

The background of the cover is a dark blue color with a light blue grid pattern. Scattered throughout are various white line-art drawings of gears of different sizes and orientations, some overlapping each other. The gears are stylized, with some showing teeth and others showing internal structures.

1

Avances
en ingeniería

De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico

Ángel Tlatelpa Becerro
Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico

Ángel Tlatelpa Becerro
Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

De la investigación a la aplicación : un enfoque práctico / Ángel Tlatelpa Becerro, Guillermo Raúl Carbajal Pérez (coordinadores). - - Primera edición. - - México : Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 2024.

127 páginas : ilustraciones - - (Avances en ingeniería ; 1)

ISBN: 978-607-8951-74-1 serie

ISBN: 978-607-8951-75-8 volumen 1

1. Ingeniería -- Investigación 2. Procesos de manufactura 3. Innovaciones tecnológicas -- Investigación

LCC TA160

DC 620.0072

Esta publicación fue dictaminada por pares académicos bajo la modalidad doble ciego.

De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico

Primera edición, noviembre de 2024

D.R. 2024, Ángel Tlatelpa Becerro y Guillermo Raúl Carbajal Pérez (coords.).

D.R. 2024, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209.

Cuernavaca, Morelos, México.

publicaciones@uaem.mx

libros.uaem.mx

Colaboradores: Víctor Manuel Zezatti Flores, Erick Omar Castañeda Magadán, Miriam Navarrete Procopio, Samuel Portillo Contreras, Miguel Ángel Chagolla Aranda, Enrique de Jesús Moreno Carpintero, Romeo Emmanuel Núñez Gómez, César Torres Segundo y Vicente Noé Rojas Mendoza.

Corrección de textos y formación: Eliezer Cuesta Gómez.

Diseño de portada: Lizbeth Zenteno.

Imagen de portada: Freepick.

ISBN serie Avances en ingeniería: 978-607-8951-74-1

ISBN volumen 1: 978-607-8951-75-8

DOI: 10.30973/2024/avances_ingenieria_1



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Hecho en México

Contenido

Presentación	7
Efectividad biológica y química en cultivo de <i>Mentha spicata</i> L. <i>Yessica Flor Cervantes Adame, María Fernanda Mendoza Pérez, Cid Aguilar Carpio, César Torres Segundo, Gregorio Bahena Delgado, Ángel Tlatelpa Becerro</i>	9
Instrumentación y control de un proceso de absorción a escala laboratorio <i>María Fernanda Silva León, Erick Omar Castañeda Magadán, Miriam Navarrete Procopio, Víctor Zezatti Flores, Ángel Tlatelpa Becerro</i>	17
Calibración de un molinete de eje axial mediante simulaciones en CFD <i>Cristian A. Márquez Soto, Laura L. Castro Gómez, Miguel A. Basurto Pensado, Juan C. García Castrejón, Víctor Zezatti Flores</i>	37
Efecto del pH de un acero microaleado doble fase <i>Enrique de Jesús Moreno Carpintero, Erik López García, Miguel Ángel Chagolla-Aranda, Romeo Emmanuel Núñez Gómez, Miguel Ángel Chagolla-Gaona, Erika Darnely Rojas Ayala</i>	67
Comparación en la eficiencia de degradación de una mezcla de dos colorantes tipo Azo mediante plasma y diferentes catalizadores de hierro <i>Rubí Brito Díaz, Esteban Montiel Palacios, Yessica Flor Cervantes Adame, Josefina Vergara Sánchez, Ángel Tlatelpa Becerro, Aarón Gómez Díaz, Pedro Guillermo Reyes Romero, Horacio Martínez Valencia, César Torres Segundo</i>	79

Sintonización y emisión múltiple de un láser de fibra óptica dopado con erbio, por medio de un interferómetro de fibra Mach-Zehnder <i>Romeo Emmanuel Núñez Gómez, Alfredo Olarte Paredes, René Salgado Delgado, Areli Marlén Salgado Delgado, Jessica Nashelly Salgado Delgado, Enrique de Jesús Moreno Carpintero</i>	89
Aplicación web para préstamo de material sustentada en una base de datos (ARE) <i>Luis Fernando González Lezama, Benjamín Etni López Leal, Samuel Portillo Contreras, Gerardo Acevedo Vega, Kenia Yadira Gómez Díaz</i>	103
Diseño de tablero didáctico para el aprendizaje de automatización y control con PLC Simatic S7-300 Siemens <i>Samuel Portillo Contreras, Hans Daniel Gallardo, Areli Yáñez Álvarez, María Fernanda Gonzaga Rosendo, Óscar Sánchez Vargas</i>	115
Conclusión	125

Agradecimientos

A la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EES-Yecapixtla), que consecutivamente ha creado espacios a través de congresos (2022 y 2023) en el área de la ingeniería para conocer los avances científicos y tecnológicos, así como el intercambio de experiencias entre la comunidad estudiantil, académicos y científicos. Estas experiencias fortalecen a la EES-Yecapixtla con importantes actividades para toda la comunidad, tales como el logro del presente libro, que ha sido elaborado a partir del Tercer Congreso de Ingeniería celebrado en 2024.

Presentación

Hoy en día, el avance de la ciencia, la tecnología e innovación en las distintas áreas de la ingeniería ha tomado un papel importante en la sociedad, puesto que proporciona herramientas para un desarrollo sostenible que permite dar solución a los desafíos sociales, económicos y ambientales más apremiantes.

En la ingeniería, mediante el uso de equipos especializados se ha logrado la innovación en procesos industriales y avances científicos con la aplicación de instrumentación, sistemas de control, automatización, electrónica, equipos láser y plasma, al buscar la mejora continua para el desarrollo global. Aunado a esto, el uso de *softwares* ha tomado importancia, puesto que acelera la optimización a los tiempos de respuesta en tareas complejas y proporciona resultados efectivos con menor esfuerzo.

En este contexto, este libro presenta ocho estudios que son resultados de trabajos de investigación y aplicaciones en distintas áreas de la ingeniería, los cuales contribuirán a la generación y aplicación de nuevos conocimientos en la ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo de una sociedad sostenible.

Efectividad biológica y química en cultivo de *Mentha spicata L.*

Yessica Flor Cervantes Adame,^a María Fernanda Mendoza
Pérez,^a Cid Aguilar Carpio,^{b*} César Torres Segundo,^a
Gregorio Bahena Delgado,^a Ángel Tlatelpa Becerro^c

Resumen

La especie *Mentha spicata L.* es de los cultivos de mayor importancia en México, sin embargo, existe poca información sobre el uso de biofertilizantes que ofrezcan una solución para mejorar el rendimiento en los cultivos sin dañar al medio ambiente. En ese sentido, se llevó a cabo la presente investigación en la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Ayala, Morelos, cuyo objetivo principal fue determinar el efecto de la fertilización biológica y química en la producción del cultivo. El experimento incluyó como tratamientos dos niveles (50 % y 100 %) de fertilización química (FQ, nitrofoska), dos fuentes biológicas (*Ascophyllum nodosum* y *Azospirillum brasilense*) y un testigo. Por lo que el diseño experimental empleado consistió en bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones; de lo anterior, las variables evaluadas fueron altura de planta (AP), diámetro del tallo (DT), peso fresco (PFP) y seco de la planta (PSP). Al finalizar, los resultados mostraron que la mayor AP y PSP se registró con la FQ (100 %) + *A. brasilense*; en cuanto al PFP y DT, la mejor respuesta fue con la FQ (100 %) +

^a Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^b Programa de Botánica, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados.

^c Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

* Autor de correspondencia: aguilar.cid@colpos.mx

A. nodosum. Se concluye que la biofertilización, como complemento de fertilización edáfica, fue de impacto en la producción del cultivo.

Palabras clave: biofertilizantes, nutrición, hierbabuena.

Abstract

The objective of the study was to determine the effect of biological and chemical fertilization on the production of *Mentha spicata*. The research was established at the Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Ayala, Morelos. The treatments were two levels (50 % and 100 %) of chemical fertilization (FQ, nitrophoska), two biological sources (*Ascophyllum nodosum* and *Azospirillum brasilense*) and a control. The experimental design was complete in randomized blocks with five treatments and three replications. The variables evaluated were plant height (AP), stem diameter (DT), fresh weight (PFP), and dry weight of the plant (PSP). The results show that the highest AP and PSP was recorded with FQ (100 %) + *A. brasilense*. Regarding PFP and DT, the best response was obtained with FQ (100 %) + *A. nodosum*. In conclusion, the use of biological fertilizers as a complement to soil fertilization has an impact on the production of *M. spicata*.

Keywords: biofertilizers, nutrition, peppermint.

Introducción

La *Mentha spicata* L. de la familia Lamiaceae tiene una demanda a nivel mundial como planta aromática, especia y medicinal (Aguilar Carpio et al., 2022a). Esta requiere en su biomasa (follaje) sostenibilidad y calidad fitosanitaria, además de que sus compuestos bioactivos estén disponibles para la agroindustria, medicina y cosmetología, entre otros (Aguilar-Carpio et al., 2022b). Sin embargo, es limitada o nula la información que se conoce acerca de la nutrición de la especie antes mencionada.

La nutrición vegetal es de gran trascendencia e importancia en la agricultura. La producción de cultivos es un proceso directamente relacionado con la nutrición vegetal y la fertilidad de los suelos (Alaşalvar & am, 2020). En la actualidad, la agricultura moderna propone alternativas de nutrición eficientes, basadas en la aplicación de biofertilizantes como una opción de fertilización edáfica complementaria, que ayuden a incrementar la producción y reducir la aplicación de fertilizantes químicos (Ali et al., 2015). Los biofertilizantes son insumos naturales (abonos orgánicos, compostas, biosólidos y microorganismos) que mejoran la absorción de nutrientes de la rizosfera, producen estimulantes de crecimiento para las plantas, mejoran la estabilidad del suelo, biodegradan sustancias, reciclan nutrientes y favorecen la sinergia microbiana, entre otros (Alaşalvar & am, 2020). El uso de biofertilizantes a base de extractos de algas marinas y rizobacterias son de importancia en la producción de cultivos hortícolas, frutícolas y florícolas (Canizalez-Silva et al., 2024). La nutrición a base de *Ascomyllum nodosum* y *Azospirillum brasilense* representa una alternativa complementaria en el cultivo de *M. spicata* L. (Fernandes et al., 2020). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue el de determinar el efecto de la fertilización biológica y química en la producción ornamental de *M. spicata* L.

Materiales y metodología

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el campo experimental de la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Ayala, Morelos, México (18°44'38.8" latitud norte y 98°54'37.1" latitud oeste a 1250 msnm). La evaluación agronómica se realizó mediante un experimento de campo conducido bajo condiciones de invernadero durante el periodo de octubre 2022 a enero 2023. El material vegetal utilizado fueron esquejes enraizados de la especie *M. spicata* L., en donde se aplicaron fuentes de nutrición y biológicas-químicas que permitieron la generación de cinco tratamientos a base de algas marinas *Ascomyllum nodosum* (Acadian®) y de bacterias *Azospirillum brasilense* (Azofer Plus) promotoras de crecimiento y fijadoras de nitrógeno. Para la fertilización química se utilizó nitrofoska 12-8-16+3 MgO, asimismo, se empleó un testigo sin aplicación (Tabla 1). La aplicación

de los inoculantes biológicos y la fertilización química fue en forma de *drench* a los 15, 30 y 45 días después del trasplante (DDT). El diseño experimental que se utilizó fue de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones. El lote experimental estuvo constituido por 90 unidades experimentales de 1.50 m × 6.10 m de longitud, dando un total de 9.15 m². Para evaluar la producción del cultivo, se hizo un muestreo destructivo a los 60 DDT, donde se midió la altura de la planta (AP, cm), diámetro del tallo (DT, cm) con un vernier, peso fresco y seco por planta (PFP y PSP, g) cuantificado con una báscula digital (OHAUS®), con aproximación de 0.0001 g. Las muestras se secaron a 80 °C en una estufa de circulación de aire forzado hasta peso constante. Las variables evaluadas se sometieron al análisis de varianza y comparación de medias DMS ($\alpha = 0.05$). Finalmente, la totalidad de análisis estadísticos se realizó con el uso del *software* Statistical Analysis System [SAS, 1999].

Tabla 1. Tratamientos bajo estudio a base de fertilizantes biológicos y químicos

Tratamientos	Dosis
T1 FQ-100 % + <i>Azospirillum brasilense</i>	Nitrofoska (12-8-16+3) + 380 g/ha ⁻¹
T2 FQ-50 % + <i>Azospirillum brasilense</i>	Nitrofoska (6-4-8+1.5) + 380 g/ha ⁻¹
T3 FQ-100 % + <i>Ascophyllum nodosum</i>	Nitrofoska (12-8-16+3) + 2 L/ha ⁻¹
T4 FQ-50 % + <i>Ascophyllum nodosum</i>	Nitrofoska (6-4-8+1.5) + 2 L/ha ⁻¹
T5 Testigo	Sin aplicación

Resultados

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos evaluados (Tabla 2). Los coeficientes de variación fluctuaron de 6.9 % a 13.5 %. Estos valores fueron presentados por la altura de la planta (AP) y su peso fresco (PSP) respectivamente. Las diferencias estadísticas manifestadas por los tratamientos se deben al diverso efecto que las variables evaluadas exponen, lo cual fue ocasionado por las diferentes dosis de fertilización química

Tabla 2. Cuadrados medios de las variables analizadas en cultivo de *Mentha spicata* L.

FV	Tratamientos	Bloque	Error	Media	CV
GL	8	2	16		(%)
AP	21.24*	2.34*	2.73	23.90	6.91
DT	0.01*	0.01*	0.01	0.32	9.65
PFP	272.33*	12.52*	10.77	39.81	8.24
PSP	20.39*	1.05*	1.05	7.58	13.51

FV = Fuentes de variación; GL = Grados de libertad; AP = altura de la planta; DT = diámetro del tallo; PFP = peso fresco de la planta; PSP = peso seco de la planta; ns = No significativo; * = Significativo a 5 %; ** = Significativo a 1 %.

y biológica. De esta forma, se demuestra que la nutrición biológica a base de *A. brasilense* (González-Salas et al., 2021) y *A. nodosum*, en complementación con la fertilización química, impactó en el desarrollo y biomasa de la hierbabuena (Grageda-Cabrera et al., 2018). Resultados similares se obtuvieron en una investigación sobre el potencial de inoculantes en la agricultura, la cual indicaba mejores rendimientos en cultivos biofertilizados y complementados con fuentes de nutrición química (Martínez et al., 2018).

Los resultados del análisis de comparación de medias (Tabla 3) muestran que la FQ 100 % + *A. brasilense* presentó el valor más alto (12.22 g) en el peso seco de la planta, el cual mostró diferencias significativas a los demás tratamientos, así como al testigo sin aplicar. En el tratamiento T3 FQ-100 % + *A. nodosum*, se registró el mayor PFP (50.20 g) y diámetro del tallo (0.39 cm), aunque este último no fue significativo en T4 y T1. En cuanto a la AP con el tratamiento T4 FQ-50 % + *A. nodosum*, este obtuvo los valores más significativos (27.97 cm), seguido del T1 FQ-100 % + *A. brasilense* (25.33 cm), los cuales no fueron estadísticamente diferentes entre ellos. A partir de los resultados se infiere que, luego de aplicar dosis de fertilización química al 100 % (12-8-16 ppm) de nitrógeno, fósforo y potasio más la acción bioestimulante de las rizobacterias, se promovió mayor crecimiento vegetal (Morales-Meléndez et al., 2023). La acción de *A. brasilense*

Tabla 3. Efecto de la fertilización biológica y química en la producción de *Mentha spicata* L.

Tratamientos	Variables			
	AP (cm)	DT (cm)	PFP (g)	PSP (g)
T4	27.97 a	0.38 a	45.80 b	9.27 b
T1	25.33 a	0.33 a	43.50 b	12.22 a
T3	24.57 b	0.39 a	50.20 a	8.36 b
T2	23.60 b	0.30 b	45.47 b	7.25 c
T5	22.20 b	0.28 b	27.50 c	4.13 d
Promedio	24.71	0.34	42.49	8.25
DMS (0.05)	2.80	0.05	2.86	0.05

T1 fertilización química (100 %) + *Azospirillum brasilense*; T2 fertilización química (50 %) + *Azospirillum brasilense*; T3 fertilización química (100 %) + *Ascophyllum nodosum*; T4 fertilización química (50 %) + *Ascophyllum nodosum*; T5 Testigo; AP = altura de planta; DT = diámetro del tallo; PFP = peso fresco de la planta; PSP = peso seco de la planta; ns = No significativo; * = Significativo a 5 %; ** = Significativo a 1 %.

mediante la fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo, potasio y la fitoestimulación mediante la producción de diversas fitohormonas promovió mayor crecimiento y generó más producción de biomasa (Martínez et al., 2018). Asimismo, el modo de acción producido por *A. nodosum*, basado en un efecto biorregulador de crecimiento y en la presencia de macro y micronutrientes (Palomino-Malpartida et al., 2022), permitió una disminución del 50 % en la fertilización química (T4).

Conclusiones

Los resultados muestran que la mayor altura y peso seco de la planta se registró con la FQ (100 %) + *A. brasilense*. En cuanto al peso fresco de la planta y diámetro del tallo, la mejor respuesta fue con la FQ (100 %) + *A. nodosum*. En conclusión,

el uso de fertilizantes biológicos como complemento de la fertilización edáfica tiene impacto en la producción de *M. spicata*. Esta estrategia promueve un uso racional de la fertilización química, por lo que además resulta ser una opción ecológica encaminada a la sostenibilidad. Por lo tanto, se sugiere el uso y aplicación de *Azospirillum brasilense* y *Ascophyllum nodosum* como complemento a la fertilización sintética para garantizar el crecimiento y rendimiento en el cultivo de *Mentha spicata* L. bajo condiciones de invernadero.

Referencias

- Aguilar Carpio, C., Arriaga Rubio, L. M., Cervantes Adame, Y. F., Arenas Julio, Y. R., & Escalante Estrada, J. A. S. (2022a). Rentabilidad y producción del maíz vs-535 en respuesta a la fertilización química y biológica. *Acta Universitaria*, 32, e3285. <http://doi.org/10.15174.au.2022.3285>
- Aguilar-Carpio, C., Cervantes-Adame, Y. F., Sorza-Aguilar, P. J., & Escalante-Estrada, J. A. S. (2022b). Crecimiento, rendimiento y rentabilidad de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) fertilizada con fuentes químicas y biológicas. *Terra Latinoamericana*, 40, e1059. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1059>
- Alaşalvar, H., & Çam, M. (2020). Ready to drink iced teas from microencapsulated spearmint (*Mentha spicata* L.) and peppermint (*Mentha piperita* L.) extracts: physicochemical, bioactive and sensory characterization. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1366-1375. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00386-4>
- Ali, N., Farrell, A., Ramsuhag, A., & Jayaramn, J. (2015). The effect of *Ascophyllum nodosum* extracto on the growth, yield and fruit quality of tomato grown under tropical conditions. *Journal of Applied Phycology*, 28, 1353-1362. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0608-3>
- Canizalez-Silva, M., Blanco-Macías, F., España-Luna, M. P., de la Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., & Lozano-Gutiérrez, J. (2024). Microorganismos en la biofertilización del cultivo de maíz como

- complemento a la fertilización química. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(1). <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3903>
- Fernandes, D. D., Cecato, U., Trento, B., Mamédio, D., & Galbeiro, S. (2020). Azospirillum spp. en gramíneas y forrajeras. *Revista Mexicana Ciencias Pecuarias*, 11(1), 223240. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4951>
- González-Salas, U., Gallegos-Robles, M. Á., Preciado-Rangel, P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Hernández, M. G., García-Hernández, J. L., & Guzmán-Silos, T. L. (2021). Efecto de fuentes de nutrición orgánicas e inorgánicas mezcladas con biofertilizantes en la producción y calidad de frutos de melón. *Terra Latinoamericana*, 39, e904. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.904>
- Grageda-Cabrera, O. A., González-Figueroa, S. S., Vera-Nuñez, J. A., Aguirre-Medina, J. F., & Peña-Cabriales, J. J. (2018). Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 281-289. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1071>
- Martínez, R. L., Carlos Ernesto Aguilar, J. C. E., Carcaño, M. M G., Galdámez, G. J., Gutiérrez, M. A., Morales, C. J. A., Martínez, A. F. B., Llaven, M. J., Gómez, P. E. (2018). Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays l.*) en Villaflores, Chiapas, México. *Universidad Central de Ecuador*, 5(1), 001-0012. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425>
- Morales-Meléndez, R., Betancourt-Galindo, R., Juárez-Maldonado, A., Hernández-Pérez, A., González-Fuentes, J. A., Puente-Urbina, B., & Méndez-López, A. (2023). Aplicación de extractos de algas, NP'SZnO y microorganismos sobre la biomasa vegetal en tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), e3206. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3206>
- Palomino-Malpartida, J. R., Esquivel-Quispe, R., Huamancusi-Morales, J. L., Alarcón-Romani, S. M., & Blásquez-Morote, C. G. (2022). Azospirillum brasilense y ácido indol-3-butírico en el enraizamiento de tallos de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Bioagro*, 35(1), 69-74. <https://doi.org/10.51372/bioagro351.8>

Instrumentación y control de un proceso de absorción a escala laboratorio

María Fernanda Silva León,^a Erick Omar Castañeda Magadán,^a Miriam Navarrete Procopio,^a Víctor Zezatti Flores,^b Ángel Tlatelpa Becerro^c

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra un sistema experimental a escala de laboratorio (columna de absorción empacada) enfocado en la captura de dióxido de carbono (CO₂) postcombustión mediante monoetanolamina (MEA), el cual simula la captura de los gases provenientes de las centrales termoeléctricas. El sistema de absorción fue instrumentado para la adquisición y control de las variables de proceso como la temperatura y el flujo volumétrico correspondientemente. La instrumentación del sistema permite mantener las condiciones de operación de manera constante durante un proceso de absorción estacionario, así como un proceso continuo de absorción de CO₂. Con la instrumentación del sistema se garantiza que los datos obtenidos de temperatura en el proceso postcombustión sean en tiempo real a distintos intervalos de flujo volumétrico (40, 20 y 14 mL/min), a diferencia de cuando este sistema opera de forma manual, es decir, cuando el usuario debe controlar la apertura de una válvula de manera manual, asegurándose simultáneamente de que la columna no se inunde ni vacíe. Por medio de la calibración del sistema de adquisición de flujo volumétrico

^a Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^b Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^c Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

* Autor de correspondencia: erick.castaneda@uaem.mx

se obtuvieron las configuraciones del voltaje necesario para el control de una electroválvula como método de regulación de flujo volumétrico de salida.

Durante las pruebas experimentales realizadas a distintas concentraciones de MEA-agua (10, 20 y 30 %), el mayor incremento de temperatura se obtuvo bajo las condiciones de operación y de proceso de 14 mL/min a una concentración del 30 % MEA-agua. Por otro lado, el menor incremento de temperatura se presentó bajo las condiciones de 40 mL/min a una concentración del 10 % MEA-agua. En cada uno de los casos se alcanzó el estado estacionario (sin cambios en la temperatura) en un tiempo promedio de 600 segundos.

Palabras clave: columnas empacadas, proceso de absorción, instrumentación, control.

Abstract

The current research shows an experimental system at a laboratory scale (packed absorption column) designed to target post-combustion carbon dioxide (CO₂) capture by monoethanolamine (MEA). This experimental system mimics the gas capture process found in thermal power plants. The absorption system was instrumented to facilitate the acquisition and precise control of critical process variables, notably temperature and volumetric flow rate. The system instrumentation ensures to be constantly maintained the operational parameters allowing an operation across without interruptions both stationary and continuous CO₂ absorption processes. With the system instrumentation, the temperature data in the post-combustion process in a real time is guaranteed for different volumetric flow rate intervals (40, 20 and 14 mL/min), due to the system worked in a manual way. Throughout the calibration of volumetric flow acquisition system, the necessary voltage configurations were obtained to control an electro-valve as a method of regulating the output volumetric flow.

During the experimental test carried out on different MEA-water concentrations (10, 20, 30 %), the highest temperature increases it was obtained under process and operation conditions of 14 mL/min and 30 % MEA-water concentration.

On the other hand, the lowest temperature increase was obtained under operation conditions of 40 mL/min and 10 % MEA-water concentration. Every test achieved a stationary state (without temperature changes) within the average time of 600 seconds.

Keywords: packed columns, absorption processes, instrumentation, control.

Introducción

Actualmente se implementan procesos de absorción para controlar los contaminantes gaseosos emitidos por diversas actividades humanas. El proceso consiste en capturar componentes nocivos en un absorbente, lo que ayuda a reducir la contaminación y proteger el medio ambiente (P. Wang et al., 2024). La captura de CO₂ postcombustión es una alternativa para la mitigación del CO₂ en las centrales eléctricas de carbón (Agboola et al., 2021; Urquiza & Castro, 2023). Las columnas de absorción empacadas se utilizan para absorber el CO₂ de mezclas gaseosas al utilizar una solución absorbente (Mesfer et al., 2020). Actualmente, existen estudios para optimizar las cantidades y las concentraciones de la solución absorbente para el proceso de captura postcombustión (Kazepidis et al., 2021). Las actividades a nivel laboratorio son esenciales en la formación en ingeniería para la comprensión de materiales, la adquisición de habilidades y los conocimientos prácticos necesarios para las actividades de producción (Edward, 2022). Las columnas de absorción a escala de laboratorio son importantes para enseñar procesos de separación, en tanto que proporcionan experiencia práctica y facilitan comparaciones entre experimentos y simulaciones para un aprendizaje mejorado (Griffin et al., 2024). La instrumentación y el control en un proceso de absorción de CO₂ después de la combustión ayudan a optimizar el flujo del solvente, la adquisición de la temperatura y la eficiencia de captura de CO₂ reducen la pérdida de CO₂ durante los cambios en la tasa de producción de la planta de las centrales (Redmond, 2022; Taqvi et al., 2023; Veldandi et al., 2020). Instrumentar los procesos experimentales permite un control estable de microflujos volumétricos con cambios precisos, los cuales ayudan

a monitorear procesos, garantizar eficiencia y gestionar recursos de manera efectiva (Delgado et al., 2022; H. Gao et al., 2023; Y. T. Duan et al., 2021). La implementación de la adquisición y control de temperatura garantiza la estabilidad dentro de límites fijos, además que ayuda a mantener condiciones consistentes para distintos procesos, mejorando la eficiencia (Rashid et al., 2014). Algunos instrumentos para la medición de temperatura son los termopares, los cuales proporcionan mediciones confiables de temperatura en diversas industrias debido a su amplio intervalo de adquisición (Edler, 2023). La instrumentación, el control y la automatización a escala de laboratorio son cruciales para comprender los procesos térmicos, mecánicos, hidrológicos y químicos acoplados, contribuyendo en las predicciones de modelos, así como en el desarrollo de pruebas confiables y en la reducción de la intervención manual (Enyedi et al., 2022; James, 2022; Shermuradova et al., 2022).

El presente trabajo implementa un sistema de instrumentación y control del proceso de absorción del sistema de captura de CO_2 postcombustión del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. La práctica de absorción tiene el objetivo de operar el proceso de manera continua hasta alcanzar el estado estacionario. Las variables del proceso de absorción a instrumentar y controlar son el flujo volumétrico mediante un caudalímetro de efecto Hall y una electroválvula proporcional de la solución absorbente, así como la temperatura de las cuatro corrientes del proceso.

Materiales y metodología

El proceso de absorción a escala laboratorio está integrado por una columna cilíndrica de acrílico montada en una estructura metálica llena de empaques aleatorios de monturas Berl de cerámica de media pulgada, una bomba peristáltica para la alimentación de la solución, un compresor para la alimentación de aire, un tanque de CO_2 y dos rotámetros. Las especies químicas utilizadas son monoetanolamina (MEA) grado reactivo y dióxido de carbono (CO_2) grado industrial.

