

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México

Tratamiento de un surfactante comercial presente en el agua por el proceso fenton efectos en la salud y el medio ambiente

Reciclado de PEBD reforzado con partículas de hierro como propuesta sustentable para la economía circular

Análisis de la influencia del número de álabes en la hidrodinámica y potencia mecánica de un tornillo de Arquímedes empleando CFD

Análisis del modelo operacional y de negocio para la implementación de UAVs en logística de distribución. Caso: proveedor Tier 1 en México.

A mobile application to create awareness about scholar's activities





Universidad Autónoma del Estado de México

Equipo Editorial

Directora editorial: Dra. Rosa María Valdovinos Rosas

Asesor científico: Dr. Rigoberto Martínez Méndez

Asesora de redacción: Dra. Mireya Salgado Gallegos

Colaborador editorial: Dr. Javier Salas García

Comité Editorial

Universidad Autónoma del Estado de México

Dra. Lourdes Loza Hernández

Dra. María Dolores Durán García

Dr. Jaime de la Colina Martínez

Universidad Politécnica de Valencia, España

Dra. Angélica Guzmán Ponce

Universidad Autónoma de Guerrero

Dr. Juan Manuel Esquivel Martínez

Editor Invitado

Dr. Ansel Yoan Rodríguez González

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE),
Baja Californial, México.

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, año 3 , Vol. 1, núm. 1, enero-junio 2023, es una Publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote., Colonia Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000, Tels. 7222-14-08-55, <https://hemeroteca.uaemex.mx/index.php/ideasingeneria>, ideasencienciai_fi@uaemex.mx. Directora editorial: Rosa María Valdovinos Rosas, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n, Toluca, Estado de México, C.P. 50130, Tel. 7222140855. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo no. 04-2017- 072110111500-203, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsables de la última actualización de este número, Mireya Salgado Gallegos y Javier Salas García, Facultad de Ingeniería. Diseño de portada y Diseño Editorial, Javier Salas García. Fecha de última modificación: 15 de marzo de 2023.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido aquí publicado sin fines de lucro, siempre y cuando no se modifique, se cite la fuente completa y su dirección electrónica en términos de licencia aplicable. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC).

Hecho en México, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), 2023.



CONTENIDO

	Pág.
Carta del Editor Ansel Y. Rodríguez González	2
Tratamiento de un surfactante comercial presente en el agua por el proceso fenton Plata Saldívar Jhoana, Girón Navarro Rocío, Garduño Pineda Laura, García González Nidia, Plata Saldívar Leonel	4
Reciclado de PEBD reforzado con partículas de hierro como propuesta sustentable para la economía circular Rodrigo Aguilar-Ayala, Miriam Sánchez-Pozos	18
Análisis de la influencia del número de álabes en la hidrodinámica y potencia mecánica de un tornillo de Arquímedes empleando CFD Mohedano-Castillo Martha Fernanda, López-Rebollar Boris Miguel, Díaz-Delgado Carlos, Salinas-Tapia Humberto, Posadas-Bejarano Abad	32
Análisis del modelo operacional y de negocio para la implementación de UAVs en logística de distribución. Caso: proveedor Tier 1 en México Tatiana Bataltescu, Jenaro Nosedal-Sánchez	53
A mobile application to create awareness about scholar's activities Sandra E. Nava-Muñoz, Dennise M. Ibarra-Cuevas, Jorge Aceves de Alba, Alberto Ramos Blanco, Francisco E. Martínez-Pérez	72

EDITORIAL



Ansel Y. Rodríguez González es Doctor en Ciencias Computacionales y miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI Nivel I. Ha participado en más de 15 proyectos de investigación y desarrollo y los algoritmos creados por él han estado entre los 2 primeros lugares en competencias internacionales como PowerTAC 2016 y Evolutionary Computation in the Energy Domain 2020, 2021 y 2022. Es miembro de la IEEE CIS Task Force on 'Computational Intelligence in the Energy Domain' y de la Association for Computing Machinery y es editor invitado de las revistas Pattern Recognition, Applied Sciences, e Intelligent Automation & Soft Computing. Participa en el fortalecimiento y consolidación de la comunidad científica mediante la dirección de tesis de nivel maestría y doctorado y como miembro de planta académica de posgrados en México y Cuba. Además, se caracteriza por una continua publicación de artículos científicos y de divulgación en revistas indexadas, y por la organización de congresos especializados y de divulgación de la ciencia y la tecnología.

Ansel Y. Rodríguez González

La ciencia y la tecnología son herramientas esenciales para abordar los desafíos ambientales y económicos y lograr la sostenibilidad en nuestro planeta. La innovación tecnológica ha permitido desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles, reduciendo el impacto ambiental de la humanidad mientras la investigación científica ha proporcionado las bases teóricas y empíricas para comprender los procesos ambientales y desarrollar estrategias para su preservación y restauración. Por su parte, la educación ha sido crucial para fomentar los avances científicos y tecnológicos necesarios para construir un futuro más sostenible. En este número se presentan trabajos inéditos que abordan estos temas.

Los surfactantes son compuestos químicos que se utilizan para reducir la tensión superficial del agua y mejorar su capacidad de disolver grasas y aceites. Aunque son útiles, su liberación al medio ambiente puede contaminar los ríos, arroyos, lagos, acuíferos, mares y océanos, alterando su calidad físico-química y microbiológica, lo que a su vez puede tener efectos dañinos en la vida acuática, la calidad del agua y la salud humana. Algunos surfactantes pueden ser tóxicos y persistentes en el ambiente. Por lo tanto, es importante encontrar tratamientos efectivos para mitigar sus efectos dañinos en el agua. En este contexto, el artículo "Tratamiento de un surfactante comercial presente en el agua por el proceso Fenton" de los autores Jhoana Plata Saldívar, Rocío Girón Navarro, Laura Garduño Pineda, Nidia García González y Leonel Plata Saldívar tiene como objetivo confirmar la degradación de un surfactante utilizando la técnica de oxidación avanzada conocida como proceso Fenton.

Otro compuesto que provoca la contaminación de los cuerpos de agua son los plásticos, los cuales son materiales no biodegradables que pueden tardar cientos de años en descomponerse. Debido al inadecuado manejo de los residuos plásticos, estos pueden acumularse en los ecosistemas y causar daños irreparables en la flora y fauna, alterando el equilibrio natural de los ecosistemas, causando la muerte de miles de animales marinos y afectando negativamente la salud humana. Sin embargo, el reciclaje y reutilización de los plásticos puede no sólo reducir su impacto ambiental negativo sino también generar importantes oportunidades económicas y de empleo en la economía circular. Considerando lo anterior los autores Rodrigo Aguilar Ayala y Miriam Sánchez Pozos presentan el trabajo "Reciclado de PEBD reforzado con partículas de Hierro como Propuesta sustentable para la economía".

Por otro lado, los autores Martha Fernanda Mohedano Castillo, Boris Miguel López Rebollar, Carlos Díaz Delgado, Humberto Salinas Tapia y Abad Posadas Bejarano presentan en su estudio titulado "Análisis de la influencia del número de álabes en la hidrodinámica y potencia mecánica de un tornillo de Arquímedes empleando CFD" en el que se realiza un análisis detallado sobre las geometrías adecuadas para aprovechar el potencial hidroeléctrico en pequeños cursos de agua. Lo abordado es un tema relevante, pues el uso de este tipo de tecnología podría tener un impacto social positivo al proporcionar energía eléctrica a las comunidades cercanas a los cuerpos de agua y, al mismo tiempo, contribuir a reducir el uso de combustibles fósiles, lo que tendría un impacto ambiental positivo.

Optimizar las cadenas de suministro también es un tema de suma importancia en el marco de abordar los desafíos ambientales y económicos y lograr la sostenibilidad. En particular, los vehículos aéreos no tripulados han emergido como una de las nuevas tecnologías más prometedoras con ese fin. Abordando esta temática los autores Tatiana Bataltescu y Jenaro Nosedal Sánchez presentan el artículo "Análisis del modelo operacional y de negocio para la implementación de UAVs en logística de distribución. caso: proveedor TIER 1 en México".

Siendo la educación el medio para formar a los futuros tecnólogos y científicos, se cierra este número con el artículo "A mobile application to create awareness about scholar's activities" de los autores Sandra E. Nava Muñoz, Dennise M. Ibarra Cuevas, Jorge Aceves de Alba, Alberto Ramos Blanco, Francisco E. Martínez Pérez.

Finalmente, invito a nuestros lectores a sumergirse en este número, el cual presenta propuestas innovadoras desde diversas áreas de la ingeniería para enfrentar desafíos ambientales y económicos y lograr la sostenibilidad de nuestro planeta.

Tratamiento de un surfactante comercial presente en el agua por el proceso fenton

Treatment of a commercial surfactant present in the water by the fenton process

Plata Saldívar, J. ^{1*}; Girón Navarro, R. ^{2*}; Garduño Pineda, L. ¹; García González, N. ¹,
Plata Saldívar, L. ¹

Recibido: 14 de octubre de 2022 – Aceptado: 7 de febrero de 2023

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en el tratamiento de un surfactante ampliamente utilizado en diferentes productos comerciales de limpieza. Como primer paso, se realizó la degradación química del surfactante ácido dodecylbencensulfónico (ADBS) presente en agua mediante el proceso Fenton homogéneo utilizando diferentes valores de pH y

concentraciones de catalizador y peróxido de hidrógeno. Para la evaluación de estas condiciones se usó un diseño experimental central compuesto obtenido en el software *Statgraphics*. El sistema experimental consistió en un reactor *batch* (una sola entrada y salida) con agitación constante mediante la inyección de oxígeno por la parte superior usando una bomba de aire.

¹ Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Km.44.8, carretera Toluca-Atlaconulco, ejido de San Juan y San Agustín, C.P. 50700 Jocotitlán, Estado de México, México; ² Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias de Agua (IITCA), Universidad Autónoma del Estado de México, Km.14.5, carretera Toluca-Atlaconulco, C.P. 50200 Toluca, Estado de México, México

*Autores de correspondencia: pasajh1608@gmail.com, rgironn@alumno.uaemex.mx



De acuerdo con las gráficas de superficie de respuesta obtenidas en *Statgraphics*, el experimento para obtener una degradación completa del ADBS, en un tiempo menor de 2 horas, requiere $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 y $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 a un pH de 4.4. Los resultados demostraron que el factor con el mayor efecto significativo en la generación de radicales $\bullet\text{OH}$ es el pH, promoviendo la eliminación más rápida del surfactante en el agua. El avance de la degradación del ADBS fue valorado en diferentes tiempos: 0, 5, 10, 30, 60, 80, 100 y 120 minutos, obteniendo una cinética de primer orden y un tiempo de vida media de 2.01 minutos. Por otro lado, la caracterización de la solución con espectrofotometría Infrarroja, antes y después del tratamiento con el proceso Fenton, confirmó la reducción de varios grupos funcionales del surfactante en el agua tratada.

PALABRAS CLAVE: tensioactivos, ADBS, Fenton, aguas residuales, diseño experimental.

ABSTRACT

The present study focuses on the treatment of a surfactant widely used in different commercial cleaning products. As a first step, the chemical degradation of the surfactant dodecylbenzenesulfonic acid (ADBS) present in water was carried out through the homogeneous Fenton process using different

pH values and concentrations of catalyst and hydrogen peroxide. For the evaluation of these conditions, a composite central experimental design obtained in the *Statgraphics* software was used. The experimental system consisted of a batch reactor (single inlet and outlet) with constant agitation by injecting oxygen from the top using an air pump.

According to the response surface graphs obtained in *Statgraphics*, the experiment to obtain a complete degradation of ADBS, in less than 2 hours, requires $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of FeCl_3 and $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of H_2O_2 at a pH of 4.4. The results showed that the factor with the greatest significant effect on the generation of $\bullet\text{OH}$ radicals is pH, promoting the most rapid elimination of the surfactant in the water. The progress of ADBS degradation was assessed at different times: 0, 5, 10, 30, 60, 80, 100, and 120 minutes, obtaining first-order kinetics and a half-life of 2.01 minutes. On the other hand, the characterization of the solution with infrared spectrophotometry, before and after treatment with the Fenton process, confirmed the reduction of several functional groups of the surfactant in the treated water.

KEYWORDS: Surfactants, ADBS, Fenton, wastewater, experimental design.

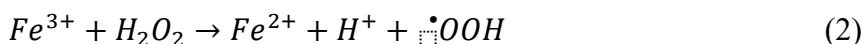
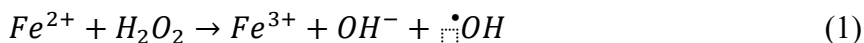
INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el uso desmedido de surfactantes en diferentes actividades antropogénicas ha generado una severa contaminación de los cuerpos de agua dulce (arroyos, ríos, lagos, acuíferos) y salada (mares y océanos), alterando sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de calidad. Los surfactantes o tensioactivos suelen utilizarse para formular grandes cantidades de productos comerciales químicos como champús, detergentes, dentífricos, enjuagues bucales, limpieza de textiles y suelos, lociones y fertilizantes agrícolas (Bhatt et al., 2020), siendo uno de los más utilizados el ácido dodecibenceno sulfónico lineal (ADBS), el cual comprende más del 40% de todos los surfactantes utilizados (Scott & Jones, 2000).

El ácido dodecibenceno sulfónico (ADBS) es un tensoactivo aniónico que tiene efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente en altas concentraciones. Algunos estudios han reportado que posee un carácter tóxico y carcinógeno en los humanos, mientras que en los ecosistemas acuáticos promueve la eutrofización no controlada, dificulta la floculación y produce formación excesiva de espumas en los cuerpos de agua (Geng et al., 2020; Mirbahoush et al., 2019). Las aguas residuales contaminadas con los surfactantes, sin tratamiento previo, se descargan en los cuerpos receptores de agua ocasionando alteraciones fisiológicas en la flora y fauna de los ecosistemas presentes, además aumentan el riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen (Badmus et al., 2021; Sathe et al., 2021).

Para mitigar los efectos dañinos de los surfactantes en el agua, algunos estudios han reportado eficientes tratamientos que involucran el uso de técnicas de oxidación avanzada, específicamente el proceso Fenton. (Mirbahoush et al., 2019) obtuvo un 80.8% de eliminación del dodecil sulfato de sodio (SDS) aplicando un tratamiento acoplado de coagulación-Fenton, mientras que (Malakootian et al., 2016) para el SDS alcanzó un 71% usando el proceso Foto-Fenton. (Morillo Semanate et al., 2019) obtuvo una reducción de tensoactivos en aguas residuales del 97% con el proceso Fenton asistido de agentes quelantes. Estos estudios confirman la idoneidad del proceso Fenton para la eliminación de surfactantes, por lo que la degradación del ADBS es de interés en la presente investigación, debido a que no ha sido reportado previamente.

El proceso Fenton es un POA eficaz basado en la producción de radicales $\bullet\text{OH}$ altamente reactivos debido a la rápida reacción entre los iones de hierro y H_2O_2 en condiciones ácidas (Ameta, 2018; Babuponnusami & Muthukumar, 2014). Las reacciones principales que ocurren en el proceso Fenton, involucran las ecuaciones (1) y (2) (Morillo Semanate et al., 2019; Zhang et al., 2019):



Algunas ventajas del proceso Fenton encontradas durante el desarrollo de la metodología fueron su realización simple, los tiempos de reacción cortos y la eliminación rápida del ADBS utilizando reactivos de bajo impacto ambiental (Aramyan, 2017).

Los objetivos del presente estudio fueron confirmar la degradación del surfactante aplicando el proceso Fenton homogéneo, evaluar las eficiencias del sistema propuesto Fe^{3+}/H_2O_2 , a través de las gráficas de superficie de respuesta, para hallar la condición óptima de degradabilidad, evaluar la cinética de reacción del ADBS y determinar las ventajas potenciales de aplicar escalar este sistema en futuras investigaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos químicos

La mayoría de los reactivos empleados fueron grado reactivo: peróxido de hidrógeno (30%, J.T. Baker, H_2O_2) y cloruro de hierro (III) ($\geq 98\%$, Sigma-Aldrich, $FeCl_3$). El surfactante ácido dodecil benceno sulfónico (94%, ADBS) se compró en una tienda local de materias primas. Para todas las soluciones preparadas se utilizó agua destilada.

Métodos analíticos

La determinación del ADBS se llevó a cabo espectrofotométricamente mediante un espectrofotómetro UV-VIS modelo GENESYS 10S. Tras efectuar un barrido con distintas concentraciones, se obtuvo la longitud de onda del ADBS (240 nm). Las muestras también fueron analizadas mediante la espectrofotometría infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) utilizando el equipo Magna-IRTM Spectrometer 550 Marca Nicolet y el programa Omnic para visualizar los espectros en un intervalo de 1000 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} .

Procedimiento experimental

En la primera etapa, a partir del estado del arte y la estequiometría de la reacción, se propusieron las condiciones de operación para el tratamiento del ADBS señalados en la Tabla 1 (Babuponnusami & Muthukumar, 2014; Malakootian et al., 2016), las cuales se introdujeron al programa *Statgraphics* para obtener el diseño central compuesto presentado en la Tabla 2.

TABLA 1.
CONDICIONES DE OPERACIÓN

Tensoactivo ADBS:		30 mg·L⁻¹	
Factores		Valor 1 (bajo)	Valor 2 (alto)
FeCl₃		15 mg·L ⁻¹	60 mg·L ⁻¹
H₂O₂		25 mg·L ⁻¹	80 mg·L ⁻¹
pH		3	6

El *software* creó un diseño compuesto central 2^3+est para evaluar los efectos de 3 factores en 21 corridas, conteniendo bloques ortogonales, lo que permitió incluir puntos estrella en una distancia axial para estimar los términos del modelo y los efectos de bloque de forma independiente. Además, su ejecución fue en un solo bloque y el orden de los experimentos fue aleatorizado para aportar protección contra el efecto de variables ocultas. La cantidad del surfactante tratada en cada experimento fue de 30 mg·L⁻¹.

Proceso Fenton

En la segunda fase, para evaluar los experimentos de la Tabla 2, se montó un sistema de tratamiento que consistió en un reactor *batch* de vidrio borosilicato (una sola entrada y salida) con agitación constante mediante la inyección de oxígeno por la parte superior usando una bomba de aire. En este reactor la reacción ocurrió en un sistema cerrado, donde los reactivos FeCl₃, el H₂O₂ y el ADBS, se incorporaron al inicio del proceso Fenton (tiempo 0 minutos). La solución contenida en el reactor fue agitada durante 2 horas y se utilizó un volumen de 1 L por cada corrida experimental. En la tercera etapa, la concentración del ADBS presente en las muestras, fue monitoreada a los 0, 5, 10, 30, 60, 80, 100 y 120 minutos de tratamiento mediante espectrofotometría UV-VIS a una longitud de onda de 240 nm.

Una vez calculada la condición óptima para degradar completamente el ADBS (sección 3. Resultados), en la cuarta etapa, las muestras líquidas obtenidas antes y después del proceso Fenton (tiempo 0 y 240 minutos) fueron analizadas por espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) leyendo los espectros a un rango de operación de 1000 cm⁻¹ hasta 4000 cm⁻¹ para finalmente identificar los grupos funcionales presentes y evaluar la eliminación del ADBS en las soluciones.

En la quinta fase, se realizó un estudio cinético basado en los modelos de orden cero, primer y segundo orden utilizando los datos experimentales obtenidos en la condición óptima para determinar las constantes cinéticas y los tiempos de vida media del surfactante ADBS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño experimental central compuesto

A partir de las concentraciones obtenidas en la etapa tres de la experimentación, fue posible calcular la eficiencia de la degradación del surfactante ADBS utilizando la ecuación 3.

$$D(\%) = \left[\frac{(C_0 - C)}{C_0} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Los porcentajes de degradación calculado para cada experimento se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2.
PORCENTAJES DE DEGRADACIÓN

Exp.	FeCl ₃	H ₂ O ₂	pH	% Degradación
	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹		%
1	37.5	52.5	4.5	100.00
2	37.5	52.5	6.86	65.80
3	2.06	52.5	4.5	100.00
4	72.93	52.5	4.5	55.27
5	37.5	52.5	2.13	14.58
6	15	25	3	11.12
7	37.5	52.5	4.5	100
8	15	80	3	0
9	60	25	6	69.51
10	37.5	9.18	4.5	78.92
11	37.5	52.5	4.5	100
12	37.5	95.81	4.5	100
13	37.5	52.5	4.5	100
14	60	80	6	100
15	15	25	6	70.76
16	60	25	3	63.29
17	60	80	3	58.33
18	37.5	52.5	4.5	100
19	37.5	52.5	4.5	100
20	37.5	52.5	4.5	100
21	15	80	6	40.34

Con los datos y resultados de la Tabla 2, se completó el diseño experimental en *Statgraphics*, obteniendo una colección de gráficos y tablas útiles para en el análisis de varianza (ANOVA), además se halló la condición óptima en la que existe mayor degradación de ADBS. En la Tabla 3 se presenta el análisis de varianza, donde se indican los efectos principales más significativos en el tratamiento propuesto:

TABLA 3.
ANÁLISIS DE VARIANZA

Factor	Suma de Cuadrados	Gl	Razón-F	Valor-P
A: FeCl₃	747.915	1	1.73	0.2154
B: H₂O₂	22.8027	1	0.05	0.8227
C: pH	4029.79	1	9.31	0.0110
AA	1696.89	1	3.92	0.0732
AB	562.298	1	1.30	0.2785
AC	339.171	1	0.78	0.3949
BB	598.793	1	1.38	0.2643
BC	32.6028	1	0.08	0.7888
CC	8863.92	1	20.48	0.0009
Error total	4760.23	11		
Total (corr.)	21654.4	20		

El coeficiente de correlación (R^2) obtenido fue 78.01%, lo cual indica un buen ajuste entre los resultados experimentales y las predicciones del modelo, es decir, el modelo así ajustado explica el 78 % de la variable de respuesta (%D) ilustrando el efecto de las concentraciones de H₂O₂, FeCl₃ y pH, además de sus interacciones. Además, el modelo fue ajustado con una $R^2_{ajustada} = 60\%$.

La Tabla 3 indica los factores que tienen un efecto significativo en la degradación del ADBS utilizando el estadístico del valor P. Si los factores tienen un valor de $p < 0.05$, son significativos y su nivel de confianza es del 95%. En este trabajo, el factor significativo fue el pH. El programa estadístico también ayudó a localizar los valores óptimos para lograr un porcentaje de degradación del 100%, los cuales se resumen en la Tabla 4.

