combustión.

PALABRAS CLAVE

Quemador de turbina de gas, extinción esbelta, combustión asistida por plasma, reducción NOx.

ABSTRACT

This article addresses the impact of supplying heat and active species under adiabatic and standard conditions on the operability and performance of premix combustion systems in gas turbines capable of burning hydrogen gas. The transformation of an energy system based on renewable energies through technological development proposals has a potential impact towards decarbonization. This study numerically and analytically evaluates how the dynamic stability, autoignition, flashback, blow-off of the burner and performance in stationary gas turbines will be affected Aero-thermodynamically by the integration of combustion assist technologies.

KEYWORDS

Gas turbine burner, lean extinguishing, plasma assisted combustion, NOx reduction.

INTRODUCCIÓN

La transformación de un sistema energético basado en energías renovables a través del desarrollo de turbinas de gas capaces de operar con un alto contenido de hidrógeno como combustible representa el principal desafío, debido a que el hidrógeno necesitaría 10 veces mayor velocidad de flujo y tres veces mayor volumen o presión comparado con el metano para lograr estabilizar la flama y equilibrar la potencia a las mismas condiciones. Los problemas en la operabilidad del quemador de premezcla son el principal enfoque de este artículo.^{1,2}

Recientes estudios han demostrado que las de combustión asistida por plasma son técnicas prometedoras para mejorar la estabilización del plasma, ignición, mezcla de combustible/aire, reducción de emisiones y versatilidad en combustibles a altas temperaturas (sobre 1100 K) y presión atmosférica.³

En un quemador de bajas emisiones en seco (figura 1), el combustible debe ser inyectado, vaporizado, y mezclado con aire antes de la combustión pueda ocurrir. La restricción para la cual esos procesos son limitados y que depende de la combustión en gran medida corresponden a las propiedades físicas y químicas de los combustibles.⁴

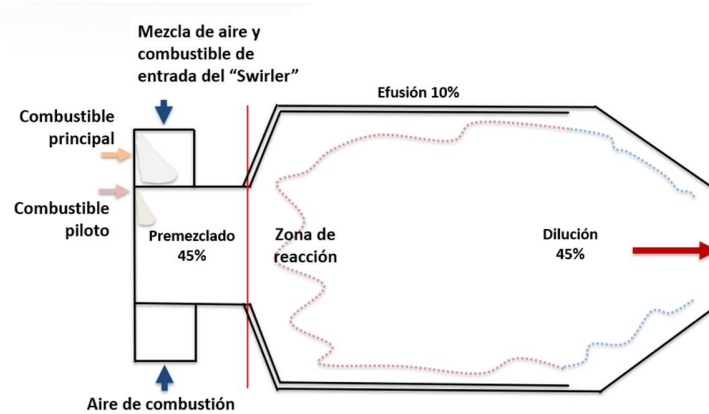


Fig.1. Quemador de premezcla, revisión seccional y concepto de combustión.

El índice Wobbe permite caracterizar y acomodar la composición del gas a ser usado. Sin embargo, no captura los efectos de otras propiedades del combustible, tal como la velocidad de la flama o la química de la combustión.⁵ El cambio de combustible impacta la flama en al menos de tres maneras a través del calor específico y temperatura de llama adiabática, tasas de cinética química y transferencia de calor radial.⁶

En particular los problemas de tasa de cinética química de combustión de premezcla esbelta son enfatizados, debido a su dependencia con los procedimientos de operación de turbinas de gas.

Las tecnologías en combustión de bajas emisiones en seco en turbinas de gas son capaces de operar eficientemente en una amplia variedad de combustibles como el uso de gas natural re-gasificado líquido (LNG), carbón derivado, combustibles syngas bioderivado e hidrógeno.⁷ Sin embargo, implica una variedad de problemas de operabilidad.

Los problemas de operabilidad del quemador de interés incluyen aquellos relacionados a una operación segura, eficiente y confiable. Esto considera mantener la flama sin presentar inestabilidades y quemar el combustible es un estado quieto. Para ello, los sistemas de asistencia para la combustión tienen una profunda influencia sobre cuatro problemas de la operabilidad de la combustión: blow-out, flashback e inestabilidad de la combustión.^{8,9}

La estabilidad de la combustión es caracterizada por oscilaciones de presión de gran amplitud que se derivan de emisión de calor en estado transitorio. Dos mecanismos responsables de la inestabilidad conocidos para quemadores de premezcla son las oscilaciones de radio de aire/combustible y el desprendimiento de vórtices.⁶

En orden para evaluar la operación y desempeño de esta tecnología, se propone un quemador seco de premezcla de una turbina de gas de ~13 MW de potencia, incorporando una fuente "Plasma Fuel Nozzle" (PFN) representada termodinámicamente en el modelo como un incremento en el suministro de calor y especies activas químicamente.

MATERIALES Y MÉTODOS - METODOLOGÍA

Para configurar y solucionar las ecuaciones que describen el comportamiento del desempeño de diseño y fuera de diseño de turbinas de gas, se utilizó el software GASTURB.¹⁰ A continuación, se presenta la metodología para evaluar analíticamente como la operabilidad de sistemas reactivos será afectado Aero-termodinámicamente por la integración de tecnologías de asistencia en la combustión. La figura 2 muestra la configuración por estaciones para la turbina de gas de referencia.

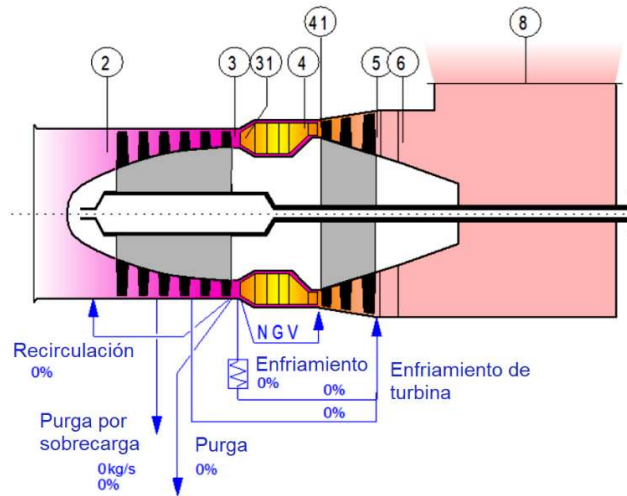


Fig. 2. Estaciones de una turbina de gas estacionaria. GASTURB ®.

El análisis numérico de desempeño en diseño se realizó simulando el arranque de una turbina de gas estacionaria de ciclo simple con potencia de ~13 MW en condiciones estándar ISO 3977-2¹¹ considerando la combustión para los siguientes casos:

- Aire-Metano
- Aire-Hidrógeno
- Aire-Hidrógeno-PAC

Seguido por el cálculo de desempeño fuera de diseño, en orden para generar la línea de operación.

Tabla I. Entradas en punto de diseño para casos de estudio.

Entradas para casos de estudio:		CH ₄	H ₂	H ₂ - PAC
Propiedad	Unidad	Valor		
Flujo Corregido admisión	Kg/s	34.2	34.2	34.2
Flujo de purgas	Kg/s	0	0	0
Temperatura límite en T4	K	1500	1500	1500
Valor calorífico del combustible	MJ/kg	49.74	118.43	102.43
Eficiencia del generador		1	1	1
Radio de Presión		16.4	16.4	16.4
Radio de Presión admisión		0.905	0.905	0.905
Radio de presión del quemador		0.955	0.955	0.955

Una vez que la simulación numérica ha convergido, los datos son exportados y utilizados para su posprocesamiento en Excel, a través de los modelos matemáticos que representan físicamente las propiedades de combustión y desempeño de los casos de estudio.

La línea de operación generada representa condiciones transitorias del arranque en frío a partir de *Idle* hasta *Full Power*. La turbina de gas estacionaria usada como referencia en diseño para el actual estudio y análisis, corresponde al modelo SGT-400 SIEMENS®.¹²

Los límites operativos de diseño para el estudio en diseño y fuera de diseño fueron siguientes:

- Eficiencia > 34.8%
- Temperatura límite de diseño 1450 K
- Emisiones de NO_x < 25 ppm

Para la evaluar la estabilización de la combustión se utilizaron los siguientes criterios u consideraciones correspondientes a los fenómenos blow-Off y flashback, los cuales se están en función de la velocidad de reacción contra la velocidad del fluido.⁷

- A) Si $grad(v_r) = A = \frac{v}{\delta_l}$
- B) $A < 4A_F = A_B$ Flashback

- A_F : gradiente de velocidades límite flashback (s-1)
- A : gradiente de velocidades capa límite formada en la pared del quemador (s-1)
- A_B : gradiente de velocidades límite *blow-off* (s-1)
- δ_L : espesor de la capa límite de velocidades (mm)
- vR : velocidad de la mezcla reactiva (m/s)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de desempeño *on design*

El diagrama temperatura-entropía (T-S) del motor es calculado para los casos de estudio y se muestran los resultados en la figura 3.

Las asunciones de aire estándar son aplicadas en la evaluación de la turbina SGT-400 SIEMENS® asumiendo como isentrópico el proceso de compresión y expansión. El análisis de la turbina involucra la determinación ideal de trabajo, calor y eficiencia térmica, a partir de asunciones ideales y de referencia en la eficiencia de los componentes. El modelo analítico de rendimiento programado en Excel resulta en valores $\leq 1\%$ de error comparados a los resultados del uso de GASTURB en el punto de diseño.

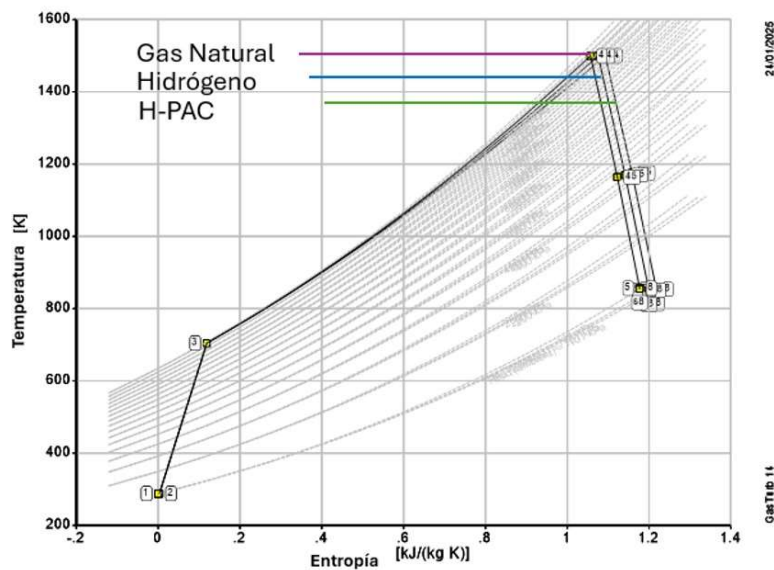


Fig. 3. Diagrama H-S de la turbina de gas estacionaria. GASTURB ®.

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO *OFF DESIGN*

La línea de operación en los mapas de componentes es generada en GasTurb, la cual representa estacionariamente el cambio en el flujo másico corregido respecto al radio de presión durante el procedimiento estándar de arranque en frío aplicado en la evaluación de la turbina ideal a partir de “Idle” hasta alcanzar “full power”.

Una vez que la geometría ha sido ajustada al punto de diseño entonces el mapa de los componentes puede ser generado para definir el desempeño bajo todas las condiciones fuera de diseño, en donde el radio de presión y la eficiencia isoentrópica son graficadas contra el flujo referido para una serie de líneas constantes de velocidad referida.¹³ Las figuras 4, 5 y 6 muestran el empalme de los mapas de componentes (compresor, turbina de alta presión y turbina de baja presión) correspondientes a los casos de estudio con la intención de evaluar el comportamiento de la línea de operación a las mismas condiciones.

Durante el cálculo fuera de diseño se detectó que la línea “surge margin” en el compresor no era suficiente por lo que se ajustó un bajo valor- β y se hizo uso de geometría variable y manejo de purgas para incrementar el “Surge margin”.

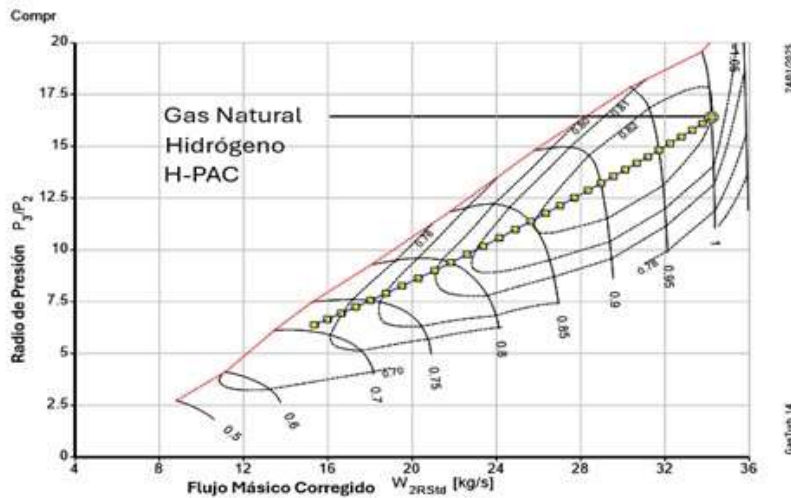


Fig. 4. Mapa del Compresor - Línea de operación. GASTURB ®.

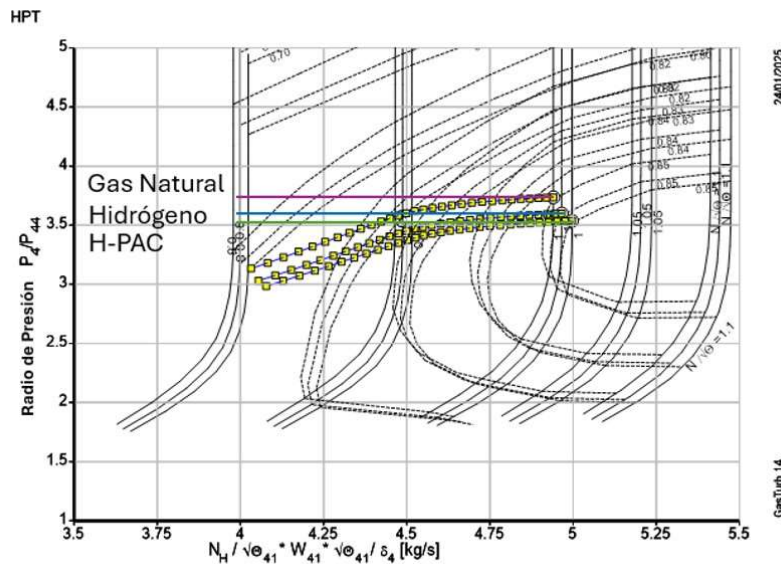


Fig. 5. Mapa de la Turbina de alta presión - Línea de Operación. GASTURB ®.

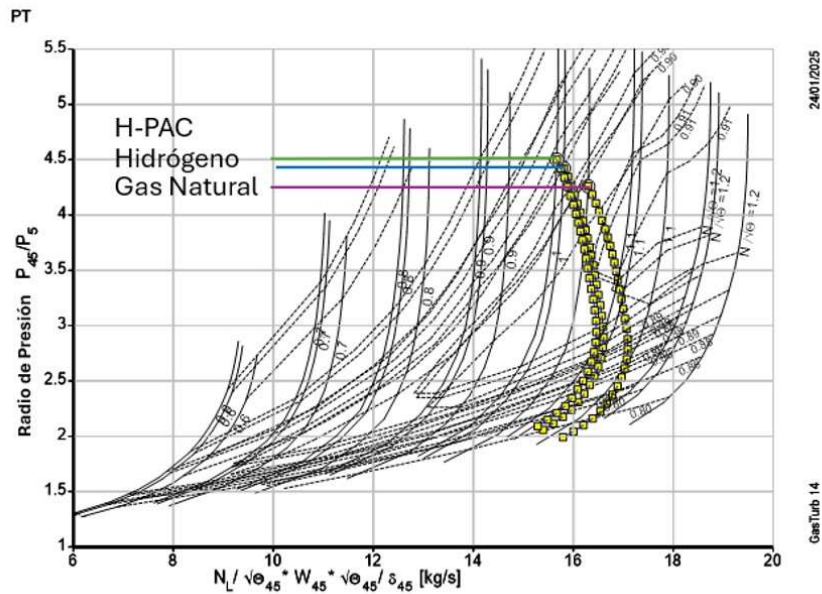


Fig. 6. Mapa de la Turbina de baja presión - Línea de Operación. GASTURB ®.