Descripción del sistema

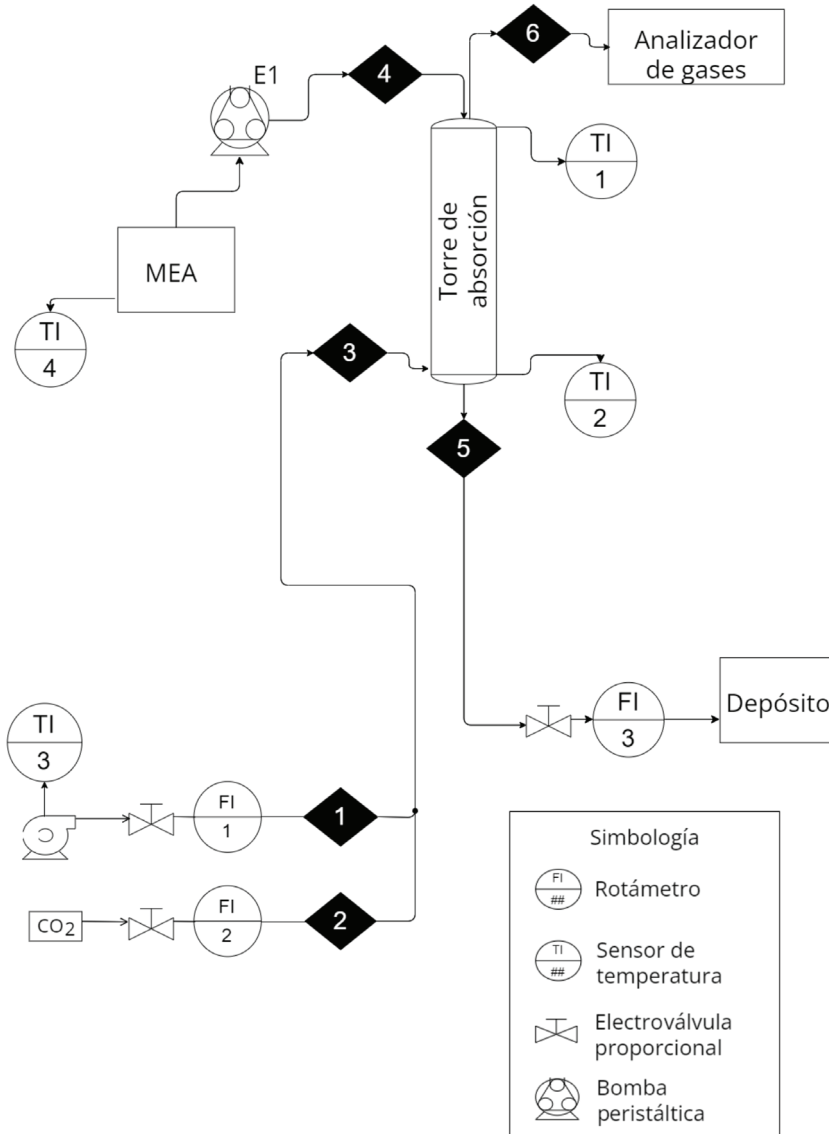
En la Figura 1 se muestra el diagrama de tubería e instrumentación (DTI) propuesto para el proceso de absorción. Por la parte inferior de la torre de absorción se alimenta la mezcla gaseosa de CO_2 -aire, la cual proviene de un tanque de almacenamiento de CO_2 y de un compresor de aire, respectivamente; ambas corrientes cuentan con un rotámetro para medir y controlar el flujo volumétrico (corrientes de proceso 1 y 2 de entrada). La mezcla gaseosa entra por la parte inferior a la torre de absorción (corriente 3) y por la parte superior de la columna de absorción (corriente 4) se alimenta la solución absorbente que se encuentra en el tanque de almacenamiento (MEA) a través de la bomba peristáltica (E1). La solución absorbente se pone en contacto a contracorriente con el CO_2 a través de la torre de absorción. La solución absorbente saturada de CO_2 sale por la parte inferior de la torre de absorción y se almacena en un depósito (corriente 5). Los gases libres de CO_2 salen por la parte superior de la torre de absorción pasando por un analizador de gases (corriente 6). En este trabajo se instrumentó el sistema de absorción con 4 sensores de temperatura, dos de ellos dentro de la torre de absorción (TI-1, TI-2), uno sumergido en el tanque de almacenamiento de la solución absorbente (TI-4) y otro expuesto al aire ambiente (TI-3). A la salida de la solución absorbente en la corriente 5, se instrumentó y controló el flujo volumétrico de la solución absorbente con la instalación de un rotámetro digital de efecto Hall (FI-3) y una electroválvula proporcional. La Tabla 1 muestra las condiciones de operación para el proceso de absorción.

Instrumentación para el control de flujo volumétrico

Electroválvula proporcional

Para garantizar el principio de continuidad en el proceso de absorción en la columna empacada se instrumentó y controló el flujo volumétrico de la solución absorbente ($\text{MEA-H}_2\text{O}$). Así, se implementó una electroválvula de bola DN8-25 tipo V, que trabaja a un voltaje de 0 a 10 VDC, mientras que el proceso de apertura y cierre de la válvula se realizó mediante un módulo regulador de voltaje que

Figura 1. Diagrama de tubería e instrumentación del proceso de absorción

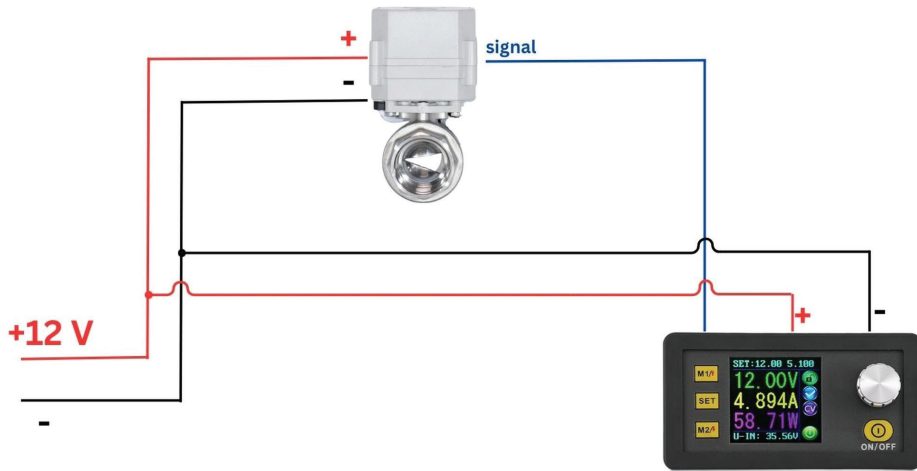


suministra el voltaje necesario, dependiendo de la apertura que se requiera para obtener la cantidad de flujo establecido. En la Figura 2 se muestra el esquema eléctrico para el control del flujo volumétrico.

Tabla 1. Condiciones de operación

Variable	Parámetro
Altura de la sección empacada	0.70 m
Diámetro de la columna	0.08 m
Empaques aleatorios	Monturas berl de cerámica de ½ pulgada
Flujo de la corriente gaseosa	8 L/min
Concentración del CO ₂	12.5 v/v %
Concentración de la MEA	20 w/w %
Presión de operación	0.8 atm
Temperatura ambiente	23 °C
Humedad relativa	27 %

Figura 2. Diagrama de conexión eléctrica de la electroválvula y el módulo regulador de voltaje ajustable

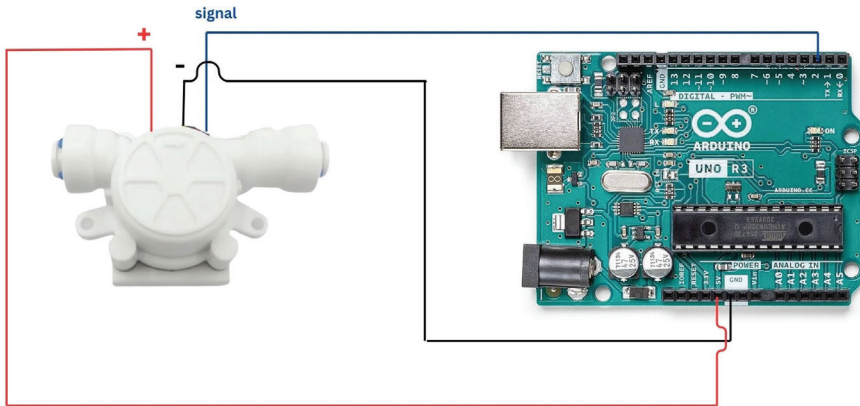


Rotámetro digital

Se implementó un rotámetro digital comercial de efecto Hall que se alimenta con un voltaje de entrada de 5V y un intervalo de flujo de 50 a 800 mL/min. Con este instrumento se lleva a cabo la adquisición de datos del flujo de la solución absorbente mediante una interfaz *Open Source*, y se logra así la automatización del proceso, además del poder utilizar los datos obtenidos para su posterior análisis.

En la Figura 3 se muestra el diagrama eléctrico implementado en el sistema.

Figura 3. Diagrama de conexión eléctrica del rotámetro

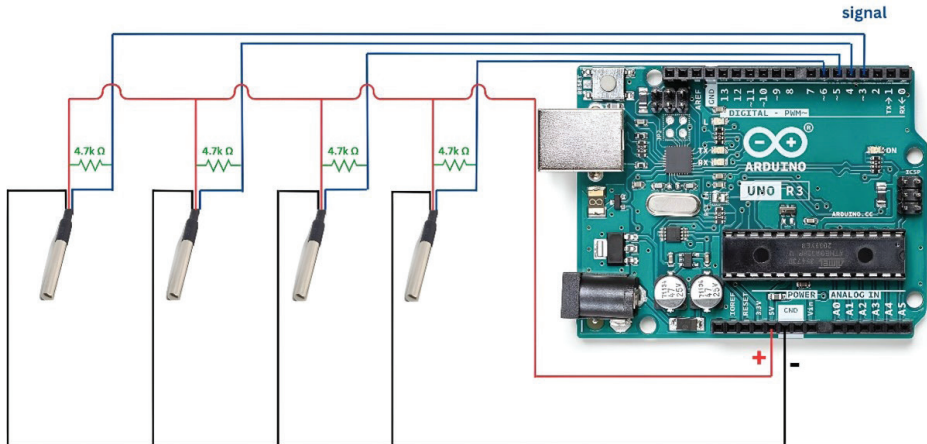


Instrumentación para la adquisición de la temperatura

Los sensores implementados en el sistema son cuatro que corresponden a las temperaturas Ds18B20 sumergibles. Estos sensores permiten medir temperaturas en un intervalo de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una resolución programable de 9 a 12 bits, además, cuenta con un encapsulado de acero inoxidable de $6\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, y es resistente al agua y la humedad.

En la Figura 4, se muestra el diagrama eléctrico de los sensores de temperatura que contiene el sistema.

Figura 4. Diagrama de conexión eléctrica de los sensores de temperatura



Calibración de instrumentos de medición

A través de pruebas experimentales en los instrumentos implementados en el sistema se obtuvieron las líneas de tendencia, así como sus ecuaciones correspondientes de ajuste. Para este caso, se parte de la Ecuación 1 de la recta para linealizar el comportamiento, siendo así, m es la pendiente de la recta y b es el intercepto con el eje y que corresponde a la ordenada del origen.

$$y = mx + b \quad (1)$$

Bomba peristáltica

En la Figura 5 se muestra la gráfica de los resultados adquiridos durante las pruebas experimentales, con los que se obtuvo la ecuación de tendencia lineal del *display* de la bomba peristáltica a partir de la Ecuación 2. Se define que la

Ecuación 2 permitirá al usuario encontrar el valor a configurar en la bomba peristáltica para que la torre empacada no se vacíe o inunde.

$$DB = 0.863\dot{v} + 2.1514 \quad (2)$$

Donde:

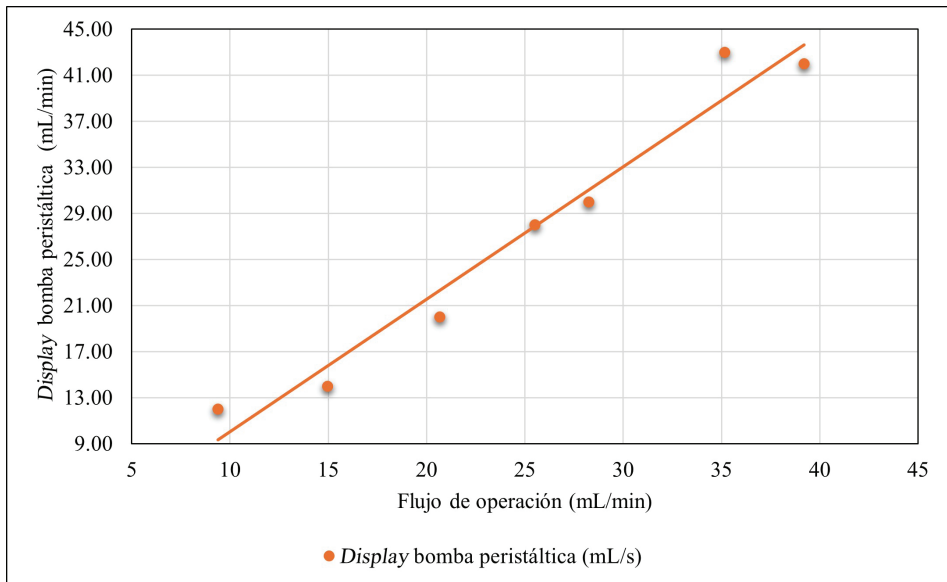
DB = *Display* de la bomba peristáltica

\dot{v} = Flujo de operación

Módulo regulador de voltaje

En la Figura 6 se muestran graficados los resultados adquiridos durante las pruebas experimentales que se llevaron a cabo en conjunto con el funcionamiento de la bomba peristáltica; dichas pruebas permitieron obtener la ecuación de tendencia lineal del módulo regulador de voltaje.

Figura 5. Ajuste del *display* de la bomba peristáltica del sistema respecto al flujo de operación



La Ecuación 3 es la resultante de la tendencia lineal que se obtuvo, por lo que esta ecuación permitirá al usuario encontrar el valor de voltaje que se configurará en el módulo regulador; todo ello con la finalidad de evitar que la torre empacada no se vacíe o inunde.

$$V = 0.0046\dot{v} + 2.1514 \quad (3)$$

Donde:

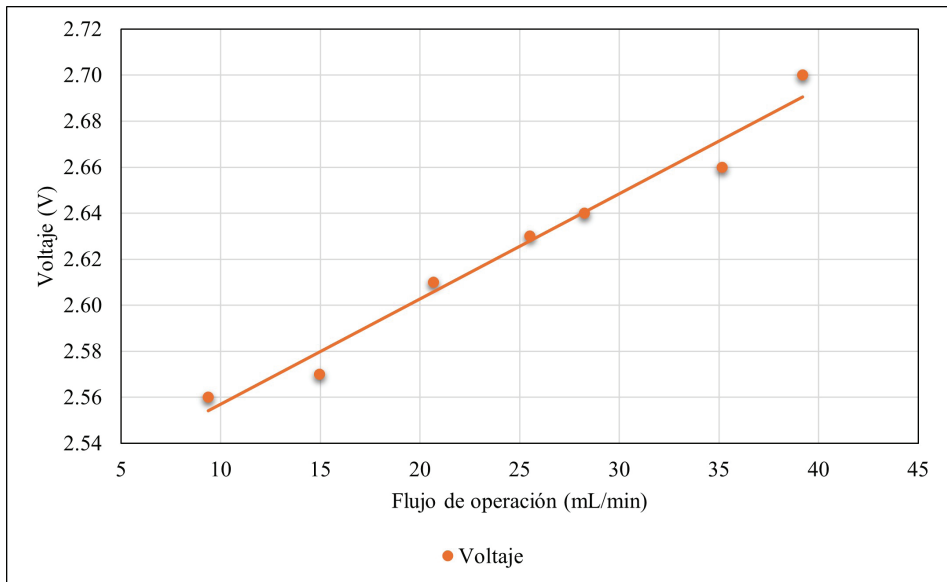
V = Voltaje de operación (V)

\dot{v} = Flujo de operación (mL/min)

Sensores de temperatura

La calibración de los sensores de temperatura se considera un aspecto crítico para la obtención de datos fiables. Para lograr mediciones precisas y exactas,

Figura 6. Ajuste de voltaje del sistema respecto al flujo de operación



se implementó un proceso de calibración integral que permitió el ajuste de las lecturas del sensor mediante un baño térmico.

De forma adicional, la temperatura indicada en el criostato del baño térmico se verificó con la utilización de un termómetro RTD de referencia. Durante este procedimiento, se consideró esencial el uso de un hidrómetro para obtener el valor de la humedad y temperatura ambiente *in situ*.

Para realizar el baño termal fue necesario definir un intervalo de temperatura en el que operarían los sensores dentro de la columna de absorción. En este caso, el rango determinado fue de 0 °C a 65 °C. Este rango establece los intervalos en los que se tomarán medidas de temperatura para su posterior premediación y ajuste de una curva. La Figura 7 muestra los sensores colocados en el criostato para realizar el baño térmico. Además, se utiliza un termómetro RTD de referencia para verificar la temperatura y garantizar que las pruebas se realicen dentro de las temperaturas indicadas.

En este proceso, se implementó un enfoque de calibración comparativa que permitió establecer una correspondencia directa entre las mediciones del sensor y los valores de referencia.

Con los datos obtenidos de estas pruebas realizadas se obtuvieron las ecuaciones de tendencia lineal (4-7) de los cuatro sensores de temperatura.

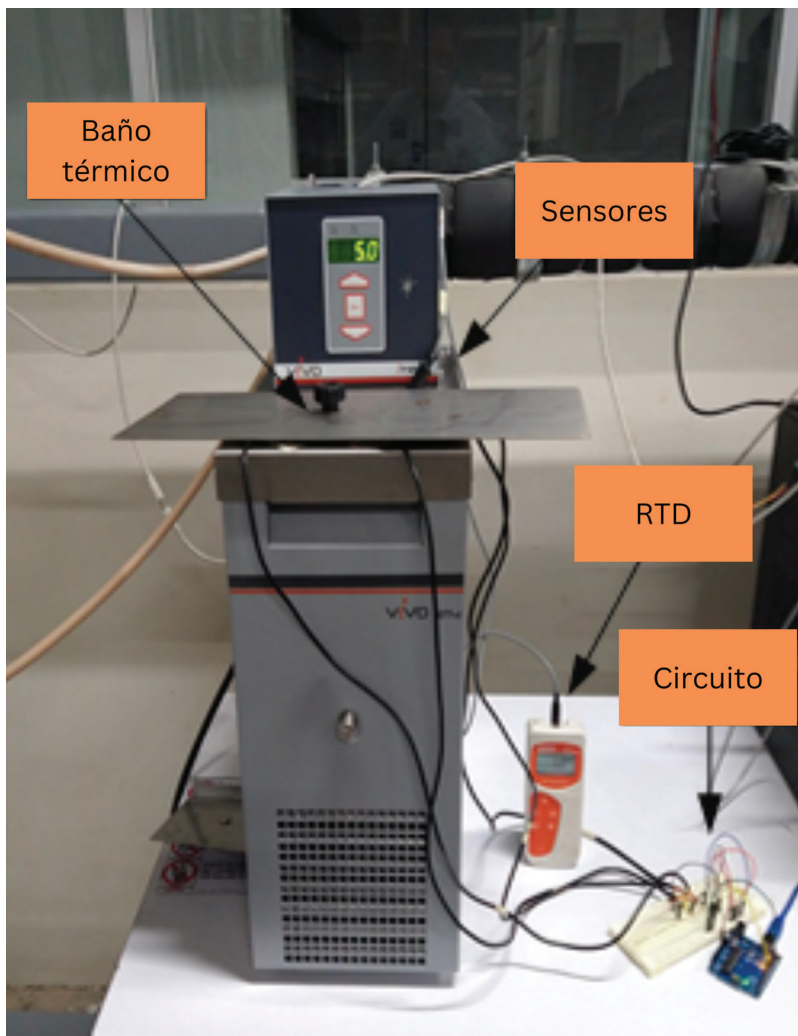
$$BT1 = 0.9932 ST1 + 1.0509 \quad (4)$$

$$BT2 = 0.9897 ST2 + 0.587 \quad (5)$$

$$BT3 = 0.842 ST3 + 1.3777 \quad (6)$$

$$BT4 = 0.9932 ST4 + 0.3547 \quad (7)$$

Figura 7. Configuración del baño térmico y verificación de la temperatura del criostato mediante un sensor de referencia antes de iniciar las pruebas del sensor de temperatura



Código de adquisición de datos

El código implementado para la adquisición de datos del sistema está realizado con una interfaz *Open Source*, en la que mediante los instrumentos mencionados anteriormente llegan al puerto serial, de donde podrán ser recolectados y posteriormente analizados.

En la Figura 8 se muestra el código que fue utilizado para la adquisición de datos, los cuales son los valores de los 4 sensores de temperatura y el flujo del rotámetro.

Resultados

La Tabla 2 muestra las ecuaciones de ajuste de los instrumentos de medición para el proceso de absorción.

Tabla 2. Ecuaciones de ajuste

Variable	Ecuación de ajuste
<i>Set point</i> bomba peristáltica	$DB = 0.863\dot{v} + 2.1514$
Sensor de temperatura 1	$BT1 = 0.9932.ST1 + 1.0509$
Sensor de temperatura 2	$BT2 = 0.9897.ST2 + 0.587$
Sensor de temperatura 3	$BT3 = 0.842.ST3 + 1.3777$
Módulo regulador de voltaje	$V = 0.0046\dot{v} + 2.1514$

Con la instrumentación de la variable temperatura y la variable flujo desarrollada en este trabajo se puede monitorear que el proceso se esté llevando de manera continua, alcanzando el estado estacionario bajo las condiciones de operación mostradas en el Tabla 1 y de los flujos de operación que se muestran en la Tabla 3.

Mediante el sistema de adquisición de datos desarrollado en *Open Source* se adquirieron las temperaturas del proceso por intervalos por segundo. Al poner en contacto a contracorriente la solución absorbente y el CO_2 en la torre de absorción se libera energía y se aumenta la temperatura de la solución. La Figura 9

Figura 8. Código de adquisición de datos

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de
pulsos recibidos
int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2
float factor_conversion = 7.11; //para convertir de
frecuencia a caudal

OneWire ourWire1(6); //Se establece el pin 2 como bus
OneWire
OneWire ourWire2(3); //Se establece el pin 3 como bus
OneWire
OneWire ourWire3(4); //Se establece el pin 4 como bus
OneWire
OneWire ourWire4(5); //Se establece el pin 5 como bus
OneWire

DallasTemperature sensors1(&ourWire1); //Se declara una
variable u objeto para nuestro sensor1
DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una
variable u objeto para nuestro sensor2
DallasTemperature sensors3(&ourWire3); //Se declara una
variable u objeto para nuestro sensor1
DallasTemperature sensors4(&ourWire4); //Se declara una
variable u objeto para nuestro sensor2

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos()
{
    NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}

//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
int ObtenerFrecuencia()
{
    int frecuencia;
    NumPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
    interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
    delay(1000); //muestra de 1 segundo
    noInterrupts(); //Desabilitamos las interrupciones
    frecuencia = NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
    return frecuencia;
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(PinSensor, INPUT);
    attachInterrupt(0, ContarPulsos, RISING);
    //(Interrupcion 0(Pin2),funcion,Flanco de subida)
    sensors1.begin(); //Se inicia el sensor 1
    sensors2.begin(); //Se inicia el sensor 2
    sensors3.begin(); //Se inicia el sensor 3
    sensors4.begin(); //Se inicia el sensor 4
}

void loop() {
    sensors1.requestTemperatures(); //Se envia el comando
para leer la temperatura
    float temp1 = sensors1.getTempCByIndex(0); //Se obtiene
la temperatura en ºC del sensor 1
    sensors2.requestTemperatures(); //Se envia el comando
para leer la temperatura
    float temp2 = sensors2.getTempCByIndex(0); //Se obtiene
la temperatura en ºC del sensor 2
    sensors3.requestTemperatures(); //Se envia el comando
para leer la temperatura
    float temp3 = sensors3.getTempCByIndex(0); //Se obtiene
la temperatura en ºC del sensor 3
    sensors4.requestTemperatures(); //Se envia el comando
para leer la temperatura
    float temp4 = sensors4.getTempCByIndex(0); //Se obtiene
la temperatura en ºC del sensor 4
    float frecuencia = ObtenerFrecuencia(); //obtenemos la
Frecuencia de los pulsos en Hz
    //float caudal_L_m = frecuencia / factor_conversion;
    //calculamos el caudal en L/m
    float caudal_L_m = frecuencia / 137;
    float caudal_ml_m = caudal_L_m * 1000;
    float caudal_real_ml_m = (1.1332*caudal_ml_m)+2.4419;
    //float caudal_L_h = caudal_L_m * 60; //calculamos el
caudal en L/h

    //-----Enviamos por el puerto serie-----
    Serial.print("FrecuenciaPulsos: ");
    Serial.print(frecuencia, 0);
    Serial.print("Hz\tCaudal: ");
    Serial.print(caudal_real_ml_m, 3);
    Serial.print(" mL/m\t");

    Serial.print("\tTemperaturas: ");
    Serial.print(temp1);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(temp2);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(temp3);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(temp4);