TABLA 4.
CONDICIÓN ÓPTIMA

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
FeCl ₃	2.06167	72.9383	37.6824
H ₂ O ₂	9.18649	95.8135	53.4127
pH	2.13744	6.86256	4.42325

Como se observa en la Tabla 4, la condición óptima para una degradación completa del surfactante ADBS presente en el agua es: $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 , $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 y un pH ácido de 4.42. Estos resultados se confirman con la gráfica de superficie de respuesta (Figura 1).

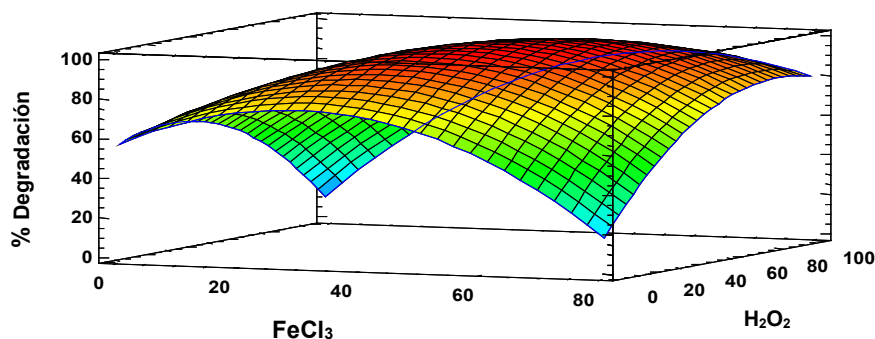


FIGURA 1.
SUPERFICIE 3D DE LA DEGRADACIÓN DEL ADBS (pH=4.4).

En la Figura 1, se observa que con $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 y $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 se alcanzó un porcentaje de degradación del 100%, el cual se identifica en la parte central de la gráfica con sombreado rojo. Con la condición optima se espera una generación idónea de radicales $\bullet\text{OH}$ durante el proceso Fenton, quienes son los encargados de degradar la molécula ADBS ($30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) a partir de la descomposición del H_2O_2 en presencia del catalizador FeCl_3 .

El proceso Fenton depende en gran medida de las condiciones de operación, como el pH de la solución y las concentraciones de Fe y H_2O_2 . No existen valores ideales para estos parámetros, por lo que es necesario evaluar las condiciones de funcionamiento óptimas para cada contaminante objetivo, considerando la estequiometría y la literatura reportada previamente.

Algunas investigaciones sobre el proceso Fenton, han demostrado que sólo es efectivo para un pH ácido, si existe un ambiente con pH neutro, se propicia la formación de hidróxidos, pero en lugar de que los radicales hidroxilos ataquen la molécula del surfactante, forman hidróxidos de hierro, lo que provoca precipitaciones e impide la degradación (Rubio-Clemente, 2017). En el presente trabajo, se obtuvo un pH ácido de 4.4 adecuado para degradar el surfactante ADBS, afirmando que, a valores de pH ácidos, el Fe^{3+} cumple su función como catalizador aumentando por más tiempo la capacidad oxidativa del reactivo. Simultáneamente, el H_2O_2 se descompone fácilmente generando especies reactiva como $\bullet\text{O}_2$, O_2 y $\bullet\text{OH}$, mejorando la degradación de los contaminantes orgánicos.

Los hallazgos encontrados coinciden con los reportados por otros autores, por ejemplo, (Sathe et al., 2021) determinaron que el tratamiento Fenton tiene una buena eficiencia a pH ácido, debido a que permite que el hierro se encuentra en solución mejorando su interacción con el H_2O_2 .

Por el contrario, a pH alcalino, el hierro precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, afectando su disponibilidad para reaccionar con el H_2O_2 y limitando la generación de radicales $\bullet\text{OH}$. No obstante, acondicionar las muestras a pH ácido, implica limitaciones ya que requerirá una inversión mayor para escalarlo al tratamiento a las aguas residuales, además a un pH ácido, el riesgo de que el hierro lixivie es mayor. Para encontrar una solución a esta desventaja, es indispensable continuar con el estudio de esta línea investigación, encontrando nuevos tratamientos que se desarrollen a pH neutro (Sathe et al., 2021). Por otra parte, algunas ventajas del proceso Fenton, destacadas durante la experimentación, fueron el corto tiempo de reacción, el montaje experimental sencillo, catalizador de bajo costo y no tóxico, no necesitó energía externa para activar el H_2O_2 y se llevó a cabo a presión y temperatura ambiente (Mirzaei et al., 2017; Vasquez-Medrano et al., 2018).

Comparando los valores de la condición óptima obtenidos con los reportados por otros estudios, es notable la diferencia debido a que no degradan el mismo surfactante. (Malakootian et al., 2016) con $\text{pH}=3$, $\text{H}_2\text{O}_2=0.5 \text{ mM}$ y $\text{Fe}^{2+}=40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ obtuvo un 71% de remoción del dodecil sulfato de sodio ($25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). La concentración de hierro utilizada es mayor que la del presente estudio, sin embargo, ocurre lo contrario con la concentración de H_2O_2 , es decir, el autor utilizó menor concentración del oxidante. Con base en esto, el tratamiento propuesto es una opción viable para conseguir una degradación completa del surfactante utilizando un catalizador de Fe^{3+} en lugar de Fe^{2+} .

Por su parte, (Morillo Semanate et al., 2019) reportó la eficiencia del tratamiento Fenton sobre aguas residuales domésticas contaminadas con tensioactivos, en donde las mejores condiciones fueron $\text{H}_2\text{O}_2=56.33 \text{ mM}$, una relación molar $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ de 1:9 a pH neutro. Al comparar la relación molar anterior (1:9) con la del presente estudio (1:4), se aprecia que la concentración de H_2O_2 empleada es menor, derivado del uso de agente quelantes y del gran volumen de agua tratada.

Caracterización por FTIR

El surfactante ADBS comercial y las muestras obtenidas antes y después del tratamiento, fueron analizadas de manera cualitativa a través de la espectrofotometría en el infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) para identificar los grupos funcionales presentes. En la Figura 2 se presenta el espectro infrarrojo del ADBS.

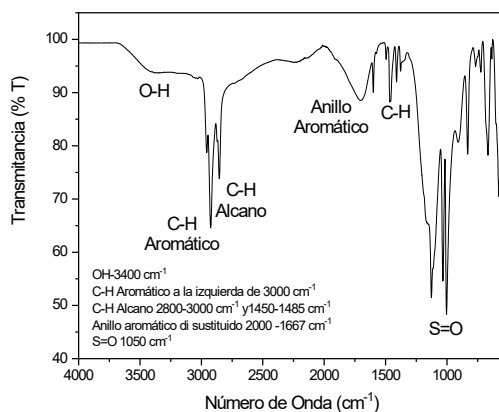


FIGURA 2.
ESPECTRO IR DEL SURFACTANTE ADBS.

Como se observa en la Figura 2, los grupos funcionales identificados fueron alcanos (C-H), aromáticos (C-H) y sulfonatos (S=O), confirmando la fórmula química del ADBS reportada por la literatura ($C_{18}H_{30}SO_3$).

La Figura 3 muestra el espectro FTIR del surfactante ADBS en el minuto 0 del tratamiento, es decir, con $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de ADBS, $37.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de catalizador, $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 y un pH ácido de 4.4.

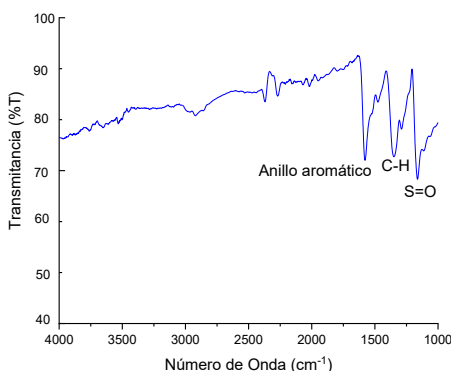


FIGURA 3.
ESPECTRO FTIR DEL ADBS EN EL MINUTO 0.

En la Figura 3, se observan picos amplios en 1100 cm^{-1} que correspondiente al enlace S=O, también está presente el grupo funcional alcano (C-H) en las longitudes de onda que van de 1250 a 1400 cm^{-1} . El enlace correspondiente al anillo aromático di sustituido está presente en la longitud de onda 1600 cm^{-1} . También se observan enlaces O-H debido a la presencia de agua en las

longitudes de onda $2700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, sin embargo, se restó del espectro del agua para visualizar con mayor claridad el ADBS.

El espectro infrarrojo de la solución tratada, es decir, después de aplicar el proceso Fenton por 120 minutos, se muestra en la Figura 4. En este espectro se visualizan dos picos correspondientes al enlace O-H, lo que nos indica presencia de agua. De esta manera, no hay presencia de grupos funcionales pertenecientes al ADBS o intermedios, por ende, se confirma que la degradación del surfactante es completa usando $37.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 , $53.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 y un pH ácido de 4.4.

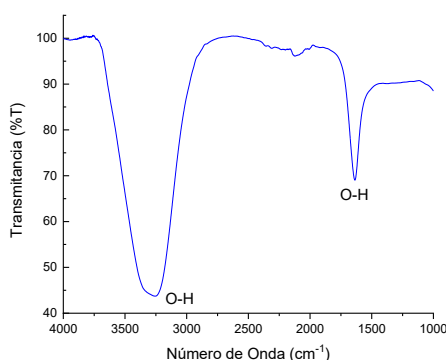


FIGURA 4.
 ESPECTRO FTIR DEL ADBS EN EL MINUTO 120.

Cinética de degradación del ADBS

A partir del experimento con las condiciones óptimas, se recopilieron los datos de concentración para hallar las cinéticas de reacción con las ecuaciones de primer orden, segundo orden y orden cero. El experimento se ajustó a un modelo de primer orden (Figura 5).

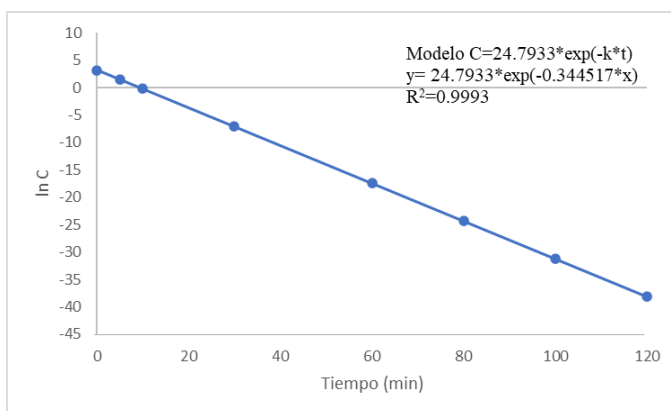


FIGURA 5.
 MODELO DE PRIMER ORDEN (C : CONCENTRACIÓN, k : CONSTANTE CINÉTICA, t : TIEMPO).

A partir de las gráficas obtenidas para cada modelo usado, se observó que el experimento óptimo para degradar el surfactante ADBS se ajustó a una cinética de primer orden debido a que arrojó un valor de correlación de 0.9993 (R^2), indicando el grado de dependencia entre las variables tiempo y concentración. También, con las ecuaciones cinéticas se obtuvo la concentración en cualquier tiempo, dentro del intervalo 0-120 minutos, y el coeficiente de determinación obtenido para comparar la correlación de los datos entre el eje x y eje y de cada ecuación. Las cinéticas de reacción son ecuaciones matemáticas que describieron la velocidad de degradación del surfactante ADBS en 2 horas.

La constante cinética (k) obtenida fue de 0.3445 min^{-1} para el modelo de primer orden. Con este resultado se determinó la rapidez de la reacción a través del tiempo de vida media, el cual indicó el tiempo requerido para disminuir a la mitad la concentración del surfactante ADBS en el agua. La vida media obtenida fue 2.0115 minutos (primer orden), lo que nos confirma que la degradación fue rápida. En otras palabras, para que la concentración del surfactante ADBS se reduzca de $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ a $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, se requiere aplicar el proceso Fenton durante 2.0115 minutos.

(Mirbahoush et al., 2019) reportó la remoción del surfactante SDS con el proceso foto-Fenton, donde los datos experimentales se ajustaron a un modelo de primer orden. Por su parte, (Ono et al., 2012) describió la tasa de degradación de un surfactante aniónico mediante una cinética de pseudo-primer orden usando el proceso foto-Fenton, obteniendo una $k=0.0269 \text{ min}^{-1}$, lo que indica una velocidad de reacción más lenta que la obtenida en el presente estudio.

CONCLUSIONES

El tratamiento del ADBS con el proceso Fenton es eficiente, convirtiéndolo en una opción interesante para tratar aguas contaminadas con este surfactante ya que promueve su rápida degradación.

La degradación eficiente se atribuye a la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) cuando se controla las concentraciones de H_2O_2 y FeCl_3 añadidas al proceso. Aunado a ello, el pH es el factor más significativo encontrado que contribuye a esta generación de especies reactivas, promoviendo la conversión del surfactante ADBS en compuestos de cadena más cortas.

Para evaluar y conocer las concentraciones óptimas de reactivos y pH se utilizó un diseño experimental central compuesto. La completa degradación del ADBS (100%) ocurrió cuando se utilizaron $53.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$, $37.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ FeCl}_3$ y un pH de 4.4 en un tiempo de tratamiento menor a 10 minutos.

El presente estudio es un antecedente para degradar surfactantes a escala laboratorio, por lo que los hallazgos encontrados pretenden ayudar a su escalamiento a plantas pilotos en futuras investigaciones. Por otro lado, El valor de pH abre una puerta para nuevos estudios que promuevan el uso del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales reales y superen el inconveniente del medio ácido, permitiendo trabajar a condiciones neutras, para cumplir con la normatividad mexicana vigente.

REFERENCIAS

- Ameta, S. C. (2018). Introduction. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00001-2>
- Aramyan, S. M. (2017). Advances in Fenton and Fenton Based Oxidation Processes for Industrial Effluent Contaminants Control-A Review. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 2(4). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2017.02.555594>
- Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 557–572. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
- Badmus, S. O., Amusa, H. K., Oyehan, T. A., & Saleh, T. A. (2021). Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44), 62085–62104. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16483-w>
- Bhatt, J., Rai, A. K., Gupta, M., Vyas, S., Ameta, R., Ameta, S. C., Chavoshani, A., & Hashemi, M. (2020). Surfactants: an emerging face of pollution. In *Micropollutants and Challenges* (pp. 145–178). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818612-1.00004-0>
- Geng, Y., Huang, J., Tan, B., Xu, Y., Li, P., & Xu, J. (2020). Efficient synthesis of dodecylbenzene sulfonic acid in microreaction systems. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 149(February), 107858. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107858>
- Malakootian, M., Jaafarzadeh, N., & Dehdarirad, A. (2016). Efficiency investigation of photo-Fenton process in removal of sodium dodecyl sulphate from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 57(51), 24444–24449. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1140082>
- Mirbahoush, S. M., Chaibakhsh, N., & Moradi-Shoeili, Z. (2019). Highly efficient removal of

- surfactant from industrial effluents using flaxseed mucilage in coagulation/photo-Fenton oxidation process. *Chemosphere*, 231, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.118>
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghighat, F., & Yerushalmi, L. (2017). Removal of pharmaceuticals from water by homo/heterogeneous Fenton-type processes – A review. *Chemosphere*, 174, 665–688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.019>
- Morillo Semanate, L. D., Naranjo Tovar, D. A., Pérez, J., Villacis Oñate, W. E., Vargas Jentzsch, P., & Mufloz Bisesti, F. (2019). REMOCIÓN DE TENSOACTIVOS Y COLIFORMES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE PROCESOS FENTON. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 931–943. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.12>
- Ono, E., Tokumura, M., & Kawase, Y. (2012). Photo-Fenton degradation of non-ionic surfactant and its mixture with cationic or anionic surfactant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(8), 1087–1095. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.668034>
- Sathe, S. M., Chakraborty, I., Sankar Cheela, V. R., Chowdhury, S., Dubey, B. K., & Ghangrekar, M. M. (2021). A novel bio-electro-Fenton process for eliminating sodium dodecyl sulphate from wastewater using dual chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 341(July), 125850. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125850>
- Scott, M. J., & Jones, M. N. (2000). The biodegradation of surfactants in the environment. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1508(1–2), 235–251. [https://doi.org/10.1016/S0304-4157\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4157(00)00013-7)
- Vasquez-Medrano, R., Prato-Garcia, D., & Vedrenne, M. (2018). Ferrioxalate-Mediated Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (Vol. 243, pp. 89–113). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00004-8>
- Zhang, M., Dong, H., Zhao, L., Wang, D., & Meng, D. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of The Total Environment*, 670, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180>

Reciclado de PEBD reforzado con partículas de hierro como propuesta sustentable para la economía circular

Recycling of LDPE reinforced with iron particles as a sustainable proposal for the circular economy

Aguilar-Ayala, R.¹; Sánchez-Pozos, M. ¹

Recibido: 13 de octubre de 2022 – Aceptado: 26 de febrero de 2023

RESUMEN

El procesamiento del polietileno de baja densidad reciclado (PEBDR) empleando extrusión resultó ser una alternativa muy útil para procesar el plástico de desecho. El PEBDR reforzado con Fe, presentó mejoras significativas en las propiedades mecánicas de deformación a la tensión, e impacto Charpy. El polietileno de baja densidad virgen (PEBD) reforzado con Fe, presentó

valores más elevados de resistencia a la tensión y dureza en función de la cantidad de Fe incorporado. Sin embargo, el PEBDR reforzado con Fe, presentó propiedades interesantes, ya que se mejoran significativamente las propiedades mecánicas con respecto a las propiedades del material virgen. Se elaboraron materiales compuestos a base de PEBD y PEBDR ambos reforzados con partículas de Fe en porcentajes de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 % p/p

¹ Universidad Autónoma del Estado de México¹Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca.
Autores de correspondencia:
daa_onte@hotmail.com, msanchezpo@uaemex.mx



empleando un extrusor monohusillo. Estos materiales pueden ser una opción sustentable, para ser usados como materiales estructurales, debido a las propiedades mecánicas que presentaron. Lo cual permitiría reintegrar los desechos de PEBD en la cadena productiva, dándoles un nuevo valor agregado y por tanto, una pequeña aportación a la economía circular de los plásticos.

PALABRAS CLAVE: Reciclado, compuestos, PEBD

ABSTRACT

The processing of recycled low-density polyethylene (LDPER) using extrusion turned out to be a very useful alternative for processing waste plastic. The Fe-reinforced LDPER presented significant improvements in the mechanical properties of tensile deformation and Charpy impact. Virgin low-density polyethylene (LDPER) reinforced with Fe presented higher values of tensile strength and hardness depending on the amount of Fe incorporated. However, the mechanical properties of the LDPER reinforced with Fe, were significantly presented improved when compared to the

properties of the virgin material. Composite materials based on LDPE and LDPER, both reinforced with Fe particles in percentages of 0, 5, 10, 15, 20 and 25% w/w, were produced using a single-screw extruder. These materials can be a sustainable option to be used as structural materials due to the mechanical benefits they present. This would allow LDPE waste to be reintegrated into the production chain, giving it new added value and therefore a small contribution to the circular economy of plastics.

KEYWORDS: recycled, composites, LDPE

NOMENCLATURA:

PEBD - Polietileno de baja densidad

PEBDR - Polietileno de baja densidad reciclado

PEBD-Fe - Compuesto a base de PEBD y limadura de hierro

PEBDR-Fe - Compuestos a base de PEBDR y limadura de hierro

RSU - Residuos Sólidos Urbanos

CNA - Consumo Nacional Aparente

INTRODUCCIÓN

La problemática actual ocasionada por el inadecuado uso de los plásticos, nos ha llevado a modificar la concepción de residuos, ya que éstos no continuarán siendo tratados como basura. Ahora son recursos fuera de lugar, lo cual es importante replantear y revalorizar en función del tiempo, con el objetivo de que sigan conservando su valor económico, lo cual llevará a minimizar la generación de residuos para lograr una economía sostenible.

Para migrar hacia la economía circular es necesario diseñar los productos, seleccionando los materiales con menor impacto. Para ello es requisito conocer su ciclo de vida, desde cómo se obtienen, de dónde vienen, cuántas emisiones genera su obtención, etc.; así como la manera en que esto puede afectar la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales. El empleo de materiales reciclados resulta ser una opción completamente viable ya que de acuerdo a las técnicas de análisis de ciclo de vida, el incorporar materiales reciclados, tiene una carga ambiental nula. Los materiales reciclados permiten la optimización al final de la vida útil de un producto, al ser reutilizados, remanufacturados, reciclados etc. para reintegrarlos al ciclo de vida.

Por lo anterior, en este trabajo se plantea, como una opción sustentable, el diseño de un material polimérico compuesto con polietileno de baja densidad reciclado y reforzado con partículas metálicas de hierro (también de desecho de una empresa metal-mecánica) para generar un material con propiedades mecánicas mejoradas, y apto para ser empleado en aplicaciones estructurales con un valor agregado importante por ser elaborado únicamente con materiales de desecho.

Los derivados del petróleo son fuente de materia prima para la fabricación de materiales plásticos, como las poliolefinas, así como otros. Entre las poliolefinas, destacan el polietileno de baja densidad (PEBD), el cual es un plástico que se utiliza para fabricar diversos productos de uso diario, como son los envases y los embalajes para alimentos, entre muchos otros artículos. Las propiedades de este plástico, precio y facilidad de procesamiento han hecho que el PEBD sea ampliamente utilizado y por ello forme parte de desechos sólidos de muchas ciudades.

Desde 1950 hasta 2017 la producción mundial anual de plástico aumentó 200 veces, alcanzando una cantidad de alrededor de 359-381 millones de toneladas y se espera que supere los 1800 millones de toneladas para 2050 (Bouche, 2019) y (Stanton, 2021).

La cifra más reciente con datos del 2015 revela que en México, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) superó las 53,1 millones de toneladas, lo cual representó un incremento del 61.2 % con respecto al año (SEMARNAT, 2015).