Lo más crucial de la evaluación de desempeño son presentados en las figuras 7–9 sobre los criterios operativos respecto a radio de presión derivado de la línea de operación. En la figura 4-9, el cambio en las propiedades del combustible muestra un incremento en temperatura límite, potencia eléctrica y eficiencia térmica, manteniendo los límites operativos.^{14,15} Sin embargo, la gráfica que muestra la variación del radio de aire-combustible respecto al incremento del radio de presión, revela el flujo de combustible necesario para llevar el sistema a las mismas condiciones comparado con el gas natural.

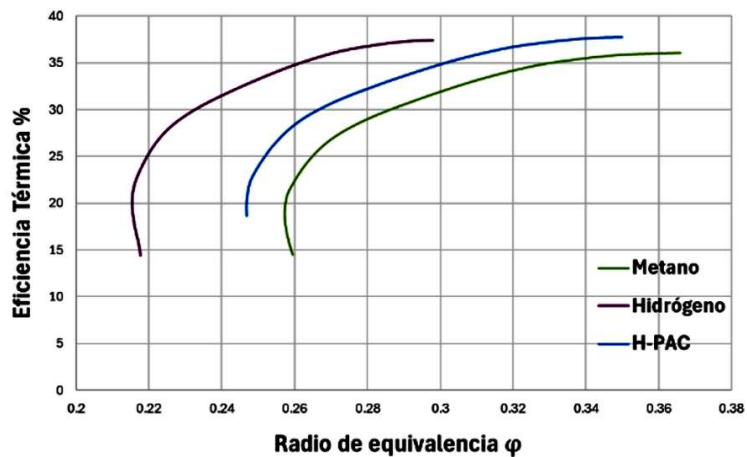


Fig. 7. Gráfico de comportamiento de la eficiencia térmica - radio de presión.

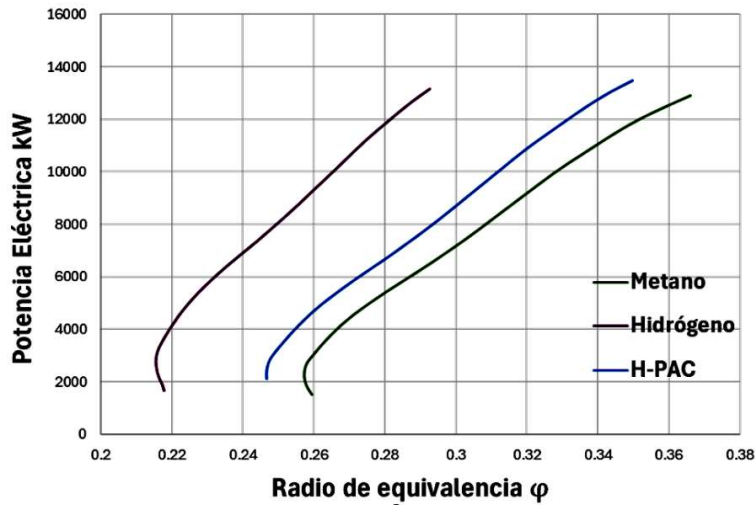


Fig. 8. Gráfico de comportamiento de la potencia eléctrica - radio de presión.

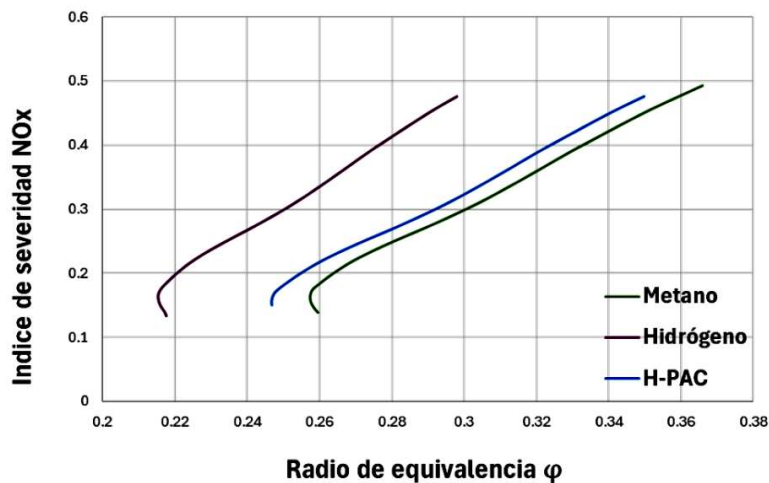


Fig. 9. Gráfico de comportamiento del índice de severidad NOx- radio de equivalencia.

ANÁLISIS DE OPERABILIDAD DEL QUEMADOR

Seguido de la simulación numérica de desempeño fuera de diseño, los límites de estabilidad de la combustión resultantes para la evaluación del sistema reactivo propuesto son presentados en las figuras 10 – 13 sobre los principales problemas de operación en la combustión a través del dosado correspondiente a la línea de operación.

Los límites de estabilidad representan la razón de consumo másico por unidad de área dividida por la densidad de la mezcla de gas sin quemarse y dependen de las propiedades del campo turbulento en el cuál existe y el método por el cuál la flama es estabilizada. El efecto de suministrar calor y masa muestra una tendencia de los límites a acercarse al comportamiento de los límites resultantes de quemar gas natural.

El comportamiento de la región estable de combustión se representa a través de los bucles de estabilidad que relacionan el radio de aire combustible a lo largo de la línea de operación contra el flujo que pasa a través del quemador.

La figura 10 ilustra las características principales del bucle de estabilidad obtenido mediante la línea de operación asumiendo los cambios de temperatura, presión y volumen del sistema reactivo para los casos de estudio.⁷

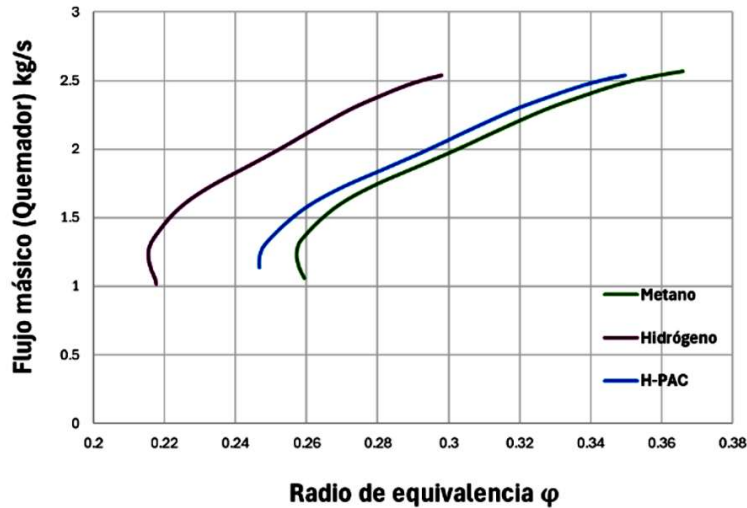


Fig. 10. Comparación de “Estabilidad” entre casos de estudio.

El tiempo de retardo de la ignición representa “El tiempo necesario para que una mezcla se encienda espontáneamente en una determinada condición”.⁵ En lugar de que la llama se propague aguas arriba hacia la sección de premezcla, la autoignición implica la ignición espontánea de la mezcla en la sección de premezcla. La figura 11 ilustra el comportamiento del tiempo necesario para que la mezcla se encienda respecto al radio de aire - combustible a lo largo del cambio de condiciones de la línea de operación de los casos de estudio.

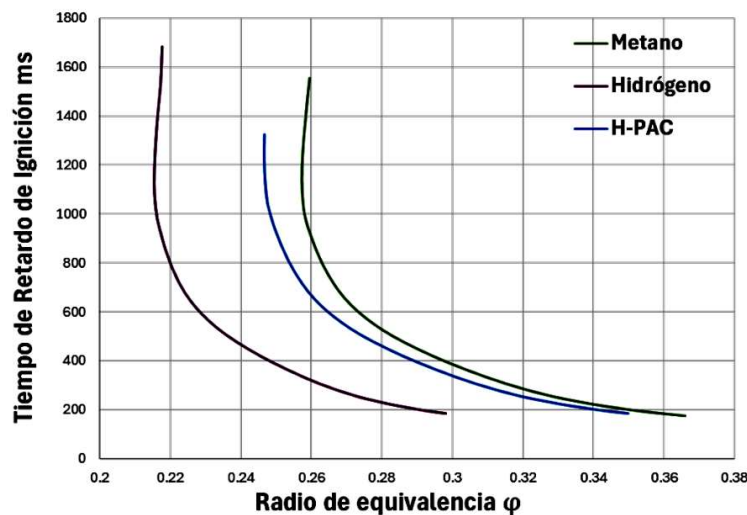


Fig. 11. Comparación de tiempo de retardo de ignición entre casos de estudio.

El fenómeno Blow-Off ocurre cuando la llama se desprende de la localización donde está anclada, debido a que el tiempo requerido para la reacción química es mayor que el tiempo de residencia en la zona de combustión y es representada a través de la expresión $SL=(aRR)1/2$ donde la razón de propagación es proporcional a la raíz cuadrada de la difusividad y la razón de reacción.⁵ Mientras que el fenómeno Flashback en la combustión ocurre cuando la velocidad de flama turbulenta excede la velocidad del flujo a lo largo de la línea de corriente, permitiendo la propagación up-stream de la llama en la sección de premezcla y es representada a través de la ecuación para turbulencias a gran escala: $ST = SL + u'$, cuando ST es la rapidez de llama turbulenta, Sl es la rapidez de flama laminar, y u' es el valor RMS de rapidez fluctuante.⁴

La figura 12 ilustra el comportamiento de los límites de estabilidad en términos de velocidades laminar, estándar y turbulenta respectivamente respecto al radio de aire - combustible a lo largo del cambio de condiciones de la línea de operación de los casos de estudio.

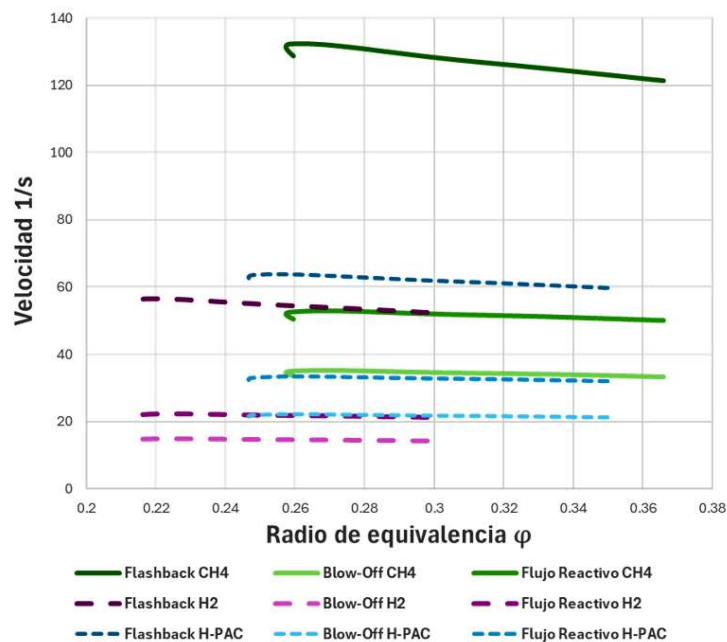


Fig. 12. Comparación de límites de estabilidad entre los casos de estudio.

La figura 13 muestra el efecto de incrementar la velocidad de flujo para igualar la estabilización de la combustión de hidrógeno comparada al metano respecto al radio de aire - combustible sobre la línea de operación.

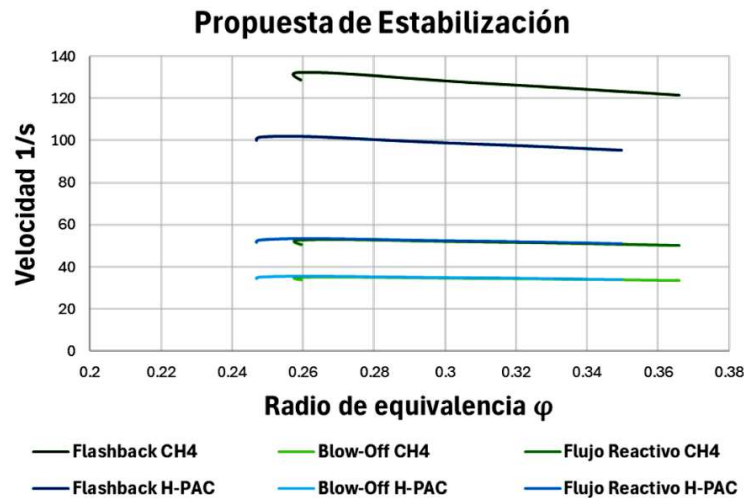


Fig. 13. Comparación de gradientes de velocidad entre los casos de estudio.

CONCLUSIONES

Se realizó el análisis comparativo del efecto de suministrar calor y especies químicas en condiciones estacionarias y adiabáticas sobre la estabilización de la combustión y el desempeño de la turbina de gas a través de la línea de operación generada en el software GASTURB.

- Los casos de estudio cumplen con los criterios en gradientes de velocidad y distancias de extinción para la estabilización de la combustión, así como los criterios operativos de temperatura límite de diseño, eficiencia, potencia y emisiones NOx.
- El mayor beneficio de utilizar al hidrógeno como combustible sustentable es la disminución del uso de combustible, ~60% menor que el gas natural.
- La tecnología propuesta debería incrementar la velocidad 1.7 veces para igualar la estabilidad del gas natural para utilizarlo en turbinas de gas.

REFERENCIAS

1. Noble, D., Wu, D., Emerson, B., Sheppard, S., Lieuwen, T., & Angello, L. (2021). Assessment of current capabilities and near-term availability of hydrogen-fired gas turbines considering a low-carbon future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 143(4).
2. Lam, K. K., Geipel, P., & Larfeldt, J. (2015). Hydrogen enriched combustion testing of Siemens industrial SGT-400 at atmospheric conditions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(2).
3. Chavda, K., & Kulkarni, K. Plasma Assisted Combustion: A Review.
4. Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions*. CRC press.
5. Irvin Glassman, Richard A. Yetter, Nick G. Glumac. (2024) *Combustion*. ELSEVIER Fifth Edition.
6. Lieuwen, T., McDonell, V., Petersen, E., & Santavicca, D. (2008). Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability.
7. Naranjo, C. S. (2011). *Teoría de la combustión*. Editorial UNED.
8. Yiguang Ju, (2021) *Plasma Assisted Combustion & Chemical Conversion*, Princeton University - Princeton Combustion Summer School. 168.

9. Noble, D. R., Zhang, Q., Shareef, A., Tootle, J., Meyers, A., & Lieuwen, T. (2006, January). Syngas mixture composition effects upon flashback and blowout. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 42363, pp. 357-368).
10. GasTurb GmbH (2024). *GasTurb 14. Design and Off-Design Performance of Gas Turbines*.
11. ISO 3977-2. *Gas turbines — Procurement — Part 2: Standard reference conditions and ratings*.
12. Walsh, P. P. (2004). *Gas turbine performance*. Blackwell publishing.
13. Saturday, E. G., & Nweke, P. (2020). Off-design performance analysis of gas turbines. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 4(2), 001-010.
14. Igwe, I. S. (2019). Off-Design Performance Analysis of Gbaran-Ubie Gas Power Plant, Bayelsa State, Using Energy and Exergy Methods. *International Journal of Engineering Science*, 21956.
15. Marin, G. E., Osipov, B. M., Titov, A. V., & Akhmetshin, A. R. (2023). Simulation of the operation of a gas turbine installation of a thermal power plant with a hydrogen fuel production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4543-4550.