    delay(1000);
}

```


Tabla 3. Flujos de operación

Solución absorbente	Flujo de operación (mL/min)	Voltaje (V)	Set point de bomba peristáltica (mL/min)
MEA-H ₂ O 10 % w/w	40	2.7	42
MEA-H ₂ O 20 % w/w	20	2.61	20
MEA-H ₂ O 30 % w/w	14	2.57	14

muestra la temperatura censada de la solución absorbente en función del tiempo para las tres diferentes concentraciones de la solución absorbente que fueron preparadas al 10 %, 20 % y 30 % en peso, mientras que la Figura 10 muestra el incremento de temperatura que se produce al operar el proceso de absorción a las tres diferentes concentraciones de la solución absorbente.

Conclusiones

Con la instrumentación del sistema experimental a escala laboratorio (columna de absorción empacada) se adquirieron y controlaron las variables de proceso bajo distintas condiciones de operación para lograr el estado estacionario en cada una de las pruebas experimentales, manteniendo el incremento de temperatura al interior de la columna empacada.

Se realizaron tres pruebas experimentales a distintos flujos volumétricos y concentraciones de la solución absorbente, donde el mayor incremento de temperatura se obtuvo bajo las condiciones de operación y de proceso de 14 mL/min y una concentración del 30 % MEA-agua. El menor incremento de temperatura se presentó bajo las condiciones de 40 mL/min y una concentración del 10 % MEA-agua.

En las Figuras 9 y 10 se puede observar que a los 600 segundos de operación del proceso en continuo del proceso se alcanza el estado estacionario y se mantiene el incremento de la temperatura.

Con la instrumentación de una electroválvula proporcional y un caudalímetro de microflujo para el control de flujo volumétrico de la solución absorbente

Figura 9. Monitoreo de la temperatura de la solución absorbente durante el proceso continuo al 10wt%, 20wt% y 30wt% MEA

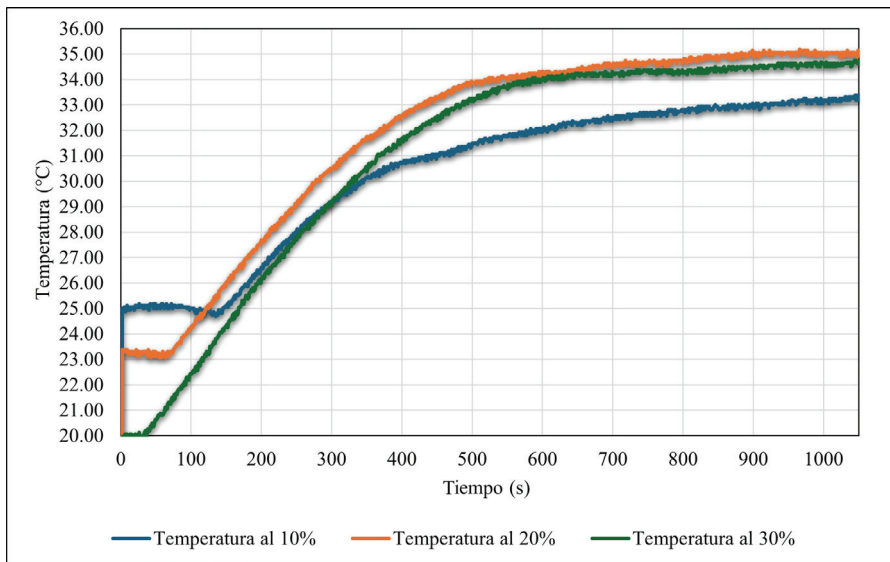
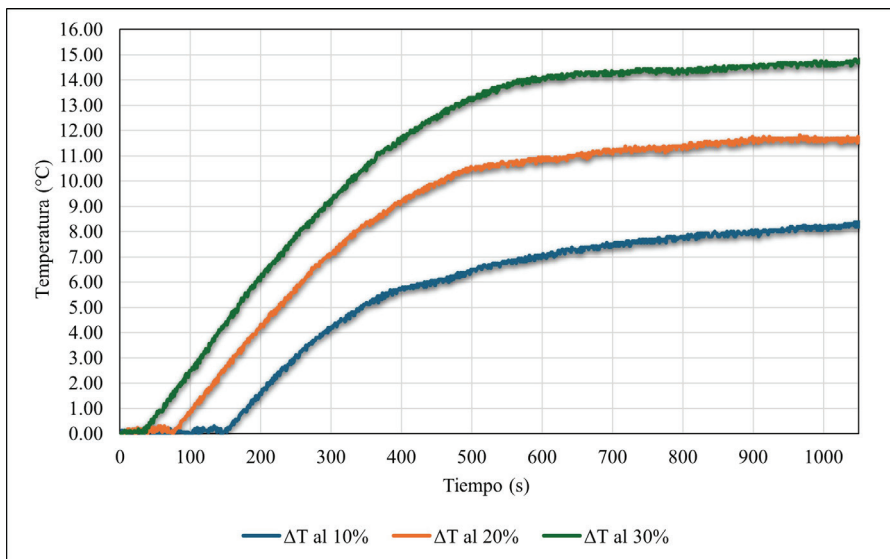


Figura 10. Comparación del incremento de temperatura de las pruebas experimentales de proceso



a la salida de la columna empacada se garantiza el flujo volumétrico exacto en cada una de las distintas pruebas experimentales llevadas a cabo. Con la calibración del sistema de adquisición de flujo volumétrico se obtuvo la ecuación correspondiente (Ecuación 2) para que el usuario determine el voltaje necesario para un determinado flujo volumétrico de salida.

La instrumentación de cuatro sensores de temperatura en el sistema experimental permite el monitoreo en tiempo real de la temperatura con el fin de observar la cantidad de energía liberada (reacción exotérmica) en forma de incrementos de temperatura en la solución absorbente al reaccionar a contracorriente con el CO₂ y determinar el tiempo en que se alcanza el estado estacionario en el proceso experimental.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQEI) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) por permitirnos realizar este trabajo de investigación en sus instalaciones.

A todos los profesores investigadores que participaron en este trabajo por el apoyo incondicional.

A la Dra. Miriam Navarrete Procopio, coordinadora del LOU, por su valiosa participación y guía en este proyecto, por aceptar realizar mi investigación en las instalaciones a su cargo.

Referencias

- Agboola, O., Moropeng, M. L., Fayomi, O. S. I., Oyebanji, J. A., & Oluwasegun, K. M. (2021). Review on coal-fired power plants from post-combustion CO₂ process and challenges., *Nucleation and Atmospheric Aerosols*, 2437(1), 020172. <https://doi.org/10.1063/5.0093305>
- Delgado, S., Cadours, R., Coquelet, C., Gaunand, A., & Volpi, C. (2022). Gas absorption in reactive solutions: Adapted instrumentation of a stirred cell

- for kinetic study and application to CO₂/amine systems. *MATEC web of conferences*, 379, 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202337901001>
- Edler, F. (2023). Reliable and Traceable Temperature Measurements Using Thermocouples. *Johnson Matthey Technology Review*, 67(1), 65-76. <https://doi.org/10.1595/205651323x16692809325480>
- Edward, N. S. (2022). The Role of Laboratory Work in Engineering Education: Student and Staff Perceptions. *International Journal of Electrical Engineering & Education*, 39(1), 11-19. <https://doi.org/10.7227/IJEEE.39.1.2>
- Enyedi, F., Thi, H. D., Szanyi, A., Mizsey, P., Toth, A. J., & Nagy, T. (2022). Low-Cost and Efficient Solution for the Automation of Laboratory Scale Experiments: The Case of Distillation Column. *Processes*, 10(4), 737. <https://doi.org/10.3390/pr10040737>
- Griffin, A., Smith, N., Robertson, M., Nunez, B., McCraw, J., H. Chen, & Z. Qiang. (2024). Research Experiences via Integrating Simulations and Experiments (REVISE): A Model Collaborative Research Project for Undergraduate Students in CO₂ Sorbent Design. *Journal of Chemical Education*, 101(3), 1096-1105. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01153>
- H. Gao, Z. Zhang., M. A. Xiao-ming., & C. Liu. (2023). Analysis of Measurement Accuracy and Reliability of Intelligent Instrumentation in Process Control. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-1557>
- James, T. D. (2022). Laboratory automation. En *Biomedical Science Practice: Experimental & Professional Skills*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/hesc/9780198831228.003.0015>
- Kazepidis, P., Papadopoulos, A. I., Fragkiskos, T., & Panos, S. (2021). Optimum design of industrial post-combustion CO₂ capture processes using phase-change solvents. *Chemical Engineering Research & Design*, 175, 209-222. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2021.08.036>
- Mesfer, M., Danish, M., & Parthasarthy, V. (2020). A Parametric Study of CO₂ Absorption from CO₂ /Air Mixture using Packed Column. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3721554>

- P. Wang, Z. Liu, Z. Pan, González-Arias, J., L. Shang, Y. Wang, & Z. Zhang. (2024). Advances in life cycle assessment of chemical absorption-based carbon capture technologies. *Separation and Purification Technology*, 346, 127252. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127252>
- Rashid, H., Hasan, N., Iskandar, & Nor, M. I. M. (2014). Temperature Peak Analysis and Its Effect on Absorption Column for CO₂ Capture Process at Different Operating Conditions. *Chemical Product and Process Modeling*, 9(2), 105-115. <https://doi.org/10.1515/CPPM-2013-0044>
- Redmond, S. (2022). A review study on instrumentation and control engineering. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 7(8), 32-40. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2022.v07i08.004>
- Shermuradova, M., Rakhmatov, D., & Kalandarov, A. (2022). *Importance and advantages of automation of measuring instruments calibration process*. <https://doi.org/10.51346/tstu-conf.22.1-77-0061>
- Taqvi, S. A. A., Zabiri, H., Singh, S. K. M., Tufa, L. D., & Naqvi, M. (2023). Investigation of control performance on an absorption/stripping system to remove CO₂ achieving clean energy systems. *Fuel*, 347, 128394. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128394>
- Urquiza, G., & Castro, L. (2023). Analysis of Absorber Packed Height for Power Plants with Post-Combustion CO₂ Capture. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15129536>
- Veldandi, P. K., Chowdhary, A. R., Durvasula, A., & Krishnamoorthy, R. (2020). Evaluation of control strategies in CO₂ capture unit. *Computer Aided Chemical Engineering*, 50, 1345-1350. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88506-5.50207-2>
- Y. T. Duan, C. Y. Mao, Y. Y. Zhang, D. Z. Wang, & H. M. Xia. (2021). A facile method for microfluidic metering and transport. *Microfluidics and Nanofluidics*, 25(94). <https://doi.org/10.1007/S10404-021-02494-Z>

Calibración de un molinete de eje axial mediante simulaciones en CFD

Cristian A. Márquez Soto,^{a*} Laura L. Castro
Gómez,^a Miguel A. Basurto Pensado,^a Juan C.
García Castrejón,^a Víctor Zezatti Flores^a

Resumen

La calibración de los molinetes ha representado un desafío técnico y metodológico desde su concepción, dando lugar a la creación de métodos y técnicas innovadoras, así como al desarrollo de instrumentación destinada a reducir la incertidumbre durante este proceso. Este documento examina dos hélices con distintos pasos axiales, siguiendo la metodología y ecuaciones de diseño propuestas por la literatura. Además, se aborda el proceso iterativo utilizado para calibrar el dispositivo mediante simulaciones en dinámica de fluidos computacional (CFD) y considerar el torque total.

En ambas hélices, se comparan los contornos de presión sobre las álabes, así como las líneas de corriente y los vectores de velocidad en la hélice y su periferia. Se observa que la hélice de paso axial medio no presenta una condición de flujo totalmente guiado en contraste con la hélice de paso axial alto. Finalmente, se presenta la curva de calibración correspondiente a esta última hélice.

Palabras clave: molinetes, calibración, paso axial, CFD.

^a Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

* Autor de correspondencia: cristian.marquezst@uaem.edu.mx

Abstract

The calibration of the current meters has represented a technical and methodological challenge since its conception, and has given a rise to the creation of innovative methods and techniques, as well as the development of instrumentation aimed at reducing uncertainty during this process. This document examines two propellers with different axial pitch, following the methodology and design equations proposed by the specialized literature. Additionally, the iterative process used to calibrate the device is addressed through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, considering the total torque amount.

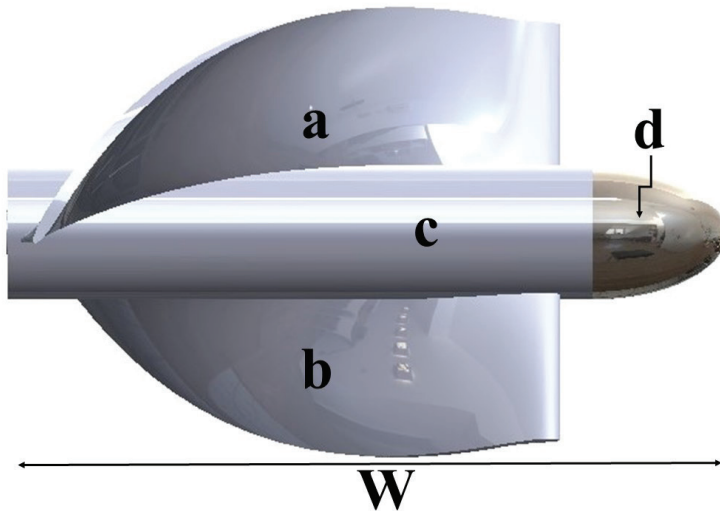
In both propellers, the pressure contours on the blades are compared, as well as the streamlines and velocity vectors in the propeller and its periphery. It is observed that the medium axial pitch propeller doesn't exhibit full fluid guidance in contrast to the high axial pitch propeller. Finally, the calibration curve corresponding to this last helix is presented.

Keywords: current meter, calibration, axial pitch, CFD.

Introducción

La medición del caudal en canales abiertos o tuberías cerradas ha sido interés de estudio; junto con esta motivación se han desarrollado métodos de medición e instrumentación para cuantificar y cualificar dichos caudales. Uno de estos instrumentos es el molinete, nombre que se deriva de la palabra francesa *moulinet* y que semeja por su forma a los molinos de viento (Edmundo, 2017). Este instrumento mide de forma local la velocidad del flujo en una sección transversal (Rolandez, 2014), la cual es proporcional a la velocidad rotacional de la hélice del molinete. El diseño de la hélice de estos dispositivos (Figura 1) ha supuesto un reto técnico, donde a lo largo de los años se han desarrollado métodos y ecuaciones de diseño sofisticadas y complejas, así como ecuaciones que permitan calibrar de forma análítica y experimental los molinetes bajo determinadas condiciones de flujo (Wang et al., 2018) y los criterios que deben considerarse

Figura 1. Hélice de molinete en vista lateral, donde *a*, lado presión; *b*, lado succión; *c*, cubo; *w*, longitud de hélice, y *d*, punta



para evaluar la incertidumbre y el error en las pruebas de medición del caudal (Herschly, 2002), ya sea en conductos abiertos (*ISO 748:2021*, 2021) o conductos cerrados (*ISO 3354:2008*, 2008; *ISO 7194:2008*, 2008), se deben cumplir varios criterios de calibración (*ISO 3455:2021*, 2021) y en el diseño, tanto en el instrumento (*ISO 2537:2007*, 2007) como en la metodología de prueba y disposición de los molinetes para el cálculo del flujo volumétrico en tuberías de presión (*pens-tocks*) (*IEC 60041:1991*, 1991).

Método de los molinetes

El método de los molinetes es una técnica de medición de la velocidad local en distintos puntos colocados estratégicamente a lo largo de una sección transversal de una tubería de presión (Proulx, 2011). Cada molinete es colocado sobre un rack de sujeción siguiendo los lineamientos dispuestos en el código internacional *IEC 60041:1991* (1991). Los campos de velocidad son obtenidos simultáneamente durante la prueba de descarga y promediados siguiendo el método de

exploración de campos de velocidad por promedios de los molinetes (IEC 60041:1991, 1991), cuya integración da como resultado el caudal o *flujo volumétrico* Q dispuesto por la Ecuación 1 en coordenadas rectangulares (Proulx, 2016).

$$Q = \iint_s v(x, y) dx dy \cong \sum_i v_i \Delta x_i \Delta y_i \quad (1)$$

Donde Q es el flujo volumétrico, v_i son los puntos de medición, x_i y y_i son las distancias horizontales y verticales respectivamente entre cada punto de medición.

Para estimar las velocidades entre los espacios de los puntos de medición se utilizan aproximaciones matemáticas mediante curvas (*splines*) o *No-Uniform Rational B-Splines (NURBS)*, donde el último método ha demostrado una mejor aproximación de la curva de velocidad a los puntos de medición (Adamkowski & Krzemianowski, 2012). El resultado de dicha aproximación es una curva de velocidad en función de las distancias horizontales x y verticales y . Dicha función es dispuesta en la Ecuación 1 para el cálculo del caudal o flujo volumétrico. La aplicación de este método tiene como finalidad el cálculo de la potencia (Ecuación 2) y eficiencia hidráulica de una turbina (Ecuación 3).

$$\eta_T = QH_n \quad (2)$$

Donde η_T es la eficiencia hidráulica, Q es la descarga o flujo volumétrico y H_n la caída de la turbina. La potencia hidráulica sigue:

$$P_h = \gamma QH \quad (3)$$

Donde P_h es la potencia hidráulica, γ es el peso específico del agua y H es la altura neta de la turbina. La importancia de conocer la potencia y eficiencia hidráulica tiene como principales objetivos repotenciar y aumentar la eficiencia de las unidades de potencia (Adamkowski & Krzemianowski, 2012; Reeb et al., 2015; Steller, 2010).

Metodología: diseño de hélices y procedimiento de calibración

El diseño CAD (*Computer Aided Design*) de las hélices fue realizado utilizando el *software* SolidWorks, mientras que para las simulaciones en CFD (*Computational Fluids Dynamic*) fue utilizado el *software* ANSYS CFX.

Ecuaciones de diseño de hélices para molinetes

La simplificación de las ecuaciones y procedimiento de diseño (Mohammad, 2016, 2020; Mohammad & Sayed, 2016) —en gran medida— y el desarrollo de las hélices de molinetes ha vuelto el proceso de construcción más sencillo y sin complicaciones, de igual forma, dicha simplificación permite conocer el rendimiento y comportamiento de la dinámica de la hélice y de las distintas secciones que la conforman (Figura 1) de una forma más comprensible. Lo anterior ha dado la posibilidad de caracterizar la hélice según la aplicación que se le dé y, de esta forma, cuantificar y cualificar el comportamiento dinámico del dispositivo bajo distintas condiciones de trabajo.

Aunque algunos autores definen tres tipos de hélice con base en su paso axial o avance (Mohammad & Sayed, 2016): HP (*High pitch*), MP (*Medium pitch*) y LP (*Low pitch*), donde el pitch (torsión, avance o ángulo de helicoides) es descrito por (Mohammad, 2020; Mohammad & Sayed, 2016) como el número de revoluciones que da la hélice por unidad de longitud, ofrecida por la Ecuación 4.

$$L = 2\pi r / \tan \theta \quad (4)$$

Donde L es el paso axial (*pitch*), r es la distancia radial medida desde el eje de la hélice hasta el borde de la hélice y θ es el ángulo de inclinación del helicoides (hélice) medido de forma perpendicular al eje de la hélice.

La literatura ha demostrado que las hélices con un paso axial constante a lo largo de la variable r muestran un mejor rendimiento y estabilidad para condiciones de flujo distintas (Mohammad, 2016, 2020; Mohammad & Sayed, 2016).

En el presente documento, al igual que la literatura, el paso axial de las hélices presentadas es constante a lo largo de r .

Asimismo, Mohammad (2020) y Mohammad & Sayed (2016) definen los tres tipos de paso axial normalizado ($L^* = L / D_t$), así como las ventajas de cada uno; estos parámetros son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de hélices y su principal ventaja

Paso axial	Rango L^*	Ventaja
<i>Low-pitch</i> (LP)	$L^* < \sigma\pi$	Alta sensibilidad
<i>Med.-pitch</i> (MP)	$\sigma\pi < L^* < \pi$	Bajo porcentaje de error de medición
<i>High-pitch</i> (HP)	$L^* \geq \pi$	

La elección del paso axial debe considerar principalmente la aplicación que tendrá el molinete con la finalidad de aumentar la precisión y exactitud de la hélice y con base en los rangos de velocidad de flujo dispuestos en el código internacional *IEC 60041:1991*. Las hélices presentadas en este documento son de tipo HP y MP. Se descarta la elección de la hélice de tipo LP dado que, en las pruebas físicas al utilizar el método de los molinetes, no involucra una medida puntual, sino un promedio de velocidades locales (Adamkowski & Krzemianowski, 2012; Proulx, 2016; Steller, 2010). Una aplicación directa para las hélices del tipo LP supondría su uso en ductos, en donde la variación del flujo y su medición en tiempo real son de interés, siendo un instrumento con una respuesta dinámica mejor (Wang et al., 2018). Cabe señalar que, hasta la fecha de publicación del presente documento, las ecuaciones y procedimientos de diseño de hélices propuestos por la bibliografía (Mohammad, 2016; Mohammad & Sayed, 2016) no han sido empleados para molinetes con aplicación al cálculo del flujo volumétrico en tuberías cerradas (ductos cuyo diámetro es similar en magnitud al diámetro de la hélice).

El segundo parámetro geométrico que debe considerarse es el diámetro total de la hélice del molinete (D_t), donde el código internacional *IEC 60041:1991* considera diámetros entre 5 cm y 10 cm, no obstante, también es sugerido que las hélices tengan un momento de inercia alto para mitigar las intermitencias

en la rotación de la hélice (estabilidad rotacional) debido a cambios repentinos en las condiciones del flujo, es aconsejado por el código internacional *IEC 60041:1991* el uso de molinetes con diámetro cercano a 5 cm en la periferia del arreglo de molinetes (cercanos a la pared de la tubería) y el uso de molinetes con diámetro cercano a 10 cm en las secciones centrales, esto con la finalidad de interferir en lo mínimo posible el flujo cercano a la capa límite del fluido. Sin embargo, se han establecido valores óptimos para el valor de la solidez (Ecuación 5) para una condición de torque de arranque lineal en función del deslizamiento (Ecuación 6), donde se han caracterizado parámetros geométricos a partir del torque de arranque (*driving torque*) ejercido por el fluido sobre las álabes de la hélice a determinadas condiciones de flujo de flujo (Mohammad, 2016, 2020; Mohammad & Sayed, 2016):

$$S = \frac{NW}{D_t} = 2.343 \quad (5)$$

Donde S es la solidez de la hélice, N es el número de paletas (*blades*) de la hélice y W es la altura total de la hélice (Figura 1), mientras que el deslizamiento (*slip*) de diseño se define como la razón de la distancia recorrida por la hélice en una revolución y la distancia teórica recorrida en una revolución:

$$\varepsilon_d = \frac{\frac{2\pi}{L} - K_d}{\frac{2\pi}{L}} \quad (6)$$

Donde Mohammad (2020) define a K_d como una constante de diseño del molinete expresada como:

$$K_d = \frac{\omega_d}{V} \quad (7)$$

Donde ω_d es la velocidad rotacional (rad/s) de la hélice y V es la velocidad de flujo que incide sobre los álabes. Las ecuaciones 6 y 7 representan ecuaciones de diseño y cuyos valores deben ser seleccionados con base en procedimiento establecido por Mohammad (2016). La Ecuación 7 también es conocida por la literatura como el factor-K o factor del molinete. Con base en las ecuaciones 4 y 7 se definen los ángulos de los álabes como:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi r}{L} \right) \quad (8)$$

$$\beta_1 = \tan^{-1} (rK_d) \quad (9)$$

$$\beta_2 = 2\theta - \beta_1 \quad (10)$$

Que representan los ángulos de torsión (*camber*), entrada y salida de las álabes respectivamente. Para que las ecuaciones 8-10 sean congruentes trigonométricamente, K_d debe satisfacer ciertos criterios, los cuales deben ser función de L principalmente. Con la finalidad de escoger valores apropiados de K_d , Mohammad (2016, 2020) y Mohammad y Sayed (2016) proponen valores óptimos para la elección de la constante de diseño, donde el autor define que, para hélices con un paso axial mediano (MP), el valor de K_d debe satisfacer las restricciones dadas por las ecuaciones 11-13.

$$K_{d,1} \leq 2\pi / L \quad (11)$$

$$K_{d,2} \leq \frac{4\pi L^*}{D_t \left[L^{*2} - (\pi\sigma_r)^2 \right]} \quad (12)$$

$$K_{d,3,b} > \frac{1}{\pi\sigma_r^2 D_t L^*} \left[(\pi\sigma)^2 - L^{*2} \right] \quad (13)$$

Para las restricciones de K_d para las hélices de tipo HP, el autor establece un valor óptimo cercano a 0 y lejano en magnitud a la Ecuación 11. Las ecuaciones de diseño, así como los valores óptimos de solidez propuestos por la literatura (Mohammad, 2016, 2020; Mohammad & Sayed 2016), tienen como principal objetivo asegurar una condición de flujo totalmente guiado sobre la hélice. Esto se traduce físicamente como la cantidad de líneas de corriente que entran y salen sobre los álabes, tanto en el lado succión como en el lado presión (Figura 1), y recorren por completo la geometría de la hélice, siguiendo la forma helicoidal de esta. La importancia de dicha condición tiene como consecuencia un giro estable de la hélice; por ende, el torque de arranque exhibe en tal condición un comportamiento lineal.