Los plásticos representan el 10.9 % del total de los RSU, lo que implica que 4,589.2 toneladas fueron de materiales plásticos. Hay 6 importantes clases de plásticos que son los más utilizados para empaques y envases, que son usados en el mercado en función de su facilidad de reciclaje (ver Tabla 1). Del número total de resinas que se utilizaron en la industria de los plásticos en el año 2015, el 47 % se destinó a envases y embalajes. Del total de la resina empleada, solo se recolectó el 18 % para el tratamiento post-consumo y reciclaje. También se observa que, entre los plásticos con mayor porcentaje de recolección a nivel nacional, están el PEAD con 22 % y el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) con 35 %. No obstante, al considerar sólo envases y embalajes, los plásticos con mayor acopio son; el LLDPE con 80 %, el PEAD con 50 % y el PVC con 50 %. SEMARNAT (2015).

TABLA 1.
PRINCIPALES PLÁSTICOS EN EL MERCADO (NatGeo , 2018)

Número de identificación para reciclado	Tipo de plástico	Acrónimo
1	Polietileno tereftalato	PET
2	Polietileno de alta densidad	PEAD
3	Policloruro de vinilo	PVC
4	Polietileno de baja densidad	PEBD
5	Polipropileno	PP
6	Poliestireno	PS

La Tabla 2 muestra el concentrado de la cantidad de plástico (en porcentaje), recolectado para reciclarse con respecto al Consumo Nacional Aparente (CNA), con respecto al porcentaje de plástico recolectado de uso para envases y embalajes.

La información que se tiene para el PEBD es que, la recolección es cercana de al 6 %. En general, los niveles de reciclaje en México son mínimos, aunque a nivel global el reciclaje del PET en nuestro país ocupa un lugar importante, el PEBD tiene un valor bajo de 2.78% del total de resina utilizada en México, lo cual equivale a 558 000 toneladas de PEBD que no son recolectadas ni recicladas por año. (ECOCE,2019).

El polietileno se utiliza ampliamente en numerosas aplicaciones, debido a sus buenas propiedades físicas, tales como; alta resistencia química, no tóxico, inodoro, dieléctrico, impermeable, y ligero. Desde 1945 su uso se ha incrementado notablemente. Sin embargo, el PEBD, es un material que en general se recupera en muy bajo porcentaje como se puede apreciar en la Tabla 2. Por lo que requiere mayor investigación, el PEBD es un material polimérico muy noble, ya que dentro de la gama de los polímeros “comodities” es uno de los polímeros más usados

TABLA 2.

VALORES DE LA RECOLECCIÓN POST-CONSUMO DE LOS PLÁSTICOS MÁS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA. ADAPTADO DE:

Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de residuos de Envase Post-Consumo de PET, PEAD, y otros. (ECOCE, 2019)

CNA de diversos polímeros (miles de toneladas)	PEAD	PVC	PEBD	LLDPE	PP	PS	Total	%
CNA de resina promedio	820	512	574	412	1 138	487	4 742	100
CNA de envases y embalajes	363	4	254	183	504	216	2 233	47
Residuo plástico acopiado	182	2	16	146	61	2	837	18
% de residuo plástico acopiado respecto a CNA promedio	22 %	0.4 %	3 %	35 %	5 %	0.4 %	18 %	
% de residuo plástico acopiado respecto a CNA de envases y embalajes	50 %	50 %	6 %	80 %	12 %	1 %	---	

y que además se puede reciclar mecánicamente sin degradación térmica significativa y con bajos costos energéticos, como lo ha reportado Gu et al. (2017).

El reciclaje mecánico de residuos plásticos es una de las técnicas más empleadas como estrategia para la disminuir el impacto ambiental de estos materiales. Gu, et al (2017) reportó el análisis de ciclo de vida, usando el proceso de extrusión de polímeros reciclados. Este autor señala que es posible disminuir la huella de carbono, si en lugar de usar resina virgen, se emplean plásticos reciclados combinados con materiales de refuerzos y aditivos. Por lo tanto, el reciclaje mecánico resultó ser una alternativa superior en la mayoría de los aspectos ambientales y mostró ser una de las opciones más sustentable en comparación con otras técnicas utilizadas para el reciclado, como lo reporta Tišler-Korljan (2014) en términos de: recuperación de energía (incineración), reciclaje de materias primas (pirólisis, hidrogenación, gasificación) y química (despolimerización).

En general, los plásticos reciclados se pueden considerar como una fuente de material renovable y utilizarlos en la fabricación de diversos productos, podría reducir en gran medida los gases de efecto invernadero, así como las emisiones y la huella de carbón. Los plásticos reciclados representan un ahorro de 20 a 50% en términos de precios de mercado en comparación con sus homólogos vírgenes.

Los materiales compuestos a base de polímeros reforzados pueden ser considerados materiales de ingeniería debido a sus elevadas propiedades mecánicas y estabilidad térmica, con propiedades estructurales importantes y sumamente adaptables y flexibles a extensas aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, aeronáutica y en la construcción. Sheikh et al. (2009) y Zuccheratt (2017) reportaron el uso de PET reforzado con hierro para generar un incremento en las propiedades mecánicas. De igual manera, Singh (2016) desarrolló un trabajo, en el que comparaba las propiedades mecánicas del PEBD y el polietileno de alta densidad (PEAD) con concentraciones menores al 12 % de Fe (hierro), obteniendo un comportamiento similar en las propiedades mecánicas de los dos materiales al ser sometidos a diferentes condiciones de esfuerzo. Se reportó un aumento en la resistencia mecánica de ambos compuestos ya que las propiedades mecánicas resultaron ser bastante mayores que las obtenidas en la matriz original (material virgen).

En el presente trabajo se han procesado compuestos de PEBD y PEBDR empleando partículas de Fe a los porcentajes de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 % p/p. Los compuestos elaborados fueron caracterizados mecánicamente para determinar su dureza, resistencia a la tensión e impacto. El análisis de estas propiedades permitió establecer el grado de desempeño que los compuestos de PEBDR-Fe presentan en comparación con las formulaciones de PEBD-Fe. Se considera que esta información es importante en términos de sustentabilidad, ya que permite determinar la factibilidad de incluir a un compuesto PEBDR-Fe como un material con propiedades mecánicas estructurales a la economía circular de los materiales poliméricos.

METODOLOGÍA

Se utilizaron dos tipos de resinas; polietileno de baja densidad (PEBD) virgen (PX20020P) producido por Petróleos Mexicanos (PEMEX) y polietileno de baja densidad post-consumo industrial (PEBDR), el cual fue proporcionado por una empresa fabricante de bolsa de polietileno (en forma de pellets). El PEBD reciclado contiene carbonato de calcio 5 % y pigmento 8 %. Ambas resinas fueron utilizadas como matrices en la elaboración de materiales poliméricos compuestos, reforzados con partículas de hierro (Fe). El hierro utilizado, es limadura de Fe, subproducto de los procesos de mecanizado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UAEMex. La limadura de Fe se calentó en una mufla hasta 280°C por 2 h, para eliminar cualquier residuo orgánico que pudiera contener. Las partículas de Fe, tienen tamaños que van de 5 μm hasta 25 μm .

Preparación y caracterización de los compuestos

Los compuestos PEBD- Fe y PEBDR-Fe se mezclaron en cinco diferentes proporciones de Fe en 0, 5, 10, 15, 20 y 25 (% p/p) (ver Tablas 3 y 4) para cada formulación. Para elaborar los materiales compuestos, se incorporaron la matriz polimérica y las partículas de Fe en los diferentes porcentajes en un extrusor monohusillo marca Brabender modelo 100 (L/D:10) empleando un perfil de temperaturas de 100, 110, 120 y 130 °C y una velocidad de mezclado de 48 rpm. Para el procesamiento de los compuestos con PEBDR-Fe, se modificó el perfil de temperaturas a 120, 130, 140, 150 °C y se utilizó la misma velocidad de mezclado (48 rpm).

TABLA 3.
COMPOSICIÓN DE LOS COMPUESTOS PEBD-Fe (% p/p)

PEBD (% p/p)	Fe (%)	Identificación
100	0	LDPE0
95	5	LDPE5
90	10	LDPE10
85	15	LDPE15
80	20	LDPE20
75	25	LDPE25

TABLA 4.
COMPOSICIÓN DE LOS COMPUESTOS PEBDR-Fe (% p/p)

PEBDR (% p/p)	Fe(%)	Identificación
100	0	LDPER0
95	5	LDPER5
90	10	LDPER10
85	15	LDPER15
80	20	LDPER20
75	25	LDPER25

Para los ensayos mecánicos de las formulaciones elaboradas, se moldearon probetas para ensayos de tensión e impacto por termo-compresión utilizando una prensa CARVER modelo Auto “C”, a la temperatura de 110°C durante 5 min para las probetas de PEBD y a 140 °C durante 5 min para las probetas de PEBDR. El ensayo de tensión se realizó empleando la norma ASTM D 638-14 en una máquina INSTRON (modelo 3360 series), con una celda de carga de 5 kN. Para cada formulación se ensayaron cinco probetas, a una velocidad de deformación de 3 mm/min y se obtuvieron las gráficas esfuerzo-deformación de cada probeta. Los parámetros mecánicos medidos fueron; esfuerzo máximo a tensión, elongación a la ruptura y el módulo de elasticidad. El ensayo de impacto se realizó empleando la norma ASTM D 6110 en una máquina TORSEE de 30 kgf-m, se ensayaron cinco probetas de cada formulación. Se registró la energía absorbida y la resistencia

al impacto. Para la prueba de dureza se empleó un durómetro Mitutoyo Shore D modelo LD055. Las pruebas de dureza se realizaron en tres regiones diferentes para cada probeta y se obtuvo el valor promedio. Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente.

RESULTADOS

Prueba de tensión

El esfuerzo a la tensión del PEBD virgen con 0% de Fe es de 10.6 MPa, mientras que para el PEBDR con 0% Fe es de 6.3 MPa, dicha tendencia se conserva aún con la incorporación de Fe. Sin embargo, el esfuerzo a la tensión se incrementa en ambos polímeros proporcionalmente con el incremento de la cantidad de Fe (Figuras 1 y 2).

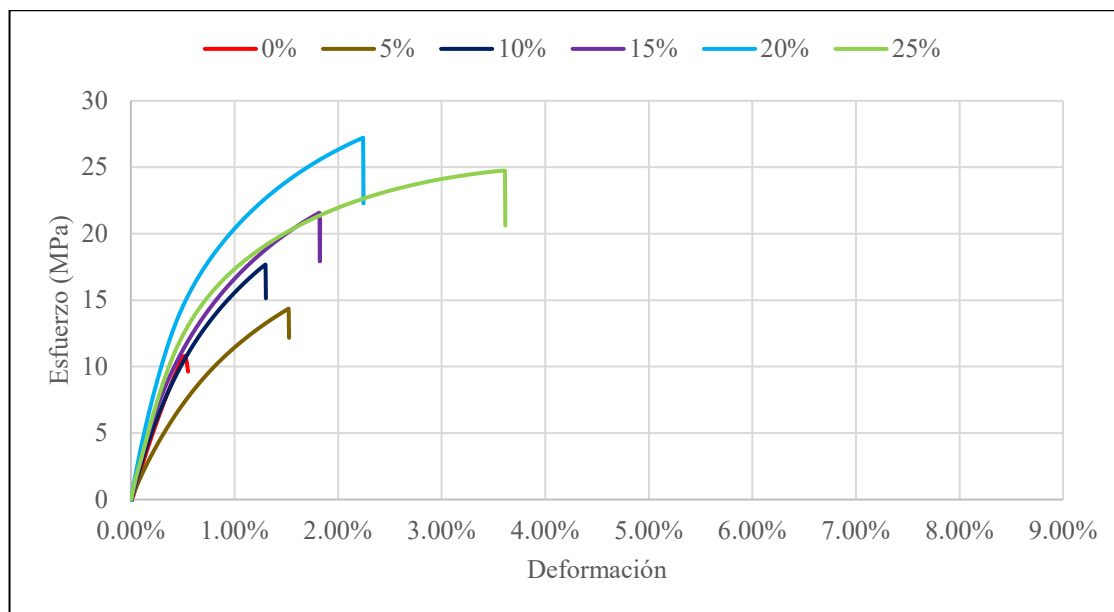
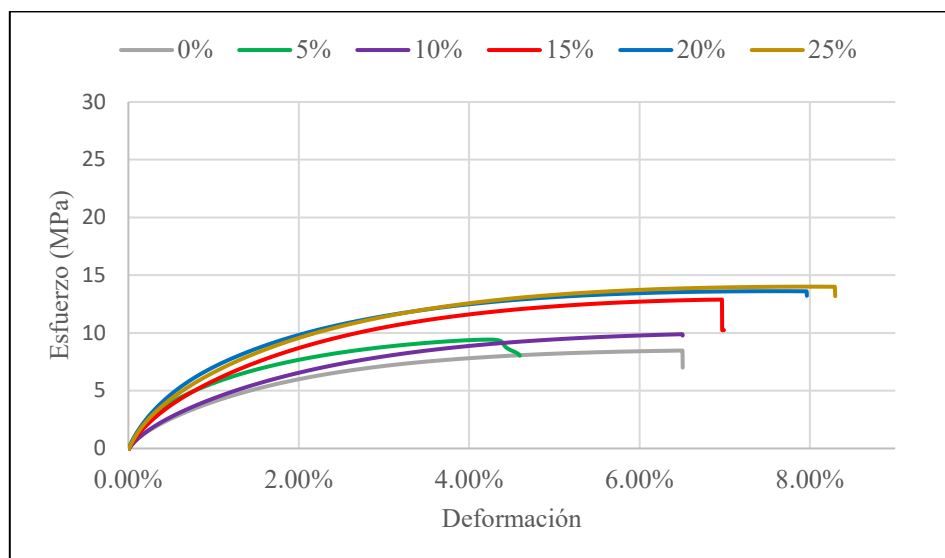


FIGURA 1.
PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBD-Fe. (Aguilar R.,2019).

**FIGURA 2.***PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBDR-Fe. (Aguilar R.,2019).*

De las gráficas esfuerzo deformación de las Figuras 1 y 2, se obtienen las siguientes propiedades mecánicas (Tablas 5 y 6):

TABLA 5.*PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBD REFORZADO CON FE. (Aguilar R.,2019)*

% Fe	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga a la rotura (MPa)	Esfuerzo último a la tensión (MPa)	Deformación promedio (%)
0	10,6	1237,5	795,8	11,3	1,1
5	13,1	1686,9	803,25	14,6	1,3
10	16,9	1823,3	808	17,7	1,3
15	16,5	2027	812,1	22,2	1,8
20	16,5	2403	810	27	2,2
25	15,1	2185	813,6	25	3,6

TABLA 6.*PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBD REFORZADO CON FE. (Aguilar R.,2019)*

% Fe	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga a la rotura (MPa)	Esfuerzo último a la tensión (MPa)	Deformación promedio (%)
0	6,3	401,2	112,5	8,9	6,4
5	7,09	462,8	136,9	9,8	4,5
10	7,4	533,8	163,2	10	6,5
15	10,3	554,8	185,6	13	7,2
20	9,6	699	193,7	13,8	7,8
25	8,7	796	264,3	14	8,2

La capacidad de deformación del PEBDR resultó ser muy superior a la del PEBD aproximadamente en un 250%. Mientras que el PEBD virgen presenta una mayor resistencia a la deformación, con un valor superior de esfuerzo a la tensión, el PEBDR resultó ser más flexible y presenta una mayor capacidad de deformación. Por lo anterior, el PEBD genera un compuesto con valores del módulo de elasticidad superiores y por tanto propiedades mecánicas de resistencia a la tensión mejoradas. El PEBDR por ser un material reprocesado, es más maleable con gran capacidad de deformación y el consiguiente costo de disminución del módulo de elasticidad.

Prueba de impacto

Como se observa en la Figura 3, los compuestos elaborados con la resina de PEBDR absorben entre el 60 y 70% de la cantidad de energía de impacto, en comparación con los compuestos elaborados con PEBD virgen. Al incrementarse el contenido de Fe, la energía absorbida también aumenta en comparación a los materiales en su estado virgen. El PEBDR es el material que presentó la mayor cantidad de energía absorbida en el ensayo de impacto ya que va desde 0.28 J para un contenido de 0% Fe a 6.46 J para 25% Fe. Esto se debe a que la incorporación de las partículas metálicas aumenta la masa de las probetas, así como su resistencia al impacto y su capacidad de absorber una mayor energía. Sin embargo, el efecto de la carga adicional que contiene el PEBDR, así como pigmentos y aditivos ocasiona que el PEBDR presente una mayor resistencia al impacto.

De igual manera los compuestos PEBDR-Fe presentaron valores mayores de resistencia al impacto en aproximadamente 200% en comparación con la resistencia al impacto presentada por los compuestos PEBD- Fe (ver Figura 4). La resistencia al impacto para el PEBD con 0% Fe es de 2.73 kJ/m² y para el PEBD con 25% Fe es de 62.58 kJ/m², lo cual permite visualizar la gran influencia del Fe en la mejora de la resistencia al impacto. De igual manera para el PEBDR con 0% Fe la resistencia al impacto es de 2.90 kJ/m² y para el PEBDR con 25% de Fe es de 183.09 kJ/m², esta diferencia significativa resulta ser muy importante para las posibles aplicaciones estructurales de este material compuesto. Por tanto, la carga adicional, los pigmentos y los aditivos que contiene el PEBDR tienen un efecto determinante en la mejora de la resistencia al impacto de dichos compuestos.

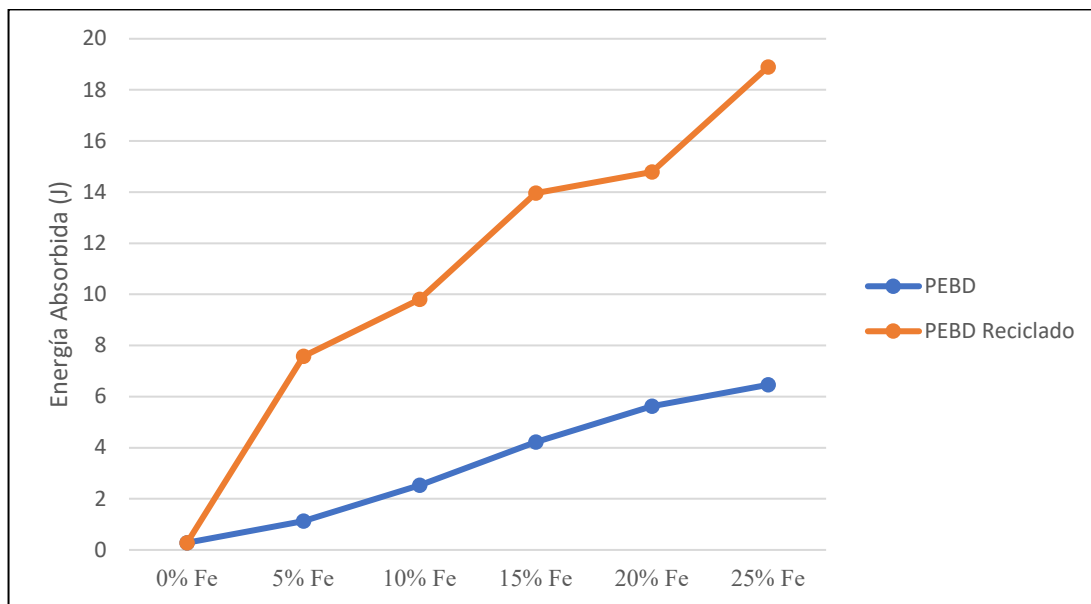


FIGURA 3.
ENERGÍA ABSORBIDA DE PEBD y PEBDR REFORZADOS CON FE (Aguilar R.,2019).

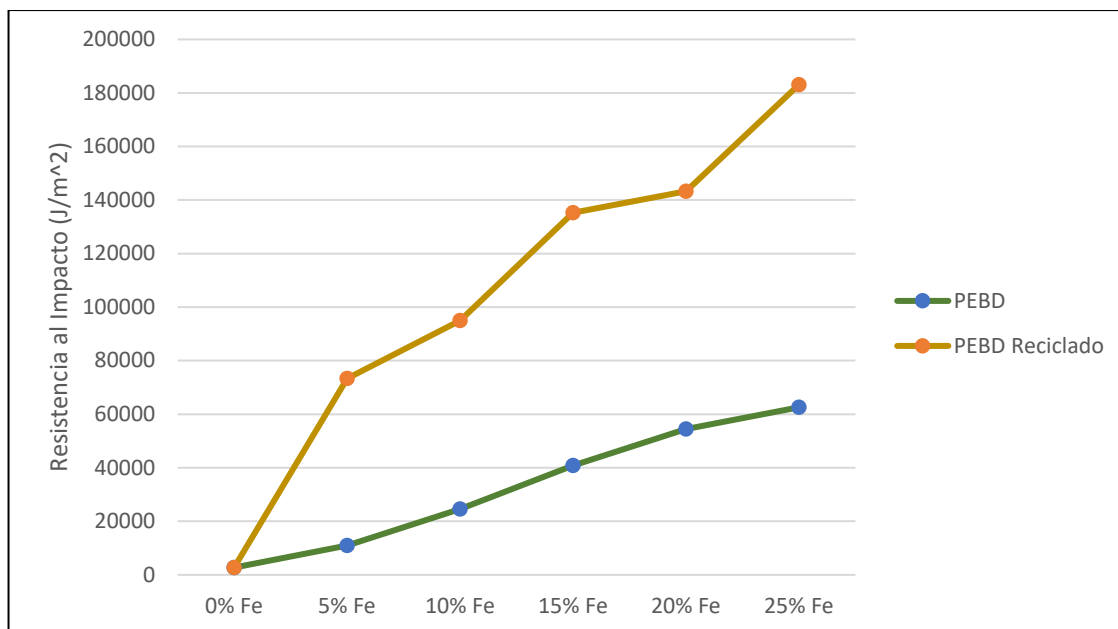


FIGURA 4.
RESISTENCIA AL IMPACTO DE PEBD y PEBDR REFORZADOS CON FE. (Aguilar R.,2019).

Prueba de dureza

Comparando la dureza del PEBD contra la del PEBDR ambos con 0% Fe, se puede apreciar que el PEBD mostró una mayor dureza con respecto al del PEBDR por casi 11 puntos Shore D. En la Figura 5 se observa, que, para cada formulación, el incremento de la dureza depende del contenido de Fe, a mayor contenido de Fe, mayor dureza. Tal es el caso de la formulación con 25 % p/p Fe, donde el valor máximo de dureza fue de 65.8 puntos para la concentración máxima de Fe. En contraste, la formulación PEBDR con 25 % p/p Fe posee 57.2 puntos y corresponden al valor máximo de dureza para los compuestos elaborados con la matriz de PEBDR.