Dos soluciones al problema de servosistemas

Efrain Alcorta García

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
efrain.alcortagr@uanl.edu.mx

RESUMEN

El diseño de servosistemas es un problema clásico en la teoría de control. Dos enfoques respecto a este problema son considerados en este trabajo. Por un lado, se plantea el problema de servosistemas como uno de control óptimo de horizonte infinito. La solución bien conocida requiere resolver una ecuación algebraica de Riccati así como la correspondiente ecuación de seguimiento (en tiempo inverso). Una alternativa se presenta como segunda opción, en la cual se parte de un planteamiento de problema de regulación y se le agrega un pre-compensador para que se logre alcanzar el valor final deseado de la salida del sistema. Las dos propuestas son comparadas utilizando un ejemplo de aplicación.

PALABRAS CLAVE

Servosistema, regulación, criterio lineal cuadrático, sistema lineal.

ABSTRACT

The design of servo systems is a classical problem in control theory. Two approaches to this problem are considered in this paper. On the one hand, the servo system problem is posed as an infinite horizon optimal control problem. The well-known solution requires solving an algebraic Riccati equation as well as the corresponding tracking equation (in inverse time). An alternative is presented as a second option, in which a regulation problem approach is used, and a pre-compensator is added to achieve the desired final value of the system output. The two proposals are compared using an application example.

KEYWORDS

Servo system, regulation, linear quadratic criterion, linear system.

INTRODUCCIÓN

El diseño de servosistemas de segundo orden es un problema clásico en la teoría de control, relevante en aplicaciones como robótica, sistemas mecatrónicos y control de motores eléctricos. Este tipo de sistemas se caracterizan por su respuesta dinámica sencilla, pero requieren enfoques rigurosos para garantizar un desempeño confiable frente a perturbaciones, incertidumbres y restricciones físicas. La necesidad de soluciones eficientes y robustas se vuelve aún más crítica en escenarios donde el cumplimiento de especificaciones como tiempo de asentamiento, sobre impulso y rechazo de perturbaciones es fundamental para el éxito operativo.

En la literatura especializada se pueden encontrar distintas soluciones al problema del diseño de servosistemas. Entre las cuales se encuentran esquemas basados en el uso de control integral,¹ las cuales suelen ser robustas a incertidumbre del modelo, pero de desempeño poco favorable;¹ en contraste, la compensación por redes de controladores proporcionales-derivativos-integrales (PID) pueden brindar un compromiso entre robustez y desempeño, pero la sintonía de los parámetros puede llegar a ser elaborada.² Alto desempeño y robustez se puede alcanzar si se permite una mayor complejidad, como el uso de técnicas no lineales y/o adaptables³ o mediante el uso de control robusto.⁴

En este trabajo, se presentan dos enfoques fundamentados en resultados bien conocidos, pero con una aplicación novedosa para resolver el problema del diseño de servosistemas de segundo orden con desempeño garantizado. La primera solución se fundamenta en el control óptimo y es bien conocida en la literatura, ver por ejemplo.^{5,6} Sin embargo, el índice de desempeño correspondiente es determinado de tal

forma que las especificaciones de desempeño requeridas se alcancen. Mientras que la segunda utiliza la solución subóptima al problema de regulación y una manera ingeniosa de calcular la compensación que complementa el resultado, ver por ejemplo.^{7,8} Ambos enfoques se desarrollan bajo un marco teórico que garantiza cumplimiento explícito de especificaciones dinámicas clave, evaluando además su efectividad mediante simulaciones y casos prácticos representativos.

El documento se organiza como sigue: en la sección 2 se describe el problema y sus formulaciones. La sección 3 presenta la primera solución propuesta, seguida de la descripción de la segunda en la sección 4. Finalmente, los resultados numéricos y la discusión se exponen en la sección 5, concluyendo con observaciones finales y posibles direcciones futuras.

Este trabajo tiene como objetivo contribuir a la práctica del diseño de sistemas de control, ofreciendo herramientas para aplicaciones que demandan confiabilidad y desempeño bajo condiciones desafiantes. Se consideran solo sistemas de una entrada y una salida. El caso en el que se tienen la misma cantidad de entradas y salidas puede también ser abordado con la metodología revisada.

EL PROBLEMA DE SERVOSISTEMAS Y SUS FORMULACIONES

El problema de servo control implica diseñar un controlador que permita a un sistema seguir una trayectoria de referencia o alcanzar un punto objetivo con precisión. En términos formales, un sistema lineal de tiempo continuo se puede modelar como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

El objetivo del controlador es diseñar una ley de control $u(t)$ tal que la salida $y(t)$ siga una señal de referencia $r(t)$ con el menor error posible. Este objetivo se puede formalizar mediante la minimización del error de seguimiento $e(t) = r - y(t)$.

Consideraciones adicionales:

- *Estabilidad:* El sistema controlado debe ser estable, lo cual implica que las raíces del polinomio característico de la matriz $A - BK$ deben estar en el semiplano izquierdo del plano complejo.
- *Desempeño:* Se deben considerar criterios de desempeño como el tiempo de establecimiento, sobrepaso y error en estado estacionario.
- *Error en Estado Estacionario:* El error en estado estacionario debe ser pequeño o nulo, dependiendo de los requerimientos del sistema.

Para un sistema lineal, una ley de control típica que resuelve el problema de servosistemas consiste en la retroalimentación del estado:

$$u(t) = -Kx(t) + K_R r \quad (2)$$

donde K es la matriz de ganancia del controlador, y K_R es una matriz de ganancia que puede depender de K .

PRIMERA SOLUCIÓN CONSIDERADA

Primeramente, se plantea un problema de control de seguimiento óptimo con horizonte infinito, ver por ejemplo.^{5,6} A diferencia del planteamiento encontrado en la literatura antes mencionada, se considera una selección específica del índice de desempeño.⁹ Dado el sistema lineal (1), considerar el índice de desempeño:

$$\begin{aligned} J &= \int_0^{\infty} [(x(\tau) - r)^T Q (x(\tau) - r) + Ru^2(\tau)] d\tau \\ &\text{Con } Q = \text{diag}\{q_1, q_2\}; R = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

La ley de control que minimiza el índice de desempeño (3) está dada por:

$$u(t) = -R^{-1}B^T S x(t) - R^{-1}B^T v(t) \quad (4)$$

$$0 = A^T S + SA + C^T QC - SBR^{-1}B^T S \quad (5)$$

$$-\dot{v}(t) = (A - BR^{-1}B^T S)^T v(t) - Qr, \quad v(T) = 0 \quad (6)$$

Notando que (6) es una ecuación diferencial ordinaria con coeficientes y entrada constantes, sin embargo, representa un problema de valor final. Se puede determinar el valor constante al que converge la solución, como es sugerida en,⁶ aplicando un cambio de variable de tiempo como $\tau = T - t$. Una vez resuelto hacer converger T al infinito.

SEGUNDA SOLUCIÓN CONSIDERADA

La segunda solución considera la propuesta de⁷ (capítulo 5) para resolver el problema de servosistemas para referencia constante mediante cambio de coordenadas. La propuesta es obtener la retroalimentación de estado requerida mediante la solución a un problema de regulación al origen con horizonte infinito, es decir, resolviendo una ecuación algebraica de Riccati. Para mostrar el enfoque de,⁷ se parte del sistema (1) y bajo el supuesto de estabilidad se considerará una entrada ideal u^* de tal forma que al aplicarla sobre el sistema (1), después de un transitorio se alcanza el valor constante x^* , de tal suerte que el sistema se puede reescribir como:

$$\begin{aligned} 0 &= Ax^* + Bu^* \\ r &= Cx^* + Du^* \end{aligned} \quad (7)$$

Donde u^* y x^* se consideran como base para proponer un cambio de coordenadas, es decir, $\tilde{x} \triangleq x(t) - x^*$ y $\tilde{u} \triangleq u(t) - u^*$. En las nuevas coordenadas la dinámica se puede establecer derivando con respecto al tiempo \tilde{x} :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= Ax(t) + Bu(t) = A\tilde{x} + B\tilde{u} + \underbrace{Ax^* + Bu^*}_{=0} \\ \dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + B\tilde{u} \end{aligned} \quad (8)$$

De donde la ley de control requerida para llevar el estado \tilde{x} al origen (y con esto lograr que el estado del sistema original logre alcanzar el ideal) es justamente una regulación al origen:

$$\tilde{u}(t) = -K\tilde{x}(t) \quad (9)$$

Y volviendo a las coordenadas originales:

$$\begin{aligned} u(t) - u^* &= -K(x(t) - x^*) \\ u(t) &= -Kx(t) + Kx^* + u^* = -Kx(t) + [K \quad 1] \begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix} \end{aligned}$$

De la ecuación (7) se puede despejar el vector $\begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix}$ como:

$$\begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r$$

Con lo que la ley de control completa se puede escribir como sigue:

$$u(t) = -Kx(t) + [K \quad 1] \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (10)$$

$$K = R^{-1}B^T S \quad (11)$$

$$0 = A^T S + SA + Q - SBR^{-1}B^T S \quad (12)$$

Una contribución consiste en el cálculo óptimo de la retroalimentación K en lugar de solo tener ubicación de polos. Note que utilizando el segundo procedimiento se requiere determinar el valor de K primero y después de la pre-compensación como en la ecuación (10).

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con la finalidad de mostrar los procedimientos considerar el modelo simplificado del control de posición de un espejo montado sobre un galvanómetro, los cuales son comunes en sistemas de escaneo láser, en grabadores láser, impresoras láser, etc.¹⁰ La ecuación diferencial correspondiente es:

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta = u(t) \quad (13)$$

Donde:

$$J = 0.001 \text{ Kg m}^2$$

$$b = 0.002 \frac{\text{N m s}}{\text{rad}}$$

$$k = 0.1 \frac{\text{N m}}{\text{rad}}$$

$u(t)$ es el par aplicado al actuador del espejo
 $\theta(t)$ es el ángulo de orientación del espejo

O equivalentemente, al multiplicar por 1000 la ecuación, resulta:

$$\ddot{\theta} + 2\dot{\theta} + 100\theta = 1000u(t) \quad (14)$$

De donde resulta la representación de estado correspondiente:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -100 & -2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1000 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0]x(t)$$

Primera solución

Las matrices involucradas en el diseño son:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -100 & -2 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1000 \end{bmatrix}; C = [1 \quad 0]; D = 0; R = 1; Q = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

La solución a la ecuación algebraica de Riccati resulta:

$$S = \begin{bmatrix} 12.2559 & 0.00377 \\ 0.00377 & 0.00316 \end{bmatrix}$$

Con lo cual la ganancia del control ($K = R^{-1}B^T S$) queda:

$$K = [3.7742 \quad 0.0849]$$

Para la solución estacionaria de la ecuación de seguimiento se obtiene

$$v = \begin{bmatrix} -61.2399 \\ -0.01935 \end{bmatrix}$$

la cual se obtuvo utilizando $r = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \end{bmatrix}$. Por lo tanto $K_R r = 19.3585$. La ley de control completa queda:

$$u^*(t) = -[3.7742 \quad 0.0849]x^*(t) + 19.3585$$

Segunda solución

Para la segunda solución se utiliza el mismo valor de S y de K previamente calculado. Para la pre-alimentación, se calcula el valor utilizando la ecuación (10):

$$K_R = [3.7742 \quad 0.0849 \quad 1] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -100 & -2 & 1000 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 3.874274$$

Y la ley de control resulta en:

$$u^*(t) = -[3.7742 \quad 0.0849]x^*(t) + 19.3713$$

DISCUSIÓN

Es importante hacer notar que, dado que ambos procedimientos utilizan la misma retroalimentación y tratándose de un sistema con una sola entrada y una sola salida, la pre-compensación requerida en ambas soluciones tiene que ser igual. De aquí se puede concluir que mediante el segundo procedimiento para el cálculo de la pre-compensación y el primero para la determinación de la ganancia de la retroalimentación se puede llegar de manera rápida a la determinación del control requerido.

Un nivel de ajuste adicional es la selección de las matrices de ponderación para garantizar un cierto desempeño requerido. Adicionalmente, se hace necesario revisar las cuestiones de robustez de ambos procedimientos. El primer procedimiento requiere algo más de trabajo computacional comparado con el segundo. Por otro lado, dado que el conocimiento de las matrices del sistema para obtener el control hace los procedimientos discutidos susceptibles a incertidumbre en las matrices del sistema.

REFERENCIAS

1. S. Domínguez, P. Campoy, J. M. Sebastian, A. Jiménez, (2006), Control en el espacio de estado, Prentice Hall.
2. I. D. Díaz Rodríguez, S. Han, S. P. Bhattacharyya, (2019), Analytical design of PID controllers, Springer.
3. R. Kelly, V. Santibañez, A. Loria, (2005), Control of robot manipulators in joint space, Springer.
4. Ch.-Ch. Tsui, (2022) Robust control system design: Advanced state space techniques. CRC-Press.
5. D. Kirk, (2004), Optimal control theory: an introduction, Dover books of electrical engineering.
6. F. L. Lewis, D. L. Vrabie, V. L. Syrmos, (2012) Optimal control, John Wiley & Sons.
7. R. H. Kwong, (2008), course notes on control systems, University of Toronto, Department of Electrical and Computer Engineering.
8. A. Saberi, A. A. Stoorvogel, P. Sannuti, (2000) Control of linear systems with regulation and input constraints, Springer.
9. J.-B. He, Q.-G. Wang, T.-H. Lee, (2000) PI/ PID controller tuning via LQR approach, Chemical Engineering Sciences, 55(2000) 2429-2439.
10. G. E. Marshall, G. E. Stutz, (2004), Handbook of optical and laser scanning, Marcel Dekker.

Efecto de los parámetros de impresión 3D en la resistencia mecánica del ABS

Flor Yanhira Rentería-Baltierrez¹, Jesús Gabino Puente-Córdova²,
Pedro Inés Loera-Martínez¹, Arlethe Yari Aguilar-Villarreal¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

flor.renteriabltz@uanl.edu.mx, jesus.puentecr@uanl.edu.mx, pedro.loeramr@uanl.edu.mx, arlethe.aguilarrvll@uanl.edu.mx

RESUMEN

Dado el continuo avance de la tecnología de impresión 3D y el creciente interés en desarrollar prototipos o productos con propiedades mejoradas, este estudio se centra en la evaluación de las propiedades mecánicas del acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Se fabricaron probetas de ABS bajo diferentes condiciones de impresión, las cuales fueron evaluadas mediante un diseño de experimentos y ensayos de tensión para identificar los parámetros óptimos que maximizan la resistencia a la tensión del material. Adicionalmente, se realizó un análisis mecánico dinámico (DMA) para la probeta con mejores condiciones de impresión, evaluando su comportamiento viscoelástico en función de la temperatura. Los resultados del DMA muestran una temperatura de transición vítrea alrededor de 123°C, indicando la máxima disipación de energía. Por encima de los 160°C, el material mostró un comportamiento viscoso asociado al inicio del flujo, información clave para optimizar procesos como la inyección, extrusión e impresión 3D. Este enfoque integral combina técnicas de caracterización mecánica y viscoelástica, permitiendo establecer una relación entre los parámetros de impresión y el desempeño del ABS, contribuyendo al diseño eficiente de procesos y aplicaciones.

PALABRAS CLAVE

Impresión 3D, ABS, propiedades mecánicas, diseño de experimentos.

ABSTRACT

The continuous advancement of 3D printing technology and the growing interest in developing prototypes or products with enhanced properties have driven this study, which focuses on evaluating the mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene (ABS). ABS specimens were fabricated under different printing conditions, which were assessed through a design of experiments and tensile tests to identify the optimal parameters that maximize the material's tensile strength. Additionally, dynamic mechanical analysis (DMA) was performed on the sample with the best printing conditions, evaluating its viscoelastic behavior as a function of temperature. The DMA results identified a glass transition temperature around 123°C, indicating the maximum energy dissipation. Above 160°C, the material exhibited a viscous behavior associated with the onset of flow, providing key information for optimizing processes such as injection molding, extrusion, and 3D printing. This integrated approach combines mechanical and viscoelastic characterization techniques to provide valuable insights into the relationship between printing parameters and the performance of ABS, contributing to the efficient design of processes and applications.

KEYWORDS

3D printing, ABS, mechanical properties, design of experiments.

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, la cual forma parte de la manufactura aditiva, es una tecnología que ha hecho posible el desarrollo de estructuras complejas a partir de un diseño o modelo computacional con el cual se obtiene un elemento sólido.¹ La técnica de impresión 3D ha sido utilizada en diversas aplicaciones y desarrollos tecnológicos ya que, a diferencia de técnicas como el mecanizado de arranque por viruta, la manufactura aditiva permite crear prototipos rápidos y personalizados con alta precisión, evitando el uso de diversas herramientas y el desperdicio de material.²

Por lo anterior, un área que se encuentra en crecimiento e investigación es el desarrollo de nuevos procesos de producción que optimicen los recursos de materia prima, y además brinden la facilidad de obtener objetos con diseño libre partiendo de un modelo digital computarizado.³ Sin embargo, en la manufactura aditiva se han reportado algunas desventajas como las relacionadas a la fusión deficiente y el comportamiento anisotrópico debido a problemas de adhesión que resulta en defectos entre capas durante la impresión. Para mejorar el rendimiento de las piezas impresas en 3D, se ha estudiado la selección de parámetros de impresión 3D.⁴ Entre los más comunes se encuentran la altura de la capa, la temperatura de extrusión, velocidad de alimentación, el patrón de relleno, la orientación de la pieza y la dirección de extrusión. El comportamiento mecánico y calidad del material impreso estará en función de la selección y combinación de los parámetros establecidos en el equipo de impresión 3D. Entre las diferentes tecnologías de manufactura aditiva, el modelado por deposición fundida (FDM) es la técnica más popular y versátil en la que se utiliza un filamento termoplástico como materia prima, el cual pasa a través de una extrusora donde se funde y se deposita capa por capa en una plataforma, solidificándose para formar un objeto 3D.⁵

La manufactura mediante tecnología tipo FDM ha sido objeto de investigación para abordar el comportamiento mecánico de los materiales impresos, ya que las propiedades mecánicas del material procesado con esta tecnología difieren de las propiedades de la materia prima.⁶ Por un lado, las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D disminuyen en comparación con las procesadas de manera tradicional, como lo es inyección o extrusión. Por otro lado, si las capas de impresión se fusionan correctamente, se obtienen resultados aceptables. Sin embargo, el carácter heterogéneo obtenido durante la impresión genera un rendimiento mecánico sensible a la orientación de la impresión, lo que determina la distribución de los defectos.

Se han reportado resultados de “*air gap*” los cuales hacen referencia al espacio entre dos filamentos adyacentes.⁷ Cuando el *air gap* es positivo significa que dos filamentos consecutivos no tienen contacto y por lo tanto hay presencia de huecos. Si este valor es negativo, indica que hay un mejor relleno y esto aumentará la resistencia a tensión, la densidad, y por tanto la resistencia de las uniones.⁸ Sin embargo, es importante considerar que un exceso de material conlleva a un mal acabado, o incluso que los filamentos adyacentes presenten deformaciones o distorsión. En cuanto a la dirección de extrusión del filamento se ha reportado que las piezas fabricadas presentan mayor resistencia cuando la impresión se fija en la dirección de extrusión del filamento. Esta diferencia de propiedades según la dirección es lo que se conoce como anisotropía.⁹ En la altura de capas ha sido posible observar, en el eje vertical, un efecto escalera en las geometrías curvas. Este es un factor importante en la rugosidad y acabado superficial. A menor altura de capa, menor rugosidad y mejor acabado superficial, lo que conlleva a mayor tiempo de fabricación.¹⁰

La historia térmica del material juega un papel fundamental en la calidad de las uniones. La calidad de la unión dependerá de la formación de un cuello de unión entre dos filamentos adyacentes y de la difusión de las cadenas poliméricas a través de la unión. Los patrones de relleno afectan la resistencia de las piezas debido a que el relleno impacta la orientación del filamento. Los patrones de relleno más utilizados suelen ser el rectangular y el panal de abeja (*honeycomb*). Los efectos de la orientación en el rendimiento mecánico de las piezas FDM se han estudiado previamente.¹¹ Los autores coinciden en que la orientación de impresión más fuerte se obtiene cuando la deposición del filamento fusionado coincide con la dirección de tensión. Sin embargo, se puede encontrar una variedad de orientaciones a lo largo de esta dirección de tensión, que no han sido analizadas en otros estudios.

Los materiales poliméricos más empleados para el proceso de impresión 3D son el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), nylon, policarbonato (PC), poliuretano termoplástico

(TPU) y el politereftalato de etilenglicol (PET).¹² Además, es posible el empleo de ciertos aditivos que provoquen variabilidad en las capacidades y propiedades mecánicas y térmicas. El ABS es un copolímero termoplástico que surge por la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno. Las porciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno.¹³ El ABS es un material amorfo, es decir que no tiene temperatura de fusión verdadera y esta se encuentra en un rango de 220 a 240°C, y presenta buenas propiedades mecánicas haciéndolo uno de los materiales más utilizados por la tecnología de manufactura aditiva.

Dado que resulta imprescindible conocer las propiedades de los productos obtenidos mediante este proceso, uno de los ensayos que permiten conocer su esfuerzo máximo es el ensayo de tensión.¹⁴ Al realizar un análisis estadístico con los diferentes materiales y sus niveles de densidad, se puede llegar a determinar las condiciones óptimas y la variabilidad existente en los datos obtenidos del ensayo de tensión.¹⁵ En investigaciones previas, se han empleado métodos estadísticos como Taguchi y ANOVA para analizar cómo los parámetros de impresión influyen en las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante FDM.¹⁶ Existe una amplia cantidad de datos en la literatura que exploran el rendimiento mecánico, las configuraciones de impresión y las estrategias de optimización aplicadas a componentes producidos mediante impresión 3D.^{17,18}

Este trabajo se centra en evaluar la resistencia máxima de probetas de ABS impresas bajo diferentes condiciones de patrón de relleno, resolución y orientación de impresión. A través del método Taguchi, se identifican los efectos individuales y combinados de los parámetros del proceso, determinando las condiciones óptimas para maximizar las propiedades mecánicas. Adicionalmente, se realizaron ensayos de análisis mecánico dinámico (DMA) para caracterizar el comportamiento viscoelástico de las probetas y comprender de manera más profunda las interacciones entre los parámetros de impresión y las propiedades dinámicas de los materiales. Los hallazgos de este estudio ofrecen una valiosa contribución para optimizar los procesos de impresión 3D del ABS, proporcionando una base sólida para el diseño de condiciones de procesamiento específicas. Además, estos resultados permiten una selección informada de los parámetros de impresión en función del campo de aplicación, promoviendo un enfoque más eficiente y personalizado en la fabricación aditiva.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Material y preparación de probetas

El material utilizado en este estudio es ABS de color verde neón, con dimensiones de 50 × 7 × 3 mm, seleccionado para evaluar las condiciones óptimas del proceso de impresión 3D. El filamento de ABS fue empleado tal como se recibió del proveedor 3D Systems, sin modificaciones adicionales. El diseño de las probetas fue desarrollado utilizando el software Creo Parametric 2.0, y la fabricación se llevó a cabo en una impresora 3D CubePro Trio 3D Systems, modelo 40173. Los valores de los parámetros de impresión, presentados en la tabla 1, se mantuvieron constantes y fueron seleccionados en base a las recomendaciones del fabricante para garantizar la calidad y reproducibilidad de las muestras.

Tabla 1. Parámetros fijos en el proceso de impresión 3D.

Parámetros de impresión	Valores
Densidad de relleno	100 %
Temperatura de operación	~ 240 °C
Temperatura de cama	~ 90 °C
Velocidad de impresión	15 mm/s

Diseño de experimentos

El enfoque de Diseño de Experimentos (DOE) se empleó para planificar y estructurar el trabajo de laboratorio, asegurando que los resultados fueran confiables y estadísticamente relevantes. La tabla II presenta los dos principales componentes de un DOE: factores y niveles, los cuales están organizados en forma de una matriz experimental. Para este estudio, se fabricaron un total de 18 probetas siguiendo el arreglo ortogonal propuesto por la metodología Taguchi, optimizando la cantidad de experimentos sin comprometer la calidad del análisis.

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab 19, donde se llevó a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05. Este análisis permitió evaluar de manera cuantitativa el efecto de los parámetros seleccionados sobre las propiedades mecánicas del material, identificando aquellos factores que influyen significativamente en el desempeño de las probetas fabricadas mediante impresión 3D. Los resultados proporcionan una base sólida para comprender y optimizar los parámetros de impresión.

Tabla II. Factores y niveles en el DOE.

Parámetro	Nivel		
	1	2	3
Patrón de relleno	<i>Cross</i> ×	<i>Diamonds</i> ♦	---
Resolución (µm)	70	200	300
Orientación de impresión	Horizontal	Borde	Vertical

Ensayo de tensión

Las probetas impresas se sometieron a ensayos de tensión uniaxial. Dichos ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal Shimadzu AGS-X con una celda de carga de capacidad de 10 kN. Las condiciones de los ensayos fueron las siguientes: temperatura ambiente de 23°C, y una velocidad de avance de 50 mm/min. Las probetas presentan una geometría de 50 mm x 7 mm x ~3 mm.

Análisis mecánico dinámico

Las pruebas de tensión realizadas en la máquina universal permitieron determinar la resistencia máxima de las probetas fabricadas, identificando la muestra con el mejor desempeño mecánico. Esta muestra fue seleccionada para su posterior caracterización mediante análisis mecánico dinámico (DMA8000 Perkin Elmer), con el objetivo de complementar la evaluación del material. El ensayo DMA se realizó en modo *single cantilever*, con un barrido de temperatura de 20 a 200°C, una rampa de calentamiento de 2°C/min, un desplazamiento de 0.01 mm y una frecuencia de 1 Hz. Este análisis permitió estudiar las propiedades viscoelásticas del material bajo condiciones dinámicas y térmicas controladas, proporcionando una visión más integral del comportamiento del ABS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ensayo de tensión se registra la fuerza y desplazamiento de las muestras estudiadas de ABS en color verde, figura 1. Los resultados se presentan en tres secciones: en la primera sección se discuten los resultados del comportamiento mecánico del polímero en relación con las condiciones del patrón, resolución y orientación seleccionados. En la segunda, se presentan y discuten los resultados estadísticos para evaluar los factores significativos en el comportamiento mecánico. Finalmente, se presenta la predicción de la mejor combinación de factores para obtener la fuerza de tensión óptima del material.

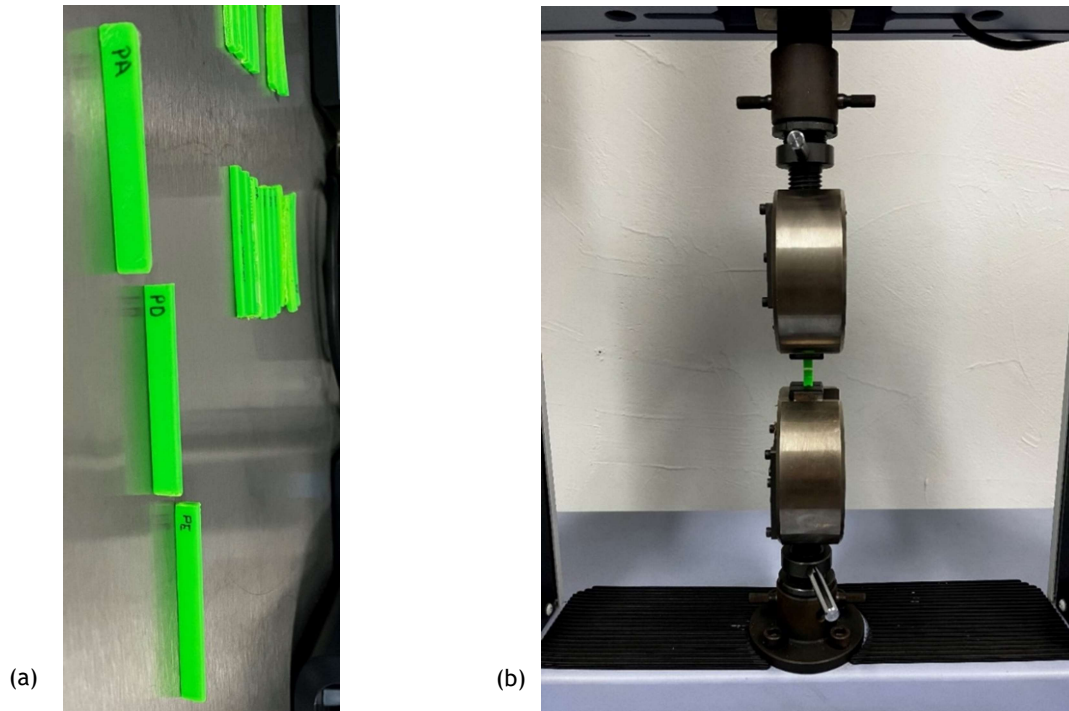


Fig. 1. (a) Probetas impresas 3D y (b) Ensayo de tensión.

Patrón de relleno

Las diferentes estrategias de relleno influyen directamente en el rendimiento mecánico de un componente impreso en 3D.¹¹ Por lo tanto, es de suma importancia seleccionar los parámetros que influyen en la pieza. Se seleccionaron dos diferentes patrones de relleno para mostrar su efecto sobre la resistencia de tensión máxima (UTS) del filamento ABS. Los resultados en la figura 2 muestran que el patrón *cross* presenta mayor fuerza de tensión en comparación con el patrón *diamonds*. De acuerdo con la literatura el patrón de panal de abeja es uno de los que presentan mejores resultados, por lo que se recomienda agregar este patrón para su estudio en futuras impresiones.^{11,18}

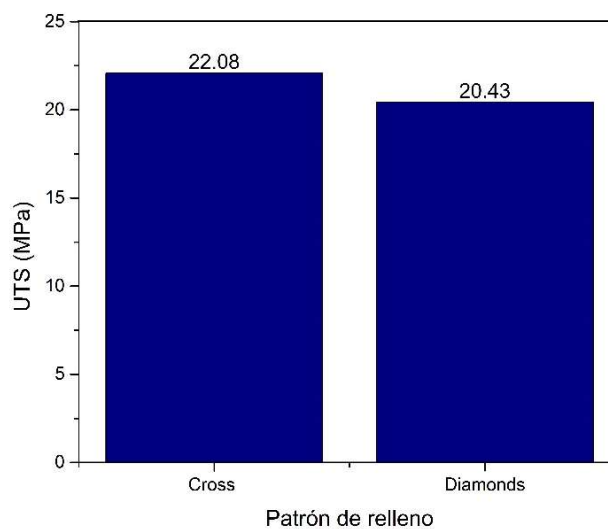


Fig. 2. Resistencia máxima a la tensión en función del patrón de relleno.

Resolución de Capa

La resolución de capa se relaciona con el espesor de las capas de filamentos depositados. El espesor de capa define la resolución en el eje Z afectando directamente el número de capas, acabado y rugosidad del objeto impreso. En general, la literatura reporta que, a mayor espesor de capa, menor calidad tendrá la pieza. Si la altura de capa es menor, el tiempo de impresión aumenta, la precisión de la pieza mejora y por lo tanto debe traducirse en mejores propiedades mecánicas. Cuando aumenta el número de capas, la carga de tensión se distribuye uniformemente en las capas adyacentes, equilibrando así las tensiones internas, que generalmente están asociadas con una estructura laminada.³ Cuanto menor sea el espesor de la capa, mejor será la unión entre capas, porque las capas se apilan estrechamente con menor aparición de micro-huecos o porosidad, en consecuencia, se obtiene una mayor resistencia a la tensión.¹⁹ De acuerdo con los resultados experimentales, la mejor respuesta mecánica se presenta con una resolución de 70 μm , figura 3.

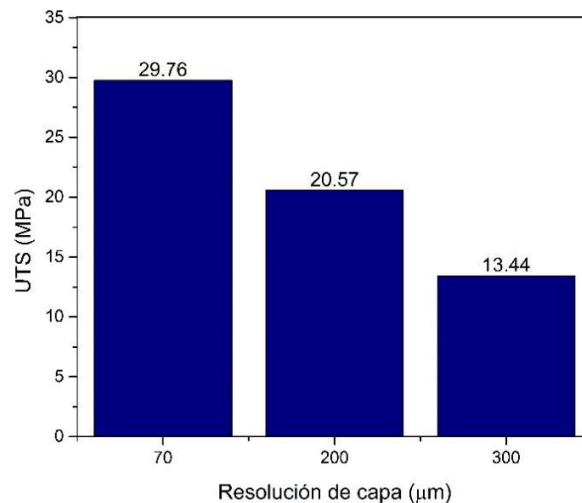


Fig. 3. Resistencia máxima a la tensión en función de la resolución de capa.

Orientación

La orientación de la impresión se refiere a cómo y en qué dirección se coloca una muestra en la plataforma de impresión 3D. Esto se observa a menudo en objetos impresos de forma anisotrópica, lo que hace que el rendimiento estructural dependa en gran medida de la orientación de la construcción de manera similar a los laminados compuestos. Los efectos de la orientación en el rendimiento mecánico de las piezas FDM se han estudiado previamente.¹³ Estos autores coinciden en que la orientación de impresión más fuerte se obtiene cuando la deposición del filamento fusionado coincide con la dirección de tensión.

Diversos autores² han reportado que probetas verticales exhiben fallas entre capas con menor rendimiento de resistencia y rigidez. Las probetas horizontales y de borde han mostrado las propiedades mecánicas más altas. Además, se ha demostrado un comportamiento de fractura frágil para la orientación vertical y un comportamiento de fractura dúctil para las orientaciones de borde y horizontal. Las probetas orientadas en el borde exhiben un mejor rendimiento de resistencia a la flexión y a la tensión, debido a una mayor efectividad en la alineación de las capas respecto a la fuerza aplicada. Además, las probetas de borde han exhibido el mejor comportamiento de tensión-deformación en términos de ductilidad. Por lo anterior, se ha concluido que las probetas de borde presentan un desempeño mecánico óptimo en términos de resistencia, rigidez y ductilidad.

Las muestras de ABS exhibieron una anisotropía notable. La orientación de la impresión afectó significativamente las propiedades mecánicas. La orientación en borde muestra los valores más altos para la máxima resistencia a la tensión, mientras que la orientación vertical y horizontal resultan en valores

bajos, figura 4. Estas diferencias se pueden explicar considerando las fallas de unión de fusión entre capas. En la orientación vertical, la orientación de la capa es perpendicular a la carga aplicada, permitiendo que las capas individuales se desprendan bajo la carga.⁶ En el caso de la orientación de borde, las probetas se estiraron paralelas a la dirección de carga por lo que las fibras individuales soportaron la mayor parte de la carga aplicada. Además, en borde existe una mayor interacción (unión) entre capas por lo que el número de capas es mayor que en la orientación horizontal. Durante la impresión horizontal existe mayor liberación de calor por lo que la unión entre capas no es tan fuerte y presenta mayor número de defectos.

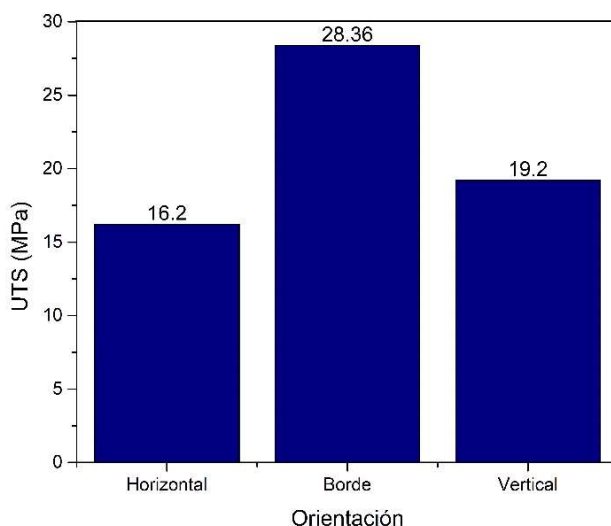


Fig. 4. Resistencia máxima a la tensión en función de la orientación.

Análisis estadístico

En la tabla III se presenta el Análisis de Varianza, ANOVA, donde es posible observar que la resolución de capa tiene el mayor impacto en la resistencia máxima de tensión. Asimismo, entre los parámetros, solo dos parámetros son estadísticamente significativos y tienen un valor de P inferior a 0.05, la orientación de impresión y la resolución de capa. Los resultados del presente estudio coinciden con los reportes de trabajos anteriores.^{14,18,20}

Tabla III. Análisis de Varianza de los parámetros de impresión.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Patrón	1	12.37	12.37	0.47	0.505
Resolución	2	803.38	401.69	15.34	0.000
Orientación	2	481.47	240.73	9.19	0.004
Error	12	314.21	26.18		
Total	17	1611.43			

El efecto de cada parámetro y sus niveles se muestran en la tabla IV, que también se denomina rendimiento promedio o efecto principal. Los parámetros óptimos se determinaron mediante la selección de la máxima relación de los promedios del efecto para cada factor, que se selecciona para maximizar la resistencia a la tensión. Como se presenta en la figura 5, el conjunto óptimo de parámetros es la combinación *cross*, 70 μ m y borde, donde la predicción arroja un UTS de 37.694 MPa.

Tabla IV. Efecto principal de los parámetros de impresión.

Nivel	Patrón	Resolución	Orientación
1	22.08	29.76	16.20
2	20.43	20.57	28.36
3	---	13.44	19.20
Delta	1.66	16.32	12.16
Rank	3	1	2

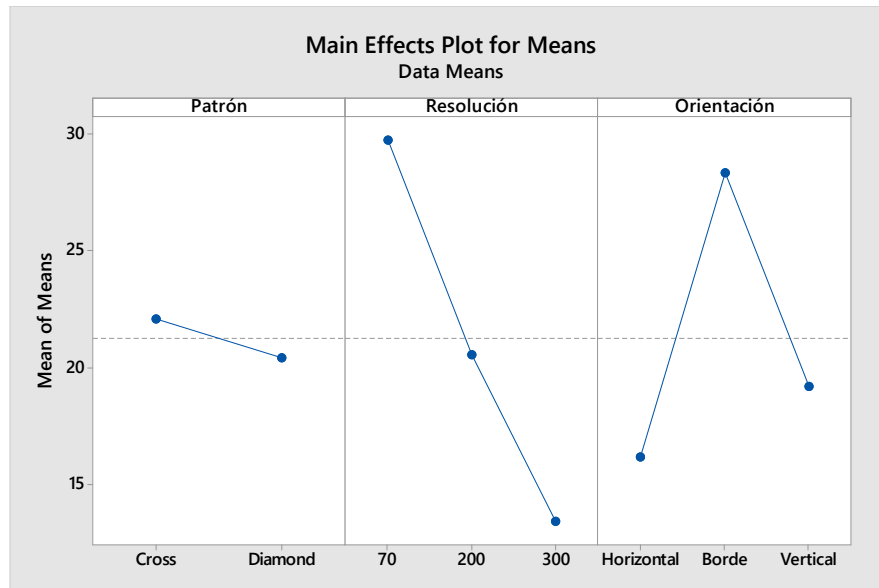


Fig. 5. Efecto promedio de UTS para los parámetros de impresión: patrón, resolución y orientación.

Análisis mecánico dinámico

La probeta seleccionada para el análisis mecánico dinámico (DMA) corresponde a la fabricada con una resolución de 70 μm , un patrón de relleno *cross* y una orientación de impresión en borde, ya que los resultados estadísticos del ensayo de tensión demostraron que estas condiciones de impresión maximizan la resistencia mecánica del ABS. Este desempeño superior en términos de resistencia hace que sea particularmente interesante explorar las propiedades viscoelásticas del material bajo estas condiciones óptimas. El análisis mediante DMA permite evaluar los módulos de almacenamiento (E') y pérdida (E'') de energía, proporcionando una comprensión más profunda de cómo estas configuraciones de impresión afectan la capacidad del material para soportar cargas dinámicas.²¹ Adicionalmente, el DMA ofrece información clave sobre el comportamiento del material frente a deformaciones dinámicas y variaciones térmicas, incluyendo aspectos como la estabilidad mecánica, la transición vítrea (T_g) y la movilidad molecular, y las capacidades de amortiguamiento del material.²² Este enfoque permite no solo confirmar el desempeño observado en los ensayos de tensión, sino también ampliar el entendimiento del material hacia aplicaciones donde las condiciones dinámicas y térmicas sean relevantes.

En la figura 6 se presentan los resultados de DMA para el ABS, se observa que E' disminuye a medida que aumenta la temperatura. Este proceso corresponde a la manifestación mecánica de la transición vítrea, la cual está asociada con un cambio conformacional debido al aumento de los grados de libertad de las cadenas poliméricas. El polímero experimenta un cambio de estado de baja movilidad molecular (estado vítreo) a un estado de alta movilidad molecular (estado cauchótico o elastomérico). A temperaturas mayores a 160°C comienza el proceso de flujo.

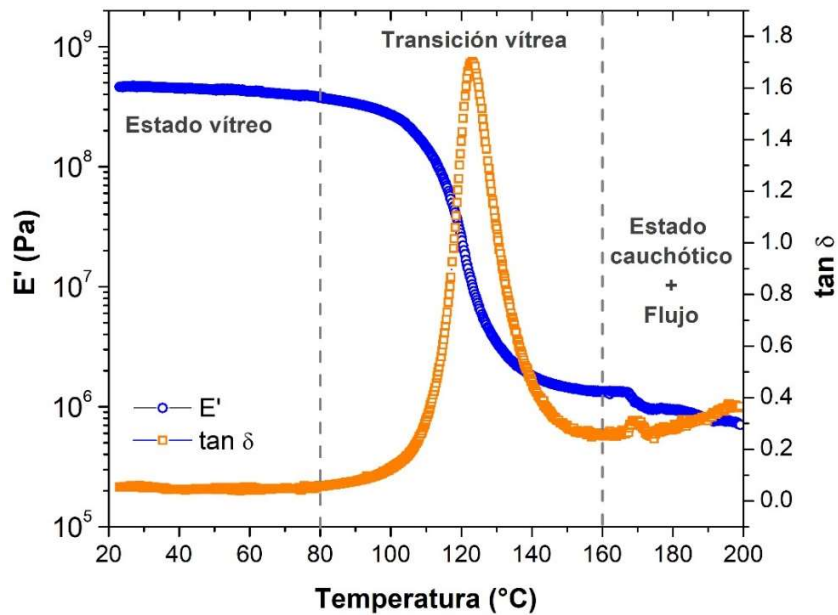


Fig.6. DMA para el ABS.

Respecto a $\tan \delta$, una relación entre las componentes viscosa y elástica del polímero ($\tan \delta = E''/E'$), para el proceso de la transición vítrea se tiene un máximo o un pico, lo cual está asociado con la máxima disipación de energía. Si tomamos el máximo a 123°C, este valor se asocia directamente con la temperatura de transición vítrea. Por encima de 160°C, $\tan \delta$ tiende a aumentar de manera considerable, lo cual implica el proceso del flujo (comportamiento viscoso). Este comportamiento es crítico para los procesos de transformación del ABS, como la inyección, la extrusión y la impresión 3D, donde la comprensión de estos cambios mecánicos y viscoelásticos es fundamental para optimizar las condiciones de procesamiento.²³

CONCLUSIONES

Se analizaron diferentes parámetros de impresión 3D para evaluar su influencia en la resistencia a la tensión máxima (UTS). Se concluye que la resolución y la orientación de la impresión tienen un considerable efecto en la UTS. La impresión en la dirección de borde produjo la disposición más resistente mecánicamente porque la fuerza aplicada fue paralela a las capas impresas. Además, la resolución de 70 μm produce una mejor calidad de impresión en las capas favoreciendo también a las propiedades mecánicas. Los mejores resultados se determinaron por medio de la metodología Taguchi dando como recomendación trabajar con 70 μm , orientación en borde y un patrón *cross*, siendo este último factor el menos significativo. Los resultados de DMA proporcionan una comprensión integral del comportamiento viscoelástico del ABS bajo condiciones dinámicas y térmicas. La transición vítrea, identificada a 123°C, resalta como un parámetro crítico para el diseño y optimización de procesos de fabricación aditiva, ya que marca el límite entre la rigidez estructural y la flexibilidad del material. Adicionalmente, el inicio del flujo a temperaturas superiores a 160°C subraya la importancia de controlar la temperatura durante el procesamiento para garantizar una transformación eficiente y reproducible del material. La selección de la muestra óptima, basada en los ensayos de tensión y corroborada con los resultados de DMA, demuestra que las configuraciones de impresión (resolución de 70 μm , patrón *cross* y orientación en borde) no solo maximizan la resistencia mecánica, sino que también aseguran un desempeño viscoelástico adecuado. Este enfoque combinado de caracterización mecánica y dinámica-mecánica valida la metodología empleada y refuerza la importancia de integrar análisis complementarios para optimizar materiales y procesos en la fabricación aditiva. Como trabajo futuro se deben analizar otros patrones de impresión, así

como aditivos y el efecto del envejecimiento físico a fin de establecer un control adecuado de los parámetros del proceso de la manufactura aditiva.

REFERENCIAS

1. Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T., Osswald, T., Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling, *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 616, pp. 1-12, 2019.
2. Štaffová, M., Ondreáš, F., Svatík, J., Zbončák, M., Jančář, J., Lepcio P., 3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: Basic concepts and effective tools for improved thermomechanical properties, *Polymer Testing*, vol. 108, pp. 1-11, 2022.
3. Fontana, L., Minetola, P., Iuliano, L., Rifuggiato, S., Khandpur, M., Stiuso, V., An investigation of the influence of 3d printing parameters on the tensile strength of PLA material, *Materials Today: Proceedings*, vol. 57, Part 2, pp. 657-663, 2022.
4. Vidakis, N., Petousis, M., Velidakis, M., Spiridaki, M., Kechagias, J., Mechanical Performance of Fused Filament Fabricated and 3D-Printed Polycarbonate Polymer and Polycarbonate/Cellulose Nanofiber Nanocomposites, *Fibers*, vol. 9(11), no. 74, pp. 1-15, 2021.
5. Vidakis, N., Petousis, M., Savvakis, K., Maniadi, A., Koudoumas, E., A comprehensive investigation of the mechanical behavior and the dielectrics of pure polylactic acid (PLA) and PLA with graphene (GnP) in fused deposition modeling (FDM), *International Journal of Plastics Technology*, vol. 23, pp.195–206, 2019.
6. Hanon, M., Dobosa, J., Zsidaia, L., The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness, *Procedia Manufacturing*, vol. 54, pp. 244–249, 2021.
7. Hanon, M., Zsidai, L., Mac, Q., Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors, *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, Part 5, pp. 3089-3096, 2021.
8. Gebisa, A., Lemu, H., Investigating Effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 using Designed Experiment, *Materials*, vol. 11, no. 11, pp 1-23, 2018.
9. Sood, A., Ohdar, R., Mahapatra, S., Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, *Journal of Advanced Research*, vol. 3, no. 1, pp. 81-90, 2012.
10. Leite, M., Fernandes, J., Deus, A., Reis, L., Vaz, M., Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA, *3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)* pp. 547-552, 2018.
11. Chacón, J.M., Caminero, M.A., García-Plaza, E., Núñez, P.J., Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design*, vol. 4, no. 15, pp. 143-157, 2017.
12. Wasti, S., Triggs, E., Farag, R., Auad, M., Adhikari, S., Bajwa, D., Li, M., Ragauskas, A., Influence of plasticizers on thermal and mechanical properties of biocomposite filaments made from lignin and polylactic acid for 3D printing, *Composites Part B: Engineering*, vol. 205, pp. 1-23, 2021.
13. Markiz, N., Horváth, E., Ficzer, P., Stiffness and damping behavior of 3D printed specimens, *Polymer Testing*, vol. 109, pp. 127-130, 2020.
14. Hikmat, M., Rostam, S., Ahmed, Y., Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology, *Results in Engineering*, vol. 11, pp. 1-10, 2021.
15. Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., Martorelli, M., The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, pp. 604-617, 2015.

16. Tunçel, O., Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method, *Polymers*, vol. 16, pp. 2-17, 2024.
17. Kothandaraman, L., Balasubramanian, N., Optimization of FDM printing parameters for square lattice structures: Improving mechanical characteristics, *Materials today: Proceedings*, vol. 1, 2024.
18. Nazma, M., Shadat, O., Rangan, N., Parametric optimization and sensitivity analysis of the integrated Taguchi-CRITIC-EDAS method to enhance the surface quality and tensile test behavior of 3D printed PLA and ABS parts, *Helijon*, vol. 11, pp. e41289, 2025.
19. Rajabi, A., Rostami, S., Aliha, M., Berto, F., Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies, *Procedia Structural Integrity*, vol. 34, pp. 71-77, 2021.
20. John, J., Devjani, D., Ali, S., Abdallah, S., Pervaiz, S., Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 6, pp. 62-78, 2023.
21. Krivic, G., Rostam y Slavič, J., Simultaneous non-contact identification of the elastic modulus, damping and coefficient of thermal expansion in 3D-printed structures, *Polymer Testing*, vol. 125, pp. 108131, 2023.
22. Medel, F., Abad, J., Esteban, V., Influence of printing direction on 3D printed ABS specimens, *Production Engineering Archives*, vol. 26(3), pp. 107529, 2022.
23. Mishra, V., Kapil, Ch., Negi, S., Kar, S., Veeman, E., Dynamic mechanical analysis of continuous metal wire-reinforced recycled thermoplastic composite fabricated 3D printing technique, *Materials Letters*, vol. 382, pp. 137928, 2025.

Medio siglo de innovación: Nanotecnología y telefonía celular, dos pilares de la era moderna

Alejandra I. Vallejo Martínez, Alexis J. Ortiz Ledezma, Roxana Berlanga Pérez, Leonardo Chávez-Guerrero

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Cd. Universitaria, Pedro de Alba, San Nicolás de los Garza, N.L.
alejandra.vallejom@uanl.edu.mx, alexis.ortizld@uanl.edu.mx, roxana.berlangapz@uanl.edu.mx,
leonardo.chavezgr@uanl.edu.mx,

RESUMEN

Los avances en nanotecnología han acercado la posibilidad de teléfonos celulares más ligeros, con baterías con mayor duración, procesadores rápidos e incluso pantallas flexibles. Esta ciencia, que manipula la materia a escala nanométrica (<100 nm), ha sido clave en la evolución de la industria electrónica y móvil. El presente artículo pretende explorar cómo las innovaciones en nanotecnología han redefinido los dispositivos móviles y su impacto en el futuro de los celulares, destacando tanto sus beneficios como sus limitaciones. Conforme la nanotecnología avanza, surgen nuevas posibilidades que transforman la experiencia digital, que podrían aplicarse a otros campos.

PALABRAS CLAVE

Nanotecnología, Nanoelectrónica, Teléfono inteligente, Teléfono celular.

ABSTRACT

Advances in nanotechnology have brought closer the possibility of lighter cell phones, longer-lasting batteries, fast processors and even flexible screens. This science, which manipulates matter at the nanometer scale (<100 nm), has been fundamental to the evolution of the electronics and mobile industry. Innovations article aims to explore how innovations in nanotechnology have redefined mobile devices and their impact on the future of cell phones, highlighting both its benefits and limitations. New possibilities are emerging as nanotechnology advances, transforming the digital experience, which could be applied to other fields.

KEYWORDS

Nanotechnology, Nanoelectronics, Smartphone, Cell phone.

INTRODUCCIÓN

Al considerar la veloz evolución de los dispositivos de comunicación, la cual devino en el desarrollo de teléfonos celulares, aparatos que cargamos a todas partes, se suele pasar por alto el mundo de la nanotecnología. Este campo de la ciencia y la tecnología trabaja con materiales y estructuras comprendidas en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm), una escala donde las propiedades de los materiales se transforman favorablemente para aplicaciones específicas. En la figura 1 se muestra una escala comparativa de tamaños donde se visualiza la diversidad de dimensiones en objetos cotidianos, estructuras y partículas subatómicas, subrayando la magnitud de la reducción en el ámbito nanométrico.¹

La nanotecnología y su disciplina complementaria, la nanociencia, se enfocan en estudiar y manipular la materia a escala nanométrica. Mientras que la nanociencia analiza cómo se comportan los materiales a esta escala, la nanotecnología aplica ese conocimiento para diseñar materiales, dispositivos y sistemas avanzados. Uno de los resultados de estas áreas ha sido el avance exponencial que han presentado los aparatos electrónicos, permitiendo el desarrollo de dispositivos más compactos y eficientes, mejorando la capacidad de las baterías y procesadores, así como la resolución de las pantallas. Esto ha sido fundamental para la evolución de los teléfonos celulares.

Los avances en la fabricación de materiales a escala nanométrica han permitido diseñar los componentes que forman parte de los circuitos y dispositivos electrónicos actuales. Esto ha transformado no solo los teléfonos celulares, sino también otros aspectos de la vida cotidiana, al hacer posible la miniaturización y mejora continua de la tecnología.

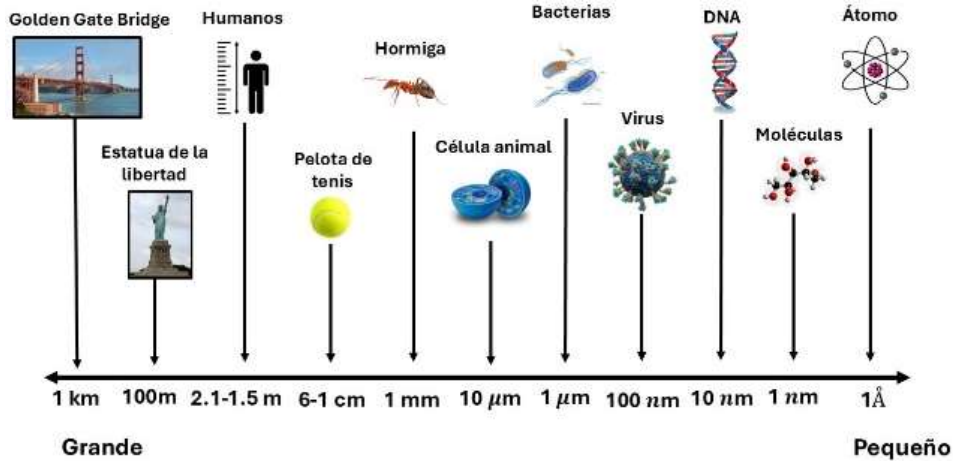


Fig.1. Escala comparativa de tamaños, mostrando la diversidad de dimensiones en objetos cotidianos, estructuras y partículas subatómicas.

NANOTECNOLOGÍA

De acuerdo con la norma ISO/TC 229,³ que incorpora elementos de la definición por parte de la *U.S National Nanotechnology Initiative*, la nanotecnología se define como: la comprensión y el control de la materia y los procesos a nanoescala, por debajo de los 100 nanómetros en una o más dimensiones. En esta escala, el conjunto de fenómenos dependientes del tamaño suele permitir aplicaciones novedosas al aprovechar las propiedades de los materiales que, a nanoescala, son distintas de las de los átomos individuales, las moléculas y la materia en bulto. Estas características permiten la creación de materiales, dispositivos y sistemas mejorados que explotan estas nuevas propiedades.

No obstante, antes de llegar a esta definición contemporánea, el término *nanotecnología* fue introducido por Norio Taniguchi en 1974, cuando describió el proceso de fabricación de semiconductores mediante técnicas como la deposición de películas finas y la incidencia de haces de iones, las cuales involucran la manipulación de materiales a escala nanométrica. Esta conceptualización marcó el inicio de una etapa en los campos de la ciencia y la tecnología.⁴

Los nanomateriales se agrupan en cuatro categorías principales según su dimensionalidad: cero dimensiones (0-D), que incluyen elementos como los puntos cuánticos, los cuales están completamente confinados en las tres direcciones del espacio; una dimensión (1-D), representada por los nanotubos, que están restringidos a lo largo de su longitud, sin variaciones en ancho o altura; dos dimensiones (2-D), que abarcan materiales como las nano-láminas, que se extienden en longitud y ancho, pero tienen un grosor extremadamente reducido; y tres dimensiones (3-D), que se definen por su capacidad de extenderse en las tres direcciones del espacio: longitud, ancho y altura. Este último tipo de nanomateriales presenta estructuras complejas que pueden integrar múltiples componentes en una sola entidad, otorgándoles características únicas y versátiles que son útiles en diversas aplicaciones.⁵

El campo de aplicación de la nanotecnología está en constante crecimiento y en él convergen diversas disciplinas, como la física, la ingeniería, la biología, la medicina, entre otras.⁶

En cada una de estas ramas hay aplicaciones muy particulares. Algunas de ellas se pueden visualizar en la figura 2.



Fig. 2. Algunas aplicaciones dentro de la nanotecnología.

El área de aplicación que le concierne en adelante al presente artículo son los dispositivos electrónicos, por lo que se desglosará con mayor detalle la evolución y avances que han ocurrido desde que la nanotecnología se convirtió en un punto de interés para la electrónica.

NANOELECTRÓNICA

La electrónica es la rama de la física que se encarga de los circuitos que constan de diversos componentes activos, como diodos, transistores, tubos de vacío, circuitos integrados, así como equipos de interconexión como las tarjetas de circuito y otras formas de infraestructura de comunicación, que permiten que se complete la funcionalidad del circuito. Cada elemento electrónico depende de cómo los materiales permiten o bloquean el flujo de electricidad, por lo que la clasificación de los materiales toma un papel importante. De acuerdo con las propiedades electrónicas de un material se clasifican como: conductores, aislantes o semiconductores. En un circuito eléctrico, cada uno de ellos cumple una función. Los conductores son los responsables de transportar energía de un punto a otro; los aislantes suelen usarse para recubrir a los cables y evitar fugas eléctricas.

Por su parte, los semiconductores, gracias a sus propiedades únicas, controlan y procesan las señales eléctricas. Debido a esto, juegan un rol importante en la nanoelectrónica. Para perfeccionar su funcionamiento, uno de los procesos esenciales en los semiconductores es el dopaje, que consiste en introducir intencionalmente pequeñas cantidades de otros átomos, llamados *impurezas*, alterando la densidad de portadores de carga y, por ende, modificando su capacidad de conducción. El número de electrones de valencia de las impurezas atómicas determinará el tipo de semiconductor que tendrá lugar; Pueden ser del tipo *n* o tipo *p*, los cuales están esquematizados en la figura 3. Ese tipo de ajustes controlados facilita la fabricación de diversos dispositivos electrónicos, como transistores o *chips*.

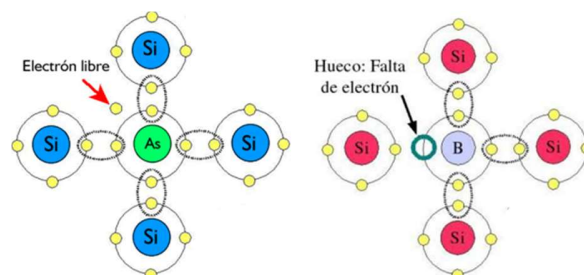


Fig. 3. Dopaje con arsénico en un semiconductor tipo N y dopaje con boro en un semiconductor tipo P.

Después de tener delimitados los términos de *nanotecnología* y *electrónica*, es posible establecer un término que combina estas dos áreas: la nanoelectrónica, que es la rama a la que le compete el manejo, la caracterización y la fabricación de dispositivos electrónicos a escala nanométrica.⁷

Comportamiento de los materiales electrónicos a escala nanométrica

Cuando se trabaja con materiales a nanoescala, existen dos razones principales por las que se modifican las propiedades del material. La primera es que las nanoestructuras tienen una superficie mayor en comparación con un bloque más grande que contenga la misma cantidad de material, lo que aumenta su reactividad. La segunda razón es que los efectos cuánticos adquieren mayor relevancia a medida que la escala se acerca a los nanómetros, algo que no se observa en tamaños mayores. Este fenómeno es conocido como *confinamiento cuántico* (figura 4), en donde las partículas, como los electrones, tienen menos espacio para moverse, lo que provoca que solo puedan ocupar ciertos niveles de energía específicos,⁸ en lugar de moverse libremente como en un material más grande. Debido a lo anterior, cuando la materia se encuentra en la escala nanométrica se presentan variaciones en sus propiedades, como en la conductividad eléctrica, por lo que un material que se comporta normalmente como conductor, a nanoescala puede comportarse como semiconductor o aislante.⁹ Esto ha permitido desarrollar tecnologías innovadoras, como celdas solares más eficientes, sensores avanzados y dispositivos electrónicos que aprovechan estas propiedades.

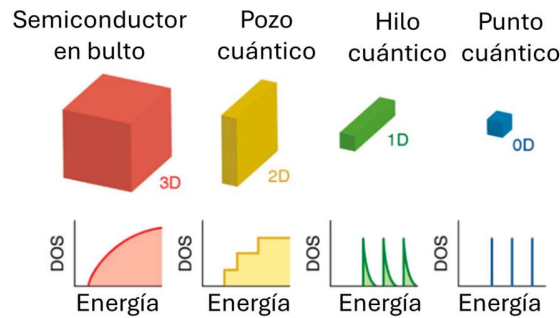


Fig. 4. Representaciones de confinamiento cuántico en distintas dimensionalidades (DOS: densidad de estados electrónicos).¹⁰

La nanotecnología y la miniaturización en los componentes eléctricos

La miniaturización es un concepto general que aborda la manufactura de dispositivos electrónicos, mecánicos y ópticos cada vez más pequeños sin perder su efectividad, e incluso, en muchos casos, aumentando su rendimiento.¹¹ Esta técnica permite incluir más funciones en espacios reducidos, lo que da lugar a dispositivos más compactos, eficientes y fáciles de transportar. En la tecnología moderna, la miniaturización es esencial, ya que aumenta la capacidad de procesamiento, reduce el consumo de energía y optimiza la velocidad de funcionamiento.

La nanotecnología ha sido clave en este avance, debido a las propiedades únicas que presentan los materiales en la escala nanométrica. Un ejemplo es la creación de transistores a nivel nanométrico, pues se ha reducido notablemente el tamaño de los dispositivos electrónicos, aumentando la densidad de transistores en áreas más pequeñas. Esto se traduce en mejoras significativas en el rendimiento y eficiencia energética de los *microchips*, así como en la optimización en la transmisión de señales, fundamentales en tecnologías como los teléfonos móviles y otros dispositivos electrónicos.

Pero, además del rendimiento de dispositivos, el impacto de la nanotecnología en la electrónica abre camino a tecnologías emergentes como la computación cuántica y la inteligencia artificial, las cuales requieren un alto nivel de procesamiento y eficiencia energética. Estos avances no solo transforman el sector tecnológico, sino que también repercuten en áreas como el análisis de datos, la inteligencia de datos y la ciberseguridad. Por lo que, a medida que la nanotecnología siga avanzando,

es crucial que el desarrollo sea responsable, ético y sostenible, para asegurar un impacto positivo tanto en la tecnología, como en la sociedad y en el planeta.¹²

Desarrollo del Transistor y el Circuito integrado

El transistor, uno de los descubrimientos más trascendentales del siglo XX, fue desarrollado en 1947 por un equipo de científicos en los Laboratorios Bell, liderado por William Shockley e integrado por John Bardeen y Walter Brattain, mostrados en la figura 5. Este invento surgió como respuesta a las limitaciones de los tubos de vacío, dando lugar a un dispositivo semiconductor capaz de amplificar señales eléctricas. En 1956, el trabajo de Bardeen, Shockley y Brattain fue reconocido con el Premio Nobel de Física "por sus investigaciones sobre semiconductores y el descubrimiento del efecto transistor". Actualmente, el transistor es un componente esencial en todos los dispositivos electrónicos, formando la base de los circuitos integrados y facilitando la miniaturización tecnológica.¹³



Fig. 5. 1956, William Shockley, sentado, (1910-1989), John Bardeen, en el centro, (1908-1991) y Walter Brattain, a la derecha, (1902-1987).

El desarrollo del circuito integrado en los años 60 representó un punto de inflexión crucial. Procesos como la fotolitografía y el transistor planar hicieron posible la fabricación masiva de componentes en una sola oblea de semiconductor, lo cual redujo costos y mejoró la fiabilidad. La predicción de Gordon E. Moore, que anticipaba una duplicación continua de la complejidad de los circuitos integrados, ha sido asombrosamente precisa, con circuitos que actualmente contienen cientos de miles de componentes.

El auge de la microelectrónica ha tenido un profundo impacto económico. Tras la introducción del circuito integrado, el consumo global de estos componentes se disparó, alcanzando casi mil millones de dólares en 1970 y superando los 3500 millones en 1976. Este crecimiento se tradujo en un aumento en la producción y exportación de circuitos integrados por parte de compañías estadounidenses, subrayando su papel esencial en la industria electrónica mundial, valorada en unos 80 mil millones de dólares.

Además de reducir los costos directos de los circuitos integrados, esta tecnología ha aportado significativos ahorros en mano de obra y materiales, gracias a la reducción de interconexiones necesarias. Los circuitos integrados, al ser más confiables y requerir menos mantenimiento, permiten un ahorro considerable en costos operativos. También hacen un uso más eficaz del espacio físico y disminuyen la necesidad de infraestructura adicional, como transformadores y sistemas de refrigeración. La evolución de la microelectrónica ha transformado tanto la tecnología como la economía, y a medida que seguimos descubriendo su potencial, es probable que esta revolución continúe generando nuevas oportunidades y desafíos en los años venideros.¹⁴

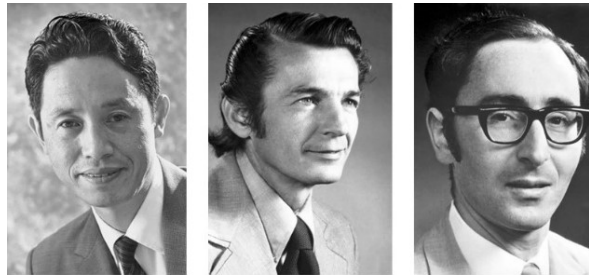
Los avances en la tecnología microelectrónica han desencadenado una revolución que ha reconfigurado el panorama tecnológico. La miniaturización de los componentes electrónicos y el

desarrollo del circuito integrado han transformado las capacidades tecnológicas, convirtiendo a los dispositivos microelectrónicos en elementos clave para aplicaciones que van desde misiones especiales a Marte y la Luna, hasta objetos cotidianos como relojes digitales, calculadoras y celulares. Esta evolución ha potenciado la capacidad de las computadoras para almacenar, procesar y visualizar información, dando lugar a dispositivos más rápidos, compactos y eficientes, además de integrar la computación en herramientas industriales y de uso personal. Asimismo, la microelectrónica ha generado oportunidades intelectuales y sociales, facilitando el acceso a vastas cantidades de información mediante computadoras personales.

Avances en la nanotecnología

El desarrollo de dispositivos electrónicos modernos, como los teléfonos móviles, ha sido posible gracias a descubrimientos científicos que impulsaron avances significativos en tecnología. A lo largo del tiempo, distintos premios Nobel han aportado contribuciones clave que sentaron las bases para la innovación en este campo. Estos premios no solo han promovido la investigación en áreas cruciales, sino que también han permitido la creación de componentes más pequeños y potentes, haciendo que los dispositivos electrónicos se conviertan en herramientas esenciales en nuestra vida diaria.

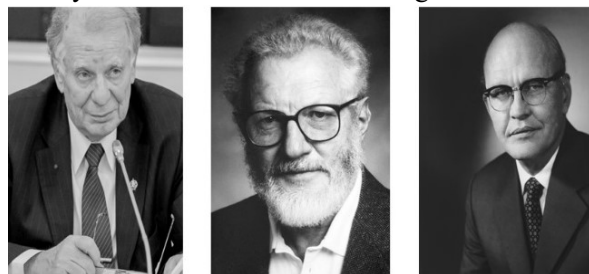
El Premio Nobel de Física de 1973 fue otorgado a Leo Esaki, Ivar Giaever y Brian Josephson, quienes realizaron importantes contribuciones al diseño de dispositivos basados en el tunelamiento cuántico. Estas innovaciones, como los diodos de túnel y las uniones Josephson, impulsaron avances en electrónica de alta frecuencia y establecieron la base para tecnologías fundamentales en la resonancia magnética. En la figura 6 se presentan a los galardonados, cuya labor marcó un hito en la física aplicada y la tecnología moderna.¹⁴



Leo Esaki Ivar Giaever Brian Josephson

Fig. 6. Leo Esaki, Ivar Giaever y Brian Josephson, Premio Nobel de Física 1973 por avances en tunelamiento cuántico, clave en electrónica y resonancia magnética.¹⁵

En el año 2000, Zhores Alferov, Herbert Kroemer y Jack Kilby fueron premiados por sus contribuciones a la tecnología de la información y comunicación. Alferov y Kroemer obtuvieron el reconocimiento por su desarrollo de heteroestructuras semiconductoras, mientras que Kilby fue honrado por inventar el circuito integrado (IC). En la figura 7 se destacan a los galardonados, cuya labor transformó la electrónica y sentó las bases de la tecnología moderna.¹⁶



Zhores Alferov Herbert Kroemer Jack Kilby

Fig. 7. Zhores Alferov, Herbert Kroemer y Jack Kilby, Premio Nobel del 2000 por avances en heteroestructuras semiconductoras y la invención del circuito integrado.

Albert Fert y Peter Grünberg recibieron en 2007 el Premio Nobel de Física por su descubrimiento de la magnetorresistencia gigante (GMR), un hallazgo que transformó la tecnología de almacenamiento de datos y dio lugar al campo de la espintrónica. En la figura 8 se presentan a los galardonados, cuya investigación revolucionó el almacenamiento de datos y las aplicaciones en espintrónica.¹⁷



Fig. 8. Albert Fert y Peter Grünberg, Premio Nobel de Física 2007 por el descubrimiento de la Magnetorresistencia Gigante (GMR), clave en almacenamiento de datos y espintrónica.¹⁷

EL AVANCE TECNOLÓGICO

Los transistores: la base de la evolución tecnológica

La evolución del transistor ha transformado la tecnología y la comunicación. Desde los primeros bulbos de vacío, grandes y poco eficientes, hasta los transistores MOSFET que permitieron una miniaturización sin precedentes y un menor consumo de energía. Con la nanotecnología, los transistores alcanzaron escalas nanométricas, integrando millones de ellos en un solo chip. Esto sentó las bases para dispositivos modernos como los teléfonos celulares, donde el tamaño reducido es clave para la innovación tecnológica (figura 9).¹⁸

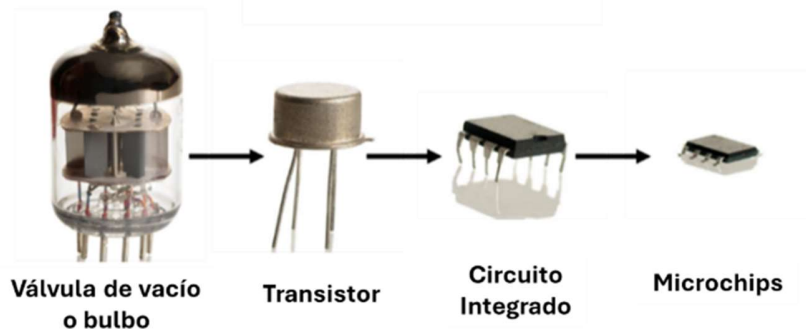


Fig. 9. Evolución de los transistores.

Principales partes de un teléfono celular

El funcionamiento de un teléfono celular involucra varias partes interconectadas:

Procesador (SoC): El núcleo del teléfono, que integra la CPU, GPU y otros controladores en un solo chip (figura 10). Utiliza transistores a escala nanométrica (5-7 nm), lo que permite procesar tareas en paralelo con alta eficiencia.¹⁹

Memoria RAM: Almacena datos e instrucciones temporales para mejorar la multitarea y el rendimiento rápido. La RAM moderna (LPDDR5) utiliza circuitos de bajo consumo y alta densidad gracias a avances en litografía (menos de 10 nm).²⁰

El iPhone 3G recibió su nombre por ser el primer modelo con esta tecnología. 4G trajo velocidades mucho mayores, permitiendo streaming en HD y el uso de aplicaciones más intensivas en datos. Finalmente, 5G ofrece velocidades aún más rápidas, latencia ultrabaja y la capacidad de conectar muchos dispositivos, impulsando aplicaciones como la realidad aumentada y el IoT.²²

Evolución de los procesadores de los celulares

Desde los primeros celulares en los años 90, los procesadores han evolucionado gracias a la miniaturización de transistores. Inicialmente, estos dispositivos utilizaban chips básicos para llamadas y mensajes. Con la llegada de los primeros smartphones en los 2000, surgieron procesadores ARM de un núcleo capaces de manejar tareas simples como navegación web y reproducción de música. En 2010, los chips multinúcleo como el Apple A4 y el Snapdragon S1, fabricados en procesos de 45 y 65 nm, respectivamente, marcaron un avance en la capacidad multitarea. La conectividad 4G impulsó la transición hacia tecnologías de 10 nm, ejemplificada por el Snapdragon 835 y el Apple A11 en 2017. Hoy, chips como el Apple A14 Bionic, fabricado en 5 nm con 11.8 mil millones de transistores, optimizan el rendimiento para aplicaciones avanzadas y redes 5G.

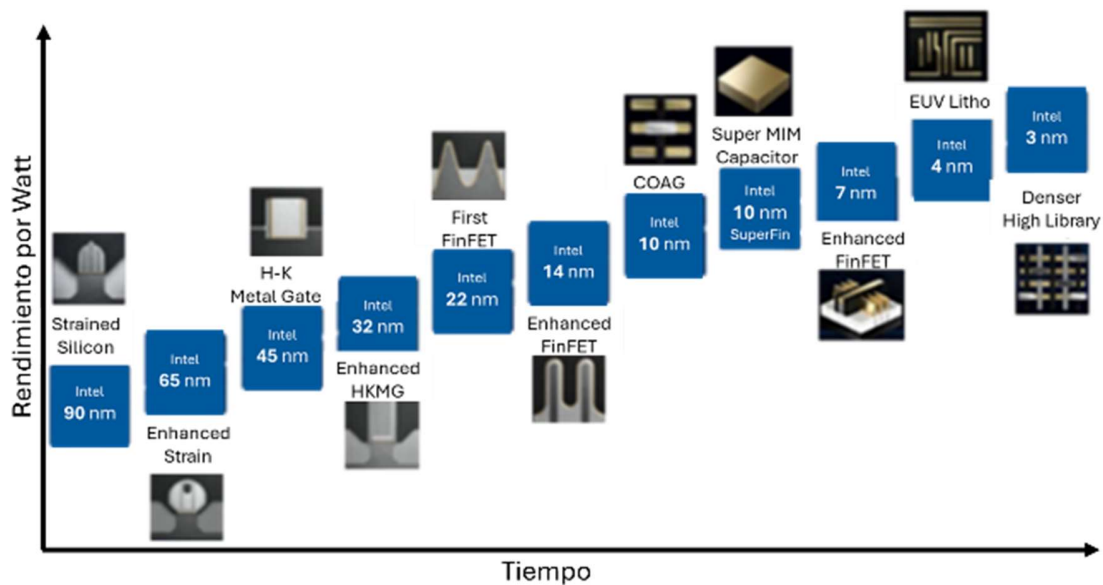


Fig. 12. Evolución de los procesadores Intel y su tecnología.

Intel ha liderado la miniaturización desde el procesador 4004 en 1971. En los años 70 introdujo el 8086, precursor de la arquitectura x86, y en los 90 los Pentium marcaron un salto en rendimiento. La serie Core, lanzada en 2006, inauguró la era multinúcleo. Desde entonces, Intel ha reducido sistemáticamente el tamaño de sus transistores: 800 nm en los 90, 45 nm en 2007, y 14 nm en 2014. Actualmente fabrica chips de 7 y 10 nm, avanzando hacia tecnologías de 4 y 3 nm (figura 12). Sin embargo, según Chris Miller en “La Guerra de los Chips”,²³ Nvidia ha superado a Intel en valor de mercado y liderazgo tecnológico.

Límite físico en la miniaturización

Durante décadas, el crecimiento en el rendimiento de los procesadores ha seguido la Ley de Moore formulada en 1965 por Gordon Moore, cofundador de Intel, que predice que la cantidad de transistores en un chip se duplica aproximadamente cada dos años. Sin embargo, al acercarnos a escalas menores a 5 nanómetros, los límites físicos de la miniaturización se hacen evidentes: los transistores se vuelven tan pequeños que comienzan a experimentar efectos cuánticos que afectan su

estabilidad. Estos problemas, junto con la creciente generación de calor en procesadores más densos, complican la continuación de la Ley de Moore.²⁴ La industria de los semiconductores está mirando hacia nuevas estrategias como la optimización a través de software y algoritmos, permitiendo que los dispositivos usen su hardware de manera más eficiente. Además, están surgiendo arquitecturas innovadoras, como los sistemas de computación heterogénea (*CPU*, *GPU* y unidades de procesamiento neural en un solo *chip*) y el uso de materiales avanzados, que podrían reemplazar el silicio en el futuro. Estas alternativas podrían permitir el crecimiento en rendimiento sin depender exclusivamente de la miniaturización de transistores.

CONCLUSIONES

Los avances en nanotecnología, impulsados por descubrimientos que han recibido reconocimientos como los premios Nobel, han transformado la tecnología moderna, posibilitando la miniaturización y eficiencia de los componentes electrónicos. Este progreso ha impactado en el desarrollo de dispositivos esenciales como los teléfonos celulares, mejorando su rendimiento, reduciendo el consumo energético y permitiendo diseños más compactos. La incorporación de componentes a escala nanométrica, como procesadores más potentes, ha convertido a los celulares en herramientas multifuncionales de alta precisión. Estos avances destacan la importancia de seguir investigando en nanotecnología para satisfacer las crecientes demandas tecnológicas de la sociedad.

REFERENCIAS

1. Bhushan, B. (Ed.). (2017). Springer handbook of nanotechnology (pp. 1-4). Springer.
2. Dudley, D. (2024, 13 febrero). The evolution of Mobile Phones: 1973 to 2019. Flaunt Digital. <https://flauntdigital.com/blog/evolution-mobile-phones/>.
3. ISO/TC 229 - Nanotechnologies. (2021, 1 abril). ISO. <https://www.iso.org/committee/381983.html>.
4. Quintili, M. (2012). Nanociencia y Nanotecnología. un mundo pequeño. Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos, (42), 125-155.
5. Tiwari, J. N., Tiwari, R. N., & Kim, K. S. (2012). Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. *Progress in Materials Science*, 57(4), 724-803.
6. Singh, H., & Kaur, K. (2023). Role of nanotechnology in research fields: Medical sciences, military & tribology- A review on recent advancements, grand challenges and perspectives. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.061>.
7. Payal, N., & Pandey, P. (2021). Role of Nanotechnology in Electronics: A Review of Recent Developments and Patents. *Recent Patents On Nanotechnology*, 16(1), 45-66. <https://doi.org/10.2174/1872210515666210120114504>.
8. Cavallari MR, Santos G, Fonseca FJ. Nanoelectronics. *Nanoscience and its application*. 2017.
9. Wise, F. W. (2000). Lead Salt Quantum Dots: the Limit of Strong Quantum Confinement. *Accounts Of Chemical Research*, 33(11), 773-780. <https://doi.org/10.1021/ar970220q>.
10. Busatto, S., & De Mello Donega, C. (2022). Magic-Size Semiconductor Nanostructures: Where Does the Magic Come from? *ACS Materials Au*, 2(3), 237-249. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.1c00075> <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.1c00075>
11. Ahmadi, M., Amouzegar, Z., Khalili, S., Asadi, S., Aghajani, S., Aryanrad, P., Afkhami, A., Madrakian, T., Thomas, S., & Nguyen, T. A. (2022). Miniaturization—An introduction to miniaturized analytical devices. En *Elsevier eBooks* (pp. 3-16). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823727-4.00002-x>.
12. Charles Jr, H. K. (2005). Miniaturized electronics. *Johns Hopkins APL technical digest*, 26(4), 402-413.
13. Craford, M. G. (2024). LED LIGHTING. *LED LIGHTING*, (pp. 125-129).

14. Noyce, R. N. (1977). Microelectronics. *Scientific American*, 237(3), 62-69.
15. Langenberg, D. N. (1973). The 1973 Nobel Prize for Physics. *Science*, 182(4113), 701-704.
16. Alferov, Z. I., Kroemer, H., & Kilby, J. S. Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2000.
17. Thompson, S. M. (2008). The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(9), 093001.
18. Magubane, N. (2023, May 3). Moore than meets the eye: The evolution of computing. *Penn Today*. Consultado el 28 de octubre de 2024 Recuperado de: <https://penntoday.upenn.edu/news/moore-meets-eye-evolution-computing>.
19. Arabi, K., & Kaminska, B. (Eds.). (2000). *System-on-a-Chip: Design and Test*. Artech House. Electronic ISBN: 9781580534710.
20. Heald, R. A., & Hodges, D. A. (1976). Multilevel random-access memory using one transistor per cell. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 11(4), 519-528.
21. Flipsen, B., Geraedts, J., Reinders, A., Bakker, C. (2012). Environmental sizing of smartphone batteries. *2012 Electronics Goes Green* (pp. 1-9) IEEE.
22. Alanko, T., Kojo, M., Laamanen, H., Liljeberg, M., Moilanen, M., & Raatikainen, K. (1994). Measured performance of data transmission over cellular telephone networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24(5), 24-44.
23. Miller, C. (2024). *La guerra de los chips: La gran lucha por el dominio mundial* (1.a ed.). Planeta Publishing.
24. Leiserson, C. E., (2020). There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law?. *Science*, 368(6495), eaam9744.

Colaboradores

Aguilar-Villarreal, Arlethe Yari

Profesora en la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Cursó la licenciatura en Ingeniería Industrial en la FCQ-UANL, obtuvo la Maestría en Ingeniería Industrial con especialidad en Calidad y Productividad en la Escuela de Graduados de Administración e Ingeniería Industrial de la FCQ, actualmente cursa el Doctorado en Filosofía con especialidad en Administración por la Facultad de Contaduría Pública y Administración de la UANL. Sus intereses de investigación incluyen la inteligencia artificial, inteligencia de negocios, manufactura aditiva, diseño tridimensional, competitividad en pymes, educación y vinculación, emprendimiento. Actualmente es Subdirectora de Relaciones Públicas y Asuntos Internacionales en la FCQ-UANL.

Alcorta Garcia, Efrain

Doctor en ingeniería Eléctrica (control automático) por la Universidad Gerhard Mercator de Duisburg (Duisburg-Essen), Alemania. Licenciatura y maestría por la UANL en temas afines. Desde 1999 es profesor de tiempo completo en el departamento de control, así como en el posgrado de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL. Áreas de interés incluyen el control automático y control con tolerancia a fallos.

Berlanga Pérez, Roxana

Ingeniera Mecatrónica por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Cursa la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Nanotecnología en la misma facultad. Su investigación se enfoca en el desarrollo de nanomateriales para almacenamiento de energía.

Chávez Guerrero, Leonardo

Doctorado en Nanociencias y Nanotecnología, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., (2008). Cuenta con un postdoctorado en la escuela de Química de París en 2011 en la escuela de Química de la Universidad de St Andrews en 2012. Con 4 patentes otorgadas y 4 en solicitud. Reconocido en el Sistema Nacional de Investigadores con el Nivel II.

Loera-Martínez, Pedro Inés

Profesor en la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y tiene el cargo de Jefe de Laboratorio de Especialidades de Ingeniería Industrial y Administración. Cursó la licenciatura en la carrera de Ingeniero Mecánico Administrador en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la UANL. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en el Posgrado de Ingeniería de Sistemas de la FIME-UANL. Sus intereses de investigación se centran en el análisis de sistemas industriales, en la elaboración y solución de formulaciones matemáticas, generación de heurísticas e implementación de algoritmos de optimización enfocados en el sector industrial. También participa en el desarrollo de herramientas digitales de la Industria 4.0.

Martínez de la Cruz, Azael

Investigador de la UANL, pertenece al SNI Nivel III. Su línea de investigación se enfoca en el estudio de semiconductores con aplicación en el tratamiento de agua y purificación de aire. Cuenta con 8 premios de investigación en el área de Ingeniería y Tecnología.

Nava Núñez, Magaly Yajaira

Profesor de tiempo completo en la Universidad Tecnológica Mariano Escobedo, pertenece al SNII Nivel Candidato. Sus áreas de interés son el desarrollo de materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas. Obtuvo el Premio de investigación en el área de Ingeniería y Tecnología en el año 2021.

Ortiz Ledezma, Alexis Javier

Licenciado en Física por la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente está cursando la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Nanotecnología en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL.

Puente-Córdova, Jesús Gabino

Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales y el Doctorado en Ingeniería de Materiales, por la FIME-UANL. Sus intereses de investigación incluyen la reología de polímeros, diseño mecánico, teoría de vibraciones, propiedades electromagnéticas de los materiales, y el cálculo fraccionario. Actualmente es miembro del SNII nivel I.

Rentería-Baltiérrez, Flor Yanhira

Profesora en la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Cursó la licenciatura en Ingeniería Industrial en el Tecnológico Nacional de México – Delicias, obtuvo la Maestría en Ciencia de Materiales en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), y el Doctorado en Ingeniería de Materiales por la FIME-UANL. Realizó una estancia doctoral en L’Institut FEMTO-ST, Besançon, Francia. Sus intereses de investigación incluyen la manufactura aditiva, las propiedades mecánicas y eléctricas de sistemas poliméricos, así como el modelado mediante cálculo fraccional. Actualmente es miembro del SNII nivel I.

Soto-Álvarez, Paulina R.

Ingeniera en Materiales recién egresada de la UANL con una destacada inclinación hacia la innovación en el desarrollo de materiales cerámicos. Actualmente se desempeña en el sector privado como ingeniera de procesos.

Ugalde Mejía, Eduardo

Ingeniero en materiales y procesos especiales cuenta con la licenciatura en Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Querétaro.

Vallejo Martínez, Alejandra Itzel

Ingeniera Química por la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) en 2023. Actualmente estudiante de posgrado en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Nanotecnología en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME-UANL).



Se invita a estudiantes, docentes, investigadores, profesionistas y demás interesados en difundir sus trabajos científicos y tecnológicos, a colaborar con sus artículos en la revista Ingenierías.

LINEAMIENTOS EDITORIALES

Es requisito que las colaboraciones sean producto del trabajo directo de los autores, estableciendo claramente su contribución, y que estén escritas en un lenguaje claro y accesible. Se sugiere que las contribuciones no estén redactadas en primera persona. El número máximo de autores por artículo es cinco.

Todos los artículos recibidos estarán sujetos a arbitraje de tipo doble ciego, siendo el dictamen inapelable. Los criterios aplicables a la selección y dictaminación de textos serán: originalidad, rigor científico, exactitud de la información y la claridad en el lenguaje.

La publicación de artículos en la revista Ingenierías implica ceder los derechos de autor a la UANL. Asimismo, los artículos aprobados estarán sujetos a revisión de estilo.

CRITERIOS EDITORIALES

Los autores de artículos de revisión o divulgación deberán presentar trabajos que ofrezcan una panorámica del campo temático, separar las dimensiones del tema y presentar una conclusión que se derive del material presentado.

Las contribuciones sobre modelación y simulación deberán estar científicamente validadas dentro del propio trabajo.

No se consideran para publicación protocolos de investigación, manuales, proyectos, propuestas o trabajos inconclusos.

Los artículos extensos y divididos en partes deberán enviarse en su totalidad, pues se arbitrarán como un solo manuscrito.

INSTRUCCIONES DE ENVÍO

La propuesta de publicación consistirá en lo siguiente: 1) manuscrito del artículo con autores (.docx y .pdf), 2) manuscrito del artículo sin autores (.docx), 3) material gráfico en alta resolución (300 dpi y 15 cm en su lado más corto, .tif, .eps, .jpg o .bmp) y 4) fichas biográficas de cada autor con un máximo de 150 palabras (.docx). Estos archivos se deberán enviar a través de la plataforma digital de la revista (<https://ingenierias.uanl.mx/index.php/i>). Adicionalmente, se deberán llenar los campos de información que se soliciten en la plataforma.

La extensión de los artículos no deberá exceder de 15 cuartillas tamaño carta (incluyendo material gráfico) en tipografía Times New Roman de 11 puntos en interlineado sencillo.

Los artículos deberán incluir un resumen tanto en español como en inglés, de no más de 150 palabras, así como un máximo de 5 palabras clave, tanto en español como en inglés.

Las referencias deberán ir numeradas en el orden de citado en el texto. La bibliografía deberá seguir el formato de citación APA 7ª ed.

El material gráfico, además de estar incluido en el artículo, deberá enviarse en archivos individuales.

CONTACTO

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Edificio 7, primer piso, ala norte.

Tel.: 8329-4000 Ext. 5854

E-mail: revistaingenierias@uanl.mx



Autores

Criterio de autoría o coautoría

Se considera autor o coautor a quien haya contribuido significativamente a la conceptualización, desarrollo, ejecución, análisis, discusión o redacción del trabajo.

Los autores deben:

Presentar un manuscrito inédito que contenga una narración concisa y exacta del trabajo desarrollado, así como una discusión objetiva de su significado intelectual y científico.

Incluir detalles suficientes y referencias a fuentes de información públicas que cumplan con las condiciones necesarias para la confirmación o falsación científica del trabajo por terceros.

Citar aquellas publicaciones que son antecedentes esenciales para comprender el trabajo.

Incluir a los coautores fallecidos, asentando la fecha de su muerte.

Incluir a los coautores que hayan cambiado de afiliación durante el proceso de preparación y publicación del documento, señalando el evento en una nota.

Reconocer mediante una nota de agradecimiento el apoyo de las instituciones y organismos que hayan contribuido significativamente al desarrollo del trabajo, así como a colaboradores que hayan contribuido de manera importante, incluyendo a fallecidos o a quienes hayan cambiado de afiliación, pero sin que hayan llegado a cumplir con el criterio de coautoría, si los hubiera.

Responsabilizarse del material que presentan en su manuscrito.

Atender puntualmente las críticas y observaciones emitidas por los revisores como parte del proceso de evaluación.

Los autores deben abstenerse de:

Ofrecer manuscritos que se encuentren en consideración por otras publicaciones.

Presentar críticas personales en sus trabajos.

Incluir información que hayan obtenido mediante comunicación privada que no se localice en publicaciones.

Incluir información que hayan obtenido de manera confidencial sin el permiso explícito correspondiente.

Incluir información obtenida en el proceso de servicios confidenciales, tales como documentación para concursos o solicitudes de becas.

Citar publicaciones que no se relacionen o que sólo se relacionen remotamente con la materia.

Incluir como autores a terceros que no cumplan con el criterio de coautoría.

Utilizar nombres ficticios o pseudónimos.

Revisores

Deberes

Los revisores deben:

Evaluar el manuscrito enviado para su consideración, y emitir su fallo correspondiente en tiempo y forma.

Declinar cualquier invitación para evaluar un manuscrito si no se consideran calificados, carecen de tiempo para juzgar o se les presenta algún conflicto de intereses, tal como encontrarse vinculados estrechamente a los autores o al trabajo a evaluar.

Manifestar al editor cualquier conflicto de intereses que detecten.

Considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Explicar y apoyar sus juicios de manera suficiente para que el editor, los miembros de cuerpo editorial y los autores comprendan el fundamento de sus observaciones y sugerencias.

Considerar en su revisión posibles errores o fallas de los autores al citar el trabajo relevante de otros.

Informar al editor si encontraran alguna semejanza substancial entre el manuscrito y cualquier otro trabajo.

Restricciones

Los revisores deben abstenerse de:

Conservar, difundir o utilizar información, argumentos o interpretaciones no publicados contenidos en el manuscrito posteriormente al proceso de evaluación.

Contactar a los autores, si hubieran inferido su identidad, previamente a haber emitido su fallo.

Expresar críticas personales.

Editor

Deberes

El editor debe:

Dar consideración justa e imparcial a todos los manuscritos ofrecidos para su publicación, juzgando cada uno de sus méritos científicos o tecnológicos, sin prejuicios de raza, género, religión, creencia, origen étnico, ciudadanía, posicionamiento filosófico o político de los autores.

Considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Explicar y apoyar su juicio final para que los autores comprendan el fundamento de sus observaciones.

Respetar la independencia intelectual de los autores.

Procesar los manuscritos con diligencia.

Ejercer su responsabilidad y la autoridad para aceptar o rechazar un artículo enviado para su publicación.

Delegar en los miembros del consejo editorial o comité técnico la autoridad para aceptar o rechazar un manuscrito enviado para su publicación en casos en que se presente algún conflicto de intereses con él.

Delegar la responsabilidad y autoridad editorial en alguno de los miembros de los consejos editoriales cuando él sea autor o coautor de un manuscrito sometido a consideración de la revista.

Restricciones

El editor debe abstenerse de:

Utilizar la información, argumentos o interpretaciones no publicados desplegados en un manuscrito sometido, excepto cuando cuente con el permiso de los autores.

Compartir información sobre un manuscrito en proceso de revisión o publicación a ninguna persona fuera de aquellos a quienes se les solicite consejo profesional.

Expresar críticas personales.

Cuerpo Editorial

(Consejos Editoriales y Comité Técnico)

Deberes

Los miembros del cuerpo editorial deben:

Estar dispuestos a otorgar consejo al editor en las situaciones requeridas.

Declinar cualquier invitación para brindar consejo si se les presenta algún conflicto de intereses, tal como encontrarse vinculados estrechamente con los autores o con el trabajo a evaluar.

Manifiestar al editor cualquier conflicto de intereses que detecten.

Considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Explicar y apoyar sus juicios de manera suficiente para que el editor, los miembros de cuerpo editorial y los autores comprendan el fundamento de sus observaciones.

Respetar la independencia intelectual de los autores.

Restricciones

Los miembros del cuerpo editorial deben abstenerse de:

Utilizar la información, argumentos o interpretaciones no publicados desplegados en un manuscrito sometido, excepto cuando se cuente con el permiso de los autores.

Compartir información sobre un manuscrito en proceso de revisión o publicación a ninguna persona fuera de aquellos a quienes se les solicite consejo profesional.

Expresar críticas personales.