La condición de flujo totalmente guiado, así como el comportamiento lineal de torque de arranque, no siempre son dados en la práctica. Un claro ejemplo de ello es el efecto de la turbulencia en el flujo, dado que, si los remolinos existentes en el flujo turbulento son más pequeños que el diámetro total (D_t) de la hélice del molinete, contribuyen a patrón de turbulencia. Por lo tanto, no es posible medir una velocidad instantánea debido a que dichos remolinos ejercen simultáneamente acciones de sustentación sobre los álabes, originando su rotación intermitente.

Simulaciones en CFD

Con el desarrollo actual de la dinámica de fluidos computacional, así como la capacidad de cómputo disponible, es posible realizar simulaciones basadas en métodos matemáticos como el *método de elementos finitos* de una forma más precisa y apegadas a los fenómenos físicos (objetos de estudio). Tales desarrollos y capacidades de cómputo otorgan la posibilidad de realizar calibraciones de molinetes con un bajo error de precisión de hasta un 99.1 % (Mohammad, 2020),

además de estudiar más precisamente los efectos ambientales sobre la dinámica de estos dispositivos, motivo por el cual dicha aplicación es objeto de estudio en pleno siglo XXI.

El efecto de la viscosidad en mediciones realizadas con molinetes en ductos cerrados (Suna & Lin, 2013), el efecto de la temperatura en la calibración y la medición del flujo (Mattas & Libuše, 2013) suponen objetos de estudio realizados con simulaciones en CFD y sustentados con pruebas experimentales, los cuales demuestran que tanto la temperatura como la viscosidad con parámetros de entorno deben ser considerados para desarrollar modelos de calibración más exactos y precisos, dado que el modelo clásico de calibración propuesto por la literatura (Mohammad, 2016, 2020; Mohammad & Sayed 2016) es lineal (Ecuación 14) y no involucra las magnitudes de la temperatura y viscosidad (esta última tiene efectos principalmente en aplicaciones de tuberías de gas).

$$V = \frac{\omega}{K_a} + a = \frac{n}{K_a} + a \quad (14)$$

Donde K_a es la constante del molinete para una V determinada, ω y n es la velocidad rotacional de la hélice expresada en rad/s o rpm, respectivamente, y a es una constante proporcional a los torques de arrastre considerados en el dispositivo.

La curva de calibración es parte de la documentación que debe poseer cualquier dispositivo sensor. Para el caso de los molinetes, la curva de calibración permite conocer al propietario la velocidad del flujo a una determinada velocidad rotacional de la hélice; mediante aproximaciones numéricas es posible obtener una función matemática que modele dicha curva. La calibración de un molinete a través de simulaciones en CFD sigue una serie de pasos que deben respetarse para obtener un resultado preciso, exacto y con una baja incertidumbre, que corresponde a una curva de calibración confiable. Estos pasos son:

- Magnitud precisa de los diferentes torques de arrastre debido a los distintos elementos del dispositivo (rodamientos, interruptores magnéticos, etc.).
- Discretización correcta del dominio fluido y las secciones del molinete.
- Criterio de convergencia de calibración menor a $\pm n^{-4} [J \cdot m]$ y criterio de convergencia en las simulaciones en CFD de $1 \cdot 10^{-5}$.
- Elección del modelo de resolución SST (Mohammad, 2016).
- Análisis de resultados (CFD-Post).
- Condición de flujo totalmente guiado.
- Relación lineal entre V y ω .

Aproximación del torque de arranque

La calibración de molinete de forma física o mediante simulaciones en CFD se basa en encontrar la curva de calibración o el factor del molinete (K); esta a su vez es función de la velocidad rotacional de la hélice (Ecuación 14), que debe ser proporcional a la velocidad del flujo que pasa sobre ella en pocas palabras. Si el comportamiento del dispositivo es linealmente dependiente de la velocidad del flujo, es posible construir una curva de calibración con tres puntos correspondientes a un rango mínimo, intermedio y máximo al que se pretende calibrar el dispositivo. El parámetro para aproximar la velocidad rotacional de la hélice para una velocidad de flujo en la entrada determinada es el torque de arranque, conocido en la literatura como *driving torque* (Mohammad, 2020) dado por la Ecuación 15:

$$T_{dr} - T_b - T_h - T_m - T_t - T_w = J \cdot \dot{\omega} = 0 \quad (15)$$

Donde T_{dr} es el par de arranque (torque generado por el fluido sobre las álabes del molinete); T_b es el par de retardo del torque; T_h es el torque de retardo generado por el cubo; T_m es el par de retardo generado por la fuerza electromagnética del sistema de conteo (para tacómetros ópticos este término de la ecuación se invalida); T_t es el torque de arrastre generado por la distancia entre

la sección externa de las álabes (grosor de las álabes) y las paredes de la tubería, donde este término se invalida para aplicaciones en caudales abiertos o tuberías de presión (aforos cerrados), y T_w es el torque de arrastre generado por el grosor de las hélices; J es el momento de inercia de la hélice, y $\dot{\omega}$, la aceleración angular de la hélice. La Ecuación 15 puede reescribirse (Ecuación 16) despreciando los términos que no aplican de acuerdo con el código internacional (Mohammad & Sayed, 2016).

$$T_{dr} - T_b - T_h - T_w = J \cdot \dot{\omega} = 0 \quad (16)$$

Al hacer la suma de los torques se tiene que:

$$T_{tot} - T_{dr} - T_d = J \cdot \dot{\omega} = 0 \quad (17)$$

Donde T_{tot} es la suma de los torques de arranque T_{dr} y de arrastre T_d . La Ecuación 17 puede interpretarse de la siguiente manera: la hélice girará con una velocidad angular ω constante ($\dot{\omega} = d\omega / dt = 0$) cuando el torque generado por el fluido sobre los álabes de la hélice se iguale en magnitud con el torque de arrastre generado por las contribuciones de este (Ecuación 10); así, la Ecuación 17 describe matemática y físicamente el comportamiento dinámico de la hélice. El par de arranque total puede ser calculado mediante simulaciones en CFD. Es recomendado por la literatura (Mohammad, 2020; Suna & Lin, 2013) el uso de CFX para su estimación, no obstante, no se puede prescindir del torque de arrastre como establece Khozaei, dado que, aunque la magnitud del torque de arrastre es despreciable en comparación con el par de arranque, la aplicación de T_d en la Ecuación 17 confiere más exactitud a la calibración de estos dispositivos mediante simulaciones en CFD. La literatura recomienda establecer un criterio de convergencia para la Ecuación 19, donde el torque total se aproxime a un valor cercano a 0; la exactitud de la calibración mediante este método dependerá en su mayoría al criterio de convergencia ($T_{tot} \approx 0$). El par de arranque T_{dr} es calculado con sumatoria de los torques de arranque de cada elemento infinitesimal de la hélice n dado por la Ecuación 18.

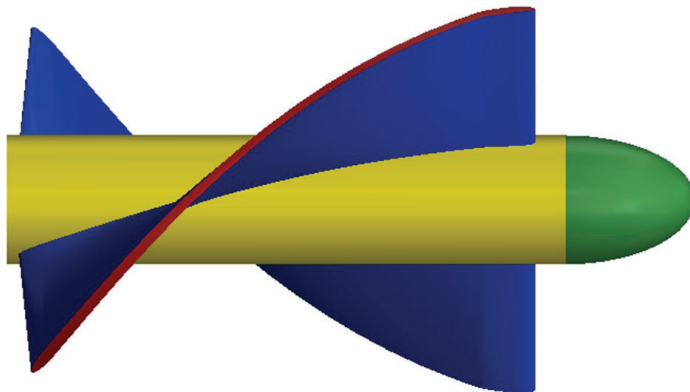
$$T_{dr} = N \sum_n^i P_i \times A_i \times r_i \times \cos \beta_i \quad (18)$$

Donde P_i es la presión del elemento infinitesimal sobre la pala; A_i es el área del elemento infinitesimal; r_i es el radio medido desde el eje de rotación al elemento infinitesimal de la pala correspondiente.

Discretización del dominio y preprocesamiento en CFX

Las contribuciones de T_{dr} , T_h y T_w pueden ser estimadas mediante CFD dividiendo la hélice en las secciones correspondientes a la Figura 2. La discretización del dominio fue realizada en el *software Meshing*, la malla resultante es del tipo no-estructurada. Para obtener una mejor resolución del modelo de turbulencia *SST* cercano a las paredes de los álabes, se realizó una aproximación exponencial

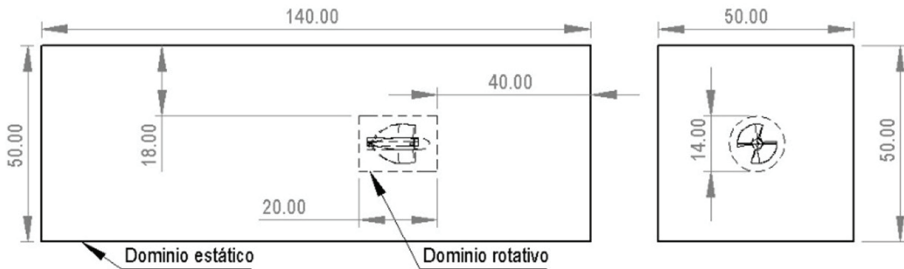
Figura 2. Secciones de una hélice de paso axial alto (*high pitch*).
Sección: verde, punta; amarillo, cubo (*hub*); azul, álabes (*blades*);
rojo, sección externa o grosor de los álabes (*blade tip*)



de la capa límite a esta mediante un $\gamma^+ = 1.5$, obteniendo así una mejor aproximación de los gradientes de presión sobre la hélice. El torque de arrastre generado por los rodamientos es estimado usando el *software SKF® Bearing Calculator*, cuyos valores de entrada corresponden a las cargas axiales, radiales y frecuencia rotacional en rpm sobre el rodamiento, donde las dos primeras cantidades son omitidas debido a que, en condiciones reales, las cargas axiales y radiales son despreciables para hélices balanceadas en su eje de rotación.

Para las simulaciones en CFD se proponen dos dominios fluidos: El fluido estacionario corresponde al tamaño total del dominio fluido, donde la entrada de este se encuentra del lado izquierdo, seguido de paredes rígidas y la salida de flujo. El fluido rotativo, por otra parte, consiste en un dominio que gira sobre el mismo eje que la hélice; este se divide a su vez en tres secciones que corresponden a las interfaces de entrada, periferia y salida, utilizando el método de interfaz *Frozen Rotor* (Mohammad & Sayed, 2016).

Figura 3. Dimensiones del dominio fluido (estático y rotativo)



Durante el preprocesamiento de la simulación, se deben considerar varios puntos como la rugosidad de la superficie de los álabes y el cubo, la intensidad turbulenta del flujo, el sentido de giro de la hélice dado por la Ecuación 4, además de la temperatura del fluido (agua a 25 °C en este caso).

La discretización del dominio, así como la división en secciones de la hélice, fueron realizadas en el *software Meshing*. Finalmente, la Ecuación 19 es resuelta

aplicando el método numérico de volumen finito mediante ANSYS CFX, con una discretización geométrica de la hélice se obtienen elementos volumétricos y superficiales donde las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas para la estimación de la presión en las superficies de las álabes y de la hélice en general. Las cantidades de la Ecuación 16 son configuradas durante el preprocesamiento de la simulación. Se configura una velocidad rotacional al dominio rotativo aproximada a la velocidad de entrada del flujo en el dominio estático. Si el torque de arranque sobre el eje de rotación no se aproxima en magnitud y sentido al torque de arrastre ($\pm n^4 [J \cdot m]$) como se muestra en las ecuaciones 16 y 17, se debe realizar un ajuste a la velocidad rotacional (ω) del dominio rotativo; si el torque total de la hélice es de signo negativo, significa que el torque de arranque T_{dr} es menor que el torque de arrastre T_d , por lo tanto, la hélice físicamente se desacelera; por otro lado, si $T_{dr} > T_d$, la hélice se está acelerando y se debe disminuir la velocidad rotacional del dominio rotativo (Mohammad & Sayed, 2016; Suna & Lin, 2013); en este sentido, se debe aclarar que el signo resultante del torque de arranque es independiente del sentido de giro de la hélice, dado que ambas cantidades son perpendiculares entre sí. Este proceso iterativo puede optimizarse mediante los *puntos de diseño* y sigue la siguiente metodología: en el preprocesamiento se debe configurar la velocidad rotacional del dominio rotatorio como un parámetro de entrada (punto de diseño); el torque de arranque T_{dr} y los torques de arrastre T_h y T_w deben ser configurados como parámetros de salida en CFD-Post. Ambos parámetros pueden ser visualizados desde ANSYS-Workbench en la opción de puntos de diseño, dando la posibilidad de cambiar los valores de ω sin hacerlo desde CFX y visualizar los torques T_{dr} , T_h y T_w directamente sin hacerlo desde CFD-Post. Las cantidades que expresan la magnitud y sentido de los torques son visualizadas durante la simulación.

Con el objeto de realizar una calibración más precisa, se consideraron cuatro puntos de calibración más uno que fue extrapolado para flujos con velocidades de 0.1 (m/s), cuyos límites son establecidos por el código internacional *IEC 60041:1991* como rango de operación del objeto de estudio, siendo este de una velocidad de flujo de 0.4 a 6 m/s con puntos intermedios a 3.5 y 4 m/s. Las velocidades rotacionales iniciales fueron estimadas a partir de la literatura

(Mohammad & Sayed, 2016) para una hélice de avance medio (MP) y una de avance alto (HP).

Posprocesamiento y análisis de resultados: CFD-Post

La condición de flujo totalmente guiado sobre la hélice puede ser corroborada mediante CFD de dos formas distintas:

- Método numérico: Se basa en la proporción lineal de la velocidad rotacional de la hélice respecto a la velocidad de entrada del flujo. Una condición de flujo no totalmente guiado tendría como principal característica una distribución de los puntos de calibración sin relación alguna o un valor de R^2 cercano a cero.
- Método gráfico: Mediante CFD-Post es posible corroborar que exista o no una condición de flujo totalmente guiado, si esta condición es dada, los gradientes de presión sobre los álabes de la hélice se deben mostrar homogéneos y distribuidos. Se debe considerar que, para un $T_d > 0$ los gradientes de presión en el lado presión deben ser mayores en magnitud que en el lado succión y viceversa para un $T_d = 0$. Gradientes con una distribución no homogénea en los álabes pueden propiciar que las partículas del fluido no sigan una trayectoria definida y suave a lo largo de los álabes, provocando que la fuerza de sustentación de la hélice sea variable y, por lo tanto, la hélice tenga, además de un giro intermitente un comportamiento variable para cada condición de flujo dada, tornándose así imposible la estimación de ω .

Análisis de resultados

Resultados numéricos

Se presentan a continuación los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones en CFX para los torques T_d y T_{tot} mediante los puntos de diseño

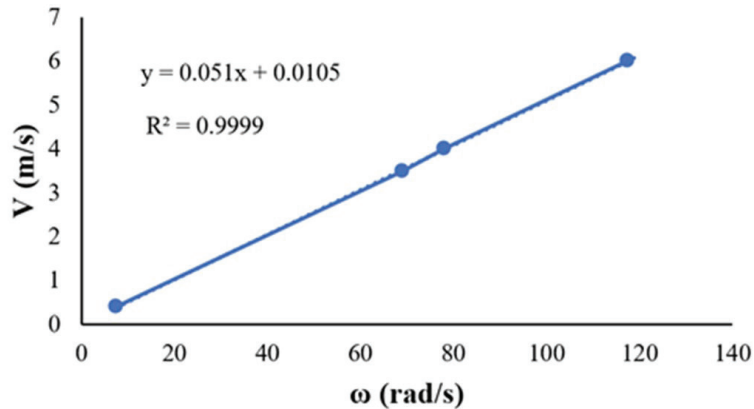
establecidos para la hélice con paso axial alto (HP) en la Tabla 2. Las estimaciones de los torques de arranque para la hélice con un paso axial medio no pudieron ser aproximados debido a que la condición de flujo totalmente guiado no fue dada.

Con base en la Tabla 2, se muestra en la Figura 4 la aproximación lineal de los puntos de calibración realizados, así como la ecuación de calibración resultante.

Tabla 2. Resultados numéricos para la hélice de paso axial alto (HP)

vel. (m/s)	ω (rad/s)	T_{tot} (N)	K_d
6	117.38	1.6e-4	19.6
4	78	8.7e-4	19.5
3.5	69	2.3e-4	19.7
0.4	7.65	1.5e-4	19.1

Figura 4. Curva y modelo de calibración de la hélice HP



Resultados gráficos (CFD-Post)

Los gradientes de presión mostrados en la Figura 5 corresponden a una velocidad de flujo de 4 (m/s), velocidad a la cual la hélice MP obtuvo un torque total ($T_{tot}=0.99e-4$ Nm) aproximado al criterio de convergencia de calibración.

En la Figura 5 (a-d) se muestran los gradientes de presión de dos hélices con paso axial distinto con una velocidad de flujo de 4 (m/s). Como es mencionado en la literatura (Mohammad, 2020; Mohammad & Sayed, 2016), las hélices con un paso axial elevado (MP y LP) son más sensibles a cambios de flujo que las hélices de paso axial alto, esto es debido a que las hélices MP y LP captan más cantidad de flujo volumétrico, por lo tanto, el torque ejercido sobre los álabes por el fluido es mayor (Ecuación 19). Lo anterior se traduce en un aumento de presión sobre los álabes, de tal modo que, a una velocidad de flujo determinada, las hélices con paso axial bajo/medio tendrán una velocidad rotacional mayor que las hélices de paso axial alto (Mohammad & Sayed, 2016). Por otra parte, la hélice de paso axial medio (Figura 5) muestra aumentos significativos de presión sobre las hélices cercano al borde de ataque de los álabes y una disminución considerable de la presión cercano al borde de salida (Figura 5d). Estos cambios repentinos del gradiente de presión ocasionan que el flujo no siga una trayectoria definida a lo largo de la geometría de la hélice, propiciando que la condición de flujo totalmente guiada no sea dada y, por tal motivo, que la relación de V y ω no sea lineal y la estimación del torque de arranque se vuelva impredecible.

Además de las notorias diferencias de los gradientes de presión en ambas hélices, el efecto de estela que es originado por estas supone un aumento significativo para la hélice de paso axial medio (Figura 6a-b). Este efecto, sumado a la generación de vórtices de las hélices, ha sido objeto de estudio, donde la importancia de estos parámetros tiene consecuencias sobre las estructuras que sujetan a los molinetes. El efecto estela es un indicativo de la baja hidrodinámica de la hélice, lo que aumenta la carga de arrastre paralela a la dirección del flujo. Las contribuciones de la fuerza de arrastre originada por el fluido sobre los álabes puede tener mayor importancia en arreglos matriciales de molinetes al sumar las contribuciones de dicha fuerza de arrastre. Por otra parte, la generación de

vórtices aguas arriba o en la periferia de los álabes del molinete propicia vibraciones en el dispositivo y estas, a su vez, son transmitidas a la estructura de sujeción/sopORTE de los molinetes (*Rack*), provocando que la estructura pueda entrar en resonancia natural dados sus modos armónicos.

La separación del flujo aguas abajo del cubo (Figura 6a) no supone un tema que deba investigarse o analizarse, dado que en dicha zona iría colocada la estructura mecánica e instrumentación electrónica del dispositivo. En la Figura 6b se observa un aumento considerable en la velocidad del flujo en el lado succión del álabE MP en contraste con el álabE de la hélice HP; si el flujo aumenta su velocidad en dicha zona, la presión disminuye (Figura 5a), provocando que, como se mencionó antes, la hélice se acelere. Para el caso en que el torque de arrastre sea $T_d = 0$ los gradientes de presión en el lado succión y presión de los álabes, así como la velocidad del flujo en dichas zonas deben ser equivalentes, como se ejemplifica en la Figura 7, donde el fluido utilizado para tal simulación fue aire y los gradientes de presión en ambos lados de la hélice son equivalentes entre sí.

Con la finalidad de obtener una velocidad mínima de arranque de la hélice de paso axial alto, se realizó la simulación con una velocidad de entrada de 0.1 (m/s); con base en la función de calibración mostrada en la Figura 4, se estima una velocidad rotacional de 1.75 (Rad/s). Los resultados de las simulaciones en CFD para dicho punto de calibración se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Velocidad mínima de flujo permisible para la hélice HP

Vel. (m/s)	ω (rad/s)	Torque (N)	K_d
0.1	1.75	1.8e-5	17.5

Los gradientes de presión sobre la hélice HP para una velocidad de flujo de 0.1 (m/s) se muestran en la Figura 8.

No obstante, se detectó una separación del flujo cercano al borde de ataque de los álabes. Esta separación es caracterizada por un valor cercano a cero en la velocidad de flujo en dicha zona (Figura 9). Esta separación del flujo tiene como consecuencia la generación de vórtices que se propagan aguas abajo del álabE,

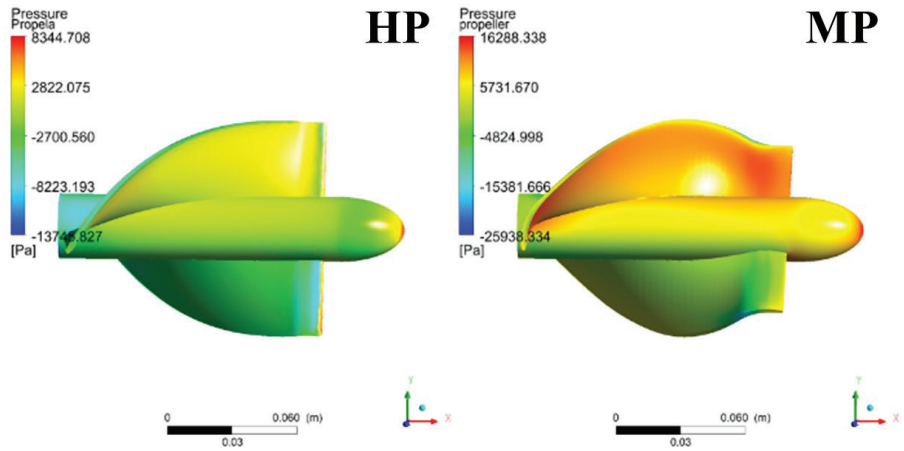
como se muestra en la Figura 10a, por otra parte, este efecto no se muestra sobre el borde de salida de los álabes (Figura 10b).

Las líneas de corriente en la periferia de la hélice para una velocidad de flujo de 6 (m/s) y 0.1 (m/s) son mostradas en la Figura 11, en la cual es posible observar que, para ambos casos, las líneas de corriente siguen la forma de la hélice, sin embargo, existen trayectorias sobre los álabes que no siguen esta condición.

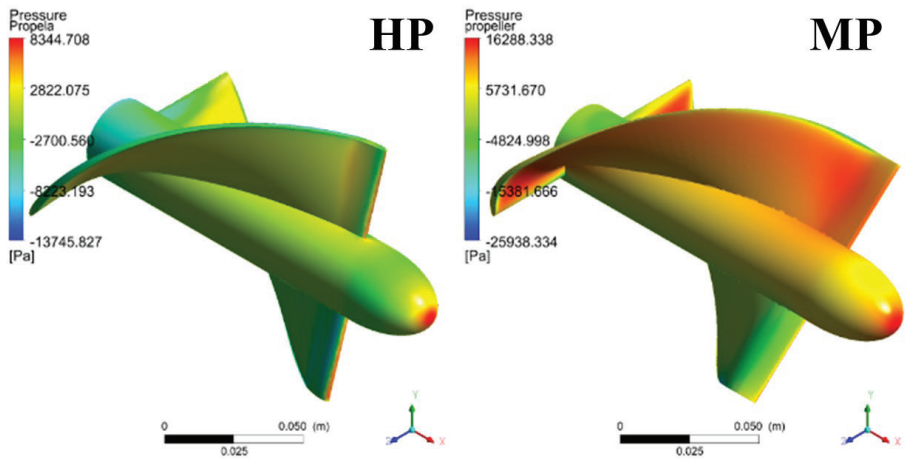
La separación del flujo mostrada en la Figura 12 se extiende para rangos de velocidad superiores, en las Figuras 12 y 13 se observa que la región donde se separa el flujo de la geometría es equivalente para el rango de velocidades definidos. La cantidad de flujo que recorre por completo la geometría en el lado succión disminuye a medida que la velocidad del flujo aumenta (Figuras 12a y 13a-b), no obstante, el lado presión muestra una condición de flujo totalmente guiada en el rango de velocidades mostrados en las Figuras 12 y 13, lo que ocasiona que el cambio de velocidad rotacional de la hélice sea linealmente proporcional al cambio de la velocidad del flujo (Figura 4).

La generación de vórtices en dicha zona es debida a la torsión de la hélice, donde la transición del ángulo de entrada β_1 no es uniforme respecto a θ , ocasionando que en dicha transición exista una zona de baja presión, lo que provoca que el flujo circundante a la zona turbulenta no recorra por completo la geometría de los álabes y estos presenten un desbordamiento del flujo.

Figura 5. Contornos de presión de hélices HP y MP en distintas vistas

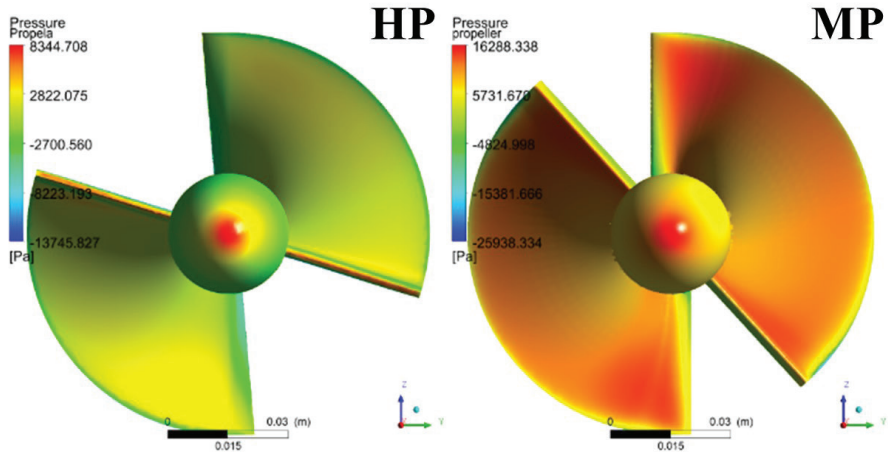


(a)

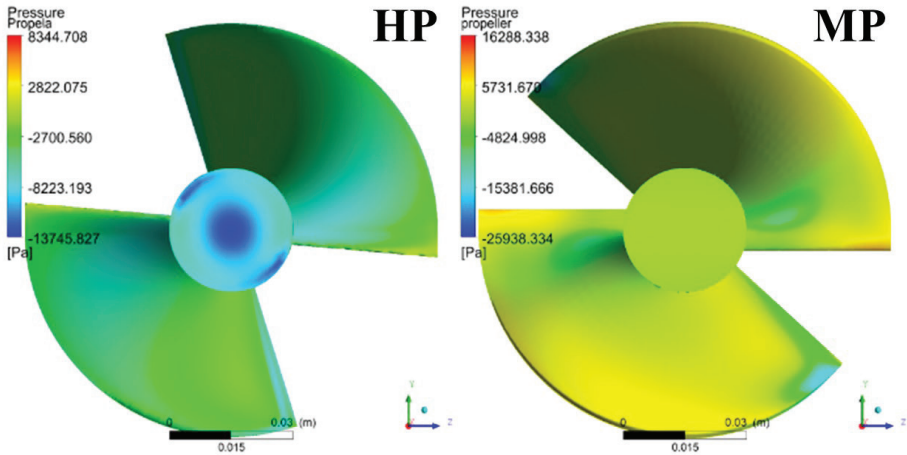


(b)

Figura 5. Continuación...

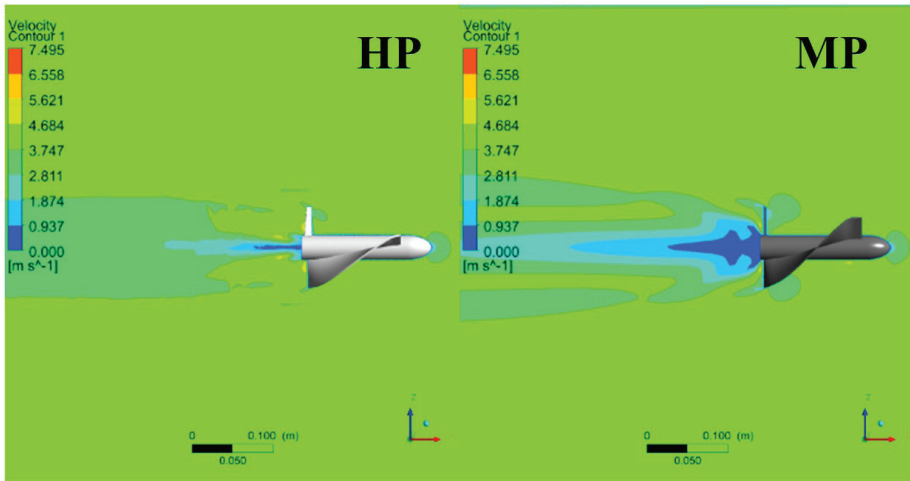


(c)

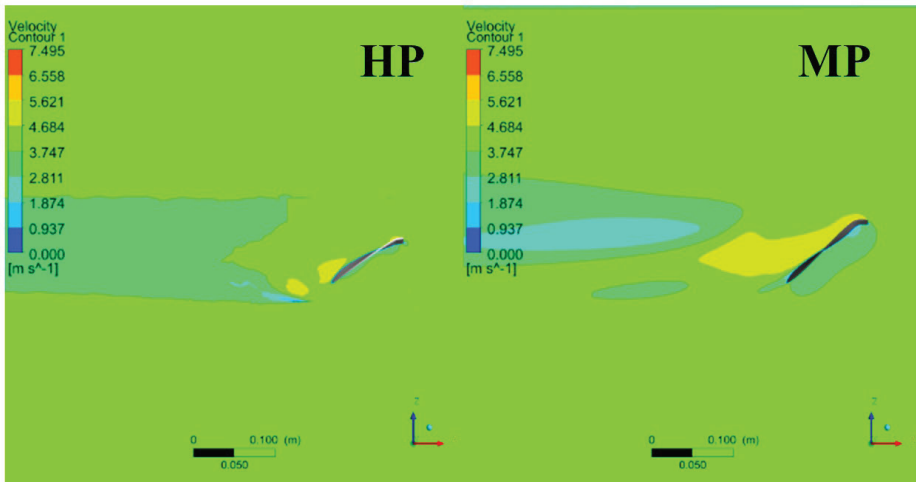


(d)

Figura 6. Contornos de velocidad

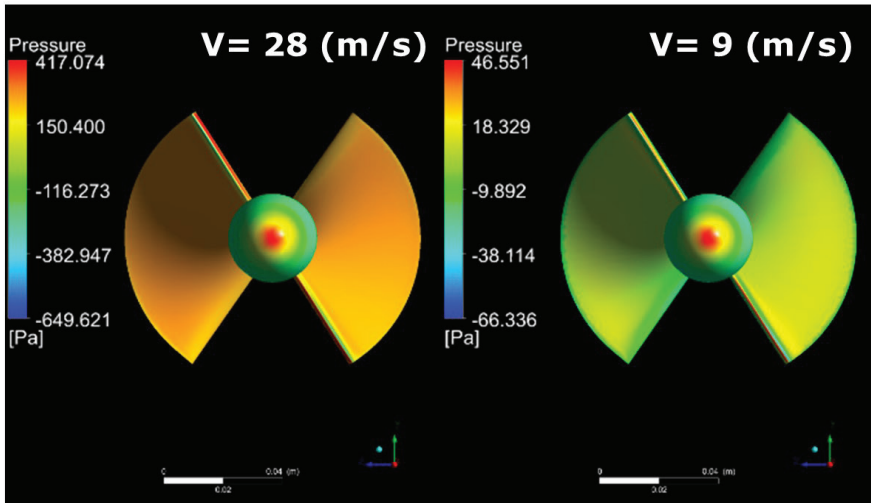


(a) plano de sección media

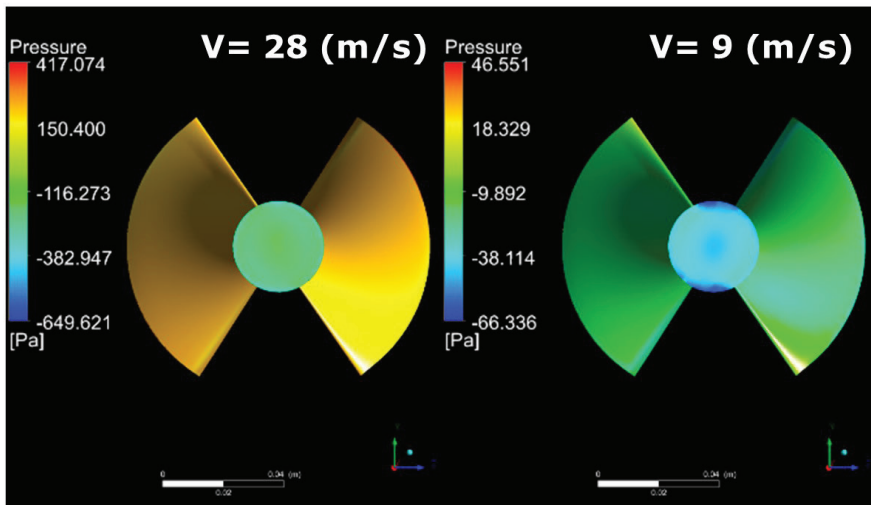


(b) plano sobre álabes

Figura 7. Ejemplo: gradientes de presión para una hélice HP para distintas velocidades de flujo utilizando aire

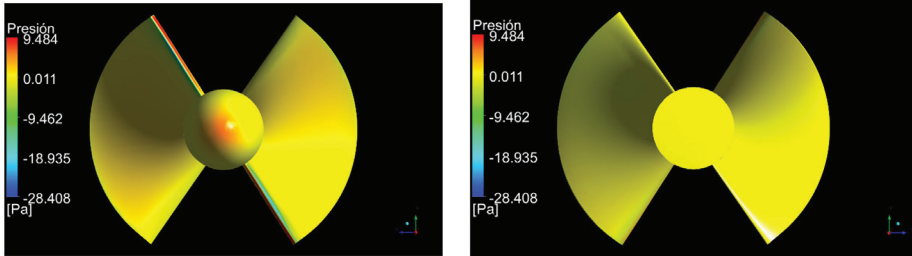


(a) lado presión



(b) lado succión

Figura 8. Contornos de presión para la hélice HP



(a) lado presión

(b) lado succión

Figura 9. Contornos de velocidad sobre un álabe de la hélice, detalle "a": separación de flujo sobre el borde de ataque

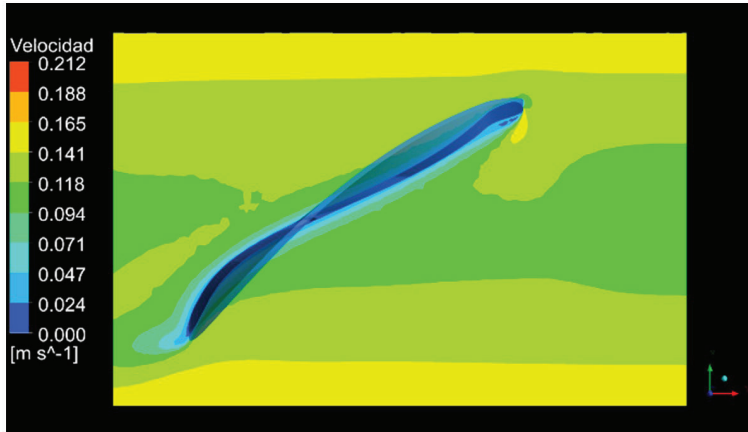
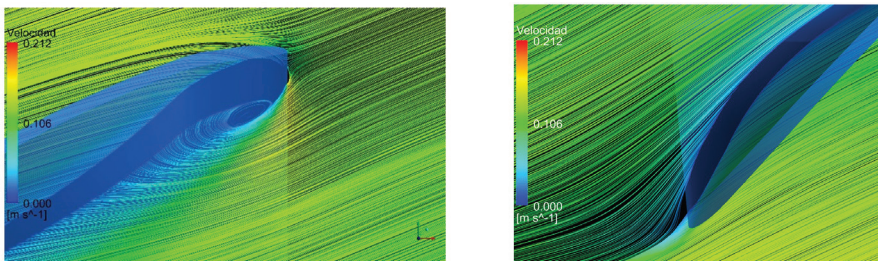


Figura 10. Líneas de corriente sobre el álabe



(a) borde de ataque

(b) borde de salida de la hélice HP

Figura 11. Líneas de corriente para una hélice HP para distintas velocidades de flujo

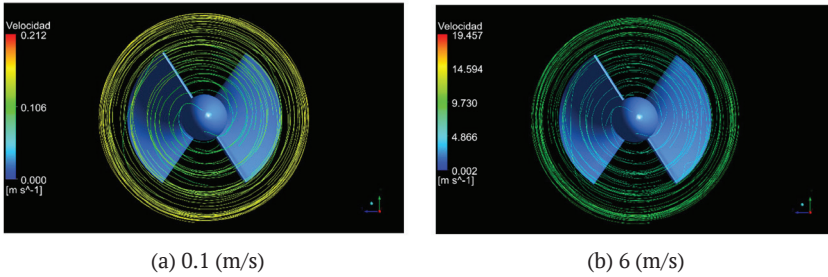


Figura 12. Líneas de corriente de hélice HP con una velocidad de flujo de 6 (m/s)

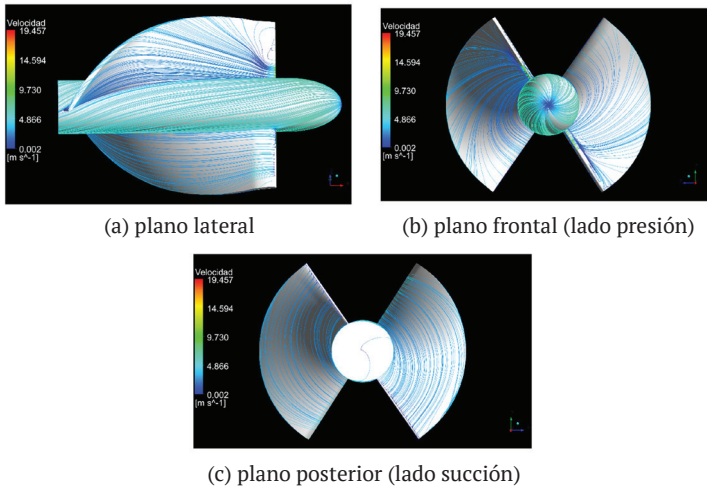
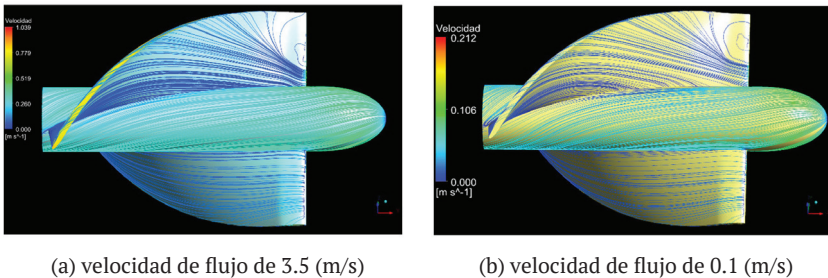


Figura 13. Líneas de corriente de hélice en plano lateral



Conclusiones