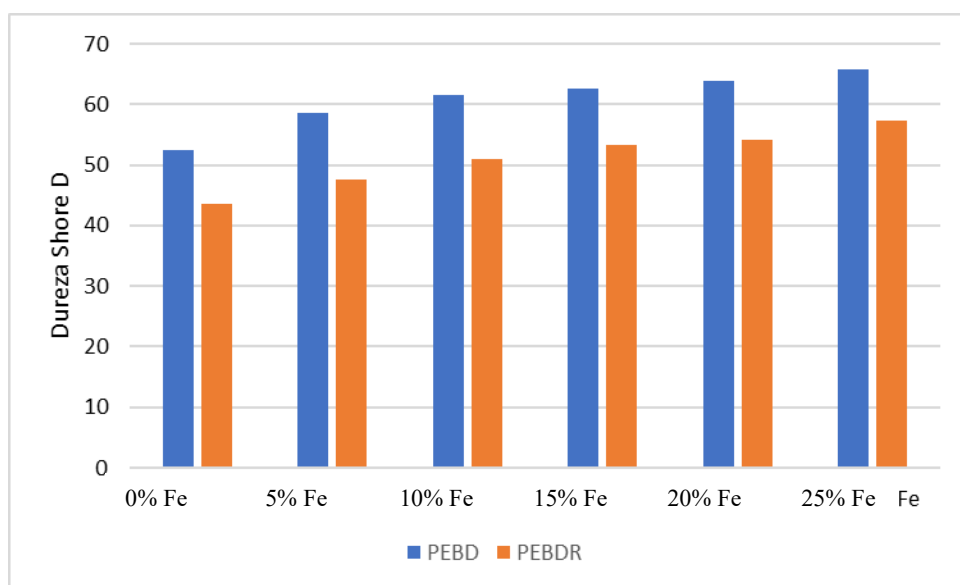


FIGURA 5.

COMPARATIVO DE DUREZAS ENTRE LOS COMPUESTOS PEBD y PEBDR. (Aguilar R., 2019).

Se observa una relación directa de la dureza en función del contenido de Fe, el aumento de dureza que presentan tanto el PEBD y el PEBDR es prácticamente en la misma proporción para cada tipo de plástico, aunque a diferente escala. Se observa un incremento general de la dureza de 1.4 puntos Shore para la familia PEBD-Fe, y un incremento general promedio de 13.7 puntos Shore para los compuestos PEBDR-Fe.

CONCLUSIONES

En términos generales, el procesamiento de la resina de PEBDR resultó ser más difícil de manipular en comparación con el PEBD, debido a las cargas, pigmentos y aditivos añadidos durante su manufactura; así como a los procesos previos a los que fue sometido este plástico en su

primer procesamiento. Las temperaturas de procesamiento del PEBDR son superiores, así como la temperatura de moldeado por termo-compresión. La incorporación de Fe durante el proceso de extrusión, fue un factor importante en la transferencia de energía térmica al PEBD y al PEBDR.

Los materiales a base de PEBDR reforzado con Fe, presentaron propiedades mecánicas con potenciales aplicaciones estructurales, en función de los valores de módulo de elasticidad, dureza y resistencia al impacto obtenidos en la caracterización mecánica. Lo cual podría generar un impacto ecológico positivo, ya que utilizar y mejorar las propiedades del material reciclado y prolongar su periodo de vida útil permitirá la incorporación del PEBDR a la economía circular de los materiales poliméricos.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad Académica de Santiago Tianguistenco- Ingeniería de plásticos- por habernos facilitado la maquinaria y equipo para la realización de la caracterización mecánica de los materiales compuestos presentados en este proyecto.

REFERENCIAS

- Aguilar R. (2019). Caracterización mecánica de materiales compuestos de matriz polimérica PEBD reforzados con partículas de limadura de hierro. Tesis de Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma del Estado de México. México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/105492>
- ASTM D 638-14. (2014). Standar Test Method for Tensile Properties os Plastics. *American Societty For Testing and Materials*.
- ASTM D 6110-18. (2018). Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastic. *American Society of Testing and Materials*.
- Bouche J., Billard G. (2019). The Challenges of Measuring Plastic Pollution. Field Actions. *Science Rep* 19, p. 68–75. Disponible en <https://journals.openedition.org/factsreports/5319>.
- ECOCE. (2019). Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de Residuos de Envase Post-Consumo de PET, PEAD, y otros. Pp. 7-10. https://www.ecoce.mx/assets/pdf/plan_nacional/PLAN_NACIONAL_PRIVADO_COLECTIVO_DE_MANEJO_DE_RESIDUIS_DE_ENVASES_Y_EMPAQUES_2019_SEMARNA_T_2.pdf.

- Gu F., Guob J., Zhang W., Summers P. A., Hall P. (2017). From waste plastics to industrial rawmaterials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment*. 601, p.1192–1207, Elsevier. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717313980?via%3Dihub>
- NatGeo. (2018). *Tipos de plásticos según su facilidad de reciclaje*. Consultado el 12 de diciembre de 2018, de National Geographic Channel Sitio web. Disponible en https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje_12714/6.
- SEMARNAT. (2015) *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*, Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Sheikh A., Jamal Y. (2009). *Machining of polymer composites*. Abu Dhabi: Springer. Disponible en <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>
- Singh R., Singh N., Fabbrocino F., Fraternali F., Ahuja I.P.S. (2016). Waste management by recycling of polymers with reinforcement of metal powder. *Composites part B: Engineering*, 105, p. 23-29. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816314500>
- Stanton T., Kay P., Johnson M., Chan F. (2021). *WIREs Water*. 8, p.1490. Disponible en <https://doi.org/10.1002/wat2.1490>
- Tišler-Korljan B., Gregor-Svetec D. (2014). Properties and printability of compression moulded recycled polyethylene. *Materials and Design*. 55, p. 583–590. Elsevier. Disponible en <https://daneshyari.com/article/preview/829571.pdf>
- Zuccheratt Vieira & Braccini F. (2017). Synthetic gravel for concrete obtained from Sandy iron tailing and recycled polyethyltherephtalate. *Construction and Buildin Materials*. 151. p. 859-865. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817312758>

Análisis de la influencia del número de álabes en la hidrodinámica y potencia mecánica de un tornillo de Arquímedes empleando CFD

Influence analysis of blades number on the hydrodynamics and mechanical power of an Archimedes screw using CFD

Mohedano-Castillo, M.F. ; López-Rebollar, B. M. ¹; Díaz-Delgado, C. ¹;
Salinas-Tapia, H. ¹; Posadas-Bejarano, A. ¹

Recibido: 25 de octubre de 2022 – Aceptado: 22 de febrero de 2023

RESUMEN

Las centrales micro-hidroeléctricas se caracterizan por ser una tecnología de generación de energía renovable limpia, confiable y sostenible. En México, el 10.2% de la energía que se produjo en 2018 provenía de centrales hidroeléctricas y únicamente el 0.23% correspondía a micro centrales (Secretaría de energía, 2019). Este hecho fortalece la

necesidad de investigar e innovar acerca de dispositivos capaces de aprovechar el potencial hidroeléctrico disponible en el país para su explotación a microescala. Al respecto, el tornillo de Arquímedes es una tecnología con grandes ventajas al ser utilizada para la generación de electricidad. Sin embargo, se carecen de guías para su diseño e implementación.

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.5. C.P. 50295 Toluca, Estado de México.

Autores de correspondencia:

mfmc2409@gmail.com, bmllopezr@uaemex.mx, cdiazd@uaemex.mx



El objetivo del presente trabajo fue analizar la influencia del número de álabes del tornillo de Arquímedes en su hidrodinámica y generación de potencia mecánica empleando dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) con el fin de determinar las geometrías adecuadas para ser evaluadas en esquemas de simulación más complejos que contemplan el movimiento de rotación de la turbina.

Las principales fases del análisis fueron: 1) Diseño geométrico, tomando como base relaciones geométricas analizadas en literatura; 2) Simulación con CFD para la obtención de los campos de presión y velocidad además del torque en el tornillo; 3) Análisis de resultados para descartar geometrías y condiciones de operación no favorables.

Con el método empleado, se obtuvieron eficiencias superiores al 75% para un tornillo de Arquímedes con 6 álabes y potencia mecánica de 127.3 W. Por otra parte, los campos de velocidad y presión sugieren una buena transferencia de cantidad de movimiento en dispositivos con 2 y 3 álabes obteniendo potencias mecánicas de 37.7 y 57.2 W respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Tornillo de Arquímedes, CFD, microturbina hidráulica

ABSTRACT

Micro-hydroelectric plants are characterized by being a clean, reliable, and sustainable renewable energy generation technology. In Mexico, 10.2% of the energy produced in 2018

came from hydroelectric plants and only 0.23% corresponded to micro plants (Secretaría de Energía, 2019). This fact strengthens the need to investigate devices capable of taking advantage of the hydroelectric potential available in the country for its microscale exploitation. In this regard, the Archimedean screw is a technology with significant benefits when used to generate electricity. However, guidelines for its design and implementation are lacking.

This work aims to analyze the influence of the number of blades of the Archimedean screw on its hydrodynamics and mechanical power generation using CFD, to determine the appropriate geometries to be evaluated in more complex simulation schemes that contemplate the rotational movement of the turbine.

The main phases for this analysis consist of 1) Geometric design based on geometric relationships analyzed in the literature; 2) Simulation with CFD to obtain the pressure and velocity fields as well as the torque in the screw, and 3) Analysis of results to rule out unfavorable geometries and operating conditions. With the method employed, efficiencies greater than 75% were obtained for an Archimedean screw with six blades and mechanical power of 123 W. On the other hand, the velocity and pressure fields suggest a good momentum transfer in devices with 2 and 3 blades, obtaining mechanical powers of 37.7 and 57.2 W, respectively.

KEYWORDS: Archimedes screw, CFD, hydraulic microturbine

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un requerimiento esencial y su disponibilidad proporciona importantes beneficios a una nación. En efecto, estos beneficios se ven reflejados en mayor seguridad para la ciudadanía, incremento en la productividad, mejores servicios de salud, así como en la garantía de acceso adecuado a la información, educación y entretenimiento (Simmons & Lubitz, 2017). Sin embargo, existe una brecha cada vez mayor entre el suministro de energía y la creciente demanda. Tan sólo en México, se estima que alrededor de 1.8 millones de personas carecen de electricidad, las cuales en su mayoría habitan en comunidades rurales que se encuentran alejadas de la red eléctrica nacional (Secretaría de energía, 2020).

Las microcentrales hidroeléctricas (potencia menor a 1 MW) (Palacios et al., 2017) se han posicionado como una de las soluciones emergentes para la electrificación rural. Este tipo de infraestructura podría satisfacer la demanda energética de comunidades cercanas a pequeños ríos aprovechando el potencial hidroeléctrico disponible. A diferencia de las grandes centrales hidroeléctricas, las microcentrales no requieren de costosas construcciones, tampoco de grandes caídas de agua o de embalses para su funcionamiento. La generación hidroeléctrica es considerada como una de las energías renovables más eficientes, confiables y sostenibles por lo que es de las más utilizadas a nivel mundial (YoosefDoost & Lubitz, 2020).

Hoy en día, existen distintas turbinas que son capaces de generar hidroelectricidad. Sin embargo, no todas ellas son apropiadas para aprovechar el micro potencial hidroeléctrico disponible. En los últimos años se ha tenido especial interés en el dispositivo denominado tornillo de Arquímedes (Figura 1). Particularmente porque este dispositivo ofrece un conjunto de ventajas sociales, económicas y ambientales sobre otros dispositivos, como las que se presentan en la Tabla 1. Por otra parte, existen casos donde con el tornillo de Arquímedes se ha obtenido hasta un 15% más de energía anual en comparación con una turbina Kaplan para condiciones similares de operación (Adlard, 2011).

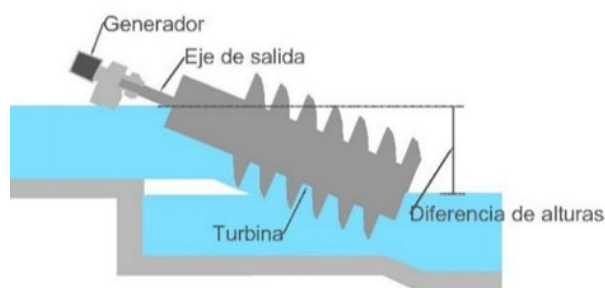


FIGURA 1.
TORNILLO DE ARQUÍMEDES COMO GENERADOR DE ELECTRICIDAD (ELABORACIÓN PROPIA).

TABLA 1.
VENTAJAS DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES (ELABORACIÓN PROPIA).

Tipo	Ventajas
Económicas	*Requiere de poco mantenimiento, lo que lo hace idóneo para países y regiones no desarrolladas *Se prevé que los costos generales de funcionamiento y mantenimiento sean inferiores a los de otras turbinas (Bennion, 2013) *Genera hasta un 15% más de energía anual que una turbina Kaplan (Adlard, 2011) *Permite la generación de electricidad en lugares donde no es posible construir grandes presas.
Sociales	*Fabricación local, lo que fomenta el empleo (Simmons & Lubitz, 2017). *Su uso podría contribuir a reducir la dependencia al diésel y queroseno para linternas y estufas disminuyendo el riesgo de incendios y contaminación del aire al interior de las viviendas.
Ambientales	*No obstruye la migración de peces ya que permite su paso a través de los álabes (Fishtek consulting, 2008) *Permite el paso de sedimentos y escombros flotantes (Rinaldi et al., 2013). *Se pueden utilizar para generar energía eléctrica a partir de aguas residuales no tratadas (International Water Power & Dam Construction, 2010)

El tornillo de Arquímedes es un dispositivo inventado por Arquímedes de Siracusa y desde hace miles de años es utilizado para bombeo. Sin embargo, una aplicación más reciente es como turbina para generar energía eléctrica (Lubitz et al., 2014).

Este dispositivo consta de un eje cilíndrico alrededor del cual se envuelven una o más superficies helicoidales denominadas álabes. El agua llega por la parte superior del tornillo formando prismas de agua que se trasladan por la longitud del tornillo, la presión hidrostática que ejerce el agua sobre el tornillo es lo que provoca que éste gire, por lo que al acoplarlo con un generador es posible producir energía eléctrica. Este artefacto es capaz de operar con alturas de caída de agua que van desde menos de 1 m hasta 10 m y con un rango de caudal de 10 l/s hasta 10 000 l/s dependiendo de las dimensiones del dispositivo (Shahverdi et al., 2020). Estas condiciones favorecen su implementación en pequeños cursos de agua que otras turbinas no son capaces de aprovechar. Las principales características geométricas del tornillo de Arquímedes se muestran en la Figura 2, las cuales incluyen el diámetro exterior (D_o), diámetro interior (D_i), paso (S), número de álabes (N), longitud (L) y ángulo de inclinación (β).

Este estudio tiene como objetivo el análisis y la revisión de la presencia de contaminantes, así como los cambios en la fisicoquímica de la calidad del agua derivado de la incorporación de contaminantes asociados a la infiltración del lixiviado de los rellenos sanitarios, así como su efecto a la salud y al ambiente.

Al ser el tornillo de Arquímedes relativamente una tecnología nueva para la generación de electricidad carece de guías de diseño, normas o reglas específicas para su diseño hidráulico óptimo. En este estudio se proponen una serie de pasos a seguir para analizar la influencia que tiene el número de álabes en estos dispositivos para la generación de potencia mecánica, así como

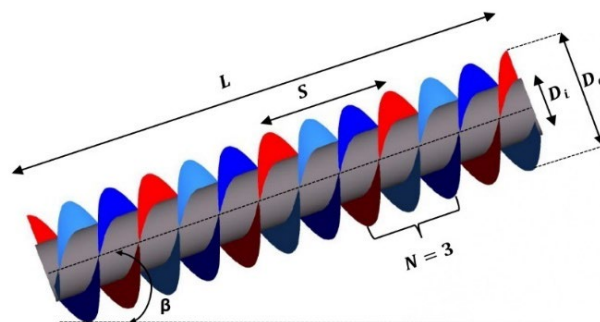


FIGURA 2.
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES (ELABORACIÓN PROPIA).

en su hidrodinámica. Su análisis se efectúa mediante el uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) pudiendo aplicar este método a tornillos con distintas características geométricas y condiciones de operación.

La CFD es una de las ramas de la mecánica de fluidos que predice el flujo de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados resolviendo las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos a través de la modelación numérica (Jeong & Seong, 2014). En efecto, el comportamiento de un flujo dentro de un medio se puede predecir mediante la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales que describen la conservación de masa y momentum (López, 2015), las cuales generalmente no pueden ser resueltas analíticamente. Para obtener una solución numérica aproximada se ocupa el método de discretización del dominio. Este método aproxima las ecuaciones diferenciales a un sistema algebraico de ecuaciones que posteriormente pueden ser resueltas en un computador (Mata Cárdenas, 2017).

Una de las principales ventajas del uso de la CFD es que reduce el tiempo y gastos económicos que se llevan en la experimentación, permitiendo analizar una gama de condiciones y fenómenos específicos (Hu, 2012). Sin embargo, cabe resaltar, que el uso de la CFD y la experimentación son complementarios entre sí.

Para este trabajo, se utilizó Ansys Fluent siendo el software de simulación de fluidos líder en la industria y reconocido por sus capacidades avanzadas de modelado físico y precisión. Esta herramienta permite analizar una variedad de fenómenos de fluidos en una interfaz amigable e intuitiva lo que facilita su uso. La base de la simulación numérica es la solución aproximada e iterativa de las ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos: conservación de masa, cantidad de movimiento y energía (Tu et al., 2013), así como modelos de turbulencia, multifásicos, entre otros.

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum):

$$M_x \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$M_y \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$M_z \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2} \quad (4)$$

Ecuación de la energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

Donde: x, y, z son los ejes del sistema coordenado u, v, w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad, ρ es la densidad del fluido, p es la presión absoluta, T es la cantidad de calor del fluido, C_p es el calor específico del fluido, λ es la conductividad térmica y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas no lineales y están dentro de las ecuaciones mejor conocidas y más difíciles de las ciencias de la ingeniería. A partir de estas ecuaciones, se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados.

El uso de este software permitió innovar y optimar el diseño del tornillo de Arquímedes colaborando en la toma de decisiones para la mejora del dispositivo, reduciendo significativamente el tiempo de análisis que se llevaría en un proceso de experimentación física.

En este trabajo, es de interés conocer la influencia del número de álabes en el campo de velocidades y presión, siendo indicadores de la transferencia de energía entre el fluido y la turbina. Además, el software permitió la obtención del momento de torsión generado por los álabes en el eje de la turbina, siendo esta información de gran utilidad para la determinación de la potencia mecánica y la eficiencia de cada uno de los dispositivos.

METODOLOGÍA

En esta sección, se exponen cada una de las etapas propuestas y llevadas a cabo en el proceso de este trabajo de investigación. En la Figura 3 se presenta un esquema general del método de análisis propuesto:

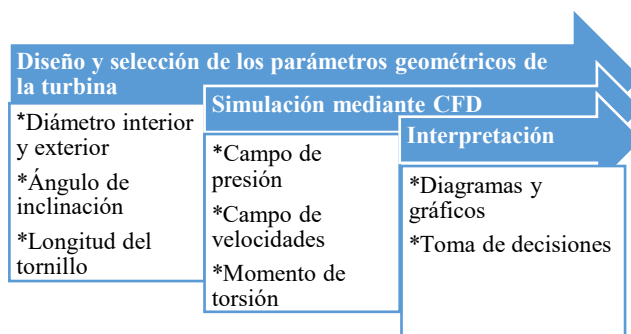


FIGURA 3.

DIAGRAMA GENERAL DEL MÉTODO DE ANÁLISIS PROPUESTO (ELABORACIÓN PROPIA).

Diseño y selección de los parámetros geométricos de la turbina.

Las dimensiones geométricas propuestas se encuentran asociadas con los dos objetivos siguientes:

- Diseñar un dispositivo con dimensiones físicas que sea fácil de transportar para su futura validación en campo.
- Considerar que las dimensiones del dispositivo permitan realizar pruebas experimentales en la infraestructura disponible del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) una vez que haya sido optimado el número de álabes mediante Ansys Fluent.

La

Tabla 2 resume las dimensiones de los 6 dispositivos seleccionados. Cabe mencionar que se ha realizado una recopilación de estudios tanto teóricos como experimentales que han permitido delimitar algunas relaciones geométricas de diseño óptimas del tornillo de Arquímedes (Lubitz et al., 2014), las cuales son utilizadas para el diseño propuesto: $\frac{D_i}{D_o} = 0.5$, $\frac{S}{D_o} = 1$ y $\frac{L}{D_o} = 4$.

TABLA 2.

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LAS TURBINAS EVALUADAS (ELABORACIÓN PROPIA)

Parámetro	Dimensión
Diámetro exterior (D_o)	494 mm
Diámetro interior (D_i)	247 mm
Paso (S)	494 mm
Longitud (L)	2000 mm
Ángulo de inclinación (β)	20°
Número de álabes (N)	1, 2, 3, 4, 5 y 6

Simulación mediante CFD.

La simulación mediante CFD se compone principalmente de 5 etapas, las cuales se muestran en la Figura 4.

1.- Modelo conceptual	*Geometría 3D
	*Generación del dominio de fluido
2.- Mallado	*Discretización del dominio
	*Análisis de sensibilidad de malla
3.- Set Up	*Modelo de turbulencia
	*Esquema de solución y estado del flujo
4.- Solución	*Variables de monitoreo
	*Iteraciones que garanticen convergencia
5.-Postproceso	*Gráficos, contornos, líneas de flujo, videos etc.

FIGURA 4.

ETAPAS PRINCIPALES PARA LA SIMULACIÓN MEDIANTE CFD (ELABORACIÓN PROPIA).

Modelo conceptual

En lo referente al modelo conceptual, se presenta un ejemplo en la Figura 5. En la que puede observarse el dominio de fluido, así como las fronteras y secciones de interés.

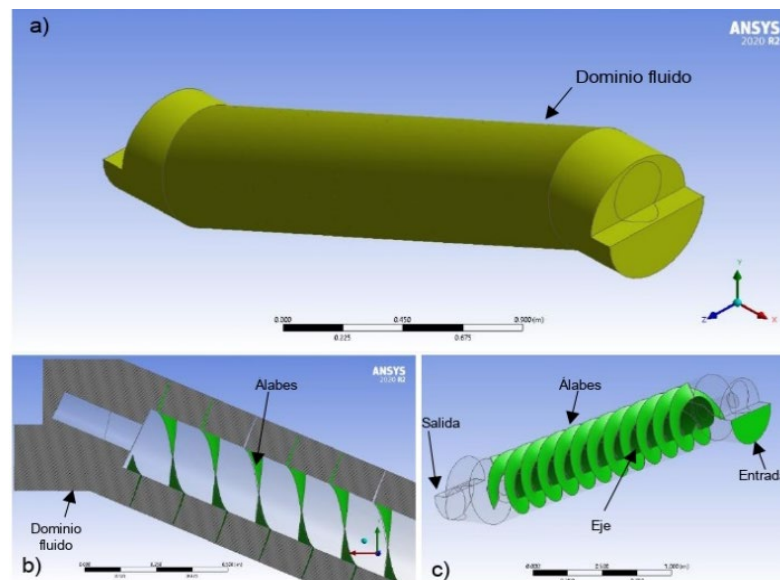


FIGURA 5.

MODELO GEOMÉTRICO A) DOMINIO DE FLUIDO, B) CORTE DEL DOMINIO DE FLUIDO, C) SUPERFICIES DE INTERÉS. (ELABORACIÓN PROPIA).

Malla

Esta etapa consiste en la discretización del dominio que se pretende modelar. Se utilizó una malla tetraédrica no estructurada debido a la adaptabilidad que presentan para geometrías complejas (Figura 6).

Previo a la selección del mallado adecuado, se realizó un análisis de sensibilidad de malla con el objetivo de garantizar la independencia de los resultados respecto a su tamaño. Con dicho análisis se logró determinar la malla adecuada para el caso de estudio, tomando en cuenta criterios como, calidad ortogonal de la malla, tiempo de simulación y convergencia de resultados. Se utilizó un tamaño de elemento de 15 mm obteniendo una calidad ortogonal mayor a 0.75 resultando en una muy buena calidad de malla de acuerdo con lo sugerido por ANSYS (Ahmad et al., 2013). El tiempo de simulación fue de 2 horas.

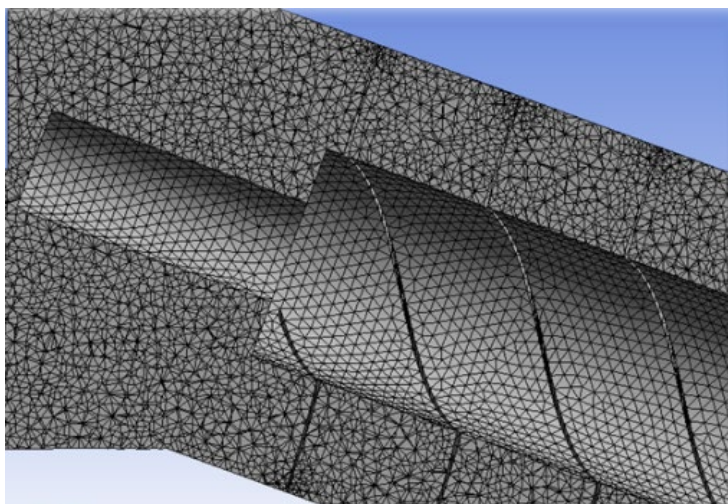


FIGURA 6.

DETALLE DE LA MALLA TETRAÉDRICA NO ESTRUCTURADA (ELABORACIÓN PROPIA).

Set Up

En esta etapa se seleccionó el agua como fluido de trabajo; el esquema de solución basado en la presión; el estado de flujo estacionario; el modelo de turbulencia SST k- ω (shear stress transport, por sus siglas en inglés) y la turbina en un esquema estático. Es de suma importancia resaltar que se utilizó un esquema de simulación con la turbina estática con la finalidad de comparar resultados con otros estudios que han empleado un método de análisis similar al desarrollado en este trabajo (Khan et al., 2019; Maulana, Syuhada, & Almas, 2018; Maulana, Syuhada, & Nawawi, 2018; Rosly et al., 2016).

Este tipo de simulación permite obtener una primera aproximación al torque generado por la turbina, así como su evaluación hidrodinámica.

Para la condición de frontera en la entrada se consideró una velocidad de flujo de 0.25 m/s la cual corresponde a un caudal de diseño de 24.5 l/s. En la salida se empleó la condición de presión atmosférica idealizando que el agua sigue su trayectoria a flujo libre.

Solución

En esta etapa, fue necesario verificar la convergencia de los resultados obtenidos, a través del monitoreo de las variables de interés que permitieron garantizar la solución numérica, entre ellos están los siguientes:

- Flujo másico en entrada y salida para garantizar continuidad.
- Velocidad del flujo en la salida y en el dominio de fluido para garantizar el estado final del flujo.
- Presión en el dominio de fluido y sobre los álabes.
- Momento de torsión o torque sobre los álabes de la turbina.

En la Figura 7 se muestra el resultado de convergencia del flujo másico para la turbina de 2 álabes. El número de iteraciones se estableció en 1000 y fueron suficientes para mantener un comportamiento estable en los resultados numéricos.

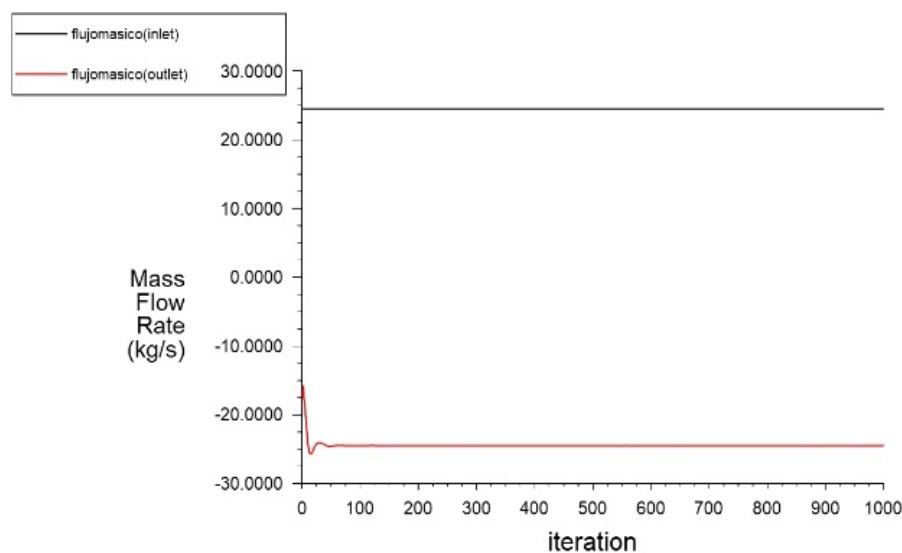


FIGURA 7.
MONITOR DE FLUJO MÁSIKO DE LA TURBINA DE 2 ÁLABES (ELABORACIÓN PROPIA).

Postproceso

En el postproceso se obtuvieron el campo de velocidades y presión en el dominio, así como el momento de torsión en cada una de las turbinas analizadas ya que este dato es indispensable para obtener la potencia mecánica generada mediante la siguiente expresión (Erinofiardi et al., 2017):

$$P_{mecánica} = \omega T \quad (6)$$

Donde: $P_{mecánica}$ es la potencia mecánica de la turbina (W) ω es la velocidad de rotación angular de la turbina (rad/s) y T el torque (Nm).

Posteriormente, para el cálculo de la eficiencia es necesario conocer la potencia hidráulica y ésta se obtiene mediante la siguiente expresión (Lyons & Lubitz, 2013):

$$P_{hidráulica} = \rho g Q H \quad (7)$$

Donde $P_{hidráulica}$ es la potencia hidráulica (W), ρ es la densidad del agua (kg/m³), g la aceleración de la gravedad (m/s²), Q el caudal (m³/s) y H la carga neta disponible (m).

Finalmente para obtener la eficiencia de la turbina ($\eta_{turbina}$) (Erinofiardi et al., 2017) se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta_{turbina} = \frac{P_{mecánica}}{P_{hidráulica}} \quad (8)$$

Interpretación

En la última etapa del estudio se evaluaron diferentes criterios de selección de la turbina ideal, los cuales se han empleado en otros trabajos de investigación. Por lo que, en este caso se realizó una recopilación de los criterios utilizados, para generar una evaluación e interpretación más completa.

Dentro de los rubros evaluados, se consideraron los siguientes: potencia mecánica, eficiencia y comportamiento de la presión y velocidad a lo largo del tornillo (Khan et al., 2019; Maulana, Syuhada, & Almas, 2018; Maulana, Syuhada, & Nawawi, 2018; Rosly et al., 2016).

RESULTADOS

En esta sección, se presentan y analizan los resultados obtenidos para las 6 turbinas estudiadas, con base en la metodología propuesta. Para ello, se inicia con el análisis de los campos de velocidad y presión seguido de la obtención del torque para obtener la eficiencia de los dispositivos; y se

finaliza con la selección de geometrías mejor evaluadas hidrodinámicamente. Cabe recordar que se evaluaron las turbinas con las características geométricas presentadas en la Tabla 2.

Campos de presión y velocidad

Una de las ventajas del uso de la CFD para el análisis de turbinas, es que permite obtener y observar los campos de presión y velocidad a lo largo del dispositivo, lo que facilita la toma de decisiones y mejoras en el diseño.

El campo de presión y velocidad, son de amplio interés para el análisis del tornillo de Arquímedes ya que esta turbina gira gracias a la presión hidrostática que genera el peso de agua a través de sus álabes, por lo que a lo largo del dispositivo se esperan cambios en estos parámetros. Siendo éstos los indicadores de la transferencia de cantidad de movimiento entre el agua y la turbina.

Al aumentar el número de álabes incrementa la presión ejercida sobre los álabes tal y como se aprecia en la Figura 8 ya que esto ocasiona mayor acumulación de flujo a la entrada de la turbina aumentando así la presión. Por otra parte, puede observarse el comportamiento de la presión a lo largo de los álabes de las turbinas identificándose las presiones más bajas en la turbina con 1 álabe y las más altas en la turbina con 6 álabes. Esta diferencia es más notoria a la entrada de los tornillos de Arquímedes.

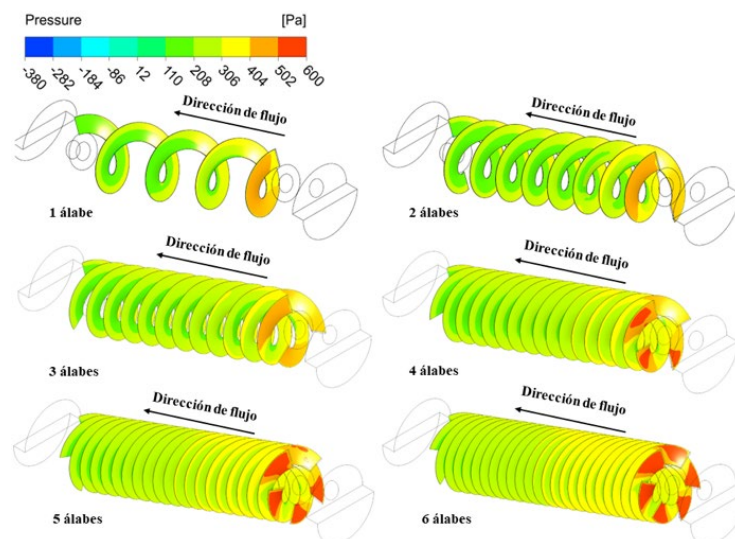


FIGURA 8.
CONTORNOS DE PRESIÓN SOBRE LOS ÁLABES DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

Con el fin de observar la tendencia de los parámetros de presión y velocidad en distintos puntos de la turbina, se seleccionaron 3 planos de análisis (Figura 9):

- ✓ Plano 1: A la entrada de la turbina
- ✓ Plano 2: A la mitad de la turbina (1 m)
- ✓ Plano 3: A la salida de la turbina

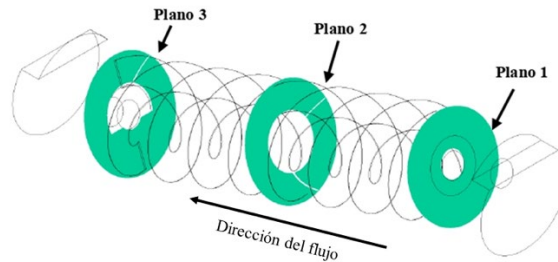


FIGURA 9.
PLANOS DE ANÁLISIS DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

En la Figura 10 se expone la presión obtenida en cada uno de los planos de análisis. Coincidiendo con el análisis anterior, a mayor número de álabes mayor presión a la entrada de la turbina con el mismo caudal de llegada, ya que éstos ocasionan un frenado en el flujo aumentando de esta manera la presión. Por otra parte, en la salida del dispositivo se tienen presiones cercanas a 200 Pa, lo que implica la existencia de transferencia de momento.

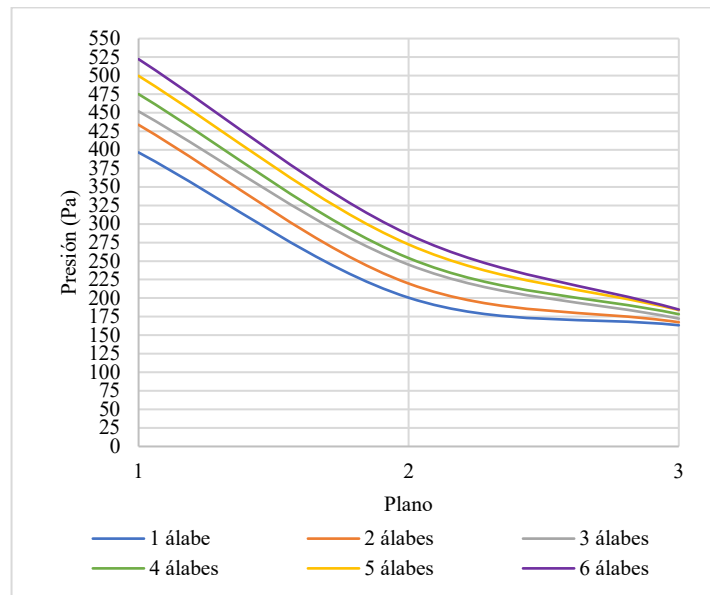


FIGURA 10.
 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN A LO LARGO DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

El análisis de velocidad, resumido por la Figura 11 considera su evolución en los distintos planos seleccionados para las 6 turbinas.

Como se ha mencionado, se espera que la velocidad tenga un comportamiento inverso a la presión por lo que la velocidad aumentará a la salida de la turbina. Así, con base en la Figura 11 se puede notar que de acuerdo con este criterio se tiene una mayor transferencia de momento entre el plano 1 y 2 obteniendo los valores de velocidad más altos en las turbinas con 2 y 3 álabes.

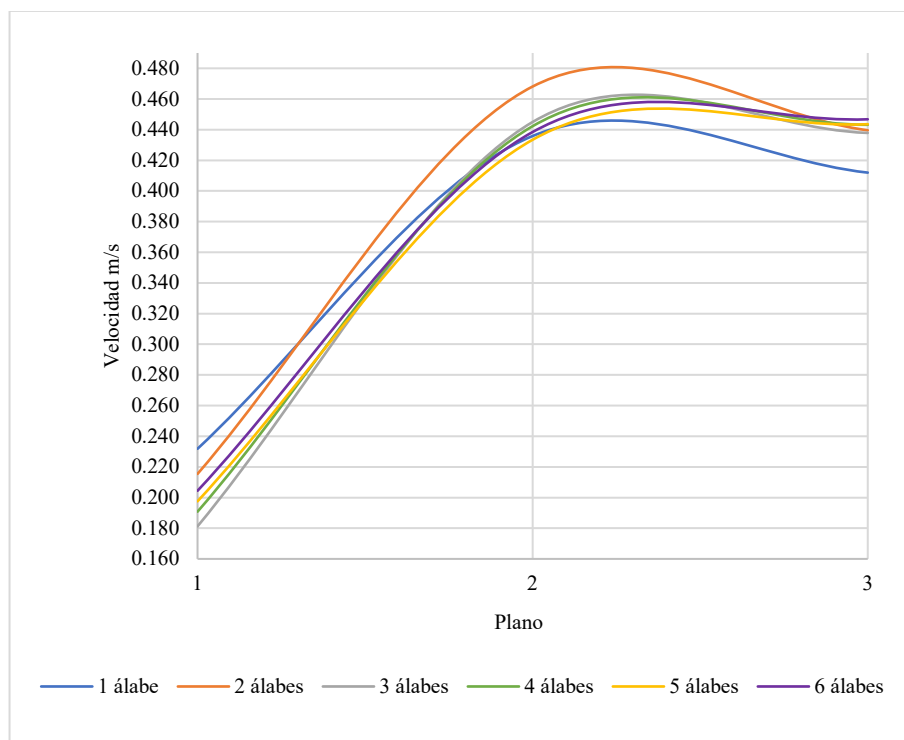


FIGURA 11.

DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD A LO LARGO DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

Torque, potencia mecánica y eficiencia

Derivado del análisis fue posible obtener el momento de torsión en el tornillo de Arquímedes, siendo de utilidad para calcular la potencia mecánica generada por la turbina, tal y como se presentó en la sección de metodología. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos, considerando una potencia hidráulica de 164.30 W y una velocidad angular de 1.71 rad/s para todos los casos evaluados. Se presentó el mayor torque y eficiencia para la turbina de 6 álabes situación que era de esperarse ya que, al tener mayor área de contacto entre el fluido y la turbina, esta última experimenta mayor presión.

DISCUSIÓN

Una vez analizados los parámetros más relevantes del dispositivo, se identificó que la turbina con 6 álabes es la que presenta mayor presión a la entrada y en consecuencia mayor torque al contar con una mayor área de contacto entre el fluido y la superficie de la turbina. Esta turbina, presentó una eficiencia de 77% y potencia mecánica máxima de 127.3 W comparado con las otras

geometrías propuestas y que fueron evaluadas bajo las mismas condiciones de operación. Sin embargo, las simulaciones realizadas corresponden a un esquema de simulación con el tornillo estático, similar a lo realizado en otros estudios (Khan et al., 2019; Maulana et al., 2018; Rosly et al., 2016) con la finalidad de comparar las eficiencias y campos de flujo.

TABLA 3.
TORQUE, POTENCIA MECÁNICA Y EFICIENCIA DE LAS TURBINAS EVALUADAS (ELABORACIÓN PROPIA)

Turbina	Torque (Nm)	Potencia mecánica (W)	Eficiencia (%)
1 álabe	11.60	19.8	12%
2 álabes	22.07	37.7	23%
3 álabes	33.48	57.2	35%
4 álabes	45.85	78.4	48%
5 álabes	59.65	102.0	62%
6 álabes	74.45	127.3	77%

Se han reportado eficiencias del 87% en un tornillo de 5 álabes, 5.2 m de longitud y diámetro exterior de 1.6 m, con un caudal de operación de 820 l/s (Khan et al., 2019). Cabe mencionar que, para dispositivos de gran tamaño, las pérdidas por flujo de fuga (flujo entre la brecha del canal y la turbina) son menos significativas comparadas con turbinas más pequeñas, lo que incrementa su eficiencia, pero requieren un mayor suministro de agua, lo que dificulta su implementación en sitios con poca disponibilidad del recurso. La turbina analizada en esta investigación pretende trabajar con caudales menores a 100 l/s manteniendo una eficiencia superior al 75%. Con ello, este prototipo podrá ser utilizado en cauces que tengan poco caudal incluso en temporada de estiaje.

Por otra parte, han obtenido eficiencias hasta de un 81% para un tornillo de 3 álabes, diámetro exterior de 0.11 m y longitud de 1.14 m con una velocidad de flujo a la entrada de 2.4 m/s (Rosly et al., 2016). En este caso, para el cálculo de la eficiencia se emplearon la velocidad de flujo obtenida mediante CFD y un modelo matemático simplificado ocasionando una sobreestimación en la eficiencia. Para el caso de esta investigación el porcentaje de eficiencia del 77% se obtuvo a partir del torque calculado numéricamente, lo que garantiza una estimación de la eficiencia más confiable al no simplificarlo únicamente con el campo de velocidades.

En lo referente a los planos de presión observados a lo largo del tornillo de Arquímedes, es importante mencionar que no se obtuvieron picos de presión en ninguna de las 6 turbinas,

evitando el estancamiento de agua entre los álabes. Se observó una disminución uniforme de la presión y por ende un aumento de velocidad del flujo en la salida del tornillo que beneficia en su rotación y eficiencia. A diferencia de otro estudio (Maulana et al., 2018) en el cual los tornillos de Arquímedes resultaron tener picos de presión que podrían ocasionar inestabilidades en la generación del torque y estancamiento de agua. Esto quiere decir, que las relaciones geométricas empleadas en el diseño de los tornillos de Arquímedes analizados en este trabajo de investigación son las adecuadas y garantizan una distribución uniforme de la caída de presión en todas las secciones del aspa lo que produciría mejor torque y estabilidad en la turbina.

Este trabajo ha permitido, con ayuda de la herramienta de simulación con CFD, determinar la influencia del número de álabes en la hidrodinámica del tornillo de Arquímedes, así como la propuesta de un método con el cual es factible diseñar y optimar este tipo de turbinas para generación de electricidad en centrales micro hidroeléctricas. Sin duda, este tipo de iniciativas abrirá la puerta a otros trabajos de investigación que conduzcan a la determinación de guías de diseño que contribuyan en el fortalecimiento del suministro energético del país y con ello impulsar el desarrollo económico y mejorar la calidad de vida de los mexicanos que cuenten con un suministro deficiente de energía eléctrica.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente trabajo se logró concebir una propuesta metodológica viable que sirva como guía para el diseño y optimación del número de álabes en un tornillo de Arquímedes como generador de electricidad en micro centrales hidroeléctricas. El método propuesto sugiere una serie de pasos que facilitan la evaluación hidrodinámica de tornillos de Arquímedes, con distintas dimensiones geométricas y parámetros de flujo, permitiendo el ahorro de tiempo, recursos humanos y económicos con la implementación de simulaciones mediante CFD.

El esquema de simulación estacionario con la turbina estática es adecuado para realizar un primer análisis hidrodinámico de los dispositivos. Ya que requiere menor capacidad de cómputo, así como de tiempo en comparación con los esquemas de simulación móvil. Con este planteamiento es posible obtener los campos de velocidad, presión, turbulencia y torque, que son indicadores requeridos para la evaluación del desempeño de las turbinas hidráulicas.

Como resultado de esta investigación, la geometría del tornillo de Arquímedes con 6 álabes fue el que presentó mayor torque y en consecuencia una mayor potencia mecánica (127.3 W) además de una eficiencia del 77%. Este caso presentó también una mayor presión en la entrada al

tener una mayor superficie de contacto con el fluido, siendo necesario un análisis en trabajos futuros que permita evaluar las pérdidas ocasionadas por fricción.

Para futuras investigaciones se sugiere el análisis del tornillo móvil, para los escenarios geométricos que presentaron condiciones adecuadas de funcionamiento bajo el esquema estático, con el fin de observar los fenómenos que pueden influir en el rendimiento de la turbina, como es el caso de las pérdidas por fricción y el propio movimiento de la turbina.

REFERENCIAS

- Abiriga, D., Jenkins, A., Alfsnes, K., Vestgarden, L. S. & Klempe, H. (2021). Characterisation of the bacterial microbiota of a landfill-contaminated confined aquifer undergoing intrinsic remediation. *Science of the Total Environment*, 785(3800), 0–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147349>
- Adlard, J. (2011). Archimedes' screw: Copley hydropower generator. Future Energy Yorkshire.
- Ahmad, T., Plee, S. L., & Myers, J. P. (2013). Fluent Theory Guide. ANSYS Inc.
- Bennion, D. (2013). Maintaining Archimedes Screw Pumps. ECS Engineering Services. <http://www.ecsengineeringservices.com/maintaining-archimedes-screw-pumps/>
- Erinofardi, Nuramal, A., Bismantolo, P., Date, A., Akbarzadeh, A., Mainil, A. K., & Suryono, A. F. (2017). Experimental Study of Screw Turbine Performance based on Different Angle of Inclination. *Energy Procedia*, 110, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.094>
- Fishtek consulting. (2008). Archimedes screw turbine fisheries assessment phase II: eels and kelts. Fishtek consulting.
- Hu, H. H. (2012). Computational Fluid Dynamics. En *Fluid Mechanics* (pp. 421–472). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1>
- International Water Power & Dam Construction. (2010). A Quiet Revolution. <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurea-quiet-revolution/>
- Jeong, W., & Seong, J. (2014). Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017>
- Khan, A., Khattak, A., Ulasyar, A., Imran, K., & Munir, M. A. (2019). Investigation of Archimedean Screw Turbine for Optimal Power Output by Varying Number of Blades. 2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering

- (ICECCE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940654>
- López, B. M. (2015). Aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura [Maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Lubitz, W. D., Lyons, M., & Simmons, S. (2014). Performance Model of Archimedes Screw Hydro Turbines with Variable Fill Level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000922](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000922)
- Lyons, M., & Lubitz, W. D. (2013, julio 14). Archimedes Screws for Microhydro Power Generation. ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability. ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, Minneapolis, Minnesota, USA. <https://doi.org/10.1115/ES2013-18067>
- Mata Cárdenas, G. F. (2017). Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Modelado Mecánico en el Estudio del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC) [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maulana, M. I., Syuhada, A., & Almas, F. (2018). Computational Fluid Dynamic Predictions on Effects of Screw Number on Performance of Single Blade Archimedes Screw Turbine. *E3S Web of Conferences*, 67, 04027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186704027>
- Maulana, M. I., Syuhada, A., & Nawawi, M. (2018). Blade number impact on pressure and performance of archimedes screw turbine using CFD. 030037. <https://doi.org/10.1063/1.5024096>
- Palacios, A., Peña, N., Cervantes, E., Güitrón, A., & López, M. (2017). Bases para un Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica CEMIE-Hidro 1era Parte: Infraestructura Hidroeléctrica Actual. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rinaldi, M., Gurnell, A., Belletti, B., Cano, M. I., Bizzi, S., Bussettini, M., Tánago, M., Grabowski, R., Habersack, H., & Klösch, M. (2013). Final Report on Methods, Models, Tools to Assess the Hydromorphology of Rivers. REFORM. <https://reformrivers.eu/>
- Rosly, C. Z., Jamaludin, U. K., Azahari, N. S., Mutasim, M. A. N., Oumer, A. N., & Rao, N. T. (2016). Parametric study on efficiency of Archimedes screw turbine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(18), 5.
- Secretaría de energía. (2019). PRODESEN 2019-2033 Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. SENER.

- Secretaría de energía. (2020). Porcentaje de la población con servicio eléctrico. SENER.
<https://datos.gob.mx/busca/dataset/porcentaje-de-la-poblacion-con-servicio-electrico>
- Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Gohari, S., Marofi, S., & Bellos, E. (2020). Numerical Optimization Study of Archimedes Screw Turbine (AST): A case study. *Renewable Energy*, 145, 2130–2143. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.124>
- Simmons, S., & Lubitz, W. (2017). Archimedes screw generators for sustainable energy development. 2017 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference (IHTC), 144–148. <https://doi.org/10.1109/IHTC.2017.8058176>
- Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2013). *Computational Fluid Dynamics* (2a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Yoosef Doost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation- A review of potential and design procedures. *Sustainability*, 12(18), 2–34. <https://doi.org/10.3390/su12187352>

Análisis del modelo operacional y de negocio para la implementación de UAVs en logística de distribución. Caso: proveedor Tier 1 en México

Operational and business model analysis for UAVs implementation in distribution logistics: Case: Tier 1 Supplier in México

Bataltescu, T.^{1*}; Nosedal-Sánchez, J. ^{2*}

Recibido: 8 de noviembre de 2022 – Aceptado: 7 de febrero de 2023

RESUMEN

La cadena de suministro es un conjunto de actividades, medios e instalaciones de distribución necesarios para llevar a cabo desde la elaboración y fabricación, hasta la venta de un producto; la eficiente gestión de esta permite a las empresas aumentar su productividad y rentabilidad. Pero, cuando estas actividades, medios o instalaciones

presentan limitaciones para seguir incrementando la eficiencia, es necesario buscar otros métodos o tecnologías que impliquen innovación. Para la logística, uno de estos métodos más prometedores de los últimos años son los vehículos aéreos no tripulados o UAVs (por sus siglas en inglés), comúnmente conocidos por drones. En este documento se revisan algunos los factores para tener en cuenta en su implementación, y

¹ Escuela de Ingeniería, C/ dels Emprius nº 2, Campus de la UAB, 08202, Sabadell, Barcelona, España; ² Àrea d'Enginyeria i Infraestructura dels Transports, C/ dels Emprius nº 2, Campus de la UAB, 08202, Sabadell, Barcelona, España
Autores de correspondencia:
tbaltatescu@gmail.com, jenaro.nosedal@uab.cat



se presenta un estudio de viabilidad de su aplicación en un caso real para envíos de urgencia entre una empresa proveedora de autopartes y la empresa cliente, dedicada a la manufactura final de los vehículos.

PALABRAS CLAVE: UAVs, Dron, Logística, Análisis Operacional, Modelos de Negocio, Análisis de factibilidad.

ABSTRACT

The supply chain is a set of activities, means and distribution facilities necessary to carry out from the production and manufacture to the sale of a product; the efficient management of this allows companies to increase their productivity and profitability. However, when these activities, means

or facilities present limitations to further increase efficiency, it is necessary to look for other methods or technologies that involve innovation. For logistics, one of the most promising methods in recent years are unmanned aerial vehicles or UAVs, commonly known as drones. This paper reviews some of the factors to be considered for their implementation and presents a feasibility study of their application in a real case for emergency shipments between an auto parts supplier company and the client company, dedicated to the final manufacture of vehicles.

KEYWORDS: UAVs, Drone, Logistics, Operational analysis, Business model, Feasibility assessment

INTRODUCTION

Los principales objetivos del análisis para la implementación de UAVs en logística de distribución, es determinar la viabilidad de operativa, pero también económica, para el uso de drones en las actividades de entrega de suministros (piezas del sector automotriz) para ensamble final en la planta de producción. El principal problema por resolver es mejorar el proceso de distribución de pedidos de emergencia o no programados, de tal modo que en el presente trabajo no se aborda el análisis de métodos para mejorar la gestión de inventarios (puntos de reorden, periodos de resurtido) en el punto de surtido a la línea de producción, ni tampoco para la gestión del transporte de los pedidos normales. Para garantizar la continuidad del funcionamiento de las líneas de producción, es necesario que el servicio de entrega sea oportuno y confiable, por lo tanto, el principal objetivo es reducir el tiempo de entrega de la mercancía para así, evitar o reducir los costos asociados a los paros de la línea de fabricación, actualmente medido como un indicador clave de desempeño (ICD) de la empresa proveedora.

Es importante tener en cuenta los costos asociados tanto en el proceso de implementación (costos de inversión) como los costos operativos del modelo a implementar, ya que es un factor clave a la hora de tomar la decisión final sobre la viabilidad del modelo de distribución propuesto; por lo tanto, estos deberán ser equiparables con los beneficios de su implementación o incluso capaces de generar ahorros.

También se pueden destacar otros objetivos perseguidos, mayormente de forma implícita con la adopción de la tecnología, estos son: mejorar del servicio ofrecido, fidelización de los clientes, aumento de la competitividad y creación de valor añadido a los servicios ya ofrecidos. De acuerdo con la anterior, el presente trabajo busca desarrollar el análisis y evaluación operacional y económica para la implementación de UAVs para entregas urgentes desde el almacén del proveedor de autopartes hacia las instalaciones del fabricante de vehículos, el trabajo se desarrolla para apoyar la toma de decisiones de una empresa con operaciones en México, que deberá proporcionar el servicio, ya sea con un modelo de operación tradicional (vía terrestre) o incorporando un canal de entrega más innovador (vía aérea con drones).

CONTEXTO

El caso de estudio involucra dos empresas con operaciones en México, y en particular para las sedes ubicadas en Monterrey, Nuevo León. La primera de ellas, que funge como proveedor Tier 1, es una empresa que proporciona un servicio logístico para una ensambladora del sector automotriz.

La distancia por carretera entre las dos organizaciones es de 7,5 km, y aunque es una distancia corta, para recorrerla hay que transitar por carreteras principales de la región. Por lo que las condiciones de tráfico, en los casos de entregas de último momento, ya sea por cambios o ajustes en el plan de producción de la ensambladora o bien por alguna subestimación del stock de piezas requerido, representa entregas que deben ejecutarse en ventanas de tiempo cortas y no previsibles, son operaciones de emergencia para la empresa proveedora. Para dicha operación de entrega de emergencia un problema a enfrentar es la inexactitud de los tiempos de entrega vía terrestre (dependiendo del día y de la franja horaria el recorrido puede ser de entre 8 y 26 minutos), que en casos de falta de suministro en las líneas de producción por parte de la empresa ensambladora puede llevar a un paro en la producción, hecho implica el riesgo de incurrir en grandes costos para la empresa proveedora de las piezas y componentes.

De acuerdo con la información disponible (ICDs), se estima que los envíos de emergencia realizados por parte de la empresa distribuidora son en promedio de 5 al mes (envíos de urgencia),

con un peso total de entre 20 y 80 kg por envío, siendo el peso del paquete individual de 20 kg. De tal modo que lo que se busca mantener en cero o al mínimo el costo por suministro tardío de materiales (ICD actualmente medido internamente y que se calcula como \$/mes, incurridos por paros de línea, atribuibles al proveedor).

A continuación, se resumen todas las características relevantes del caso de estudio (Tabla 1).

TABLA 1.
CARACTERÍSTICAS DEL CASO DE ESTUDIO

Características específicas	
Distancia en km (Carretera)	7.5 km
Distancia en Línea Recta	3.18 km
Peso mercancía (1 paquete)	20 kg
Costo paro línea de producción por día	19,500.00 \$
Horas de trabajo totales de la línea de producción por día	18 h
Costo paro de línea de producción por minuto	18.055 \$/minuto

METODOLOGÍA

Según el CSCMP (Council of Supply Chain Management Professionals), “la gestión logística es la parte de la gestión de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo eficiente y eficaz de avance y retroceso y el almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes” (Salazar, 2019). Es decir que, se ocupa de todos los aspectos relacionados con el flujo y almacenamiento de información, bienes o servicios desde el origen hasta el destino.

Para garantizar la mejor calidad posible del bien o servicio ofrecido es importante que la logística funcione eficientemente tanto hacia adelante, es decir, del productor al cliente, como hacia atrás, del cliente al productor. Este flujo bidireccional de información, bienes o servicios dotará la empresa de más eficiencia al incorporar en sus procesos logísticos diferentes partes de manera coordinada.

El concepto de cadena de suministro “abarca los procesos de negocio, talento, organizacionales, de infraestructura, de tecnologías y plataformas de información, permitiendo el

flujo continuo de los procesos de servicio o manufactura” (Salazar, 2019). Tiene como objetivo satisfacer las necesidades del consumidor final aportando beneficios para todas las partes involucradas. La gestión de la cadena de suministro “es una práctica basada en la confianza y en la filosofía ganar/ganar, la cual consiste en la planificación, organización y el control de los flujos de la red de valor, entre los que se encuentran los flujos transaccionales, de productos o servicios, y de la información, los cuales son aplicados a los proveedores, los operadores de transporte, los centros de distribución, los vendedores y los consumidores finales” (Salazar, 2019).

Es decir, la gestión de la cadena de suministro se ocupa de organizar y gestionar los procesos de la cadena de suministro, que permite a las empresas disponer de los recursos necesarios en cada momento para desarrollar la actividad empresarial, cuando esta actividad va acompañada de eficiencia (reducción costos, reducción tiempos, aumento de la calidad, etc.) ayuda a las organizaciones a reducir el ciclo de negocios y por consiguiente aporta un mayor valor agregado al producto o servicio ofrecido.

Gestionar de manera eficiente los procesos logísticos permitirá a las empresas mejoras en algunos aspectos de la organización (Muñiz, 2008), así como aumentar la capacidad de líneas de producción; gracias a las nuevas tecnologías y a los sistemas de la información, es posible disminuir los inventarios en la cadena de distribución; las estrategias “*Just-in-Time*”, consisten en el abastecimiento de materiales o productos acabados lleguen a su destino justo a tiempo, es decir que nos permite disponer de los suministros en las cantidades, tiempo y lugar requeridos. Sin embargo, la operación “*Just-in-Time*” también impone retos para mantener la requerida productividad sin el respaldo de inventario, es decir, se transfiere una responsabilidad mayor a los sistemas de distribución.

Uso de drones en la distribución de mercancías

Según el diccionario de Cambridge el dron se define como “un avión que no tiene piloto, sino que es controlado por alguien en tierra, utilizado especialmente para lanzar bombas o para la vigilancia (= vigilancia cuidadosa de un lugar)” y como “una aeronave sin piloto que es controlada por alguien en tierra, utilizada especialmente como pasatiempo” (DRONE, 2021). En los últimos años, con la mejora de las tecnologías, se ha logrado que el vehículo vuele sin ser pilotado por alguien a distancia, sino que es capaz de volar de manera autónoma, por lo tanto, se pueden aplicar en distintos sectores para un uso comercial.

En (Shahzaad et al., 2019), se propuso un nuevo marco de Servicios de entrega de paquetes basado en UAV, llamado *Drone-as-a-Service* (DaaS). El marco propuesto incluye un modelo de servicio espaciotemporal y un modelo de calidad DaaS. Según la conferencia “los drones se están

convirtiéndose en un nuevo tipo de servicio de entrega apto para grandes y pequeñas empresas” (Shahzaad et al., 2019). Esta misma conferencia destaca que los drones ofrecen mejoras importantes en las funciones de detección, entregas o inspección. Se pueden aplicar en distintos sectores, como por ejemplo el sector comercial, civil, militar, logístico, etc.

Ventajas y desventajas

En (Ceña, 2017 & Drone Delivery, n.d), explican que el uso de drones presenta tanto ventajas como desventajas, mayoritariamente cuenta con más ventajas que desventajas, ya que el aporte que puede hacer puede llegar a ser muy importante en una organización si su actividad se ve afectada en gran medida. Las desventajas que presentan en la mayoría de los casos son debido a la novedad de la tecnología y el constante cambio y mejora. Las principales ventajas que presenta el uso de los drones son: ahorro en costos de transporte y distribución, ahorro de combustible, envíos más rápidos, envíos más eficientes y la disminución del impacto medioambiental, disminución de las aglomeraciones en las infraestructuras de transporte, accesibilidad a zonas de entrega de difícil acceso o remotas, largos turnos de servicio y disponibilidad permanente. Por otro lado, también presenta ciertas ventajas como por ejemplo el incremento del tráfico aéreo, contaminación acústica y visual, necesidad de instalaciones o acondicionamientos para las maniobras de aterrizaje y despegue, problemas de seguridad y privacidad, menor alcance debido a las limitaciones de la duración de baterías, legislación inestable, requerimientos de mano de obra especializada, dificultades operativas (condiciones meteorológicas) y la posible pérdida de empleos.

Factores críticos para la implementación drones para el caso de estudio

A continuación, se analizan los factores críticos aplicables para el caso de estudio; en caso de determinar la importancia de algún factor crítico, se detallan las posibles medidas de mitigación que se pueden adoptar para evitar o disminuir los impactos que pueda ocasionar.

Amenaza a la privacidad y seguridad: Debido a las ubicaciones geográficas (periferia de la ciudad, zona no habitacional en Monterrey, N.L, México) del caso de estudio y la separación entre zonas o comunidades de terceros no involucrados en el acuerdo establecido para el transporte (al tratarse de áreas amplias como almacenes o plantas de producción) este factor no afecta o limita la aplicación de drones para el uso pretendido.

Normativa: Se cumple con las restricciones locales para operar drones en Monterrey, México. No existen limitaciones que afecten de manera negativa o que impidan el reparto para la zona prevista.

Percepción pública: Este factor crítico está asociado más bien a la percepción de la tecnología por parte del implementador y sus clientes que recibirán los servicios mediante esta tecnología. Por lo tanto, es importante informar bien a todos los miembros involucrados directa o indirectamente en el proyecto, señalando los beneficios aportados y resolviendo las dudas que puedan ocasionar. De esta manera se mejorará la percepción de la tecnología y el proceso de adaptación será mucho más ágil.

Cuestiones medioambientales: En particular para la aplicación prevista es importante que la fuente de energía sea renovable, para así asegurar de que la tecnología no daña al medio ambiente y a la vez ayuda a cumplir con los requerimientos sobre los impactos medioambientales de las empresas.

Aspectos económicos: Desde el punto de vista económico, un elemento relevante es la necesidad de prescindir de un trabajador (conductor vehículo terrestre). Para evitar esta situación se puede considerar el conductor para el puesto de trabajo nuevo, ofreciéndole formación profesional, siempre y cuando este cumpla con ciertos requisitos para las formaciones, de no ser posible, se deberán de estudiar otras alternativas como, por ejemplo, otra oferta de trabajo de puesto similar en la misma empresa, o un puesto de trabajo que el trabajador pueda realizar y la empresa necesite, pero si finalmente es necesario prescindir de dicho trabajador, se deba de tener en cuenta que al mismo tiempo se está generando otro puesto de trabajo.

Problemas técnicos: Otro de los factores críticos más importantes a tener en cuenta son los problemas técnicos que pueda tener el dron. Por desgracia estos no pueden ser previsibles y por lo tanto no se pueden evitar por completo. Sin embargo, con el correcto mantenimiento y la realización de pruebas de funcionamiento continuos del aparato, estos problemas pueden minimizarse y bajar considerablemente los riesgos de sufrir problemas técnicos.

En cuanto a la duración de la batería, para este caso de estudio no se presenta ningún tipo de problema debido a que la distancia a recorrer es relativamente corta, y con las opciones de drones existentes actualmente se cumple la distancia necesaria a recorrer con la capacidad de carga de todas las opciones estudiadas.

RESULTADOS

La calidad del agua subterránea es alterada en su fisicoquímica, debido a la infiltración del lixiviado de los RSU. Esto plantea graves riesgos para la salud, lo que ha llevado a la prohibición de explotar el agua subterránea para uso humano. La presencia de las altas concentraciones de metales pesados, como el Cr, Cd, Pb, Zn, Hg en los lixiviados confirman su migración al agua

subterránea, revelando la infiltración continua de la pluma de contaminación hacia los estratos del suelo. Se recomienda el uso de tecnología para la recolección y tratamiento de los lixiviados, con el fin de proteger el agua subterránea. De acuerdo con la revisión, en la mayoría de los documentos se recomienda el cierre definitivo del relleno sanitario para que se inicie el proceso de recuperación del suelo, a fin de mitigar una mayor percolación del lixiviado en agua subterránea. El monitoreo de la calidad del agua subterránea cercana a un relleno sanitario debe realizarse continuamente para evitar impactos a la salud y al ambiente, sobre todo si entra en la categoría de un sitio controlado.

Análisis y elección del dron

En esta sección a partir de una búsqueda de las alternativas de drones existentes en el mercado y un análisis de los requerimientos del caso de estudio, se describe el proceso de selección de la tecnología a evaluar. A continuación, se resumirán las características de algunos de los drones estudiados para realizar este estudio de viabilidad para la entrega de mercancías en la cadena de aprovisionamiento.

Es importante destacar que los drones pueden volar de manera autónoma, sin embargo, por cuestiones de seguridad, es habitual que el personal encargado de programar la misión de vuelo se mantenga monitoreando el vuelo en remoto para identificar cualquier anomalía y sobre todo para poder intervenir en caso de algún imprevisto, por lo tanto, aunque no se necesita personal para la entrega de mercancías como tal, la recepción la seguiría realizando el personal encargado en el sitio de producción, y se prevé que será necesario un elemento humano para la supervisión de las misiones. No obstante, al reducirse el tiempo de los viajes de entrega, ello permite generar un mayor aprovechamiento del costo de personal, por otra parte, al reducirse la carga en vacío, también es posible reducir los costos asociados al transporte (furgoneta/camión, carburante, seguro, mantenimiento, etc.). Por otro lado, la mayoría de ellos disponen de un motor eléctrico, que significa que no contamina el medio ambiente con emisiones directas, y si la energía de carga proviene de algún tipo de energía verde el beneficio ambiental es mayor. A continuación (Tabla 2), se detallan las características de las opciones estudiadas.

TABLA 2.
CARACTERÍSTICAS Y FACTORES PARA LA IMLEMENTACIÓN

Nombre	Carga útil máxima (kg)	Tiempo de vuelo (min)	Distancia de vuelo (km)	Consumo (KW)	Velocidad (km/h)	Precio (pesos mexicanos) / (dólares)
GRIFF 135	50	30	37.5	0.1	60	\$ 5,022,500.00 / 250,000.00
FB3 (FlyingBasket)	100	50	20	0.1	60	\$ 2,209,606.69 / 109,985.40
GRIFF 300	226	45	15	0.1	60	\$ 5,022,500.00 / 250,000.00
EHang 216	250	21	45.5	0.1	130	\$ 6,027,000.00 / 300,000.00
Volocopter e-volo uVC200 cargo	200	120	30	0.1	80	\$ 7,179,261.95 / 357,355.00

Por la adecuación de las características del dron al caso de estudio, se ha decidido optar por el dron FB3 de FlyingBasket (FlyungBasket, n.d), el cual tiene la capacidad necesaria para la carga útil requerida y distancia de recorrido necesaria, y su precio es el menor de todas las opciones evaluadas.

En cuanto al peso de la mercancía, se conoce que los paquetes individuales para el reparto pesan 20 kg y los envíos suelen ser de unos 80 kg en total. Es decir que se podría enviar toda la mercancía (hasta 100 kg) en un solo viaje. Además, conociendo tiempo de vuelo total y el tiempo que dura el trayecto se puede determinar el número de rutas que podrá hacer el dron con una sola carga de la batería. Siendo el tiempo de vuelo máximo de 50 min y el tiempo del trayecto total de 7.08 min, se obtiene que se pueden realizar como máximo 7 trayectos seguidos, en la práctica; en la realidad, sin embargo, se debe contar con los tiempos que despegues y aterrizajes del dron y de la carga y descarga de la mercancía durante los trayectos. Los resultados reales se pueden determinar en la fase de pruebas de la implementación del proyecto, midiendo los tiempos totales de la actividad.

Análisis de los costos de adquisición y operativos asociados a la implementación y costos operativos de los dos métodos

Todo proyecto o cambio en una organización comporta unos costos asociados a la fase de adquisición y costos asociados a la operación.

Los costos de adquisición son aquellos que se desembolsan una única vez durante la implementación del proyecto, es decir que se realiza una inversión. Los costos operativos en cambio son aquellos que dependen de la actividad de la empresa, es decir que están directamente relacionados con el volumen de la actividad a desarrollar.

Costos de implementación

Para implementar la entrega de drones de la mercancía subministrada por la empresa proveedora a la planta de producción de la empresa cliente, se deben de tener en cuenta los costos asociados a la inversión inicial, que se componen por los costos de adquisición, software, formación y gastos en personal para esta fase inicial. Los costos totales de implementación ascienden a 114,767.75 dólares, ver Tabla 3.

TABLA 3.
COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Costos de adquisición y otros relacionados		
Concepto	Costo (pesos mexicanos)	Costo (dólares)
Adquisición (FB3 FlyingBasket)	\$ 2,209,606.69	\$ 110,480.33
Software (PIX 4D React)	\$ 24,027.30	\$ 1,201.37
Training		
Licencia Piloto RPAS	\$ 46,283.00	\$ 2,314.15
Curso de Mecánica y Mantenimiento de RPAS	\$ 10,678.80	\$ 220.00
Gastos en personal de implementación (por semana de duración)	\$ 11,594.00	\$ 551.90
TOTAL	\$ 2,233,633.99	\$ 114,767.75

Costos operativos

Los costos operativos asociados al uso de drones para el reparto de mercancías del caso de estudio son: consumo energético ocasionado por las cargas de las baterías, el seguro obligatorio por daños a terceros establecidos en la Norma Oficial Mexicana, los costos de personal y los costos de la adquisición anual de Servicios de Información Aeronáutica.

Teniendo en cuenta las características mensuales de los envíos de urgencia de la empresa proveedora es de 5 envíos al mes con un peso total de 80 kg por envío, pudiéndose dividir la carga total en paquetes individuales de 20 kg cada uno. A partir de estos datos, se han calculado los costos asociados a los 5 envíos mensuales de mercancía, para poder medir los costos operativos mensuales. El costo operativo mensual total del reparto con el dron FB3 asciende a **41.24 dólares**, teniendo en cuenta los 5 envíos por mes.

En la Tabla 4, se especifican los costos operativos del reparto de mercancía del caso de estudio. Para llevar a cabo una comparación entre los costos de implementación y operativo de los drones con el transporte terrestre, es necesario analizar los costos asociados al método de transporte convencional para realizar las entregas de la mercancía desde la empresa distribuidora hasta el cliente.

TABLA 4.
COSTOS OPERATIVOS DE DRONES

Concepto	Costos de operación			
	Costo mensual (pesos mexicanos)	Costo mensual (dólares)	Costo anual (pesos mexicanos)	Costo anual (dólares)
Consumo energético	\$ 1.29	\$ 0.02	\$ 15.54	\$ 0.23
Aseguradora	\$ 299.68	\$ 14.92	\$ 3,596.11	\$ 179.00
Costos de personal	\$ 129.80	\$ 6.49	\$ 1,557.60	\$ 77.88
Servicios de información aeronáutica	\$ 396.33	\$ 19.82	\$ 4,756.00	\$ 237.80
TOTAL	\$ 827.10	\$ 41.24	\$ 9,925.25	\$ 494.91

Análisis de los costos de implementación y operativos asociados a la implementación y uso de un método de transporte convencional

En primer lugar, se analizarán tiempos de entrega previstos para el trayecto (ida) en las diferentes horas del día, ya que dependiendo de la hora del día las condiciones de tráfico son más o menos favorables. Para el cálculo de los tiempos del trayecto para el envío de la mercancía con el transporte terrestre se ha utilizado la aplicación Google Maps, que permite establecer rutas y tiempos de llegada en función de la hora a través de aproximaciones estadísticas de datos anteriores. Se han podido clasificar los tiempos de entrega en 5 intervalos de tiempos diferentes, que son los mostrados en la Tabla 5:

TABLA 5.
TIEMPOS DE ENTREGA MÁXIMOS Y MÍNIMOS

	Tiempos de entrega mínimos y máximos (minutos)	
Tiempo de Entrega 1	10	18
Tiempo de Entrega 2	10	20
Tiempo de Entrega 3	12	22
Tiempo de Entrega 4	12	24
Tiempo de Entrega 5	12	26

El tiempo total de un trayecto será el doble del mencionado en las tablas anteriores, ya que se contempla tanto el viaje de ida como el viaje de vuelta para el cálculo de los costos operativos.

Costos de implementación

Los costos de implementación para el transporte por carretera se componen por un lado de la adquisición del vehículo y el costo de la obtención de la licencia Federal de Categoría B (obligatoria para el manejo de vehículos con fines comerciales (GobMx, n.d.).

En la Tabla 6, se puede observar que la inversión total a realizar es de **13,056.15 dólares**.

TABLA 6.
COSTOS DE INVERSIÓN TRANSPORTE TERRESTRE

Costos de implementación		
Concepto	Costo (pesos mexicanos)	Costo (dólares)
Adquisición	\$ 260,990.00	\$ 13,049.50
Training (obtención licencia B)	\$ 133.00	\$ 6.65
TOTAL	\$ 261,123.00	\$ 13,056.15

Costos operativos

Los costos operativos del transporte por carretera se constituyen de los sueldos del transportista, el combustible consumido para los trayectos, el costo del seguro por daños a terceros y costos de mantenimiento del vehículo.

En la Tabla 7 se puede observar que los costos operativos mensuales asociados al caso de estudio (5 repartos al mes de 80 kg en total por envío) son de **77.17 dólares**.

TABLA 7.
COSTOS OPERATIVOS TRANSPORTE TERRESTRE

Costos Operativos Mensuales				
Concepto	Costo mensual (pesos mexicanos)	Costo mensual (dólares)	Costo anual (pesos mexicanos)	Costo anual (dólares)
Salarios	\$ 403.43	\$ 20.17	\$ 4,841.20	\$ 242.06
Combustible	\$ 88.21	\$ 4.41	\$ 1,058.56	\$ 52.93
Aseguradora	\$ 829.17	\$ 41.46	\$ 9,950.00	\$ 497.50
Mantenimiento	\$ 222.50	\$ 11.13	\$ 2,670.00	\$ 133.50
TOTAL	\$ 1,543.31	\$ 77.17	\$ 18,519.76	\$ 925.99

Comparación de los costos entre ambos métodos de transporte

Comparación y análisis de los costos de implementación

Tal como se puede observar en la Figura 1, los costos de inversión asociados a la implementación de drones para el caso de estudio de Monterrey, México son mucho más altos que los costos de

inversión para el transporte terrestre. La inversión necesaria por realizar para la implementación de drones es de 114,767.75 dólares, y la del transporte terrestre de 13,056.15 dólares. La diferencia entre estos es de 101,711.60 dólares, por lo tanto, podemos decir que, los costos de inversión asociados al transporte de drones son un 779% más costos.

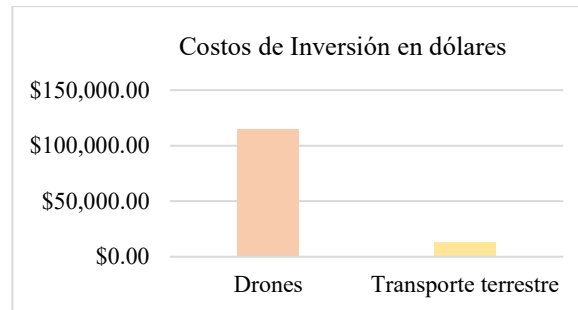


FIGURA 1.
COMPARACIÓN COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.

Comparación de los costos operativos

En la Figura 2, se puede observar que el costo operativo mensual de los drones es bastante inferior al costo del transporte terrestre. Los costos operativos de los drones son de 42.39 dólares al mes, y el del transporte terrestre de 77.17 dólares. Por lo tanto, teniendo en cuenta la diferencia entre ambos costos, se puede decir que los costos operativos de los drones permiten ahorrar un 45.1 % en cuanto a gastos operativos mensuales.

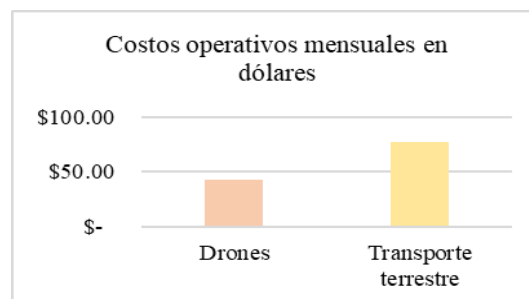


FIGURA 2.
COMPARACIÓN COSTOS OPERATIVOS MENSUALES.

Comparación de los tiempos de entrega

En cuanto a tiempos de entrega, tal como se muestra en la Figura 3, los tiempos de entrega con drones son mucho más inferiores a las del transporte terrestre. El tiempo de entrega con el dron contemplando sólo el trayecto de ida (para poder medir el tiempo en el que el cliente puede disponer de la mercancía) es de 3.54 minutos, y el promedio del tiempo de entrega vía transporte terrestre de 16.6 minutos. Por lo tanto, se puede decir que el modelo de envío con drones para el caso estudiado es un 78.7 % más rápido que el transporte terrestre.

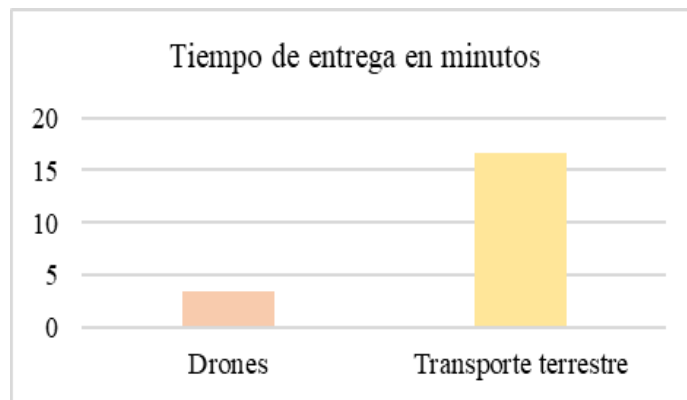


FIGURA 3.
COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE ENTREGA EN MINUTOS.

Comparación de los costos asociados al paro de línea por falta de suministros

Siempre que sea posible se velará por la continuidad del funcionamiento de la línea de producción. Para evitar el paro de línea de producción en la empresa cliente, es necesario que ésta dé la orden de requerimientos de mercancías antes de tener existencias 0 de algún material o producto necesario, gracias a la tecnología de los drones, en el caso de estudio analizado, se permite reducir el tiempo de entrega en 78.7 %, por lo tanto, se puede afirmar que el tiempo de reposición ante un evento de escasez de existencias, también bajará en un 78.7 %, es decir, la capacidad de reacción de la empresa proveedora aumentará, debido a la bajada del tiempo de la actividad de reparto, y, también permite a la empresa cliente un mayor margen de maniobra en situaciones de emergencias (escasez de existencias); este hecho aportará un gran valor añadido a la organización debido a los costos asociados al paro de la línea de producción de la empresa cliente (especificados en el apartado 2. Contexto, ilustrados en la Figura 4). En función de los tiempos de entrega de los dos métodos analizados y los datos de las características de la línea de producción, se ha deducido que el ahorro en dólares, ocasionado por la diferencia de tiempo de 13.06 minutos si el reparto se realiza con drones, permite el ahorro de 235.805 dólares del costo de paro de la línea de

producción, es decir permite ahorrar un 78.7% de los costos totales que se repercutirían si la entrega se realizará con el modelo de transporte convencional (Tabla 8).

TABLA 8.
COMPARACIÓN DE LOS COSTOS POR PARO DE LÍNEA DE PRODUCCIÓN

Comparación de los dos métodos	
Tiempo de entrega Drones	3.54
Tiempo de entrega Transporte terrestre	16.6
Costo paro línea de producción (1 envío con drones)	\$ 63.9167
Costo paro línea de producción (1 envío método convencional)	\$ 299.7222
Porcentaje de diferencia costo línea de producción (ahorro)	-78,7%

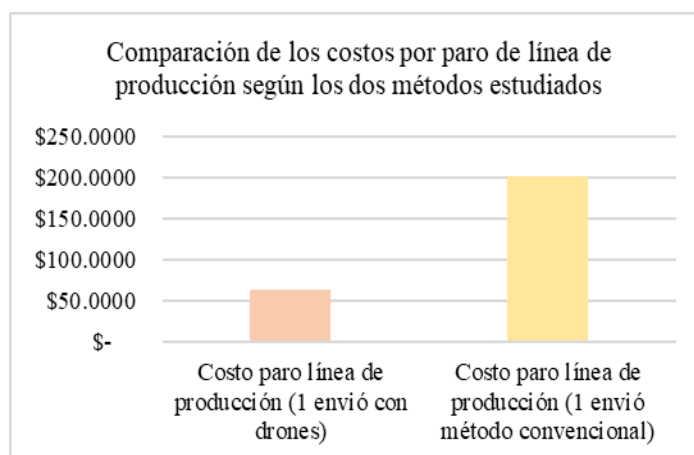


FIGURA 4.
COMPARACIÓN DE LOS COSTOS POR PARO DE LÍNEA.

CONCLUSIONES

Tras el análisis de los factores más relevantes, se puede concluir, que debido a las tendencias de la economía global de hoy en día, es de suma importancia prestar atención a los procesos logísticos de las empresas, en especial aquellas que se dediquen a la distribución de mercancías. Una de las mayores preocupaciones de hoy en día en la logística son los tiempos de entrega y los costos que

conlleve el transporte, ya que de ello depende poder entregar el producto al cliente final en el plazo de tiempo previamente acordado por ambas partes. Por lo tanto, una mejora de la calidad y tiempo de envío y/o una reducción de costos asociados al transporte aportan grandes beneficios a las empresas en lo individual y al desempeño de la cadena de suministro en lo global.

Se puede concluir que algunos de los principales beneficios de mejorar los procesos logísticos en una organización son: aumentar la competitividad y mejorar la rentabilidad; lograr una coordinación óptima de diferentes factores como el precio, la calidad, servicio al cliente, etc.; alcanzar un punto de vista más amplio para la dirección con el fin de obtener un mecanismo eficiente de planificación (tanto en procesos internos como externos); valor agregado al producto o servicio ofrecido. El principal problema de esta mejora continua, son las limitaciones de algunos de los recursos utilizados hoy en día. Por este motivo se ha llegado a la conclusión de que la importancia de innovar y optar por el desarrollo tecnológico ayudará a las empresas a evolucionar y crecer en lugar de quedarse estancadas. En el transporte, la principal limitación son los tiempos de entrega, ya que los vehículos utilizados para el transporte tienen ciertas limitaciones que no permite reducir en la medida deseada los tiempos de entregas, y, por otra parte, las condiciones de la infraestructura de transporte, que en algunas zonas puede no estar en buenas condiciones, por lo que es más probable la presencia con congestión del tráfico. Este factor también implica que los tiempos no pueden ser precisos al 100%, ya que estos dependen de condiciones externas a la organización, y cambiantes.

Gracias al desarrollo de las nuevas tecnologías y con la aparición de los drones, se ha podido dar un enfoque más amplio a estos vehículos aéreos debido a la eliminación de limitaciones por el desarrollo constante de la tecnología. En el sector de la logística existen dos campos de aplicación de los drones, en el interior y en el exterior de las infraestructuras logísticas.

Durante el análisis de estos factores, también se ha observado que esta tecnología presenta varias desventajas. Uno de los inconvenientes más importantes es la limitación de la duración de la batería y el peso máximo de carga. Pero aun así su implementación puede aportar múltiples beneficios con impacto en ICDs, por ejemplo, disminución de los costos, reducción de los tiempos de entrega y de su variabilidad o incertidumbre, mayor calidad del servicio o producto aportado, y por lo tanto mayor poder de competitividad de la empresa, creación de valor agregado, mejor posicionamiento en el mercado, etc.

Para el estudio de viabilidad, desde la perspectiva operativa y de negocio, del caso real de la entrega de mercancías desde la empresa distribuidora hasta la empresa cliente, se ha podido observar que la implementación de drones en este caso particular es viable, sobre todo considerando la operación de a mediano y largo plazo, se puede afirmar que el uso de drones en

este caso representa beneficios operativos y económicos para la empresa, presenta unos costos operativos y tiempos más bajos, en comparación con el modelo de entregas tradicional, cosa que conlleva una potencial mitigación de los costos por el paro de línea, o al menos a una disminución muy significativa del riesgo de que se originen, y aunque la inversión a realizar sea bastante mayor, las ventajas que aporta permiten un retorno de la inversión, y por lo tanto una mejora en la eficiencia de la organización, mejor posición competitiva, y posibilidad de más cuota de mercado. Como trabajo futuro a la presente evaluación de viabilidad, le seguiría la evaluación financiera, lo que permitiría determinar la factibilidad de que, bajo las condiciones específicas de financiamiento de esta nueva tecnología, la empresa pudiera ponerlo en marcha y determinar el tiempo de recuperación de la inversión asociada. Uno de los elementos adicionales para desarrollar esta evaluación sería la vida útil de componentes críticos como las baterías, un estudio específico al respecto bajo las condiciones previstas de operación podría ser objeto de una investigación posterior, en ausencia de datos empíricos o históricos se podrían emplear modelos simulación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló como parte de un Trabajo Final de Grado, con apoyo de la UAB. Durante el proyecto de investigación y la elaboración del manuscrito Nosedal-Sánchez se desempeñaba como Serra Hunter Fellow. Los autores agradecen las facilidades proporcionadas por la empresa para el desarrollo del caso de estudio presentado.

REFERENCIAS

- Ceña Arévalo, D. (2017). Reparto de mercancías a través de drones: estudio y viabilidad. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107148>
- DRONE | meaning in the Cambridge English Dictionary. (n.d.). Retrieved June 18, 2021, from <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/drone>
- Drone Delivery – The Future of Logistics | Bray Solutions. (n.d.). Retrieved June 18, 2021, from <https://www.braysolutions.com/drone-delivery/>
- FlyingBasket | Drones that can transport heavy loads to remote places. (n.d.). Retrieved June 18, 2021, from <https://flyingbasket.com/#drones>
- GobMx. Expedición de licencia federal de conductor modalidad | gob.mx. (n.d.). Retrieved June 18, 2021, from <https://www.gob.mx/tramites/ficha/expedicion-de-licencia-federal-de->

conductor-modalidad-nacional/SCT1100

- Muñiz Condori, G. (2008). “El sistema de logística en la empresa hotelera inkaterra s.a.c. Hotel de 3 estrellas, ubicado en inkaterra s.a.c. Hotel de 3 estrellas, ubicado en aguas calientes – machupicchu - cusco” aguas calientes – machupicchu - cusco.
<https://pdfslide.tips/documents/proyecto-tesis-poi-problema-objeto-de-investigacion.htm>
- Shahzaad, B., Bouguettaya, A., Mistry, S., & Neiat, A. G. (2019). Composing drone-as-a-service (DaaS) for delivery. Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Web Services, ICWS 2019 - Part of the 2019 IEEE World Congress on Services, 28–32.
<https://doi.org/10.1109/ICWS.2019.00017>
- Salazar López, B. (2019). Logística y Cadena de abastecimiento.
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/logistica/logistica-y-cadena-de-abastecimiento/>

A mobile application to create awareness about scholar's activities

Nava-Muñoz, S.E. ¹; Ibarra-Cuevas, D.M.¹; Aceves de Alba, J. ¹; Ramos Blanco, A. ¹,
Martínez-Pérez, F.E. ¹

Recibido: 19 de enero de 2023 – Aceptado: 13 de febrero de 2023

ABSTRACT

Mobile computing has been more accessible to people and the development of software for this area seeks to enhance all its benefits. A stand-alone mobile application does not depend on an Internet connection for its operation, and this operation allows it to be more useful. There are some platforms that allow us to manage an agenda and therefore get notifications about what we have scheduled, but an internet connection is needed if you want to check the agenda from a mobile device. This work, in a school context, offers to users a stand-alone mobile application to create awareness about activities planned in a school calendar. The application downloads the calendar only

when such calendar gets updated and later works independently. It also sends personalized notifications according to the user's profile configured on the mobile device. The application called Uni-Agenda was developed in its first version and concept tests were carried out to ensure its correct operation. The next step is to release it to a group of university students so features like performance and usability will be evaluated.

KEYWORDS: mobile computing, awareness, stand-alone, application, context-aware

¹ Facultad de Ingeniería. UASLP. San Luis Potosí, México
Autores de correspondencia:
senavam@uaslp.mx, A279236@alumnos.uaslp.mx, {jaceves, beto, eduardo.perez}@uaslp.mx



INTRODUCTION

In recent years, Software development can be found in different types of devices, smartphones included. Additionally, the use of a mobile devices by students in a university community is already widespread (Barboutov et al., 2017), not only to listen to music, use social networks or stay in touch with the family, but also to various applications of interest. Bordini & Korn (2020) propose an App as a solution about the transition from college to university in terms of combat loneliness and social isolation.

Other applications have been created to propose learning environments (Brazuelo, 2011; Khaddage, 2016; Loredó, 2018), consult academic information (Vega Olvera, 2017; e-Scholar App), as a school planner (Egenda App; rSchoolToday App; Class Timetable App), or to track study habits (Arnold et al., 2017). For a student it is very important to be informed about the dates of a school calendar, and the accomplishment of the different activities on time. In computational terms a student's profile (e.g. academic level) can be considered as a “user context” and the application that reacts to this information is called a “context-aware system”. The literature reports some context-aware mobile applications, focused on providing solutions in different environments, such as health (Araujo-Lara, 2016; Kumar, 2022; Marshall, 2019) and tourism (Cheverst et al., 2017). However, a challenge as proposed in (Cheverst et al., 2017) is to offer applications that do not completely depend on an Internet connection, so that it is available to the entire community.

The purpose of this work is to develop a mobile application, as a context-aware system, that works as a school assistant, which provides information about the activities planned in a school calendar and sends personalized notifications according to the student's profile. The benefit is to keep the students aware of their school activities, which allows them to have good academic performance. The school calendar is automatically updated in the application, and two versions are proposed: the first version includes the definition of the user's profile by the own student and the second one considers that their profile will download automatically from a server in the University. The main contribution of this job is the design of the software to automatically download the calendar, the acquisition of the student's profile (user context) and to send personalized notifications (context-aware notifications).

This work was developed in the Engineering School of the Autonomous University of San Luis Potosí, nevertheless, it is possible to develop on other academic entities. The structure of the paper is as follows: Section 2 describes the details of the design of the mobile

application; Section 3 shows the tests carried out, a plan for its use, and a future evaluation; and finally, Section 4 presents the conclusions and future work.

MATERIALS AND METHODS

The application was developed in Dart (Bracha, 2016) as an open-source programming language. Flutter (Meiller, 2021) was used, an SDK for the mobile application development. The app uses shared packages and plugins of the package supplier Pub Dev as complement library and makes the function of the platform Pub Dev available to the application. The detail of imported dependencies is found in the file pubspec.yaml, in which the name and version of the dependency is reflected.

Figure 1 represents the architecture of the application. The flow starts when the administrator of the scholar department of the University (1) uploads a plain file or records an activity in the server, (2) server that has a plain-files library, (3) such library contains the university's calendar records. Each registered activity is reflected in the activities list (4) which keeps a defined activity model format. The App initiates a connection with the server (5) using an API GET command under HTTP protocol, requestion the scholar calendar and the activities list. This information is then stored in the mobile application (6) where can be consulted by the student.

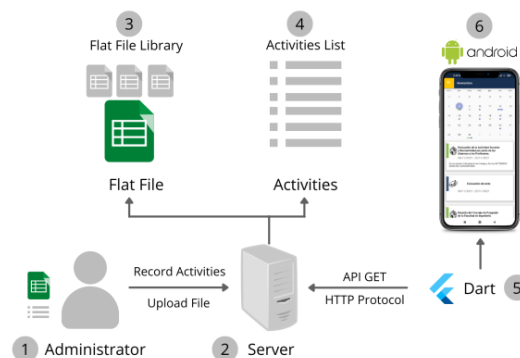


FIGURE 1.
ARCHITECTURE OF THE APP.

For the plain file library, each one of the uploaded files is given a loading date and an identifier that will be useful to recover the scholar calendar file; the purpose is for the application to identify which file is the most recent in being uploaded by the server. On the other hand, the activities list has an activity model format defined in the application with the

following fields: date of start, date of end, name, description, type of activity, academic entity, procedure, requirements, and URL.

The “type of activity” defined in the plain file allows sending custom notifications according to each user’s profile. Figure 2 shows the use cases of the application, each use case as a module in the system is described below. In case of “Storage user context” is a functionality that has the purpose to storage the user context defined by the user in a database, which is retrieval by the application.

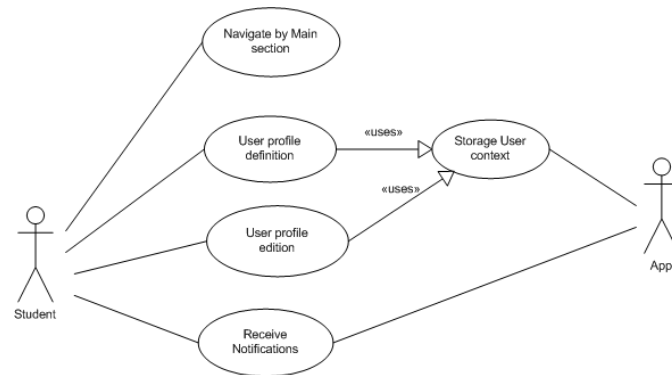


FIGURE 2.
USE CASES DIAGRAM.

Main section description

The main section includes the calendar (see Figure 3.a), it reflects each activity from the plain file through a color code, and the user may navigate to know all the belonging activities of the selected month.

In the menu bar (see Figure 3.b) it is possible to configure the calendar visualization (month or week). Additionally, it has direct access to the institutional websites, which are linked by URL launcher dependency, and allows to open a new tab in the web browser of the mobile phone.

User profile view

There is a settings screen where the student can modify the user's profile and therefore the notifications he wishes to receive. It is divided by categories that can be checked or not, also the user can activate or deactivate the option to receive notifications (See Figure 6).

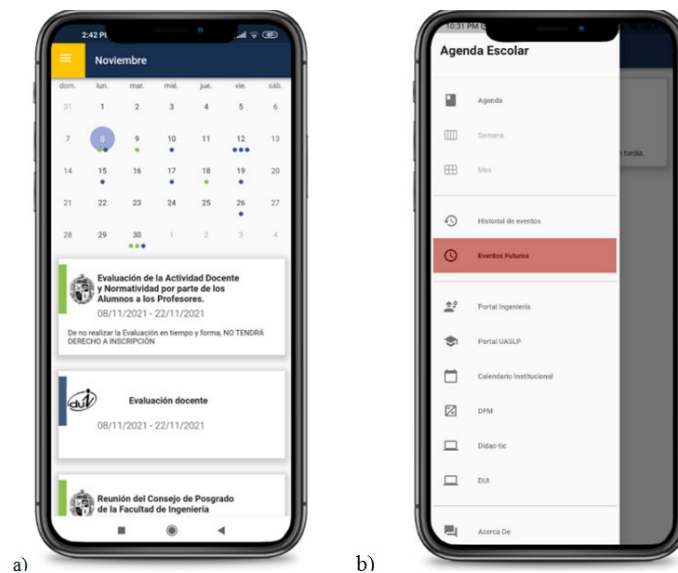


FIGURE 3.
APP VIEWS: (a), CALENDAR, (b), GENERAL OPTIONS.

User profile definition

Once the user downloads the application on a mobile device, they are asked to answer four-questions survey as part of his profile. The profile separates the user by academic level (undergraduate or postgraduate), by academic area (Agroindustrial, Ciencias de la Computación, Ciencias de la Tierra, Civil, Mecánica y Eléctrica, and Metalurgia), and also allows to establish if the Departamento de Físico Matemáticas (DFM) or Departamento Universitario de Inglés (DUI) still interest the student, see Figures 4 and 5.

After responding to the survey, a connection is established with the institutional server of the University under the HTTP protocol, allowing the reception of the scholar calendar for the current semester through a flat file. The processing of this file includes reading the information extracting from each activity: start date, end date, name, description, type of activity, academic entity, procedure, requirements, URL, academic area, notification category and academic level. Each activity is registered in the application's main calendar.

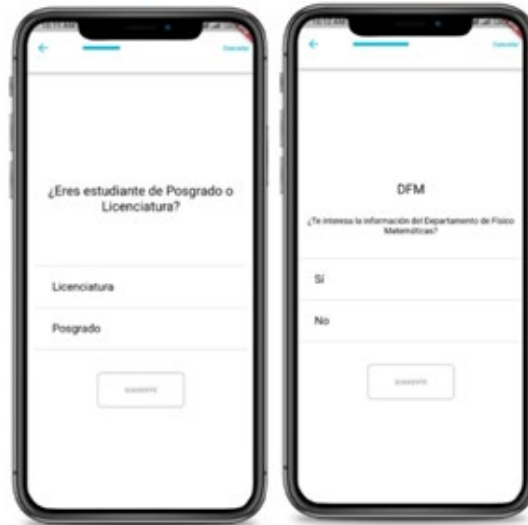


FIGURE 4.
USER PROFILE DEFINITION (ACADEMIC LEVEL AND DFM).

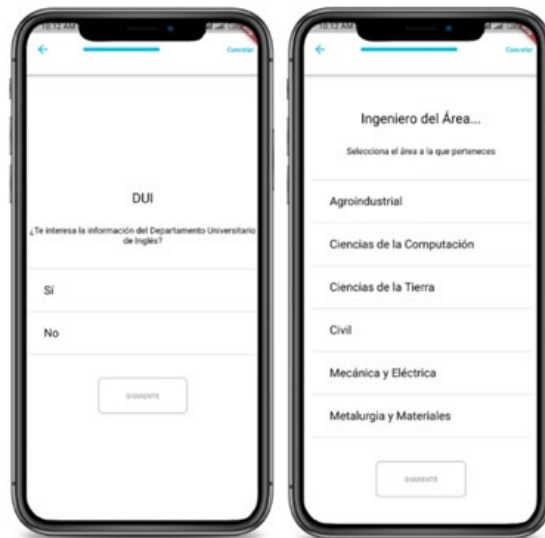


FIGURE 5.
USER PROFILE DEFINITION (DUI AND ACADEMIX AREA).

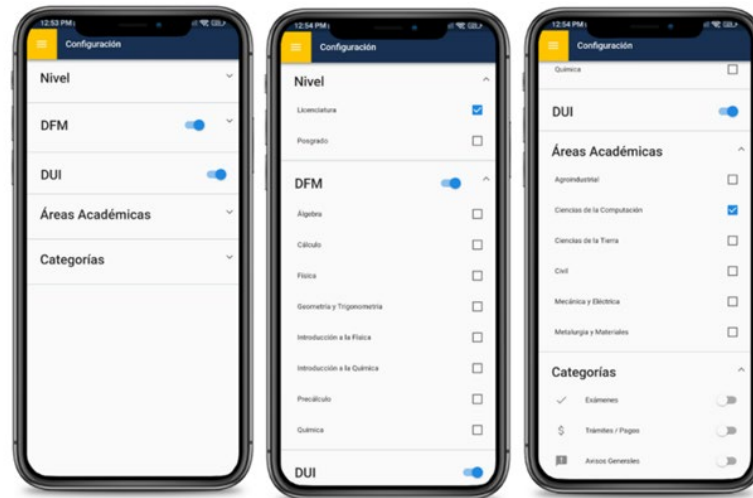


FIGURE 6.
USER PROFILE EDITION.

Notification Module

According with the Taxonomy of Notification proposed at (Nava-Muñoz et al., 2009), the content type is a “reminder”, the time considers some periods, the actor is the student, and the presentation is on a mobile device. These dimensions are based on six W’s questions approach, as shown in Figure 7.

Three periods are considered for each notification:

- Before: the date before the event happens
- During: period in which the event is happening
- Last day: date of the ending of the event

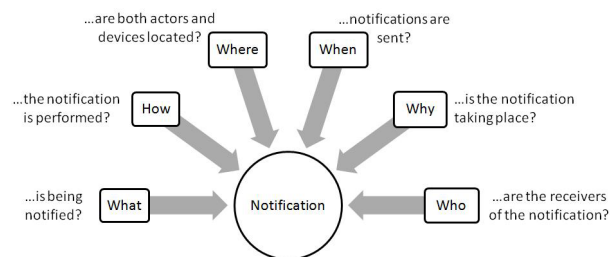


FIGURE 7.
SIX W'S QUESTION APPROACH, FROM (NAVA-MUÑOZ ET AL, 2009).

Considering these three configuration criteria: (1) user wants to be notified of a certain category, (2) the times of a notification, and (3) the categories mentioned before, the characteristics for each category:

- Exam: two notifications are created. The first notification is set one day before the exam period start date, and the second one the day the exam period starts.
- Payment Processing: The day of the start date of this processing is set.
- Notice: It is set to the start date of the notice.
- Mandatory: The first notification of this category is configured one day before the day of the event, then notifications are created based on the number of days established by the period of time for this activity, considering two-days intervals, and finally the last notification is set on the day marked as the last day for this activity (end date).
- DFM and DUI: It is configured one day before the start date of the activity.

Each of the activities are scheduled at 10:00 a.m., considering UTC time zone or the local time of the device in which the object is created. To launch a context-aware notification, the application creates an iterative process where the categories activated in the user's profile are compared with the list of activities, in the event that the current date is the same to the scheduled date, it sends a message to the user. Figure 8 shows a sequence diagram of how a notification works to a student with the categories: DUI, DFM, Ciencias de la Computación.

When the user context enabled notifications, the type of notification is queried and it gets configured. A notification is created and scheduled as shown in Figure 8. The action of scheduling a notification is different for each of the established categories, which are: exam, process payment, notice, mandatory, DFM, DUI and postgraduate.

Preliminary tests of uni-agenda app

The application was tested during one semester, with the entire calendar loaded and it was asked to users to configure user profile. The concept tests were made according to different user profiles, for example changing the academic area. For each profile, notifications waited for 15 days in order to verify its correct operation, so we could verify that each notification is associated with an active category. It was requested to users to make a log of notifications received for the verification process.

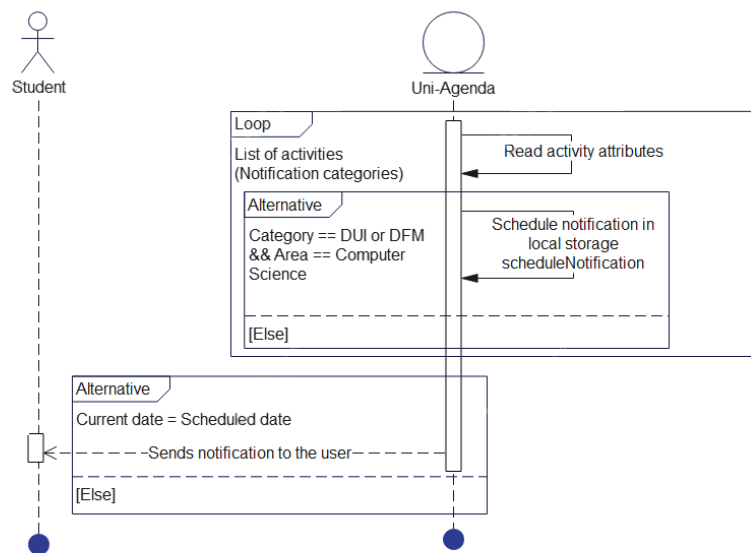


FIGURE 8.
SEQUENCE DIAGRAM ABOUT NOTIFICATION LAUNCH.

The results obtained shown the correct functionality of the App, as described next. The context-aware application responds according to the user profile, where user = {Undergraduate, DFM, Ciencias Computacionales}, the application waited for the dates for the third exam, and then it sent a notification, as shown in Figure 9.

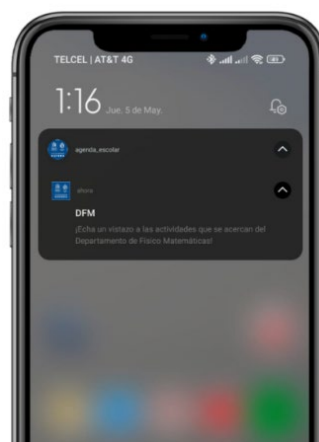


FIGURE 9.
NOTIFICATION SENT (SCENARIO 1).

Another test case was when user = {Undergraduate, DFM, DUI, Agroindustrial}, the application waited for dates for some exam (in DFM and DUI), and then it sent a notification as shown in Figure 10.

After this preliminary test, the plan is to deliver the application to a portion of students in the school. The new tests will deploy from uses cases, similar as proposed in (Phung et al., 2020); the following phases are planned:

- Phase 1: first trimester of classes (August-October 2023) use of the app by students with their own profile.
- Phase 2: two last months of classes (November-December 2023) evaluation of the use of the app by students, through a survey to measure performance and facility of use.

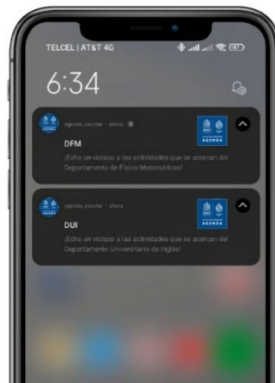


FIGURE 10.
NOTIFICATION SENT (SCENARIO 2).

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The use of mobile devices is common in the university community. Nevertheless, it is not always possible to contract a "data plan" or a permanent connection to the Internet (WiFi). Because of that, it is necessary a mobile application does not dependent of a permanent connection.

This work has the motivation of "the students' academic performance improves when they are aware of test dates and school activities". Therefore, in this work we proposed an autonomous mobile application to provide information about the school calendar and send notifications according to the student's profile. Each profile (user context) considers the academic progress of the student and therefore activities of interest can be associated. So, in this way, the notifications that are sent are considered context-aware notifications.

Concept tests were made on the first established version, with the purpose of testing the performance of the application; that according to a certain profile, the appropriate notifications are received. Successful tests were had in the tested scenarios. The results of the usability evaluation in process are not ready yet, the students will have a trial period for three months and later will answer usability survey.

As future work, it is planned to develop the second version of the application, where the user does not have to define or modify his profile, instead that can be download it in real time from the University server. This will allow the context to be acquired by the application, and to change in situations during the semester, e.g. change the enrollment on department DFM. Additionally, it is proposed to carry out a trial period and an evaluation of the App.

REFERENCES

- Araujo-Lara, Z., Nava-Muñoz, S., Martínez-Pérez, F., Pérez-González, H., & Galván Medina, J. (2016). Sistema para la monitorización de la Adherencia de Medicamentos para personas con Depresión Mayor. Paper presented at the VI Congreso Mexicano de Interacción Humano-Computadora (MexIHC 2016).
- Arnold, K. E., Karcher, B., Wright, C. V., & McKay, J. (2017). Student empowerment, awareness, and self-regulation through a quantified-self student tool. Paper presented at the Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference.
- Barboutov, K., Furuskar, A., & Inam, R. (2017). Ericsson mobility report. Stockholm, Sweden: Niklas Heuveltop.
- Bordini, R. A., & Korn, O. (2020). A Mobile App to Combat Loneliness and Social Isolation Among University Students. Paper presented at the 22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services.
- Bracha, G. (2016). The DART Programming Language: Pearson Education Inc.
- Brazuelo Grund, F., & Gallego Gil, D. (2011). Mobile Learning: los dispositivos móviles como recurso educativo: Sevilla: Editorial MAD Eduforma.
- Cheverst, K., Turner, H., Do, T., & Fitton, D. (2017). Supporting the consumption and co-authoring of locative media experiences for a rural village community: design and field trial evaluation of the SHARC2.0 framework. *Multimedia Tools Appl.*, 76(4), 5243–5274.
- Class Timetable App. Retrieved Junio 2022, from https://play.google.com/store/apps/details?id=com.icemediacreative.timetable&hl=es_MX&gl=US
- e-Scholar App. Retrieved Junio 2022, from

- <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.scholar.schoolapp&hl=en&gl=US>
Egenda App - School Planner & Assistant. Retrieved Junio 2022, from
https://play.google.com/store/apps/details?id=studios.gr8bit.schoolmanager&hl=es_MX&gl=US
- Khaddage, F., Müller, W., & Flintoff, K. (2016). Advancing mobile learning in formal and informal settings via mobile app technology: Where to from here, and how?. *Journal of Educational Technology & Society*, 19(3), 16-26.
- Kumar, D., Maharjan, R., Maxhuni, A., Dominguez, H., Frolich, A., & Bardram, J.E. (2022). mCardia: A Context-Aware ECG Collection System for Ambulatory Arrhythmia Screening. *ACM Trans. Comput. Healthcare*, 3(2), Article 20.
- Loredo E Silva, M. P., de Souza Matos, B.D., da Silva Ezequiel, O. Lucchetti, A.L.G., & Lucchetti, G. (2018). The Use of Smartphones in Different Phases of Medical School and its Relationship to Internet Addiction and Learning Approaches. *J Medical Systems*, 42(6), 106.
- Marshall, J. M., Dunstan, D.A., & Bartik, W. (2019). The Digital Psychiatrist: In Search of Evidence-Based Apps for Anxiety and Depression. *Frontiers in psychiatry*, 10, 831.
- Meiller, D. (2010). *Modern App Development with Dart and Flutter 2: A Comprehensive Introduction*: CPI books GmbH, Leck.
- Nava-Muñoz, S., Morán, L., & Tentori, M. (2009). A Taxonomy of Notification Technology for Assisting the Caregivers of Elders with Cognitive Decline. Paper presented at the 13th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI'09), San Diego, CA, USA.
- Phung, K., Odongo, S., & Ogunshile, E. (2020). Covid-19 Care – A mobile application to help connect volunteers and vulnerable people in the community during the Covid-19 lockdown. Paper presented at the 8th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT).
- rSchoolToday App - Activity Scheduler. Retrieved Junio 2022, from
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rschooltoday.activityscheduler&hl=es_MX&gl=US
- Vega Olvera, G. I., Vega Flores, P., & Morales Orozco, D. (2017). Enseñanza de la programación para tecnologías móviles. *Anfei Digital*, 3(6).