Las calibraciones de molinetes mediante CFD son hoy en día métodos novedosos y prácticos para realizar dicha tarea, no obstante, es imperativo conocer el torque de arrastre de los rodamientos, de tal forma que los datos obtenidos durante las simulaciones sean equiparables con las mediciones experimentales. La omisión de este paso significaría una curva de calibración en CFD con una ordenada al origen mayor.

Las simulaciones en CFD para el molinete con paso axial alto (HP) mostró una relación lineal entre su velocidad rotacional y la velocidad del flujo; no obstante, como se mostró en el posprocesamiento, la condición de flujo totalmente guiado solo fue dada por el lado presión de la hélice.

La calibración mediante CFD de la hélice con paso axial mediano (MP) supone un tiempo de cómputo mayor que las hélices de paso axial alto, esto es debido a la sensibilidad propia del instrumento a cambios en la velocidad de flujo.

Para obtener un perfil alar cuyas transiciones entre ángulos sean progresivas (curvas suavizadas) se debe diseñar la geometría utilizando mínimo cuatro puntos de diseño/control a lo largo de la altura total de la hélice, de tal forma que el punto superior y el punto inferior correspondan al ángulo de torsión (*camber*), mientras que los puntos intermedios correspondan con los ángulos de entrada y salida respectivamente.

El uso de modelos de turbulencia $k-\varepsilon$ y $k-\omega$ no es recomendado para la calibración mediante CFD de molinetes, dado que el primer modelo resuelve la parte turbulenta del fluido y el segundo tiene una mejor aproximación cercano a la capa límite, ambos no tienen una buena resolución para flujos turbulentos. De este modo, es recomendado por la bibliografía la aplicación del modelo de turbulencia *SST* (*Shear Stress Transport*), cuyo modelo tiene una mejor resolución cercano a la capa límite, así como la resolución de las zonas turbulentas del fluido.

Se recomienda un valor de $\gamma^+ = 1.5$ y una aproximación exponencial de elementos cercanos a la capa límite durante la discretización del dominio fluido.

El uso de puntos de diseño durante el proceso iterativo de la estimación del torque de arranque puede ser optimizado mediante el diseño de la hélice de la

Figura 1. Finalmente, el estudio de independencia de malla es óptimo cuando se posee un valor certero de la velocidad rotacional de la hélice para una velocidad de flujo dada.

Referencias

- Adamkowski, A., & Krzemianowski, Z. (2012). The comparative analysis of the current-meter method and the pressure-time method used for discharge measurements in the Kaplan turbine penstocks. *IOP Conference Series Earth And Environmental Science*, 15(2), 022021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/2/022021>
- Edmundo, P. G. (2017). *El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas*. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2185>
- Hersch, R. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 281-284. [https://doi.org/10.1016/s0955-5986\(02\)00047-x](https://doi.org/10.1016/s0955-5986(02)00047-x)
- IEC 60041:1991. (1991). *IEC* (3.a edición). <https://webstore.iec.ch/en/publication/154>
- ISO 2537:2007. (2007). *ISO* (4.ª edición). <https://www.iso.org/standard/37098.html>
- ISO 3354:2008. (2008). *ISO* (3.ª edición). <https://www.iso.org/standard/50326.html>
- ISO 3455:2021. (2021). *ISO* (3.ª edición). <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/22/72298.html?browse=ics>
- ISO 7194:2008. (2008). *ISO* (2.ª edición). <https://www.iso.org/standard/50627.html>
- ISO 748:2021. (2021). *ISO* (5.a edición). <https://www.iso.org/standard/72754.html>
- Mattas, D., & Libuše, R. (2013). Influence of water temperature on results of current-meter calibration and measurement. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61, 208-213. <https://doi.org/10.2478/johh-2013-0027>

- Mohammad, H. (2016). *Numerical and experimental study of effects of geometrical parameters on propeller-type current-meters* [M. Sc. thesis, University of Tehran]. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2043.2402>
- Mohammad, H. (2020). Analytical and numerical study of fluid in propeller-type current-meters. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2020.13.2.437>
- Mohammad, K., & Sayed, N. (2016). *The influence of the geometrical parameters of propeller-type current-meter on its performance*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3486.4325>
- Proulx, G. (2011). *Hydro-Québec experience with discharge measurement in short converging intake*. Hydro-Québec.
- Proulx, G. (2016). *Determination of hydraulic turbine efficiency by means of the current meter method*.
- Reeb, B., Dubois, G., Proulx, G., Candel, I., & Ioana, C. (2015). Flow Tests Lead to Increased Efficiencies and Benchmark Measurements. *Hydro Review*, 34(6). <https://hal.science/hal-01238730>
- Rolandez, G. (2014). Discharge measurements at La Rance tidal power plant using current meters method. *International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements*.
- Steller, J. (2010). *Performance tests of hydraulic units in low-head small hydropower installations*. Hidroenergia.
- Suna, G., & Lin, S. (2013). Analysis of viscosity effect on turbine flowmeter performance based on experimentals and CFD simulations. *Flow Measurements and Instrumentation*, 34, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.016>
- Wang, B., Zhang, N., Cao, Q., & Du, Y. (2018). Evaluation approach to dynamic characteristic of turbine flowmeters considering calibration system response. *Flow Measurement and Instrumentation*, 64, 126-132. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.018>

Efecto del pH de un acero microaleado doble fase

Enrique de Jesús Moreno Carpintero,^a Erik López García,^{b*} Miguel Ángel Chagolla-Aranda,^c Romeo Emmanuel Núñez Gómez,^a Miguel Ángel Chagolla-Gaona,^a Erika Darnely Rojas Ayala^d

Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos al estudiar un acero microaleado doble fase en una solución saturada de NaCl, y variando su pH, de 3, 7 y 12. La valoración electroquímica consistió en someter una probeta a tensión dentro de una celda electroquímica (con solución saturada de NaCl) hasta la ruptura y usando la técnica electroquímica de Ruido Electroquímico y Curvas de polarización. Para la caracterización superficial se usó un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). Las series de tiempo obtenidas mostraron que a diferentes medios de pH el comportamiento es también diferente, siendo este un medio ácido, neutro y alcalino. El parámetro estadístico del índice de localización (LI), nos dio como resultado una corrosión mixta.

Palabras clave: pH, acero, microaleado, doble fase, electroquímica.

^a Departamento de Metal-Mecánica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec.

^b Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec.

^c Departamento de Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec.

^d Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnológico Nacional de México, CENIDET.

* Autor de correspondencia: erik.lg@zacatepec.tecnm.mx

Abstract

The present work shows the results obtained by studying a double-phase microalloyed steel in a saturated NaCl solution, and varying its pH, from 3, 7 and 12. The electrochemical evaluation consisted of subjecting a specimen to tension within an electrochemical cell (with saturated NaCl solution) until breakdown, and using the electrochemical technique of Electrochemical Noise and Polarization Curves. Surface characterization used a scanning electron microscope (SEM). The time series obtained showed that at different pH media the behavior is also different, this being an acidic medium, a neutral medium, and an alkaline medium. The statistical parameter of the localization index (LI) resulted in mixed corrosion.

Keywords: pH, steel, microalloyed, double phase, electrochemistry.

Introducción

En la actualidad, el avance tecnológico en todos los campos es de vital importancia en las ciencias. En los últimos años el esfuerzo ha sido mayúsculo a la investigación de nuevos aceros capaces de tener una alta resistencia con la cuál puedan proveer propiedades mecánicas adecuadas según la aplicación que deseemos darle (Hernán Lorusso et al., 2008; Huerta, 2018; Morales Cruz, 2023). Dicha demanda es normalmente utilizada para la industria automotriz, debido a que se busca tener estructuras en los autos más resistentes, maleables y a su vez que cuando estas sean impactadas, no dañen al ser humano; se consideran también los sectores de la fuerza armada y navales (García-Jacomino et al., 2022; Pérez Fierro, Rodríguez Gonzalez et al., 2021; Pérez Fierro, Sandoval Pérez et al., 2020).

Los materiales usados en la industria automotriz han ido cambiando constantemente debido a que, para disminuir la gasolina, se necesita reducción del peso del vehículo, asimismo, se debe de cuidar la seguridad de los pasajeros, las emisiones contaminantes, además de otros factores a considerar.

Para disminuir el peso de los vehículos y aumentar la seguridad, se han implementado nuevos materiales que se consideran más ligeros sin sacrificar la resistencia al impacto. Algunos de estos son aluminio y magnesio.

Hay ocasiones en que al someter un material a una acción conjunta de esfuerzos y tracción y, sobre todo, a un medio corrosivo en específico, este sufre un fenómeno denominado corrosión bajo tensión (CBT) debido a que presentan ciertas fisuras y rupturas internas a niveles muy bajos, hablando mecánicamente (Pozo Mares, 2019; Gasent, 2020).

Es importante el papel que juegan los materiales al ser susceptibles al agrietamiento por corrosión y esfuerzo (ACE). Existen tres condiciones para que un material se fracture por ACE: *a*) un medio ambiente agresivo, *b*) existencia de esfuerzos a tensión y *c*) un material susceptible.

Es bien sabido que estructuras como la martensita sin revenir suelen ser susceptibles a la fragilización por hidrógeno en soluciones con cloros, mientras que estructuras perlíticas suelen ser propensas a la falla por disolución (corrosión) anódica. En estas dos microestructuras, a medida que el potencial de protección electroquímico aplicado es más negativo, el mecanismo se da por fragilización por hidrógeno. Por otro lado, si es más positivo, se dice que el mecanismo es por disolución anódica (Rodríguez-Aparicio, s. f.).

Los aceros microaleados se conocen por tener una alta resistencia y baja aleación (HSLA), estos tienen un contenido bajo en carbono compuesto de pequeños elementos aleantes con los cuales obtienen esfuerzos mayores de 275 MPa (40 ksi) en la condición de laminado o normalizado. La principal acción de este elemento aleante es endurecer la ferrita por medio del refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y por solución sólida. Los aceros HSLA también se desarrollaron para hacer forjas bainíticas de bajo carbono (Tengalia, 2020).

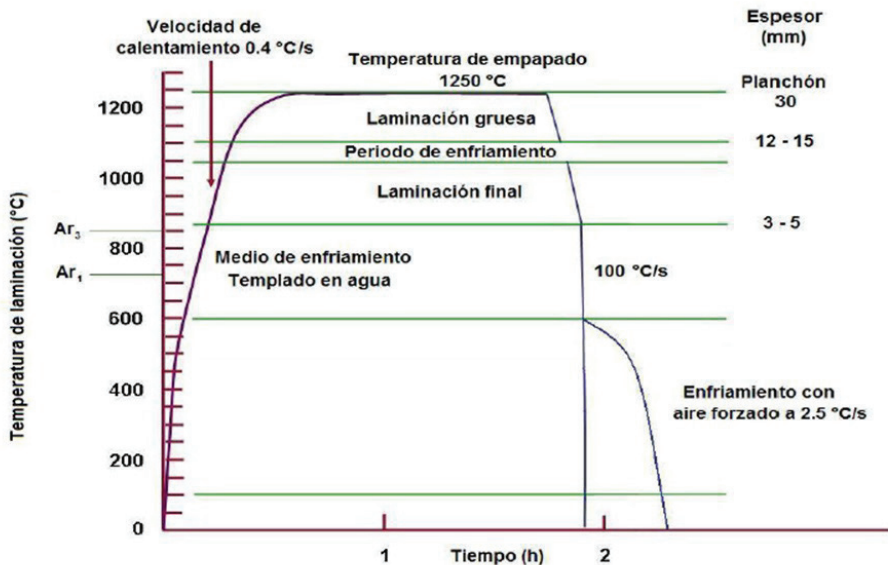
Dentro de los aceros existen diversas categorías como aceros de desgaste, aceros laminados, aceros reducidos en pelita, aceros microaleados, aceros de ferrita acicular, aceros bainíticos, aceros martensíticos de bajo carbono, o aceros duales (Zuñiga Pineda, 2020; Pérez Aroca, 2021; Álvarez Alvarado, 2024).

Materiales y metodología

El tratamiento de recocidos intercríticos es ampliamente utilizado para producir una microestructura de fase dual en los aceros, conformada de ferrita y martensita. El tratamiento consiste en calentar las muestras a temperaturas entre A_{c1} y A_{c3} , es decir, en la región de dos fases (ferrita y austenita) durante un período determinado seguido de un temple en hielo, agua o aceite (Pérez Fierro, Villegas Hernández et al., 2021). Durante el enfriamiento, la fase austenita se transforma en martensita causando una microestructura dual, típica de los aceros del mismo nombre.

El acero dual investigado fue elaborado utilizando hornos de inducción al vacío en atmósfera inerte. Placas semilaminadas de 30 mm de espesor fueron recalentadas a aproximadamente 1250 °C durante 45 minutos y laminadas en caliente, quedando al final de 3 mm de espesor, terminando aproximadamente a 900 °C. Posteriormente, la velocidad de enfriamiento fue de 100 °C/s hasta

Figura 1. Proceso de placa de llegada del acero dual



aproximadamente 600 °C donde el enfriamiento total se llevó a cabo. El proceso se muestra en la Figura 1 y la composición química del acero dual, en la Tabla 1.

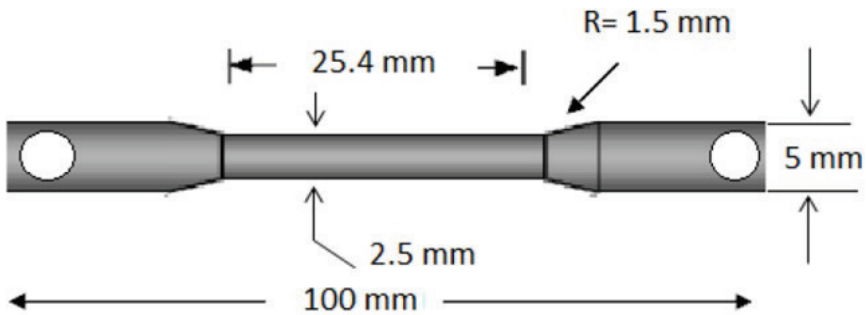
Tabla 1. Composición química del acero en estudio

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
% Peso	0.085	0.034	1.5	<0.000	<0.000	0.601	0.043
Elemento	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
% Peso	0.012	0.054	0.007	0.032	0.033	0.004	0.0004

Probetas de ensayo

Para el acero microaleado dual, primeramente, se maquinaron probetas para pruebas a velocidad de deformación lenta SSRT y bajo la norma ASTM370, 1990 (Figura 2).

Figura 2. Probeta del acero microaleado dual, según Norma ASTM370, 1990



Soluciones y temperaturas de trabajo

Como medio acuoso se utilizó la solución de NaCl al 26 %, dicha solución fue utilizada para las diferentes pruebas (un temple a 750 °C; un temple a 750 °C y revenido a 260 °C, y un temple a 750 °C y revenido a 400 °C) y en un medio con

pH 7. Posteriormente, se hicieron las mismas pruebas variando el pH a 3 y, por último, se hizo con un pH 12.

Equipo para pruebas a la tensión

Para la prueba de corrosión en presencia de esfuerzos, se utilizó una máquina universal, como se muestra en la Figura 3, dicha máquina consiste en un simple mecanismo de un motor conectado a un tren de engranes que hacen girar a un tornillo sin fin y que con ello ayuda a tensionar la muestra a velocidad de deformación lenta de $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Figura 3. Equipo para pruebas en presencia de esfuerzos



Resultados

Se realizó un microanálisis químico elemental (EDS) del acero dual con el objetivo de que cumpliera con la característica principal de ser un acero doble fase y que también se tratara de un acero microaleado (Figura 4).

Figura 4. Microanálisis químico elemental (EDS) de acero dual, a) zona blanca y b) zona oscura de la Figura 5

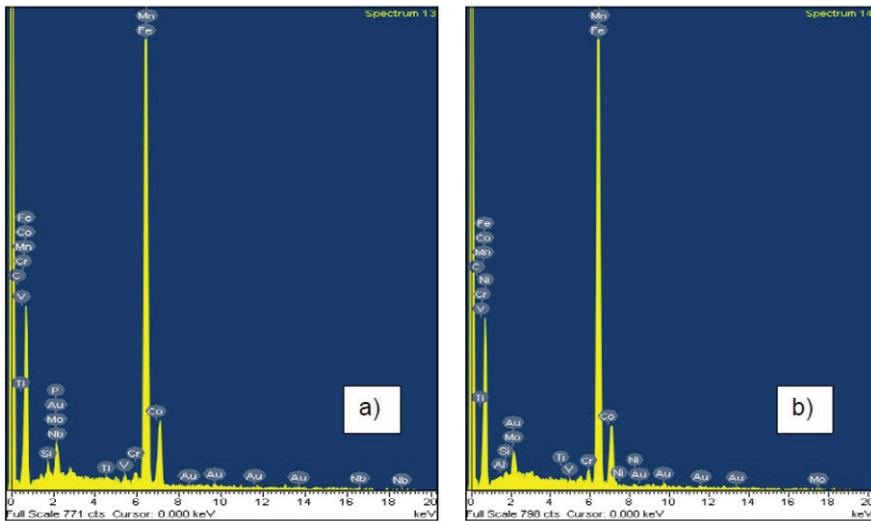
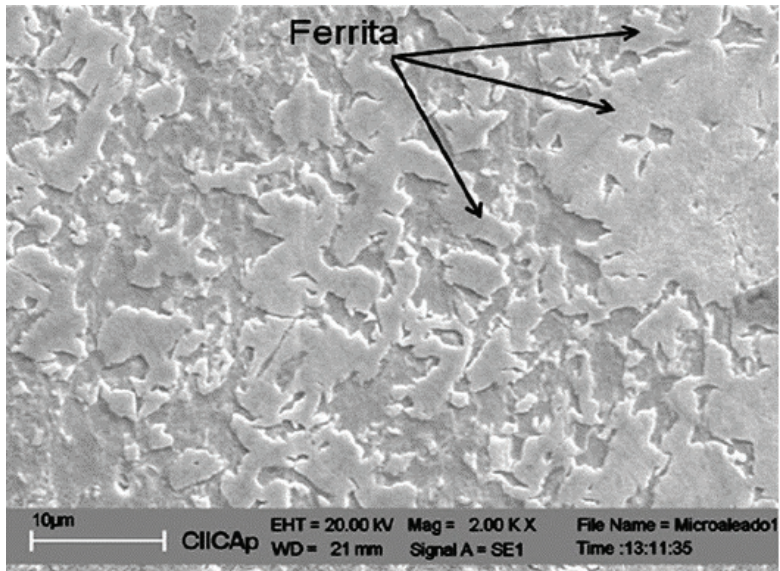
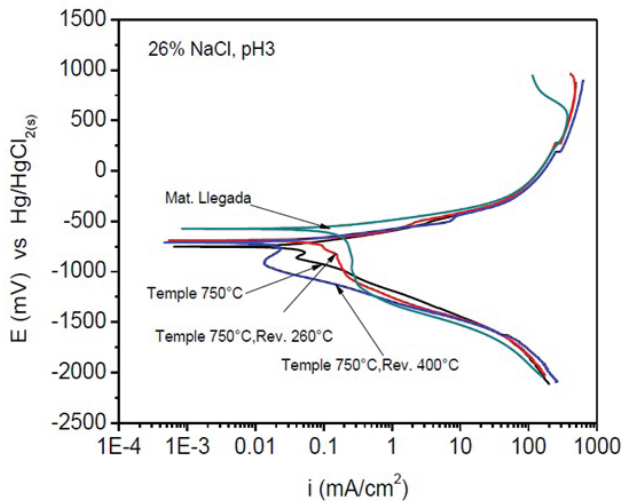


Figura 5. Micrografía del acero dual en experimentación, donde se revelan sus fases



En la Figura 5, se observa que existen dos fases, con lo cual se puede constatar que se trata de un acero doble fase. La zona más blanca se ve claramente que se trata de una zona ferrítica, mientras que la zona oscura, se puede decir que, se trata de una zona con martensita. Por lo tanto, se observa que el mejor tratamiento térmico fue a la que se le aplicó un temple a 750 °C y revenido a 260 °C en solución de NaCl a pH 3, siendo esta la que mostró ser menos susceptible a la corrosión (Figura 6).

Figura 6. Efecto del tratamiento sobre las curvas de polarización potenciodinámica templado a 750 °C comparado con el material de llegada en una solución de NaCl (26 %) a pH 3



La Figura 7 muestra el efecto del tratamiento térmico sobre las curvas de polarización en una solución del 26 % en NaCl con pH 12, en donde no hay evidencia de la formación de una capa pasiva, solo se observa un comportamiento activo con una densidad de corriente límite anódica en altos valores de sobrepotencial anódico.

En la Figura 8, no se observa evidencia de la formación de una capa pasiva, únicamente se presenta un comportamiento activo con una densidad de corriente límite anódica en altos valores de sobrepotencial anódico.

Figura 7. Efecto del tratamiento sobre las curvas de polarización potenciodinámica templado a 750 °C comparado con el material de llegada en una solución de NaCl (26 %) a pH 12

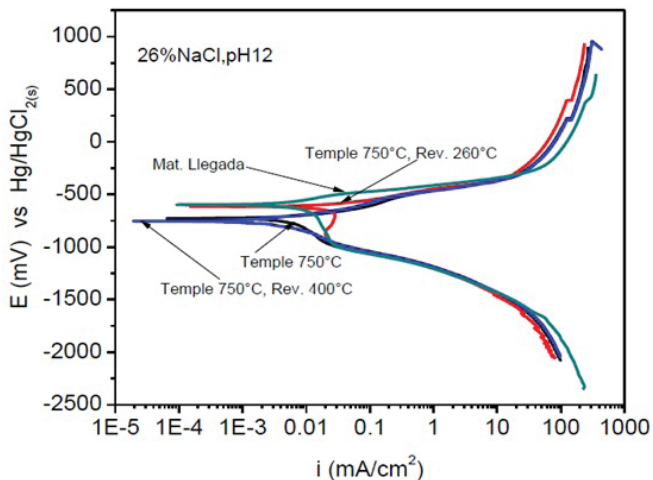
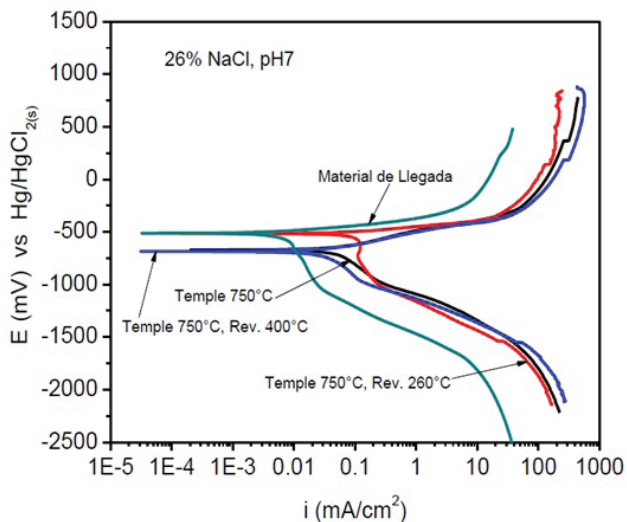


Figura 8. Efecto del tratamiento sobre las curvas de polarización potenciodinámica templado a 750 °C comparado con el material de llegada en una solución de NaCl (26 %) a pH 7



Esta densidad de corriente límite es causada por la difusión del electrolito a través de una capa de productos de corrosión, siendo la más alta para el acero templado a 750 °C sin revenido, mientras que el valor más bajo fue para el acero en la condición de llegada.

Conclusiones

Al aplicarle el temple a 750 °C a las muestras se produjo una microestructura dual de martensita con ferrita casi pura, observando que eran medianamente susceptibles a la corrosión bajo tensión, excepto a valores bajos de pH 3.

Finalmente, las condiciones ambientales de bajos valores de pH en la reacción de evolución de hidrógeno, nos da información que el mecanismo de corrosión bajo tensión sea por fragilización por hidrógeno.

Referencias

- Álvarez Alvarado, P. I. (2024). *Aceros Colados Bainíticos Libres de Carburos: Correlación entre Propiedades Mecánicas y Microestructura*. Tesis de Ingeniería en Materiales. Universidad Nacional de Mar del Plata. <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/865>
- García-Jacomino, J. L., Ferraresi, V. A., Cruz-Crespo, & A., Scotti, A. (2022). Influencia de la Atmosfera de N₂ en los Parámetros Operacionales y la Microestructura del Depósito en el Recargue Duro con FCAW. *Revista Soldagem & Inspeção*, 27. <http://doi.org/10.1590/0104-9224/si27.02>
- Gasent, S. M. (2020). *Corrosión bajo tensión en la soldadura de acero inoxidable en ambientes corrosivos. 2019-2020*. Tesis en Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/152328>
- Huerta, J. (2018). *Caracterización de un acero twip aleado para aplicaciones que sufren desgaste abrasivo en la industria minera*. Tesis Maestría en Ciencias e Ingeniería de los Materiales. Universidad Autónoma de Zacatecas. <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/2005>

- Lorusso, H., Burgueño, A., & Svoboda, H. G. (2008). Propiedades Mecánicas y Caracterización Microestructural de Diferentes Aceros Dual-Phase. CONAMET/SAM-2008. <https://www.researchgate.net/publication/266877347>
- Morales Cruz, E. U. (2023). *Efecto de bajos contenidos de Al en la microestructura y propiedades mecánicas de aceros TWIP medio carbono*. Tesis de Doctorado en Ciencias de los Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/handle/231104/3156>
- Pérez Aroca, V. (2021). *Influencia de los microaleantes en las transformaciones de un acero de fase compleja endurecible en prensa utilizado en automoción*. Trabajo de fin de máster interuniversitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras. Universidad de Oviedo. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/61362>
- Pérez Fierro, L. M., Rodríguez Gonzalez, E. A. M., Torres Hernández, Y. G., & Altamirano Torres, A. (2021). Influencia de la temperatura de bainitizado en la microestructura y comportamiento mecánico de un acero grado maquinaria. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 7(7), 363-366. <http://hdl.handle.net/11191/9310>
- Pérez Fierro, L. M., Sandoval Pérez, F., Altamirano Torres, A., Pérez Fierro, L. M., Sandoval Pérez, F., & Altamirano Torres, A. (2020). Influencia de la microestructura inicial en el grado de esferoidización en aceros AISI/SAE1045 y O-1. *Revista Tendencias En Docencia e Investigación En Química*, 6(6), 57-79. <http://zaloamati.azc.uam.mx//handle/11191/7745>
- Pérez Fierro, L. M., Villegas Hernández, Á. de J., Torres Hernández, Y. G., & Altamirano Torres, A. (2021). Efecto de la temperatura de normalizado sobre la microestructura y propiedades mecánicas de un acero AISI 1045. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 7(7), 57-79. <http://zaloamati.azc.uam.mx//handle/11191/9309>
- Pozo Mares, A. del. (2019). *Evaluación del efecto térmico en un acero microaleado sometido a agrietamiento por corrosión bajo tensión*. Tesis de Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://148.218.65.90/xmlui/handle/20.500.12055/1796>

- Rodríguez-Aparicio, R., Díaz, A., Medina, L., Alegre, J. M., & Cuesta, I. I. (S. f.). *Efecto de la presión de ensayo y de la orientación microestructural en la fragilización por hidrógeno del acero dúplex 2205 laminado Laminado*. <https://gef2024.webs.upv.es/papers/26.pdf>
- Tengalia, N. E. (2020). *Aceros colados bainíticos libres de carburos: Estudio Solidificación, Cinética de Transformación y propiedades mecánicas*. Tesis de Doctorado en Ciencias de Materiales. Universidad del Mar del Plata. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/92051>
- Zuñiga Pineda, L. F. (2020). *Efecto del proceso termomecánico en la microestructura de un acero de fase compleja (Complex Phase Steel, CP)*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz. Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/25708>

Comparación en la eficiencia de degradación de una mezcla de dos colorantes tipo Azo mediante plasma y diferentes catalizadores de hierro

Rubí Brito Díaz,^a Esteban Montiel Palacios,^a Yessica Flor Cervantes Adame,^a Josefina Vergara Sánchez,^b Ángel Tlatelpa Becerro,^c Aarón Gómez Díaz,^d Pedro Guillermo Reyes Romero,^d Horacio Martínez Valencia,^e César Torres Segundo^{a*}

Resumen

Los efluentes de la industria textil son complejas mezclas de colorantes y otros compuestos químicos que dificultan su completa mineralización por mecanismos convencionales. En este trabajo se presentan los resultados del tratamiento por plasma de soluciones preparadas con la mezcla de los colorantes negro ácido 210 (NA210) y negro ácido 52 (NA52), cada uno a una concentración de 0.5 mM y a un volumen inicial de 250 mL de la solución, y utilizando tres catalizadores diferentes: limaduras de hierro (Fe^{2+}), sulfato ferroso (FeSO_4) y sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; el plasma es generado a presión atmosférica sobre la superficie de la solución a tratar. La cinética del proceso de oxidación se determinó por espectrofotometría UV/VIS, análisis del comportamiento del carbono orgánico total (COT) y la determinación de demanda química de oxígeno (DQO). Durante el tratamiento, se monitorearon diferentes propiedades fisicoquímicas como la

^a Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^b Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^c Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^d Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.

^e Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

* Autor de correspondencia: cesar.torres@uaem.mx

conductividad eléctrica, el pH y la temperatura. Los resultados muestran una degradación mayor al 95 % en 180 minutos de operación del reactor de plasma.

Palabras clave: plasma, colorante, mezcla, COT, hierro.

Abstract

Textile industry effluents are complex mixtures of dyes and other chemical compounds that hinder their complete mineralization by conventional mechanisms. This work presents the results of plasma treatment of solutions prepared with the mixture of the dyes acid black 210 (NA210) and acid black 52 (NA52), each at a concentration of 0.5 mM at an initial volume of 250 mL of the solution, and using three different catalysts: iron filings (Fe^{2+}), ferrous sulfate (FeSO_4) and ferric sulfate $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; the plasma is generated at atmospheric pressure on the surface of the solution to be treated. The kinetics of the oxidation process were determined by UV/VIS spectrophotometry, analysis of the behavior of total organic carbon (TOC) and determination of chemical oxygen demand (COD). During the treatment, different physicochemical properties such as electrical conductivity, pH and temperature were monitored. The results show a degradation greater than 95 % in 180 minutes of operation of the plasma reactor.

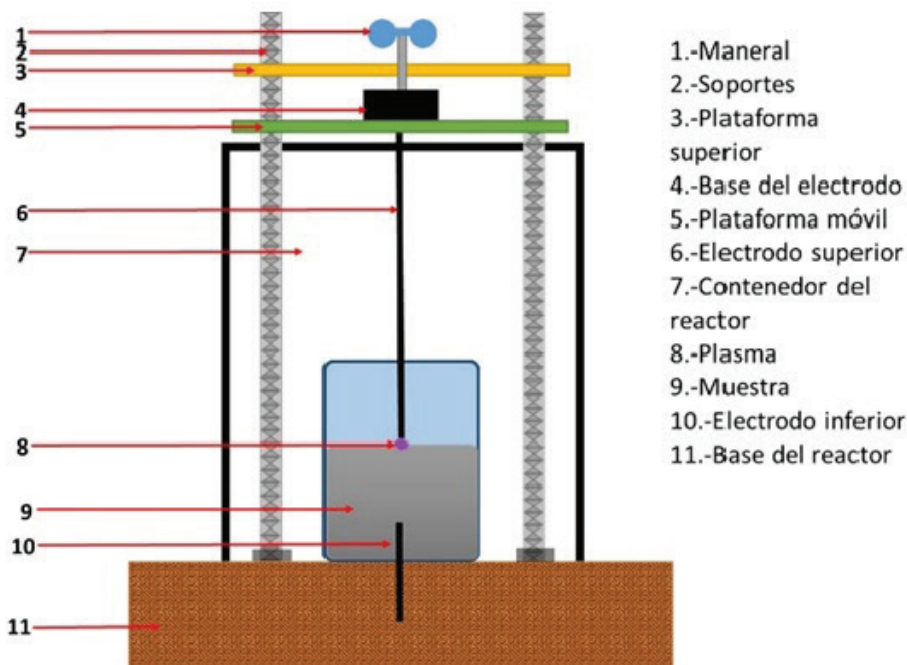
Keywords: plasma, dyes, mixture, TOC, iron.

Introducción

Durante miles de años el ser humano ha utilizado colorantes para diversas aplicaciones. Antiguamente se obtenían en pequeñas cantidades a partir de insectos o plantas. Una de las desventajas que tenían era que solo contaban con un rango limitado de colores y estos se desvanecían con la luz del sol y el lavado. Los colorantes son sustancias que tienen como finalidad dar color a cualquier material, como los textiles, cosméticos, plásticos e impresiones (Deng & Brillas, 2023). Sin embargo, la mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil

presentan resistencia a degradarse ante ciertos tratamientos convencionales. La eliminación de los colorantes del agua no solo es un problema ambiental, sino también un desafío actual. Aunque existen muchos métodos, estos no terminan de ser adecuados, baratos o eficaces, y es que estos contaminantes se deben eliminar de manera efectiva, de forma tal que no generen subproductos peligrosos (Chowdhury et al., 2023).

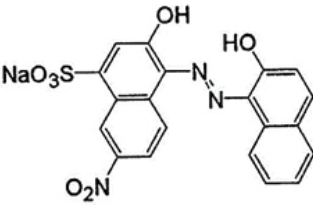
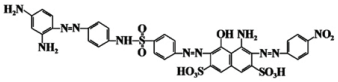
Figura 1. Reactor para tratamiento con plasma a presión atmosférica



Existen diversos tipos de colorantes. En la familia de colorantes tipo Azo, se encuentran los colorantes NA210 (negro ácido 210) con fórmula química $C_{34}H_{25}K_2N_{11}O_{11}S_3$ y NA52 (negro ácido 52) con composición química $C_{20}H_{12}N_3O_7NaS$, los cuales son usados en diferentes industrias que producen pintura, cerámica, plástico, cuero, tinta, además de la industria textil en el teñido de fibras. Este

tipo de colorantes presentan una alta resistencia al lavado, por lo que su eliminación de las aguas residuales no se puede realizar por métodos convencionales, siendo necesario el uso de procesos avanzados de oxidación (PAO).

Tabla 1. Estructura molecular y propiedades de los colorantes NA52 y NA210

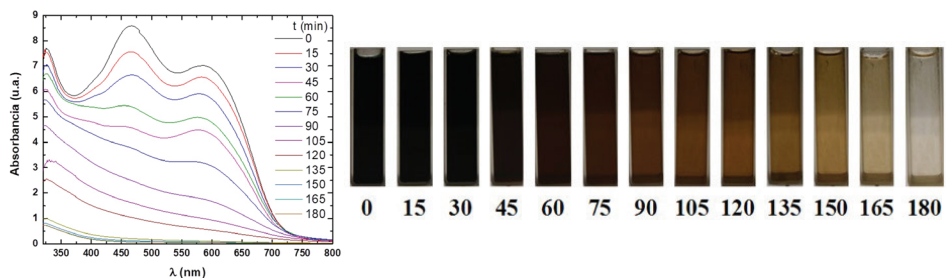
Colorante	Estructura molecular	Peso molecular (g/mol)	Longitud de onda λ_{max} (nm)
NA52 $C_{20}H_{12}N_3O_7NaS$ Color Index No. 15711 CAS No. 5610-64-0 (Chowdhury et al., 2023)		461.38	570
NA210 $C_{34}H_{25}K_2N_{11}O_{11}S_3$ Color Index No. 300825 CAS No. 99576-15-5 (Alarcón-Hernández et al., 2022)		938.02	604

Dentro de los PAO se ha demostrado que el tratamiento por plasma a presión atmosférica resulta tener alta eficiencia de degradación de diversos contaminantes debido a que combina diferentes efectos físicos y químicos aplicados a la solución tratada, como la pirolisis, la fotólisis por radiación UV, la cavitación electrohidráulica, así como la formación de especies oxidantes las cuales favorecen la descomposición de contaminantes, como los radicales H, O, $\bullet OH$ y moléculas H_2O_2 , O_3 , entre otras (Alarcón-Hernández et al., 2022). En este trabajo se presenta el estudio de la degradación y decoloración de la mezcla de colorantes tipo Azo NA210 y NA52 (Tabla 1) al interactuar con un plasma generado a presión atmosférica en la interfase líquido-aire de la solución tratada.

Materiales y metodología

Se utilizó un reactor tipo Batch (Figura 1), diseñado y construido en colaboración con el Laboratorio de Física Avanzada de la Facultad de Ciencias de la UAEMex, para producir plasma a presión atmosférica sobre la superficie de la muestra líquida. El plasma fue generado con una fuente DC (HP Mod. 6525A, 4.0 kV-50 mA), a una potencia constante de 80W. Se realizó el tratamiento de muestras con mezcla de colorante NA52/NA210 [50 %/50 %] a una concentración inicial de 0.5 mM, cada uno, con un volumen fijo de 250 mL de la solución.

Figura 2. Espectro de absorción de la mezcla NA52/NA210 a diferentes tiempos de tratamiento y decoloración de la solución usando Fe^{2+}



La degradación de la mezcla de colorantes resulta ser compleja. Es por ello que en este estudio se utilizan tres diferentes catalizadores para tratar de acelerar el proceso de degradación y lograr identificar cuál de los catalizadores es más eficiente en el tratamiento por plasma.

Se probó con dos catalizadores en solución acuosa y uno más en limadura. Los catalizadores sulfato ferroso y sulfato férrico se prepararon con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para que se mantuvieran en medio ácido y, de esta manera, se pudiera acelerar y mejorar la producción de radicales hidroxilos al adicionarlos a las soluciones con la mezcla de colorantes, e interactuar con el peróxido de hidrógeno generado por el plasma. La concentración del catalizador de sulfato ferroso fue 50 mM de FeSO_4 + 0.1 M de H_2SO_4 , y para el sulfato férrico, 50 mM de

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ + 0.1 M de H_2SO_4 ; el tercer catalizador fue limadura de hierro que es de grado analítico y se encuentra en polvo.

Para comprender los cambios fisicoquímicos que ocurren en la solución durante el proceso de mineralización de los colorantes, al inicio y durante cada uno de los tratamientos se realizan mediciones de pH, conductividad eléctrica, temperatura y absorbancia. Para la determinación del COT se utilizó el método HACH, utilizando viales de rango medio de 15-150 mg/L y un espectrofotómetro marca HACH Mod. 3900. La conductividad eléctrica, pH y temperatura fueron medidos usando un potenciómetro marca HACH modelo HQ40D. Las mediciones se llevaron a cabo cada 15 minutos durante 180 minutos.

Resultados

En la Figura 2 se presenta la absorbancia inicial de la mezcla de colorantes y su disminución en función del tiempo de tratamiento. Es posible observar que la muestra comienza a decolorarse en función del tiempo de exposición al plasma; el pico de máxima absorbancia está en 467 nm.

El porcentaje de degradación del colorante en función del tiempo de exposición con el plasma se observa en la Figura 3, el cual alcanzó en 180 minutos un valor 95.4 % para $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 97.6 % para FeSO_4 y 99.2 % para Fe^{2+} , lo cual indica que el tratamiento es eficiente para cualquiera de los catalizadores, con la posibilidad incluso de usar limadura de hierro que puede provenir de desechos industriales como catalizador.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de DQO y COT durante el tratamiento de la mezcla de colorantes con limadura de hierro (Fe^{2+}) cada 15 minutos, los valores iniciales son 144.1 y 324.3 mg/L respectivamente. Con el tratamiento por plasma el colorante se oxida y se mineraliza en forma de CO_2 y H_2O , lo cual se infiere por medio de los valores finales de DQO y COT, 15 mg/L y 26 mg/L, respectivamente. En la Figura 4 se muestran también los valores del tratamiento sin catalizador, comprobando que el catalizador acelera la eliminación del contaminante. A diferencia de los tratamientos en los que se utilizaron los catalizadores FeSO_4 y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, en las muestras tratadas con limadura de hierro (Fe^{2+})

Figura 3. Porcentaje de degradación vs. tiempo de tratamiento para cada catalizador

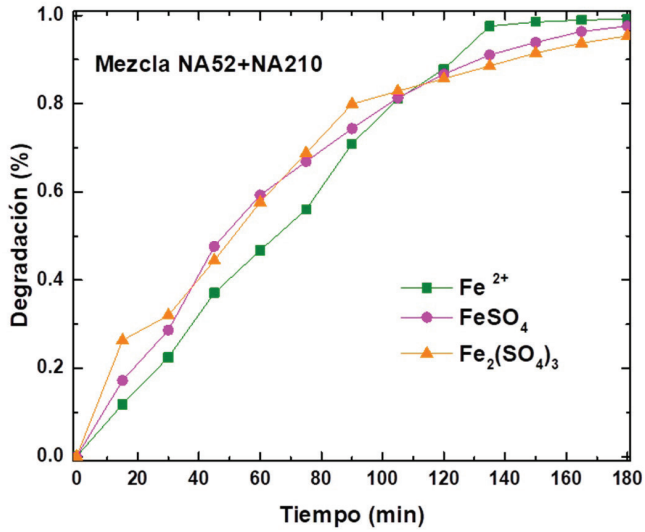
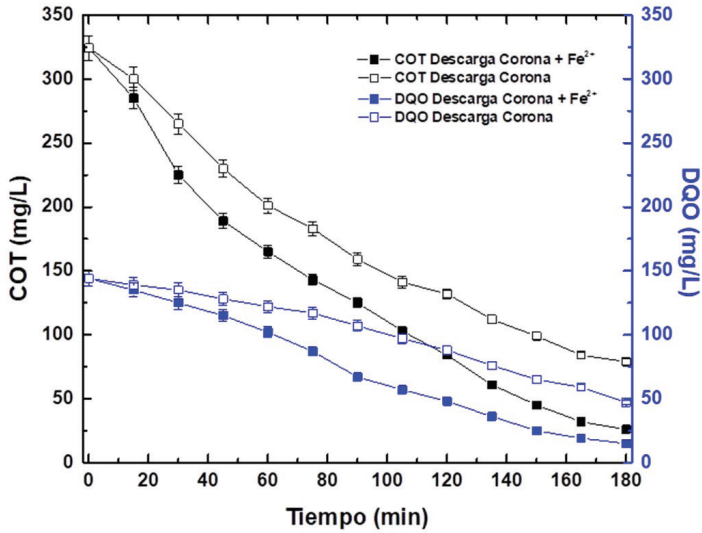


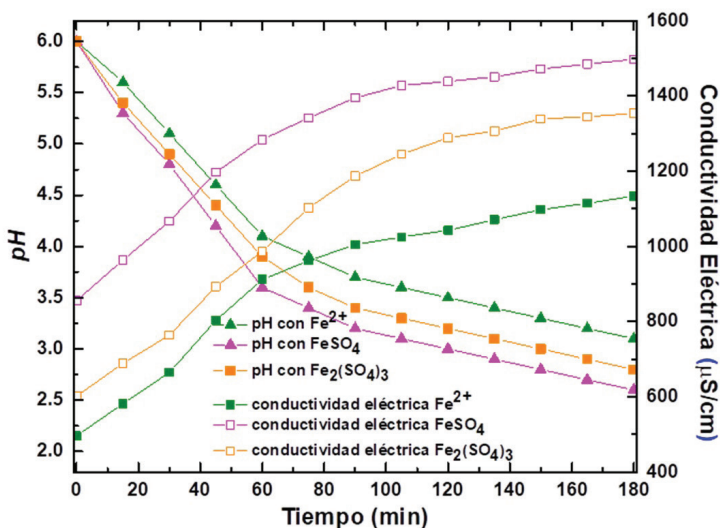
Figura 4. Gráfica de DQO y COT vs. tiempo de tratamiento



fue posible recuperar el catalizador; esto podría ser favorable para la reutilización del agua tratada.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento del pH y la conductividad eléctrica durante el tratamiento de la mezcla de colorantes con plasma asistido por diferentes catalizadores. A un mismo pH inicial (pH = 6), se puede observar que el valor de pH disminuyó menos y la conductividad eléctrica fue menor cuando se usó hierro en limadura, con valores finales de 3.1 y 1134 $\mu\text{S}/\text{cm}$ después de 180 minutos de tratamiento.

Figura 5. pH y conductividad eléctrica durante el tratamiento de la mezcla de colorantes con cada catalizador



Conclusiones

Con los tres catalizadores fue posible realizar el tratamiento en un reactor tipo Batch de la mezcla de colorantes disueltos utilizando el plasma, alcanzando porcentajes de decoloración superiores al 95 %, debido a la efectiva mineralización de los colorantes. Los valores finales en los parámetros fisicoquímicos medidos, pH (3.1), conductividad eléctrica (1134 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperatura ($\approx 87^\circ\text{C}$) sugieren que el agua obtenida requiere un pretratamiento antes de que pueda ser vertida

en los cuerpos de agua o empleada para cualquier propósito. Después de 180 minutos de tratamiento, al utilizar limadura de hierro como catalizador, se obtuvo un mayor porcentaje de decoloración; además de ello, es posible recuperar el catalizador al final del tratamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los proyectos DGAPA [IN-02916], CONAHCYT [268644], PROMEP [103.5/13/6626], PRODEP [DSA/103.5/15/6986], PII-43/PIDE/2013 y 4307/2017/CI UAEMex.

Referencias

- Deng, F., & Brillas, E. (2023). Advances in the decontamination of wastewaters with synthetic organic dyes by electrochemical Fenton-based processes. *Separation and Purification Technology*, 316, 123764. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123764>
- Chowdhury, A. P., Anantharaju, K. S., Keshavamurthy, K., & Rokhum, S. L. (2023). Recent advances in efficient photocatalytic degradation approaches for Azo dyes. *Journal of Chemistry*, 2023, 1-24. <https://doi.org/10.1155/2023/9780955>
- Alarcón-Hernández, F. B., Montiel-Palacios, E., Fuentes-Albarrán, M. C., Tabarez-León, A., Gadea-Pacheco, J. L., & Tlatelpa-Becerro, A. (2022). Behavior of the AB52 dye degradation in liquid medium by different electrical power non-thermal plasma at atmospheric pressure. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(2), IA2793. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA2793>
- Cruz, D. R. S., de Jesus, G. K., Santos, C. A., Silva, W. R., Wisniewski, A., Cunha, G. C., & Romao, L. P. C. (2021). Magnetic nanostructured material as heterogeneous catalyst for degradation of AB210 dye in tannery wastewater by electro-Fenton process. *Chemosphere*, 280, 130675. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130675>

Sintonización y emisión múltiple de un láser de fibra óptica dopado con erbio, por medio de un interferómetro de fibra Mach-Zehnder

Romeo Emmanuel Núñez Gómez,^{a*} Alfredo Olarte Paredes,^a René Salgado Delgado,^a Areli Marlén Salgado Delgado,^a Jessica Nashelly Salgado Delgado,^a Enrique de Jesús Moreno Carpintero^a

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la sintonización y emisión múltiple de un láser de fibra óptica dopado con erbio que han sido logrados mediante la aplicación de curvatura controlada a un interferómetro Mach-Zehnder. El interferómetro se fabricó con dos segmentos concatenados de fibras ópticas adelgazadas. Por efecto de las características espectrales de modulación periódica del interferómetro, la emisión láser puede sintonizar en un rango de longitudes de onda entre 1563.705 nm a 1557.71 nm, al variar los intervalos de curvatura aplicada. Además, se observa la generación de emisión láser en doble longitud de onda en los rangos de 1534.24-1549.29 nm, 1544.61-1569.66 nm y 1556.86-1561.87 nm. Este láser exhibe una alta estabilidad temporal tanto en amplitud como en longitud de onda, con variaciones máximas de 1 dB y 0.3 nm, respectivamente. Finalmente, el láser alcanza una relación señal-ruido de ~40 dB en la mayoría de las longitudes de onda demostradas.

Palabras clave: láseres de fibra óptica, interferómetro Mach-Zehnder, adelgazamientos de fibra, sintonización, múltiple emisión.

^a Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec.

* Autor de correspondencia: romeo.eng1@gmail.com

Abstract

In this article, we present the results of tuning and multiple emissions of an erbium-doped fiber laser achieved by applying controlled curvature to a Mach-Zehnder interferometer. The interferometer was fabricated with two concatenated segments of tapered optical fibers. Due to the periodic modulation spectral characteristics of the interferometer, the laser emission can be tuned over a wavelength range from 1563.705 nm to 1557.71 nm by varying the applied curvature intervals. Also, dual-wavelength laser emission is observed in 1534.24-1549.29 nm, 1544.61-1569.66 nm, and 1556.86-1561.87 nm. This laser exhibits high temporal stability in amplitude and wavelength, with maximum variations of 1 dB and 0.3 nm, respectively. Finally, the laser achieves a signal-to-noise ratio of ~40 dB across most of the demonstrated wavelengths.

Keywords: fiber optic lasers, Mach-Zehnder interferometer, fiber tapering, tuning, multiple emission.

Introducción

Los láseres de fibra óptica se han convertido, en las últimas décadas, en una tecnología de fuentes fotónicas crucial en una variedad de aplicaciones, desde las telecomunicaciones, investigación, industria, sensado remoto, hasta la medicina (Nemova, 2024). Particularmente los láseres de fibra óptica dopados con erbio destacan por su eficiencia y capacidad para operar en el rango de longitud de onda de la tercera ventana de telecomunicaciones (1550 nm), con las menores pérdidas por transmisión, lo que los hace muy atractivos para los sistemas de comunicaciones ópticas (Wang, 2024). La capacidad de sintonización y emisión múltiple de estos láseres es una característica favorable que permite su uso en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), que aumentan la capacidad de transmisión de datos o en espectroscopia, al tener disponible diferentes longitudes de onda de una misma fuente de luz láser. Estas características se logran implementando elementos de fibra óptica en la

cavidad que son dependientes de la longitud de onda y funcionan como filtros espectrales. Dentro de los más comunes en la generación de láseres sintonizables y de múltiple longitud de onda se emplean rejillas de Bragg (Awang Lah et al., 2023), rejillas de periodo largo (Li, Chen et al., 2024), adelgazamientos concatenados (Li, Yan et al., 2022), fibras fotónicas (Zhao et al., 2024) o estructuras para interferencia multimodal (Guzman-Sepulveda & Castillo-Guzman, 2021). Particularmente, la implementación de interferómetros de fibra tipo Mach-Zehnder (IFMZ) en el diseño de láseres de fibra óptica ha demostrado ser una técnica efectiva para lograr la sintonización y emisión múltiple.

Un interferómetro IFMZ es un dispositivo que, en términos generales, divide y recombina un haz de luz, pudiendo inducir interferencias constructivas y destructivas que permiten el control preciso de las características del láser (Qin et al., 2021). Una forma práctica y muy popular de configurar un IFMZ, es la incorporación de dos adelgazamientos concatenados en una sección de fibra óptica monomodal. Este mecanismo incorpora modos de luz del núcleo hacia el revestimiento, los cuales adquieren una diferencia de fase en la interfaz aire-revestimiento para posteriormente reincorporarse al núcleo, generando el proceso de interferencia, el cual crea patrones de modulación periódica espectral. Este dispositivo presenta sensibilidad a perturbaciones físicas externas como estrés, curvatura, temperatura o índice de refracción, las cuales modifican las características espectrales del interferómetro, pudiendo modular y controlar la longitud de onda emitida por el láser, además que amplían las capacidades de sintonización del sistema. Por ejemplo, se han desarrollado láseres de fibra óptica dopados con erbio para obtener hasta tres emisiones múltiples empleando adelgazamientos en serie (Geng et al., 2023), múltiple emisión láser en láseres de tulio utilizando un espejo óptico no lineal en conjunto con una configuración de adelgazamientos concatenados (Li, Yan et al., 2022), en láseres pulsados dopados con erbio tipo Q-switch con sincronización y múltiple emisión lograda por un IFMZ basado en adelgazamientos (Anzueto-Sánchez et al., 2021).

Algunas otras configuraciones se han realizado con un enfoque en el sentido óptico de parámetros como la temperatura, en la cual los adelgazamientos se sumergen en glicerol, que es calentado para variar el índice de refracción y,

con ello, desarrollar un láser sintonizable (Martinez-Rios et al., 2015; Selvas-Aguilar et al., 2014). Con este mismo enfoque se han desarrollado trabajos en la generación de multiemisión láser basado en sensibilidades cruzadas, es decir, perturbando el interferómetro con una combinación de curvatura y cambio en el índice de refracción externo (Nuñez-Gomez et al., 2015).

En el presente trabajo, se demuestra experimentalmente la sintonización y emisión múltiple (en doble longitud de onda) de un láser de fibra óptica en configuración de anillo dopado con erbio. Este proceso de control se realiza incorporando a la cavidad un interferómetro tipo Mach-Zehnder formado por dos adelgazamientos de fibra óptica que se encuentran concatenados. Las características espectrales de filtrado de este interferómetro se utilizan para modular el láser en longitud de onda, aplicando curvatura controlada por medio de un mecanismo desplazable longitudinalmente. El arreglo experimental propuesto es caracterizado en términos de longitud de onda, así como en amplitud y estabilidad, para generar un láser estable en términos temporales a temperatura ambiente y con los requerimientos adecuados de un sistema láser de fibra óptica.

Materiales y metodología

El dispositivo que forma el interferómetro de fibra óptica Mach-Zehnder está constituido por dos segmentos adelgazados, los cuales están separados una distancia L (Figura 1). El principio de funcionamiento del interferómetro es el siguiente: el modo de luz que viaja por el núcleo de la fibra óptica se acopla a modos de orden mayor en el primer adelgazamiento, es decir, cierta parte de la luz se acopla a la interfaz aire-revestimiento por el cambio de geometría. Posteriormente, los modos acoplados viajan sobre el segmento de fibra que mantiene sus dimensiones originales. En esta zona, se adquiere una diferencia de fase entre los modos acoplados y el modo que viaja por el núcleo. Finalmente, en la zona del segundo adelgazamiento, los modos del revestimiento se reacomplan al núcleo, provocado el efecto de interferencia óptica, del cual se observa un espectro con una modulación de amplitud y longitud de onda periódica “tipo peine”. Las características espectrales de filtrado óptico del IFMZ, dependen de

Figura 2. Espectro de fluorescencia de la fibra dopada con erbio, empleada como fuente de luz y referencia en la caracterización del interferómetro

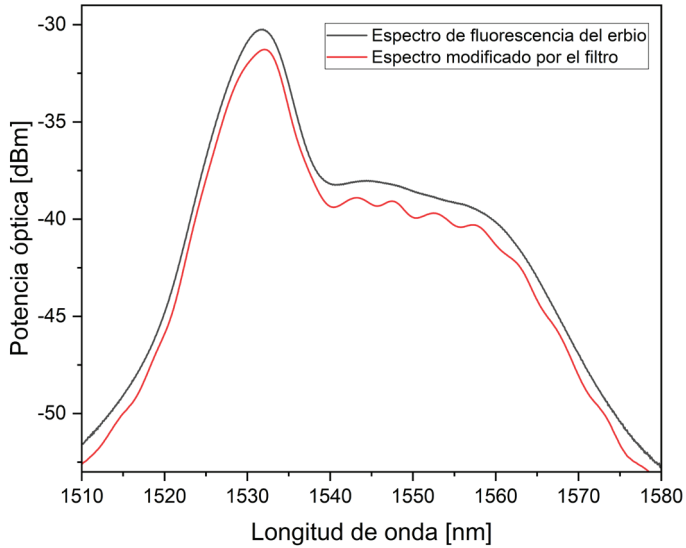
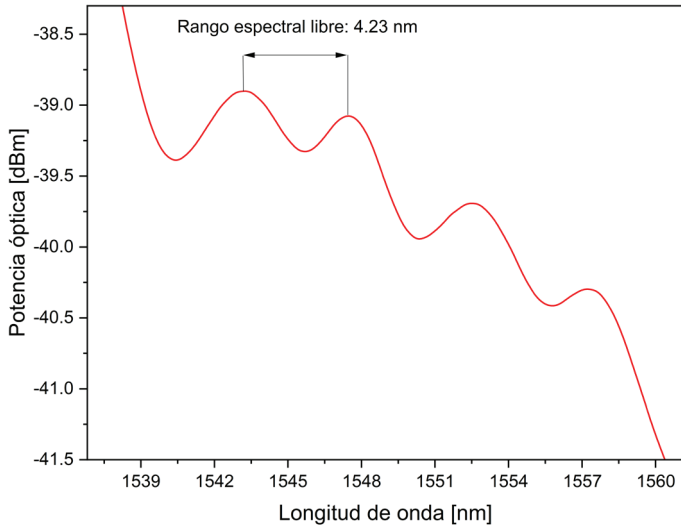


Figura 3. Espectro de modulación periódica en la zona de 1537 nm y 1561 nm y su rango espectral libre

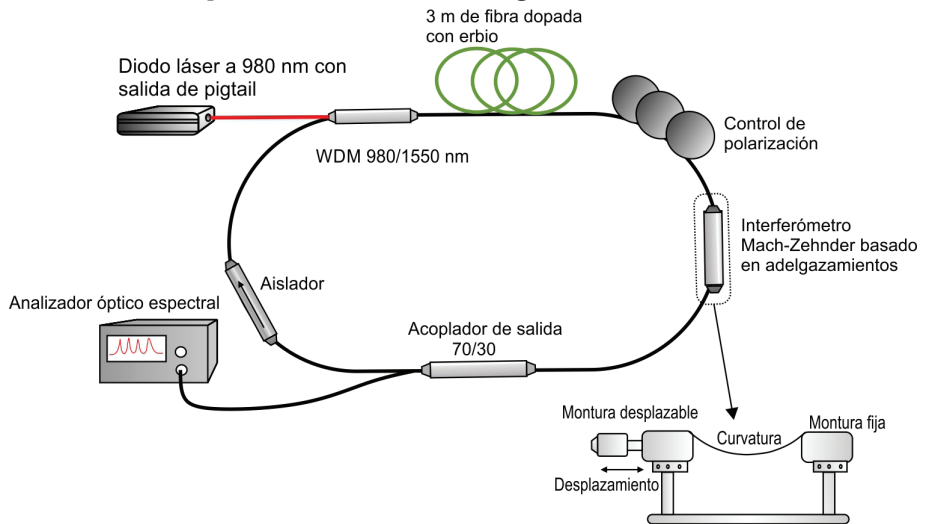


máximos o mínimos del espectro con un valor de ~ 4.23 nm. Este está determinado principalmente por la distancia de separación de los adelgazamientos: entre mayor es la distancia de separación, menor es el rango espectral libre, favoreciendo la múltiple emisión láser.

Una vez obtenido el espectro característico del interferómetro, se implementa el esquema experimental del láser dopado con erbio en configuración de anillo. La Figura 4 muestra el arreglo y los elementos que lo conforman. Está constituido por un diodo láser de bombeo a 980 nm con salida de fibra óptica. Este bombea con potencia óptica 3 m de fibra óptica dopada con erbio (Liekki Er80-8/125) a través de un multiplexor por división de longitud de onda 1550/980 nm. La salida de fibra dopada se empalma con un polarizador, el cual controla el estado de polarización de la luz en la cavidad. El interferómetro Mach-Zehnder se conecta entre la salida del polarizador y la entrada de un acoplador de salida 70/30. El filtro es colocado de forma recta sobre dos monturas (Figura 4), de las cuales una de ellas es fija y la otra puede desplazarse controladamente de forma lineal por medio un micrómetro hasta 2.54 cm. Este mecanismo al desplazarse

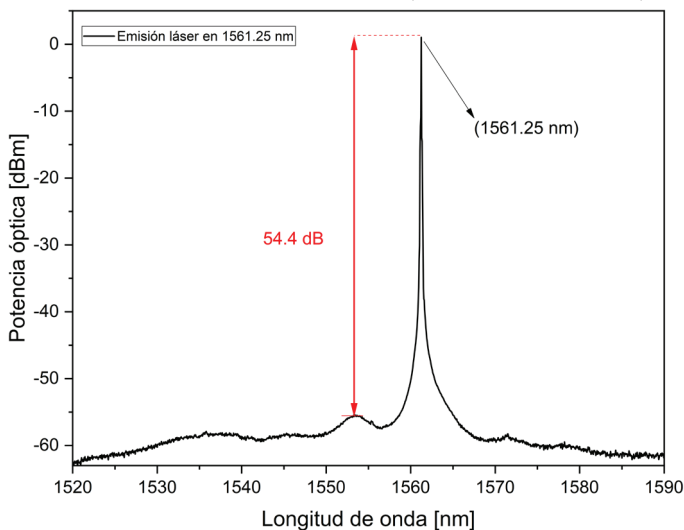
El filtro es colocado de forma recta sobre dos monturas (Figura 4), de las cuales una de ellas es fija y la otra puede desplazarse controladamente de forma lineal por medio un micrómetro hasta 2.54 cm. Este mecanismo al desplazarse

Figura 4. Arreglo experimental del láser de fibra dopado con erbio en configuración de anillo



provoca una curvatura controlada sobre el interferómetro, el cual es el principal mecanismo para obtener sintonización y múltiple emisión en la cavidad láser. La salida de 30 % del acoplador se conecta a un analizador óptico espectral para monitorear y caracterizar la señal láser. El 70 % restante se conecta directamente a la entrada de un aislador para realizar el proceso de realimentación y ampliación óptica en la cavidad. Finalmente, el aislador cierra la configuración en anillo del láser, además de promover la oscilación láser en un solo sentido. Bajo estas condiciones, la cavidad se bombea con una potencia de 80 mW manteniendo el interferómetro de forma recta (curvatura= 0 m^{-1}). La señal láser se establece a una sola longitud de onda en 1561.25 nm, presentando una relación señal-ruido de 54.4 dB y un ancho espectral de $\sim 0.03\text{ nm}$, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Emisión láser en 1561.25 nm para las condiciones iniciales de caracterización (curvatura a 0 m^{-1})

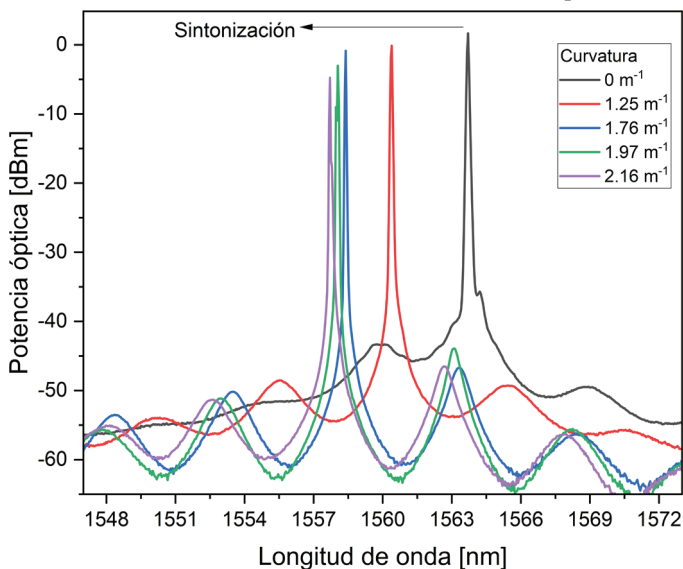


Resultados y discusión

Con las condiciones iniciales descritas anteriormente, se procede a desplazar el micrómetro de forma controlada para inducir curvatura en el interferómetro. Este proceso induce estrés en el dispositivo, el cual genera un cambio en el

índice de refracción efectivo por efecto fotoelástico, modificando las características espectrales y logrando así el proceso de sintonización o múltiple emisión. La emisión láser entonces se establece en los puntos de máxima ganancia, preferentemente en los picos del espectro del interferómetro. La Figura 6 muestra el proceso de sintonización láser en función del incremento en el valor de curvatura. Se observa que este proceso de sintonización tiene un desplazamiento hacia longitudes de onda más cortas. Para los valores de curvatura entre 0.88 m^{-1} y 2.16 m^{-1} la emisión sintoniza de 1563.705 nm a 1557.71 nm . Las amplitudes varían $\sim 4 \text{ dB}$ debido a que las pérdidas dentro de la cavidad se incrementan con la curvatura. La máxima distancia de separación entre líneas láser obtenida en el proceso de sintonización es de $\sim 6 \text{ nm}$.

Figura 6. Proceso de sintonización hacia longitudes de onda cortas, en función de la curvatura aplicada

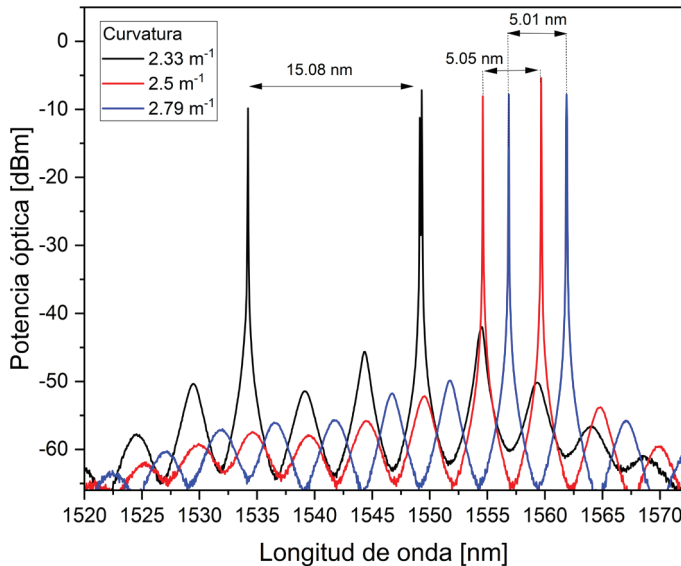


Dentro de este proceso se obtuvieron emisiones múltiples de doble longitud de onda para la curvatura de 2.33 m^{-1} , 2.5 m^{-1} y 2.79 m^{-1} en $1534.24\text{-}1549.29 \text{ nm}$, $1544.61\text{-}1569.66 \text{ nm}$ y $1556.86\text{-}1561.87 \text{ nm}$ (Figura 7). Se puede observar que la separación entre dobles líneas láser se encuentra entre 5 nm y 15 nm

aproximadamente. La amplitud para la mayoría de las longitudes de onda es de ~ 40 dB. Por otra parte, la separación máxima entre líneas alcanzada es de 35.42 nm.

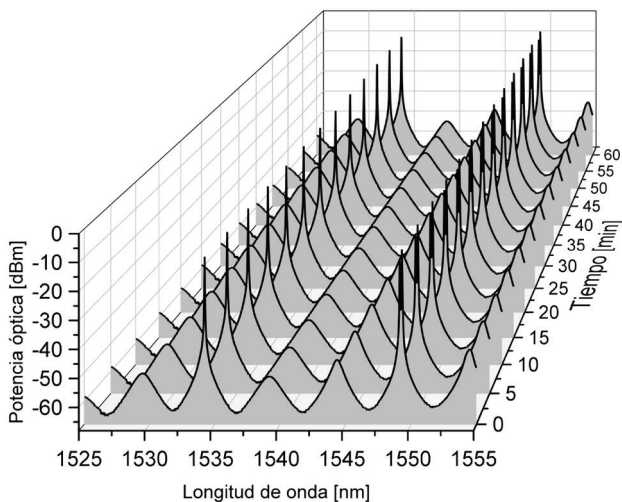
Se puede observar cómo la curvatura modifica el espectro de modulación del interferómetro Mach-Zehnder, haciendo que los rizados observados en la parte inferior de la Figura 7 se modulen en longitud de onda, así como el incremento o decremento en las bandas de atenuación. Este efecto promueve la múltiple emisión en diferentes zonas del ancho espectral que provee la fibra dopada con erbio en los puntos de máxima ganancia. A mayores curvaturas, las pérdidas en la cavidad láser se incrementan, lo que provoca un decremento en la amplitud de las oscilaciones láser, inestabilidad en amplitud y la aparición de modos adyacentes, además de que para ciertos valores la emisión láser desaparece. Otra razón importante es la fragilidad del interferómetro, ya que una curvatura mayor puede provocar la su ruptura.

Figura 7. Proceso de misión láser múltiple en función de la curvatura aplicada



Por otra parte, un parámetro fundamental de los láseres de fibra óptica es su estabilidad a temperatura ambiente. Esta caracterización se realiza tomando mediciones de amplitud y longitud de onda en intervalos de tiempo definidos hasta determinar su variación. Para este caso se seleccionó la doble longitud de onda en 1534.24-1549.29 nm. El intervalo de tiempo fue a una hora, tomando mediciones cada 5 minutos. La respuesta temporal del espectro de emisión de la múltiple longitud de onda se muestra en la Figura 8. Se puede destacar que la máxima desviación calculada experimentalmente fue de 0.3 nm, de acuerdo con la resolución del analizador espectral.

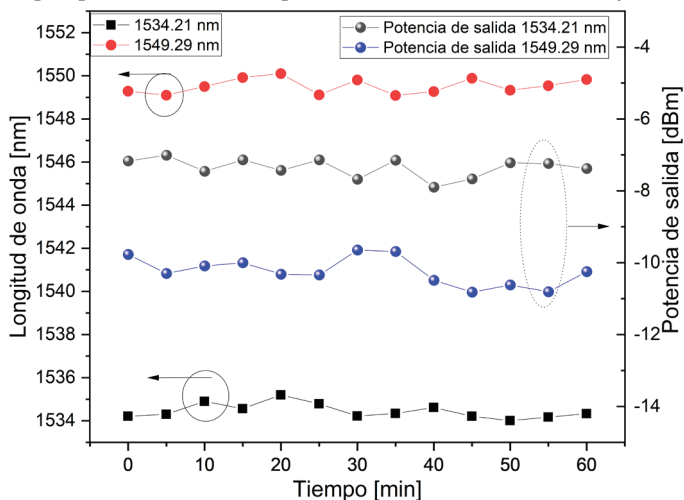
Figura 8. Caracterización temporal de la distribución espectral del láser para múltiple emisión



Asimismo, en la Figura 9 se muestra la respuesta temporal de la longitud de onda y la amplitud en función del tiempo. La respuesta en longitud de onda está representada en el eje izquierdo y la estabilidad en amplitud, sobre el eje izquierdo. De los resultados experimentales se determina que la máxima desviación en amplitud es menor a 1 dB. Estos resultados confirman que el láser presenta una alta estabilidad temporal en términos de amplitud y desviación de longitud de onda a la temperatura ambiente. Algunas de estas variaciones pueden ser debidas a perturbaciones externas adicionales, como las vibraciones

ocasionadas por el medio que rodea al interferómetro, o también debidas a pequeñas inestabilidades en la potencia óptica de bombeo.

Figura 9. Respuestas de estabilidad temporales en longitud y amplitud, propias de la múltiple emisión a 1534.21 nm y 1549.29 nm



Conclusiones

Se presentaron los resultados de la sintonización y múltiple emisión de un láser de fibra óptica dopado con erbio mediante la aplicación de curvatura controlada a un interferómetro Mach-Zehnder fabricado por medio de dos segmentos concatenados de fibras ópticas adelgazadas. Debido a las características de modulación periódica del interferómetro, a diferentes intervalos de curvatura aplicada la emisión láser puede sintonizar hacia longitudes de onda cortas entre 1563.705 nm a 1557.71 nm. Por otra parte, se genera emisión láser en doble longitud de onda entre 1534.24-1549.29 nm, 1544.61-1569.66 nm y 1556.86-1561.87 nm para ciertos valores específicos de curvatura. El láser presenta una alta estabilidad temporal en amplitud y longitud de onda, con variaciones máximas de 1 dB y 0.3 nm. Finalmente, el láser presenta una relación señal-ruido de 40 dB para la mayoría de las longitudes de onda láser demostradas.

Agradecimientos

El autor agradece al CONAHCYT por el apoyo otorgado mediante Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México.

Referencias

- Anzueto-Sánchez, G., Martínez-Rios, A., Torres-Gómez, I., Jiménez-Mares, M., Nuñez-Gomez, R. E., Camas-Anzueto, J. L., & Cabellos-Quiroz, J. L. (2021). Multiwavelength synchronously Q-switched Erbium-doped fiber laser based on the adjustment of the free spectral range of an intracavity tapered-fiber filter. *Optics and Laser Technology*, *142*, 107197. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107197>
- Geng, X., Jiang, Y., Gu, H., Luo, S., Sun, M., & Li, L. (2023). Switchable multi-wavelength fiber lasers based on asymmetric biconical fiber tapers. *Optics Communications*, *548*, 129837. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129837>
- Guzman-Sepulveda, J. R., & Castillo-Guzman, A. A. (2021). Wavelength Tuning of Multimode Interference Fiber Lasers: A Review. *Advanced Photonics Research*, *2*(8), 2100051. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100051>
- Lah, A. A. A., Sulaiman, A. H., Abdullah, F., Ambran, S., Ng, E. K., Alresheedi, M. T., Mahdi, M. A., & Yusoff, N. M. (2023). Stable Triple-Wavelength Random Fiber Laser Based on Fiber Bragg Gratings. *Photonics*, *10*(8), 924. <https://doi.org/10.3390/photonics10080924>
- Li, L., Chen, H., Shi, R., & Li, H. (2024). A dual-wavelength erbium-doped fiber laser for high resolution strain sensing with compound filter of a Sagnac loop and a long period fiber grating. *Optics & Laser Technology*, *175*, 110787.
- Li, T., Yan, F., Wang, P., Wang, X., Suo, Y., & Zhou, H. (2022). Switchable Multi-Wavelength Thulium-Doped Fiber Laser using a Two-Taper fiber filter.

- Infrared Physics & Technology*, 125, 104269. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104269>
- Martinez-Rios, A., Anzueto-Sanchez, G., Selvas-Aguilar, R., Guzman, A. A. C., Toral-Acosta, D., Guzman-Ramos, V., Duran-Ramirez, V. M., Guerrero-Viramontes, J. A., & Calles-Arriaga, C. A. (2015). High sensitivity fiber laser temperature sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(4), 2399-2402. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2377654>
- Nemova, G. (2024). Brief Review of Recent Developments in Fiber Lasers. *Applied Sciences*, 14(6), 2323. <https://doi.org/10.3390/app14062323>
- Nuñez-Gomez, R. E., Anzueto-Sanchez, G., Martinez-Rios, A., Basurto-Pensado, M. A., Castellon-Uribe, J., Selvas-Aguilar, R., Camas-Anzueto, J., & Duran-Ramirez, V. M. (2015). Multi-wavelength switching of an erbium-doped fiber ring laser based on the cross-sensitivities' features of tapered fiber filters. *Optical Review*, 22(4), 526-531. <https://doi.org/10.1007/s10043-015-0092-7>
- Qin, G., Li, Q., Wei, W., & Duan, J. (2021). Multi-wavelength tunable ring cavity fiber laser incorporated with a Mach-Zehnder interferometer filter based on waist-enlarged fiber bitapers. *Optik*, 248, 168088. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168088>
- Selvas-Aguilar, R., Martínez-Rios, A., Anzueto-Sánchez, G., Castillo-Guzmán, A., Hernández-Luna, M. C., & Robledo-Fava, R. (2014). Tuning of an erbium-doped fiber ring laser based on heating a tapered fiber filter. *Optical Fiber Technology*, 20(4), 391-394. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.04.007>
- Wang, M. (2024). 1550nm-1600nm design and research of Erbium-doped fiber lasers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2795(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2795/1/012014>
- Zhao, L., Li, W., Chen, Y., Yu, T., Zhao, E., & Tang, J. (2024). Design and characterization of a self-matching photonic lantern for all few-mode fiber laser systems. *Optics Express*, 32(10), 16799-16808.

Aplicación web para préstamo de material sustentada en una base de datos (ARE)

Luis Fernando González Lezama,^a Benjamín Etni López Leal,^a Samuel Portillo Contreras,^{a*} Gerardo Acevedo Vega,^a Kenia Yadira Gómez Díaz^b

Resumen

En la actualidad, existen diferentes métodos para registrar préstamos de equipo o material dentro de las instituciones escolares, desde nivel básico hasta nivel superior; generalmente, dichos métodos constan de simples registros en una libreta (bitácora) o en Excel, por ello se han implementado sistemas más sofisticados como formularios web. Una forma de utilizar dichos formularios es transformándolos en aplicaciones web, para lo cual se utilizan diferentes softwares de programación de páginas. El presente trabajo trata sobre la implementación de una aplicación web sustentada en una base de datos. Para ello se realizó con anterioridad una encuesta para conocer la conformidad de la población estudiantil con el actual sistema de préstamo de material; de la cual se obtuvieron datos de disconformidad de más del 80 %. Conociendo este resultado, se presentarán mejoras para el método actual como el registro de aulas, asignaturas y docentes con la finalidad de tener un mayor control sobre todo el proceso del préstamo.

Palabras clave: préstamos de equipo o material, formularios web, aplicación web, base de datos, softwares

^a Taller de Electrónica, Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^b Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

* Autor de correspondencia: samuel.portillo@uaem.mx

Abstract

Currently, there are different methods to register loans of equipment or material within school institutions, from basic to higher level; these methods consist of simple records in a notebook (log) or in Excel, which is why more sophisticated systems such as web forms have been implemented. One way to use these forms is by transforming them into web applications, for which different page programming software is used. This paper deals with the implementation of a web application supported by a database. To this end, a survey was previously conducted to know the conformity of the student population with the current system of loan of material; of which more than 80 % disagreement data were obtained. Knowing this result, improvements will be presented for the current method such as the registration of classrooms, subjects and teachers to have greater control over the entire loan process.

Keywords: loans of equipment or material, web forms, web applications, database, software

Introducción

Un sistema de préstamo de material es una estructura organizada que permite a las personas solicitar y utilizar temporalmente ciertos recursos o materiales. Estos sistemas son comunes en diversas instituciones, como universidades, bibliotecas, empresas y centros educativos, como en la Facultad de Ciencias Sociales y de la Comunicación de la Universidad de Cádiz, que ha implementado un sistema de préstamo de material audiovisual. Este sistema permite a estudiantes y profesores solicitar cámaras fotográficas, trípodes, grabadoras de voz y otros recursos para proyectos audiovisuales (Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias Sociales y de la Comunicación, s. f.). Otro ejemplo es la Facultad de Comunicación de la Universidad de Castilla-La Mancha que también ha implementado un sistema de préstamo de material audiovisual. En este caso, los préstamos se realizan mediante una solicitud previa en línea, y los usuarios pueden

recoger los recursos en el decanato de la facultad (Universidad de Castilla-La Mancha, Campus de Excelencia Internacional, Facultad de Comunicación, s. f.); o como en la Comunidad de Madrid, que existe el programa *Accede*, el cual facilita libros de texto y material curricular a los alumnos de educación primaria, educación secundaria obligatoria y formación profesional básica (Comunidad de Madrid, 2024).

Los formularios electrónicos son versiones digitales de los formularios en papel que se utilizan para recopilar información, recibir solicitudes o capturar datos en línea. Estos formularios se completan y envían a través de sitios web o aplicaciones, en lugar de hacerlo manualmente con bolígrafos y hojas de papel (Zona Green, 2023).

En los inicios de la web, los navegadores permitían dirigir formularios HTML a una dirección de correo electrónico, y se utilizaban para recopilar información ingresada por los visitantes. Sin embargo, enviar correos electrónicos directamente desde un formulario web HTML no era práctico debido a la falta de seguridad y a la exposición de direcciones de correo electrónico (Frisoli, 2024). Con el tiempo surgieron herramientas específicas para crear formularios en línea conocidas como aplicaciones web (HostingPlus Mexico, 2021), que se utilizan para enviar los formularios electrónicos y también para gestionar y recopilar datos de estos. Los formularios electrónicos se han vuelto esenciales para recopilar datos estructurados de manera interactiva a través de páginas web.

En 2018, 4021 millones de personas usaban el internet, es decir, poco más de la mitad de la población mundial (53 %) según el estudio *2018 Global Digital* elaborado por We Are Social y Hootsuite (Fraguela, 2024; Kemp, 2024b), actualmente se estima que hay 5350 millones de personas que utilizan internet en 2024, lo que equivale al 66.2 % de la población total del mundo. En México, a principios de 2024 había 107.3 millones de usuarios equivalente al 83.2 % de la población (Kemp, 2024a). Estos datos muestran la creciente tendencia hacia el uso de la web y todo lo relacionado a ella, como las aplicaciones anteriormente mencionadas. Es por esto que el uso de estas herramientas es muy amplio e importante ya que tienen grandes ventajas como la interactividad, la cual permite a los usuarios interactuar con los campos del formulario como ingresar texto,

seleccionar opciones de menú desplegable o marcar casillas de verificación; la automatización, ya que los datos ingresados se almacenan automáticamente en una base de datos o se envían a un sistema de gestión, ahorrando tiempo y reduciendo errores; el acceso remoto, para completarlos desde cualquier lugar con acceso a internet; o las medidas de seguridad, como cifrado de datos, para proteger la información confidencial (Kotlarz, 2022; Frisoli, 2024).

Por todo lo anterior, el presente trabajo tiene como finalidad implementar un sistema de préstamo sustentado en una base de datos para el taller de electrónica; esto, para mantener control y salvaguardar los equipos y material que se presta a la comunidad estudiantil de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EES-Yecapixtla).

Materiales y metodología

Softwares

PostgreSQL es un poderoso sistema de base de datos de código abierto y orientado a objetos. Se trata de un sistema de gestión de bases de datos relacionales (RDBMS) que utiliza tablas y relaciones para almacenar y recuperar datos. Este combina características de bases de datos relacionales con la capacidad de almacenar objetos complejos y tipos de datos personalizados. Ofrece transacciones seguras y consistentes (atomicidad, consistencia, aislamiento y durabilidad); puede manejar grandes volúmenes de datos y conexiones simultáneas, además que es de código abierto, permitiendo su uso gratuito y modificación (PostgreSQL, 2024).

pgAdmin es una plataforma de administración y desarrollo de código abierto para la base de datos PostgreSQL, el cual permite gestionar y trabajar con bases de datos PostgreSQL de manera gráfica. pgAdmin 4 es una reescritura completa de pgAdmin, construida con Python y Javascript/jQuery. Un tiempo de ejecución de escritorio escrito en NW.js permite que se ejecute de forma independiente para usuarios individuales, o el código de la aplicación web se puede implementar directamente en un servidor web para que lo utilicen uno o más

usuarios a través de su navegador web. El *software* tiene el aspecto de una aplicación de escritorio, sea cual sea el entorno de ejecución, y mejora enormemente su anterior versión pgAdmin III con elementos de interfaz de usuario actualizados, opciones de implementación web / multiusuario, paneles de control y un diseño más moderno (pgAdmin, s. f.).

Apache NetBeans es una plataforma de desarrollo de código abierto que ofrece un entorno integrado de desarrollo (IDE, por sus siglas en inglés) para crear aplicaciones en varios lenguajes de programación. Resalta el código fuente de manera sintáctica y semántica, facilita la refactorización del código y proporciona herramientas útiles y poderosas. También ofrece editores, asistentes y plantillas para crear aplicaciones en Java, JavaScript, PHP, HTML5 (Lenguaje de Marcas de Hipertexto), CSS (Cascading Style Sheets) y otros lenguajes (Apache NetBeans, s. f.).

El JDK (Java Development Kit) es un conjunto de herramientas y bibliotecas de desarrollo de *software* combinado con el JRE (Java Runtime Environment) y la JVM (Java Virtual Machine). Permite crear aplicaciones y applets en Java, incluye Java Runtime Environment (JRE) que es el que proporciona el entorno de ejecución para aplicaciones Java, también el compilador (javac) que convierte el código fuente Java en código de bytes y el archivador (jar) que crea archivos JAR para empaquetar clases y recursos (GeeksforGeeks, 2024).

Programación

Para la conexión entre la base de datos y las páginas web se utilizó SQL (Structured Query Language), el cual es un lenguaje de programación utilizado para interactuar específicamente con bases de datos. Con SQL, se puede almacenar, manipular y recuperar datos de bases de datos relacionales. Para este trabajo, el lenguaje de programación SQL permitió realizar consultas para recuperar información específica de la base de datos, además de insertar, actualizar o eliminar registros de las tablas y, lo más importante, definir la estructura de los datos mediante la creación de tablas y el establecimiento de relaciones entre ellas.

Para las páginas web creadas en el software de Apache NetBeans se utilizó HTML, lenguaje estándar de marcado utilizado para crear la estructura de las páginas web. Con HTML se organizó el contenido del sitio web, se definió su estructura y se establecieron relaciones entre diferentes elementos. Aunque HTML se enfoca en la estructura, para aspectos visuales como colores, diseño y estilo también se implementó CSS.

Actualidad del sistema de préstamo de material

En la EES-Yecapixtla, para solicitar material o equipo de cualquier área o taller es necesario rellenar un formulario de Google (Figura 1) cuya información posteriormente se registra en una tabla de Excel. Este método resulta un tanto

Figura 1. Formulario de registro

Centro de cómputo

Biblioteca

Laboratorio de usos múltiples

Taller Multidisciplinario

Otros: _____

Indique la herramienta, material o equipo *
que solicita en préstamo, o coloque la
palabra ACCESO

Tu respuesta

PERSONA QUE LE ATIENDE *

Eligir ▼

La EESYecapixtla le agradece su registro,
muchas gracias.

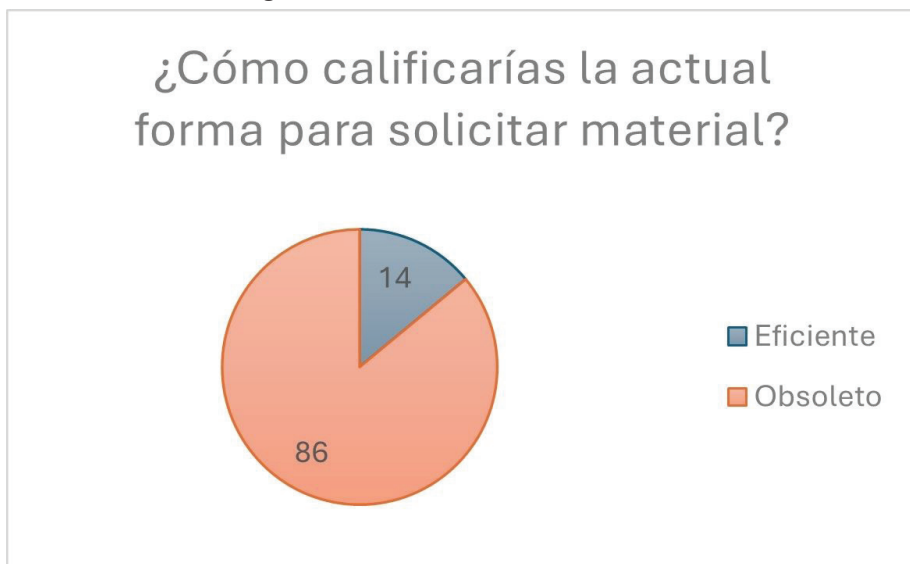
Enviar [Borrar formulario](#)

anticuado e incluso tardado para las necesidades que exige el alumnado, además de que no aporta el control que se pretende conseguir al rellenar este formulario.

Por otro lado, el taller de electrónica de la institución no cuenta con un soporte como los demás talleres. Para solicitar material o equipo de esta área es necesario registrarse de manera manual en una bitácora y esperar a que se encuentre alguno de los encargados.

Por ello se realizó una encuesta para conocer el nivel de satisfacción de la comunidad estudiantil acerca de este método de registro (Figura 2), arrojando los siguientes resultados:

Figura 2. Encuesta de conformidad



Resultados

La forma tradicional del préstamo de materiales en los talleres de la EES-Yecapixtla ha sido considerada tediosa y sobre todo obsoleta en cuestión de la forma en que se lleva a cabo el préstamo de estos. Los resultados sobre el préstamo en esta modalidad reportan que el 86 % ha calificado de obsoleto el servicio versus el 14 % (Figura 2).

Sin embargo, la aplicación web ha proporcionado una versión mejorada y más completa de los sistemas de préstamo utilizados en otros talleres y áreas de la institución (Figura 3). También revolucionó la dinámica de solicitud de material y equipo en el taller de electrónica, mejorando significativamente los tiempos y la calidad de todo el proceso de préstamo.

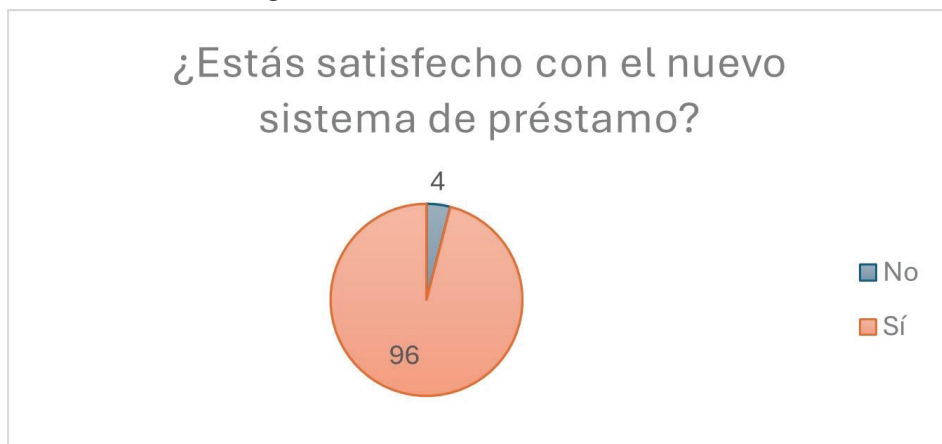
Figura 3. Registro de matrícula y comprobación de datos antes de solicitar material

Matricula:	10003553	Nombre:	Luis Fernando
Apellido paterno:	González	Apellido materno:	Lezama
Sexo:	M	Teléfono:	7352487698
Email:	luis.gonzalez@uaem.edu.mx	Semestre:	8
Carrera:	Ingeniero en robótica y sistemas de manufactura industrial	Estatus:	De alta

Para conocer la opinión de la comunidad estudiantil, específicamente de aquellos que hicieron uso de la aplicación, se realizó una segunda encuesta donde se cuestionó sobre el funcionamiento de esta y también acerca de la experiencia del usuario, arrojando datos aprobatorios de satisfacción. Estos resultados muestran que ahora el 96 % se encuentra satisfecho versus el 4 % que está en desacuerdo con la implementación del nuevo sistema de préstamo de material (Figura 4).

Cabe resaltar que hoy en día un sistema eficiente de préstamo de materiales en los diferentes niveles educativos en talleres y laboratorios debe ser optimizado para el uso adecuado de estos, así como mejorar los tiempos de entrega de prestado y recepción de los mismo para llevar a cabo diferentes actividades ejecutadas por su personal. Con este tipo de sistemas se ha logrado implementar una mejora en el préstamo de los materiales en la EES-Yecapixtla, además que cabe la posibilidad de que este sistema pueda ser empleado en diferentes instituciones.

Figura 4. Resultados de conformidad



Conclusión

El proyecto logró integrar un sistema de préstamo de material en el taller de electrónica, algo que no existía anteriormente. Además, se adaptó para mantener ciertos aspectos del sistema de préstamo anterior que algunos consideraban adecuados. Al modernizarse el proceso se permitió a los estudiantes solicitar materiales de manera más ágil y eficiente mediante un simple registro en la página web. El sistema genera un recibo que ayuda a resolver problemas anteriores y futuros, especialmente en relación con desperfectos en los materiales y tiempos de solicitud, todo lo anterior es gracias al registro en la base de datos.

Este proyecto puede servir como modelo para otros sistemas, ya que contiene datos de toda la escuela que pueden usarse para registrar y controlar diversas actividades con solo realizar pequeños ajustes y formatear según sea necesario. Finalmente, es crucial prestar especial atención al manejo de los datos personales por cuestiones de seguridad.

Agradecimientos

A los profesores Samuel Portillo y Gerardo Acevedo por la asesoría y el acompañamiento a través del desarrollo de este proyecto, además de todos los consejos, enseñanzas y oportunidades que nos proporcionaron haciéndonos mejores estudiantes y personas.

Referencias

- Apache NetBeans. (S. f.). <https://netbeans.apache.org/front/main/index.html>
- Comunidad de Madrid. (2024, 18 de julio). *Programa ACCEDE. Sistema de préstamo de los libros de texto y el material curricular de la Comunidad de Madrid*. <https://www.comunidad.madrid/servicios/educacion/programa-accede>
- Fraguela, N. (2024, 30 de abril). *El número de usuarios de internet en el mundo crece un 1.8 % y alcanza los 5.350 millones (2024)*. Marketing4eCommerce. <https://marketing4ecommerce.net/usuarios-de-internet-mundo/>
- Frisoli, C. (2024, 15 de abril). *Cómo crear un formulario HTML que te envíe un correo electrónico*. Hubspot. <https://blog.hubspot.es/website/formulario-ht-ml-email>
- GeeksforGeeks. (2024, 9 de mayo). *JDK in Java*. <https://www.geeksforgeeks.org/jdk-in-java/>
- HostingPlus Mexico. (2021, 27 de septiembre). *Funcionamiento y evolución de las aplicaciones web*. <https://www.hostingplus.mx/blog/funcionamiento-y-evolucion-de-las-aplicaciones-web/>
- Kemp, S. (2024a, 23 de febrero). *Digital 2024: Mexico*, DataReportal. Global Digital Insights. <https://datareportal.com/reports/digital-2024-mexico>
- Kemp, S. (2024b, 31 de enero). *Internet use in 2024*. DataReportal. Global Digital Insights. <https://datareportal.com/reports/digital-2024-deep-dive-the-state-of-internet-adoption>
- Kotlarz, C. (2022, 1 de marzo). *Formularios electrónicos: qué son y por qué debería usarlos*. Dokmee. <https://www.dokmee.com/es/Sobre/Blog/ArticleID/189/Formularios-electronicos-qu-son-y-por-qu-debera-usarlos>

pgAdmin. (S. f.). *Download*. <https://www.pgadmin.org/download/>

PostgreSQL. (2024). *PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database*. <https://www.postgresql.org/>

Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias Sociales y de la Comunicación. (S. f.). *Préstamo de material*. <https://sites.google.com/gm.uca.es/prestamodematerial/inicio?pli=1>

Universidad de Castilla-La Mancha, Campus de Excelencia Internacional, Facultad de Comunicación. (S. f.). *Sistema de préstamo de material audiovisual*. <https://www.uclm.es/global/promotores/facultades%20y%20escuelas/cuenca/cu-fcomunicacion/novedades/nuevo%20sistema%20de%20prestamos%20de%20material>

Zona Green. (2023, 1 de noviembre). *Formulario electrónico: descubre qué es y cómo funciona*. <https://zonagreen.com.mx/que-es-un-formulario-electronico/>

Diseño de tablero didáctico para el aprendizaje de automatización y control con PLC Simatic S7-300 Siemens

Samuel Portillo Contreras,^a Hans Daniel Gallardo,^{a*} Areli Yáñez Álvarez,^{a*} María Fernanda Gonzaga Rosendo,^a Óscar Sánchez Vargas^b

Resumen

En el ámbito industrial, es crucial contar con personal capacitado para el uso de los PLC mediante tableros didácticos bien distribuidos. El proyecto consiste en diseñar y construir un tablero de automatización con un PLC Siemens 314, proporcionando a los estudiantes formación avanzada en automatización industrial. Este tablero ofrece una formación integral en técnicas industriales avanzadas que permite a los estudiantes aprender sobre programación, control de procesos y monitoreo de sistemas automatizados. Se ha utilizado material industrial de alta calidad en su construcción, asegurando que los estudiantes trabajen con equipos que encontrarán en el entorno profesional, como pilotos, botones, cables de comunicación, manejadores y un PLC. El diseño del tablero se enfoca en la facilidad de uso, configurándose de manera intuitiva para que los estudiantes comprendan rápidamente su funcionamiento y comiencen a trabajar sin dificultades. La interfaz de usuario de apoyo facilita el aprendizaje y la operación eficiente del sistema.

Palabras clave: automatización, diseño, PLC, control.

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

^b Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

* Autor de correspondencia: hans.gallardo@uaem.edu.mx / areli.yanes@uaem.edu.mx

Abstract

In the industrial field, it is crucial to have personnel trained in the use of PLC through well-distributed teaching boards. The project consists of designing and building an automation board with a Siemens 314 PLC, providing students with advanced training in industrial automation. This board offers comprehensive training in advanced industrial techniques, allowing students to learn about programming, process control and monitoring of automated systems. High quality industrial material has been used in its construction, ensuring that students work with equipment that they will find in the professional environment, such as pilots, buttons, communication cables, controllers and a PLC. The design of the board focuses on ease of use, being configured intuitively so that students quickly understand its operation and start working without difficulties. The supportive user interface makes it easy to learn and operate the system efficiently.

Keywords: automation, design, PLC, control.

Introducción

En la actualidad, la automatización industrial tiene mayor demanda aunado al aumento de producción. La automatización de procesos permite implementar la seguridad del personal humano al emplear herramientas tecnológicas mediante tableros de automatización para poder realizar tareas a gran velocidad, ya que estos brindan una mayor organización a los componentes eléctricos, además que reducen significativamente errores y jornadas continuas de los trabajadores, evitando accidentes laborales o enfermedades ocasionadas por el entorno laboral (Gonzales, 2023). En años recientes, a nivel global se ha experimentado una automatización del empleo, definida esta como la sustitución de procesos productivos que se realizan parcial o totalmente con intervención humana, por técnicas de producción en las que se utilizan equipos controlados por Controladores Lógicos Programables (PLC). El PLC es un elemento clave que integra una solución de automatismo, puesto que cambia señales de entrada con

otros de salida que permiten facilitar la interacción lógica y secuencial del automatismo a través de la programación (Gonzales, 2023; Banco de México, 2018).

Por otro lado, aunque existen diferentes investigaciones sobre el uso de los PLC en los distintos campos de la ingeniería (Cortés et al., 2011), en la actualidad, estos aún son empleados porque facilitan la operación y control de máquinas y equipos industriales, así como para estudios de investigación (Lucena & Indriago, 2004) y sobre todo académicos. Los PLC tienen que contar con un tablero de control para su operación, puesto que son fundamentales para la programación y, por ende, para controlar los procesos en las que sea empleado. Por lo tanto, un tablero de control es un gabinete que se utiliza para el almacenamiento de componentes eléctricos y electrónicos vitales, como tarjetas de PLC, salidas, entradas analógicas y diversos relés, entre otros, cuya función es recibir y enviar señales de control, actuando como el núcleo de comunicación entre diversos elementos en un sistema (Kinenergy Internacional & Hernández, 2024; Kinenergy Internacional & Martínez, 2024). Se debe tomar en cuenta que este es esencial en cualquier sistema eléctrico y que su función principal radica en controlar, proteger y distribuir la energía eléctrica de manera segura hacia los dispositivos y circuitos que la requieren (Autycom, 2019; S7-300-Global eBusiness-Siemens WW, s. f.; Industrias GSL, 2024).

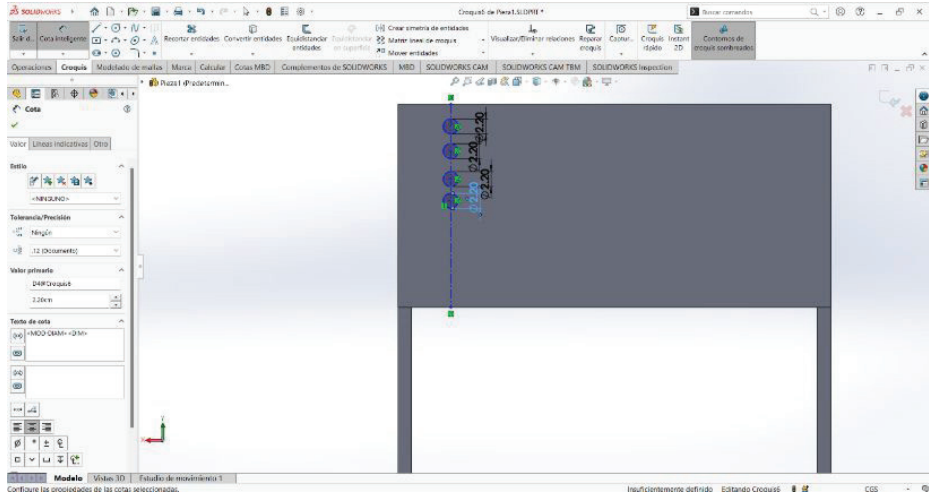
Debido a la demanda de la automatización industrial, la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EES-Yecapixtla) tiene como objetivo desarrollar un tablero didáctico con el uso de un PLC S7-300 Siemens para uso académico.

Materiales y metodología

Para llevar a cabo la manufactura del tablero se requirió comenzar con un boceto inicial en el cual se planteó el objetivo principal del tablero, que es la realización de prácticas de automatización industrial preparando a los alumnos para el ámbito laboral de un modo eficiente y seguro, por lo que se identificaron los componentes necesarios que suplieran el objetivo.

Dicho boceto se llevó a un diseño 3D a través del *software* SolidWorks (Figura 1), este *software* permitió crear un modelo detallado y preciso del tablero,

Figura 1. Mapeado en SolidWorks



incluyendo la distribución de cada uno de los componentes, como el PLC S7-300, los dispositivos de entrada/salida y otros elementos requeridos. Esto permitió la visualización general del diseño y la realización de ajustes antes de la fabricación física del tablero.

Para la realización física del tablero didáctico se utilizó un PLC S7-300 Siemens que cuenta con estructura modular, dispone 16 entradas y 16 salidas analógicas/digitales, además que cumple con los requerimientos necesarios para suplir las funciones de prácticas de automatización. Para su funcionamiento correcto se requiere del uso de una fuente de energía de 24 V como medio de alimentación.

Para la estructura del tablero se comenzó con el montaje de los componentes sobre rieles de aluminio de 20 mm x 20 mm, con un largo de 60 cm seleccionados por su resistencia y facilidad de montaje. Estos rieles permiten una disposición ordenada y segura de los componentes, además que facilitan tanto la instalación inicial como el mantenimiento posterior. Se utilizó una base de madera cubierta con vinil como estructura principal del tablero, proporcionando una superficie estable y duradera para el montaje de los rieles y componentes. Para la distribución del cableado, se emplearon canaletas que ayudaron a mantener los cables

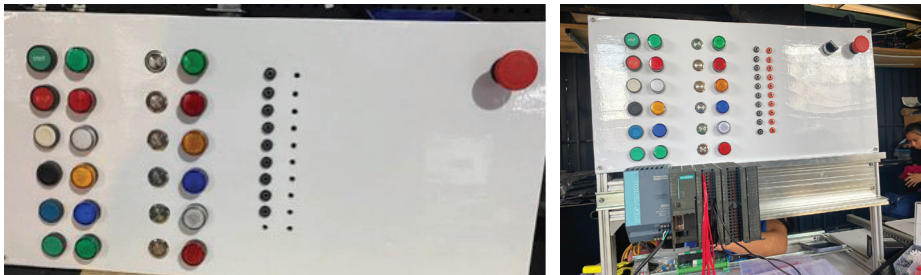
organizados y protegidos, minimizaron el riesgo de daños y facilitaron la identificación de conexiones.

Para las señales de entrada se requirió de seis botones de 24v y 110v ubicados en dos secciones de manera estratégica. Estos fueron etiquetados para su fácil identificación y evitar así cualquier tipo de confusión. Para las señales de salida se utilizaron pilotos indicadores. Finalmente, se agregaron conexiones de banana para poder realizar alguna conexión adicional requerida.

En el tablero se implementó una llave selectora, así como un botón de paro de emergencia, el cual tiene como función desconectar inmediatamente de la corriente eléctrica el tablero en caso de algún incidente.

Para las conexiones de los componentes del tablero se seleccionó cable de calibre 22. Este tipo de cable es óptimo para controles donde se maneja baja corriente, garantizando la seguridad y la eficiencia del sistema eléctrico. El cableado se realizó siguiendo los estándares industriales y el código de colores para asegurar la calidad y la fiabilidad del sistema, además de facilitar una visualización clara y entendible para los usuarios al usar clemas como puentes y terminales que permiten las conexiones entre componentes. En la Figura 2 se muestra el montaje y manufactura del tablero.

Figura 2. Manufactura del tablero de control con PLC S7-300



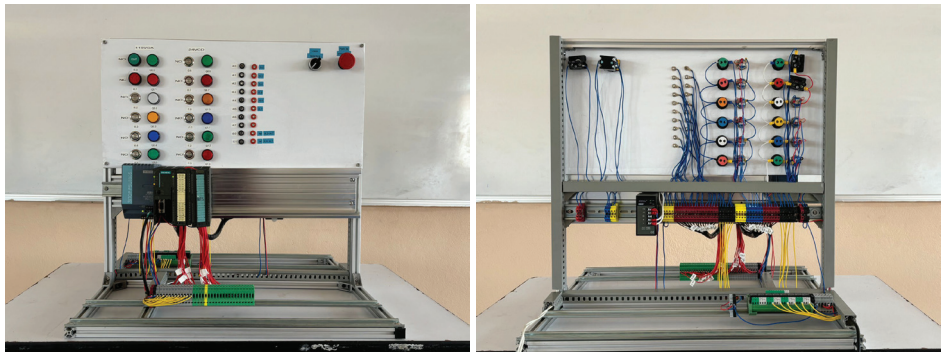
La Figura 2 muestra la distribución de los botones y pilotos que se encuentran en dos secciones debido al voltaje en el cual operan, por otra parte, se tiene las conexiones de banana y, en el extremo superior derecho, se encuentra ubicada la llave selectora y el botón de paro de emergencia. Una vez completado el ensamblaje, se llevaron a cabo la etiquetación e inspecciones visuales

para verificar la correcta instalación de todos los componentes. Posteriormente, se realizaron pruebas funcionales para asegurar que el sistema operaba según las especificaciones. Estas pruebas incluyeron la verificación de las conexiones eléctricas, la operación del PLC y la respuesta de los dispositivos de entrada y salida. Cualquier problema identificado durante las pruebas se corrigió mediante ajustes en el diseño o la programación del sistema.

Resultados

El tablero de control implementado con el PLC S7-300 demostró ser eficiente y confiable en su funcionamiento, capacitando a los alumnos mediante las prácticas de automatización industrial planteadas por el docente, con lo que fue posible la elaboración de las prácticas requeridas en la materia y se redujo el tiempo de entrega. De esta forma se cumplió con el objetivo principal de esta herramienta, además que al establecer una comunicación fluida y confiable que garantizó la operación segura y estable del sistema, se minimizó el riesgo de fallos o accidentes y se obtuvieron conocimientos reales del funcionamiento de un tablero de automatización. En la Figura 3 se muestra el tablero ya terminado con las conexiones adecuadas para su funcionamiento.

Figura 3. Tablero de control con PLC S7-300

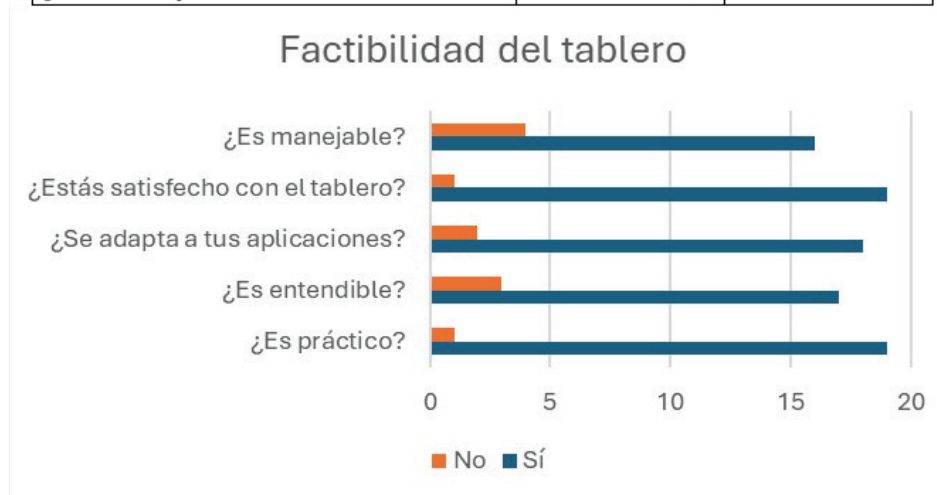


A continuación se muestran estadísticas de conocimiento y satisfacción obtenidas del grupo de octavo semestre de la Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de la EES-Yecapixtla (2024) por ser la comunidad con mayor cercanía y uso del tablero. En la Figura 4 se muestran las estadísticas obtenidas mediante una encuesta.

En las estadísticas obtenidas se observa una respuesta satisfactoria por parte de los alumnos que utilizan el tablero didáctico, reconociendo la importancia de conocer y manipular físicamente un tablero, ya que en el ámbito laboral es de suma importancia tener conocimientos previos a la automatización.

Figura 4. Gráfica estadística y tabla de encuesta

	Sí	No
¿Es práctico?	19	1
¿Es entendible?	17	3
¿Se adapta a tus aplicaciones?	18	2
¿Estás satisfecho con el tablero?	19	1
¿Es manejable?	16	4



Conclusiones

La realización del tablero de automatización ha permitido agilizar y resolver de una manera eficiente las practicas solicitadas por el docente de automatización industrial, reduciendo accidentes y el tiempo de entrega y, su vez, se desarrollan conocimientos reales del mundo laboral. Cabe mencionar que la realización de este proyectado fue elaborado a un costo menor que si se adquiriera en el mercado industrial, ya que sus costos van desde los \$11,210.80 pesos mexicanos hasta \$60,000 pesos. Dicho tablero fue elaborado con un costo de \$11,200.00, incluidos el tablero y los elementos requeridos, mientras que en el mercado industrial, con ese capital solo se lograría conseguir el tablero sin los elementos eléctricos y electrónicos.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Mtro. Samuel Portillo por su dedicación, orientación y apoyo. Su pasión por la enseñanza y su compromiso con el éxito de sus estudiantes han hecho una diferencia significativa en nuestro aprendizaje y desarrollo académico.

Referencias

- Autycom. (2019, 11 de julio). *PLC Siemens S7 300: sistemas autómatas para gamas baja y media*. <https://www.autycom.com/plc-siemens-s7-300-caracteristicas/>
- Banco de México. (2018, julio-septiembre). *La Automatización en México desde una perspectiva regional*. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/reportes-sobre-las-economias-regionales/recuadros/%7BE3665296-DCDE-78FD-54CB-0420E1CD9A36%7D.pdf>
- Cortés, J. A., Mendoza, J. A., & Muriel, J. A. (2011). Control y supervisión de un sistema pick & place neumático a través de un PLC y un sistema

- SCADA. *Scientia et Technica*, 17(50), 141-146. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84923878020.pdf>
- Gonzales, E. (2023, 10 de julio). *Importancia de la automatización de procesos industriales*. Cimatic. <https://cimatic.com.mx/blog/importancia-de-la-automatizacion-de-procesos-industriales/>
- Industrias GSL. (2024, 1 de julio). *¿Qué es un PLC y cómo funciona?* <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/que-es-un-plc-y-como-funciona>
- Kinenergy Internacional, & Hernández, R. (2024, 13 de marzo). *Importancia de un tablero de control. Consideraciones generales*. KINENERGY. <https://www.kin.energy/blogs/post/importancia-de-un-tablero-de-control.-consideraciones-generales>
- Kinenergy Internacional, & Martínez, H. (2024, 5 de marzo). *¿Qué es un tablero eléctrico y cuáles son sus componentes?* KINENERGY. <https://www.kin.energy/blogs/post/%C2%BFqu%C3%A9-es-un-tablero-el%C3%A9ctrico-y-cu%C3%A1les-son-sus-componentes>
- Lucena, Z., & Indriago, M. (2004). Optimización en el desarrollo de un programa para PLC. *Revista Ingeniería UC*, 11(3), 70-78.
- S7-300-Global eBusiness-Siemens ww. S. f. *Industry Mall*. <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/ww/Catalog/Products/5000013>

Conclusión

De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico es una obra que abarca distintos avances científicos y que tiene como objetivo ayudar a estudiantes, académicos, profesionistas y científicos a descubrir y comprender nuevos conocimientos; los cuales, a su vez, pueden aplicarse para desarrollar más ciencia y tecnología a través de la innovación, pero sobre todo para el beneficio de la sociedad y el crecimiento global.

*De la investigación a la aplicación:
un enfoque práctico*
de Ángel Tlatelpa Becerro
y Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)
se terminó en noviembre de 2024.

Los avances en distintas áreas de la ingeniería tienen un gran impacto en la sociedad actual, pues se convierten en herramientas para enfrentar los desafíos sociales, económicos y ambientales: desde el uso de equipos especializados en la industria, hasta la implementación de *softwares* que permiten acelerar la solución de tareas complejas.

De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico, primer volumen de la serie Avances en ingeniería, presenta una compilación de investigaciones de distintas áreas de la ingeniería, que muestran un enfoque práctico en la solución de problemas aplicativos. Con esta obra, los coordinadores buscan dar a conocer los avances y logros de la ciencia y la tecnología para fortalecer el futuro profesional que se encamina hacia una sociedad sostenible.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS