

Diseño y construcción de un reactor multifuncional de bajo volumen y de tanque agitado empleado en la obtención de biodiésel

García-López Marycarmen¹, Dena-Aguilar José Alonso¹, Zacarías-Moreno Edgar¹, Acevedo-Martínez Julio², Martínez-Delgado Enrique Javier¹, Romo-Rodríguez SB Pamela¹

¹ Tecnológico Nacional de México/I. T. de Pabellón de Arteaga; Departamento de Ingenierías; Carretera a la Estación de Rincón Km 1.0, C. P. 20670, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.

² Tecnológico Nacional de México/I. T. de Aguascalientes; División de Estudios Profesionales.

Resumen

Se ha diseñado y construido un reactor multifuncional bajo diseño propio de 3.65 L de capacidad para la producción de biodiésel. Se propone un diseño de un reactor tubular del tipo de tanque agitado con una zona de descarga cónica capaz de operar en multiproceso. Los diseños fueron elaborados en el software de SolidWorks 2018. La construcción del reactor considera una carcasa externa con soportes, un tanque interno, sistema de agitación y sistema de calentamiento. Para la manufactura se emplearon materiales de fácil adquisición, pero de resistencia mecánica y química comprobada. Para validar la propuesta se llevaron a cabo reacciones de transesterificación de biodiésel empleando aceite comestible vegetal bajo un diseño experimental ortogonal. La puesta en operación del reactor en flujo semicontinuo permitió obtener biodiésel bruto sin presentar fallas operativas. Los resultados son consistentes con un análisis de simulación de flujo de fluidos realizado con la herramienta SolidWorks Flow Simulation.

Abstract

A multifunctional reactor of 3.65 L capacity was designed and manufactured under own design for biodiesel production. The design reactor was proposed as a tubular stirred tank reactor with conical discharge. The reactor can be operated in multi-process mode. The designs were elaborated in SolidWorks 2018 software. The manufacture of the reactor includes a casing external tank, a reaction internal tank and a heat & stirred system. The reactor was fabricated using materials that are easy to obtain but with proven chemical and mechanical resistance. An orthogonal experimental design to validate the semi-continuous operating of the reactor with transesterification reactions using vegetable oil was established. A raw biodiesel was obtained, without operative failures or issues with the reactor. A fluid flow analysis simulation in SolidWorks 2018 Flow Simulation was realized. The simulation was consistent with the reactor results obtained.

Palabras clave: reactor multifuncional, reactor de tanque agitado, diseño mecánico, manufactura, biodiésel.

Keywords: multifunctional reactor, stirred tank reactor, mechanical designs, manufacturing, biodiesel.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los combustibles fósiles ha contribuido al deterioro del medio ambiente debido a los gases de efecto invernadero que producen durante su combustión. Motivo por el cual se ha explorado en los últimos años la producción de biocombustibles –como una alternativa de energía–, que satisfagan las demandas energéticas y que contribuyan al desarrollo de las economías de los países que los generen [1, 2]. En este contexto, se ha explorado la producción de biodiésel a partir de varias fuentes de biomasa debido a que es una bioenergía biodegradable, no es toxica, emite pocas cantidades de contaminantes durante su combustión y puede ser

mezclada con el diésel del petróleo para llegar a ser una opción viable en sectores económicos como el del autotransporte [2-4]. El biodiésel puede ser obtenido por diversos métodos, donde el procedimiento más empleado es por reacciones de transesterificación de aceites vegetales con un alcohol en un medio catalizado. Estas reacciones propician la transformación de las moléculas de triglicéridos de los aceites en esteres alquílicos muy similares a las del petrodiesel [4]. Para llevar a cabo esta transformación se emplean comúnmente reactores continuos de tanque agitado, de lecho fijo, de columna de burbujeo, tubulares u otros. Donde una característica técnica común entre estos reactores, es que cuentan con sistemas de calentamiento o de agitación que suman a las reacciones de algunos parámetros vitales inmersos en la producción de biodiésel como por ejemplo la temperatura (entre un rango de 40 y 50 °C) o la velocidad de agitación (vigorosa en régimen turbulento) [2,4]. Sin embargo, la viabilidad comercial de la producción de biodiésel es la principal desventaja que desestima la fabricación de este biocombustible debido a los costos de los aceites vegetales empleados como materia prima [5]. Por esta razón, la construcción de reactores de biodiésel se presenta como una propuesta viable para mitigar esta desventaja ya que a través de ellos se pueden controlar las variables de operación y consecuentemente poder optimizar los procesos. Al respecto, en los últimos años se han presentado varias propuestas de reactores de biodiésel donde se aplican diversas estrategias para su diseño y construcción como por ejemplo emplear materiales de acero inoxidable para su manufactura, utilizar software de diseño mecánico especializado para elaborar sus dibujos técnicos o realizar simulaciones de su funcionamiento, poder ser multipropósitos para llevar cabo diferentes procesos en el mismo equipo, incorporar técnicas de automatización o hasta usar energía solar como medio de calentamiento [1-3, 5-10].

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de diseño y construcción de un reactor multifuncional de bajo volumen para la producción de biodiésel capaz de operar en flujo continuo, discontinuo o semicontinuo. Para tal efecto, se procedió a la selección de materiales y componentes, uso de software especializado de diseño mecánico y validación del funcionamiento del equipo a través de pruebas de obtención de biodiésel en flujo semicontinuo bajo un diseño experimental ortogonal. Adicionalmente se verificó el funcionamiento del reactor mediante una simulación de flujo de fluidos. El reactor cuenta con un sistema de agitación y calentamiento automatizados. Ninguna prueba de caracterización del biodiésel obtenido fue realizada. La metodología de automatización realizada al reactor no es presentada.

2. METODOLOGÍA

Generalmente los reactores convencionales consideran un diseño cilíndrico o tubular con terminación en fondo plano. En este estudio presentamos la novedad de un diseño propio de un reactor tubular de bajo volumen del tipo continuo de tanque agitado con un fondo en terminación cónica para el trasvase del fluido de trabajo.

El diseño propuesto permite trabajar el reactor en flujo diferente para la producción de biodiésel. Para este estudio se operó el equipo en flujo semicontinuo.

Todos los diseños mecánicos del equipo fueron hechos en el software SolidWorks 2018. Los diseños permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento del sistema. Las dimensiones del reactor fueron determinadas en base a la capacidad volumétrica total del equipo, la cual fue calculada con simples ecuaciones de volumen para cuerpos cilíndricos y cilíndrico-cónicos, ver ecuación 1.

$$V = \pi r^2 h + \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (1)$$

Donde V =volumen, r = radio, h = altura.

El diseño del reactor contempla las siguientes secciones:

- a. **Carcasa.** Cuerpo cilíndrico de fondo plano donde se alberga en su interior la resistencia eléctrica de calentamiento y el tanque. En su interior se tienen 3 anillos de soporte para sujeción del tanque. En su exterior cuenta con una estructura de soporte compuesta por 4 postes, en 60° de dirección, que le otorgan estabilidad y una elevación a la carcasa.
- b. **Tanque.** Cuerpo cilíndrico con fondo cónico de 3.65 L de capacidad. La parte cónica posee una base mayor y una base menor. La base menor concluye con un cuello recto tubular de salida. El cuello está previsto con roscado para poder acoplar un tapón macho roscado o un tubo conector L para habilitar al reactor en flujo continuo o semicontinuo. La medición de variables de operación (no presentadas) se realizan a través de sensores ubicados dentro del tanque.
- c. **Sistema de agitación.** Consiste de un actuador (motor) y de un agitador propulsor soportado sobre una tapa superior cilíndrica que permite el cierre (a presión) hermético del equipo. La tapa cilíndrica se instala sobre la carcasa y cuenta con una base tipo abrazadera para montaje del actuador. Como actuador se empleó un motor a pasos NEMA 23 modelo 23HS5628 marca Aibecy adquirido en Fast Tech Commercial Group S. A. de C. V. La tapa cilíndrica cuenta con dos entradas de alimentación, mismas que son empleadas a manera de respiraderos. El sistema posee un agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín y cuenta con dos juegos de agitador propulsor de 4 aspas tipo paletas cada uno (impulsor mayor e impulsor menor). Las aspas poseen una inclinación de 35° . Mediante un cople flexible de aleación de aluminio med. 8-10 mm se fija el agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín al motor. Para dar estabilidad y nivel al eje del agitador se adaptó un rodamiento ISK comercial de 10 mm de diámetro interno. Para determinar las revoluciones por minuto (rpm) del motor se empleó un tacómetro dual DT-2236 marca Lutron.
- d. **Sistema de calentamiento.** Compuesto por una resistencia eléctrica en espiral de acero inoxidable con características de 127V, 1000 W, 16A, 60 Hz de potencia, conexiones a 90° . La resistencia fue tomada de una parrilla eléctrica marca Volteck Basic adquirida en un centro comercial urbano.
- e. Adicionalmente, el sistema de calentamiento y de agitación son controlados por un sistema mecatrónico de automatización (sistema no presentado).

En la Tabla 1, se especifican las dimensiones de diseño de cada sección del reactor (unidades en milímetros).

Tabla 1. Diseño del reactor: dimensiones de las secciones del reactor.

Componente	Largo	Alto	Diámetro	Observaciones
Carcasa (cuerpo cilíndrico exterior).		400.05	168.275	
Anillos de soporte (3) de tanque: Anillo 1 en forma de cruz con círculo central. Anillo 2 y 3 en forma circular.			Anillo 1: 17.78 Anillo 2 y 3: 139.7	Posición (altura) de anillos tomando como referencia el fondo de la carcasa: Anillo 1: 50.8 Anillo 2: 203.2 Anillo 3: 374.65
Resistencia eléctrica.			139.7	
Estructura de soporte de la carcasa (4).	210			Permiten que la carcasa esté a una altura de 133.35 con respecto al nivel del piso.
Tanque (cuerpo interno – parte cilíndrica).		247.65	127	
Tanque (cuerpo interno – parte cónica).	120	110	127 (base mayor) 12.7 (base menor)	
Cuello recto.	25.4		12.7	
Sistema de agitación (tapa cilíndrica de soporte).		44.45	169.862	
Sistema de agitación (agitador).	215.9 (eje)	25.4 (paletas impulsor mayor) 19.05 (paletas impulsor menor)	10 (eje) 88.9 (impulsor mayor) 50.8 (impulsor menor)	Agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín

El sistema completo del reactor fue construido bajo lo siguiente:

1. **Carcasa.** Construido en lámina de acero galvanizado calibre 18. Los 4 soportes de la carcasa fueron fabricados en perfil PTR en acero comercial de 1/2". Además, en su interior se cuenta con soportes (guías) cilíndricos construidos con alambroón de acero de bajo carbón de 1/4" para sujeción del tanque.
2. **Tanque.** Recipiente interno cilíndrico con terminación cónica donde se llevan a cabo las reacciones de obtención de biodiésel por transesterificación por lo que fue construido en acero inoxidable calibre 16 de tipo 304 grado alimenticio para un volumen total de 3.65 L.
3. **Sistema de calentamiento.** La resistencia se instaló en el fondo de la carcasa cuidando que su estructura no entrara en contacto directo con el tanque y sus conexiones salieran de la carcasa directo al sistema mecatrónico de control.
4. **Sistema de agitación.** La tapa, la abrazadera, los soportes del actuador y el agitador propulsor fueron construidos en acero inoxidable calibre 16.

SolidWorks Flow Simulation permite simular el flujo de fluidos dentro de recipientes diseñados en SolidWorks, por lo que esta herramienta se empleó en conjunto con lecturas de un tacómetro para validar la geometría, diseño, trayecto de flujo circular y eficiencia del agitador en términos del tipo de flujo (laminar o turbulento) alcanzado. En la literatura se reporta que es necesario garantizar un flujo turbulento con Numero de Reynolds (N_R) > 10,000 para que se puedan llevar a cabo reacciones de transesterificación de

biodiésel [11]. En relación del N_R y las velocidades de agitación, expresadas en rpm, se ha reportado que las reacciones de transesterificación pueden llevarse a cabo a 150, 300, 600 o hasta 1000 rpm [12, 13]. En la práctica, se tendrá un flujo laminar si el $N_R < 2000$ y un flujo turbulento si el $N_R > 4000$; si el N_R está entre 2000 y 4000, no se puede predecir que flujo existe, por lo que se considera que es una región de flujo transitorio [14]. Para establecer el N_R del agitador propuesto en este estudio, se tomaron en cuenta las relaciones reportadas por Nouredini y Zhu (1997) y Mott (2006), ver Tabla 2.

Tabla 2. Tipo de flujo (N_R) vs velocidad de agitación (rpm).

Velocidad de agitación (rpm)	Numero de Reynolds	Tipo de flujo
150	3100	Transitorio
300	6200	Turbulento
600	12400	Turbulento

Para validar el funcionamiento del reactor propuesto, se estableció un diseño experimental ortogonal para realizar reacciones de transesterificación de producción de biodiésel. Conforme los catálogos de diseños de Taguchi [15], se seleccionó un arreglo ortogonal de Taguchi $L_4(2^3)$, el cual fue llevado a cabo por triplicado. Las pruebas de reacción se realizaron conforme la metodología reportada por Varty y Lishawa [16]. Se empleó aceite comestible vegetal virgen de canola y/o girasol de la marca comercial 123 (Factor 1: nivel 1=1000; nivel 2=1500 mL), metanol grado ACS de la marca JT Baker como alcohol de transesterificación (Factor 2: nivel 1=200; nivel 2=300 mL), hidróxido de sodio al 50% grado industrial de la marca Golden Bell como catalizador (Factor 3: nivel 1=2.3; nivel 2=3.45 mL). El tiempo total de reacción se fijó constante en 30 minutos para cada prueba. En la Tabla 3, se presenta el arreglo ortogonal de estudio.

Tabla 3. Arreglo $L_4(2^3)$ de estudio: factores y niveles de trabajo.

Experimentos	Factores		
	Vaceite veg. (mL)	Valcohol (mL)	Vcatalizador (mL)
1	1000	200	2.3
2	1000	300	3.45
3	1500	200	3.45
4	1500	300	2.3

3. RESULTADOS

Conforme la ecuación 1 y la Tabla 1, el volumen total de trabajo del equipo resultó de 3.65 L. De las Figuras 1 a la 4, se presentan los diseños elaborados del reactor en SolidWorks. Todos los diseños fueron elaborados en estilo de visualización en color acero galvanizado (shiny galvanized) y permitieron su construcción sin contratiempos. En los diseños se puede apreciar los componentes empleados para su montaje (carcasa, tanque, sistema de agitación, agitador, sistema de calentamiento). En el Anexo 1, se presentan algunos dibujos técnicos de las secciones del reactor con cotas en unidades de milímetros. Demás diseños y dibujos técnicos detallados están disponibles gratuitamente por los autores previa solicitud.

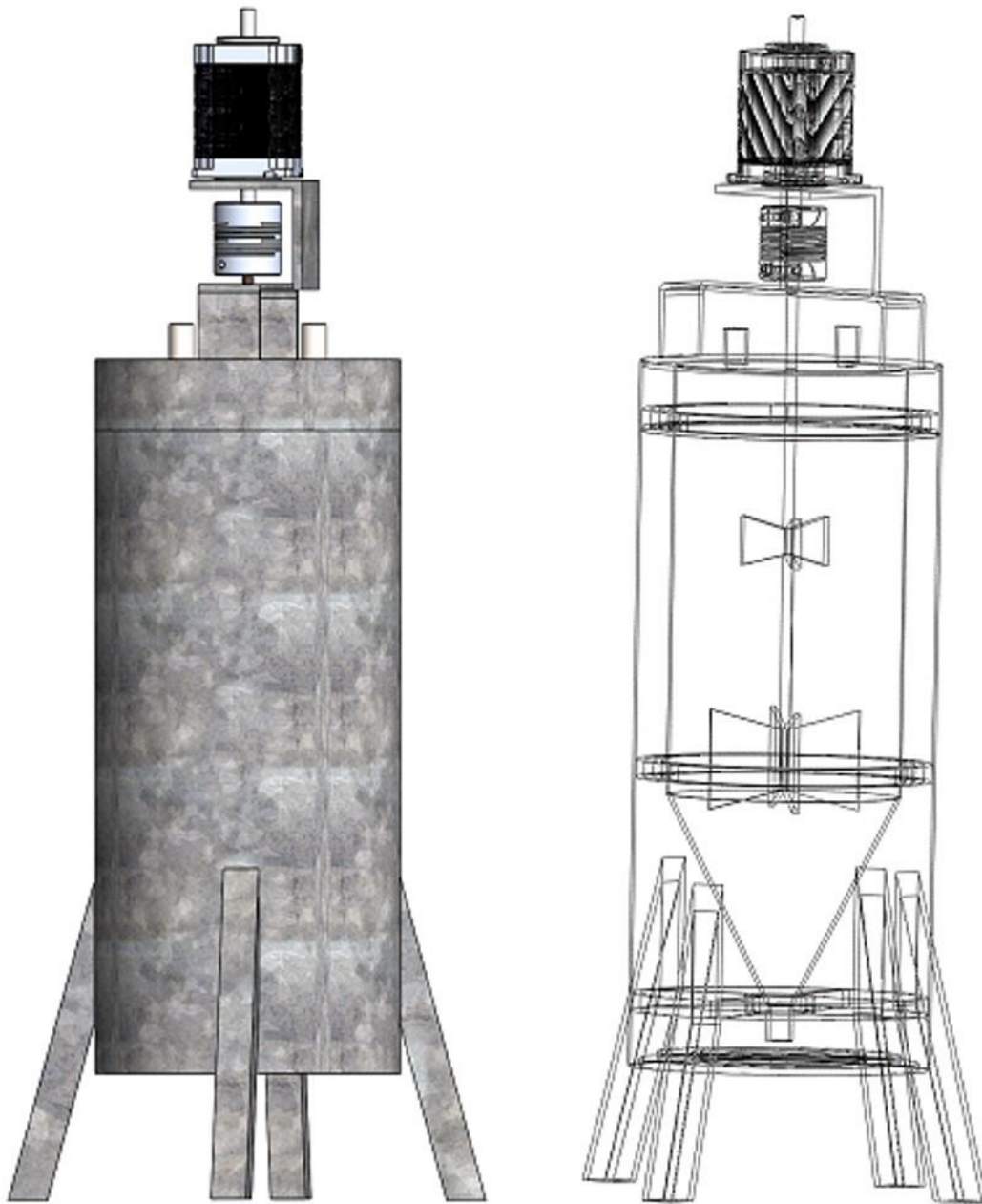


Figura 1. Reactor completo: vistas isométricas lateral (izq.) y estructura alámbrica (der.).

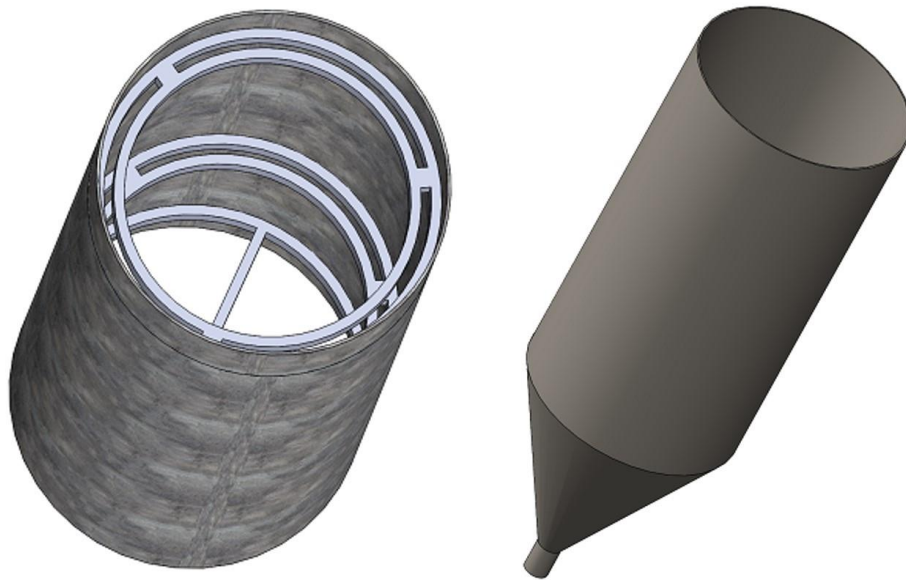


Figura 2. Vista interna superior sin fondo de la carcasa (izq.) y vista externa superior del tanque (der.).

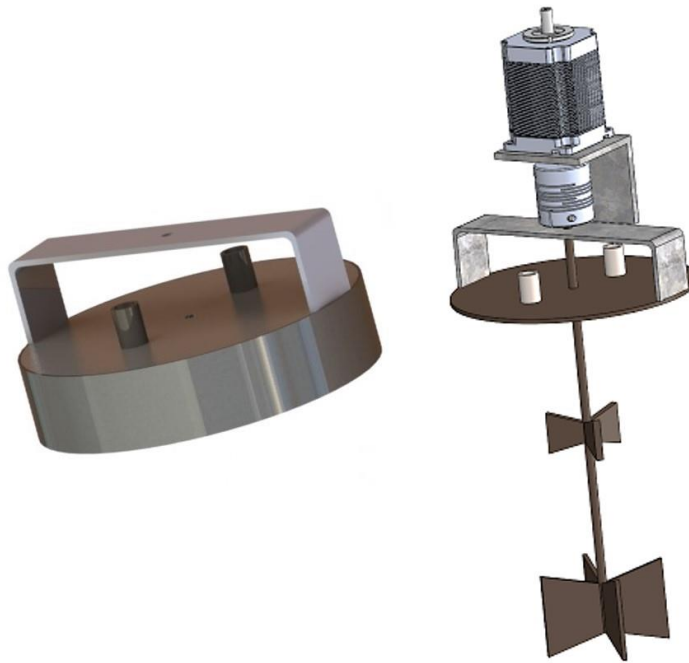


Figura 3. Tapa cilíndrica de soporte del agitador y cierre de la carcasa (izq.) y sistema completo de agitación: actuador y agitador propulsor (der.).

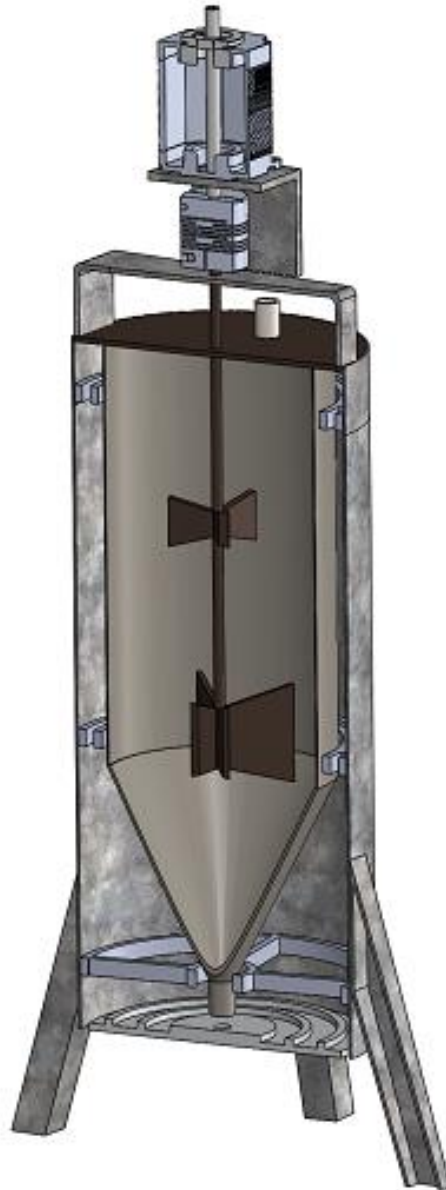


Figura 4. Vista interna del reactor en corte transversal.

La construcción del reactor de bajo volumen propuesto logró el objeto fin del proyecto de llevar a cabo reacciones de transesterificación para la producción de biodiésel. El reactor cuenta con (1) una carcasa externa cilíndrica de fondo plano elaborada en lámina de acero galvanizada que alberga al tanque y la resistencia eléctrica, así como servir de soporte para el sistema de agitación por medio de su tapa cilíndrica superior, (2) un tanque interno cilíndrico con terminación cónica construido en acero inoxidable en cuyo interior se llevan a cabo las reacciones de transesterificación, (3) un sistema de agitación consistente de un agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín de acero inoxidable impulsado por un actuador de motor a pasos lineal y (4) un sistema de calentamiento por medio de una resistencia eléctrica de espiral de 1000 W. De la Figura 5 a la 13, se muestran imágenes del reactor construido.



Figura 5. Reactor construido completo en vista completa. Se observa la carcasa y el sistema de agitación integrado.



Figura 6. Vista interna de la carcasa. Se muestran los anillos de soporte del tanque.



Figura 7. Acercamiento de la vista interna de la carcasa. Se visualiza al fondo la resistencia eléctrica.

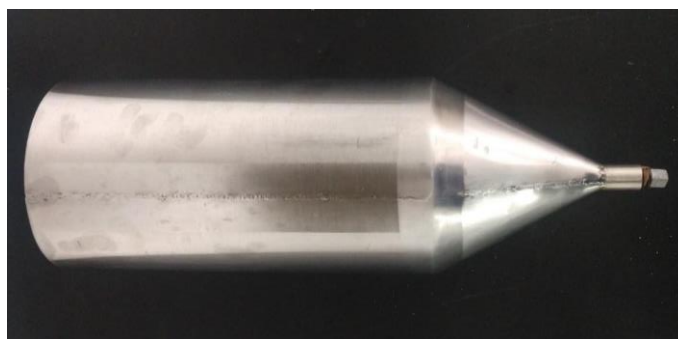


Figura 8. Vista exterior del tanque de reacción.



Figura 9. Vista superior interna del reactor. Se aprecia el tanque montado dentro de la carcasa.



Figura 10. Vista completa del sistema de agitación. Se presenta el agitador propulsor, el motor, tapa cilíndrica.

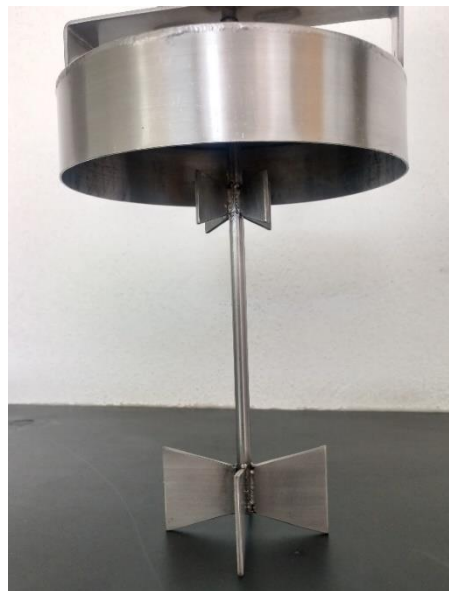


Figura 11. Vista completa del agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.

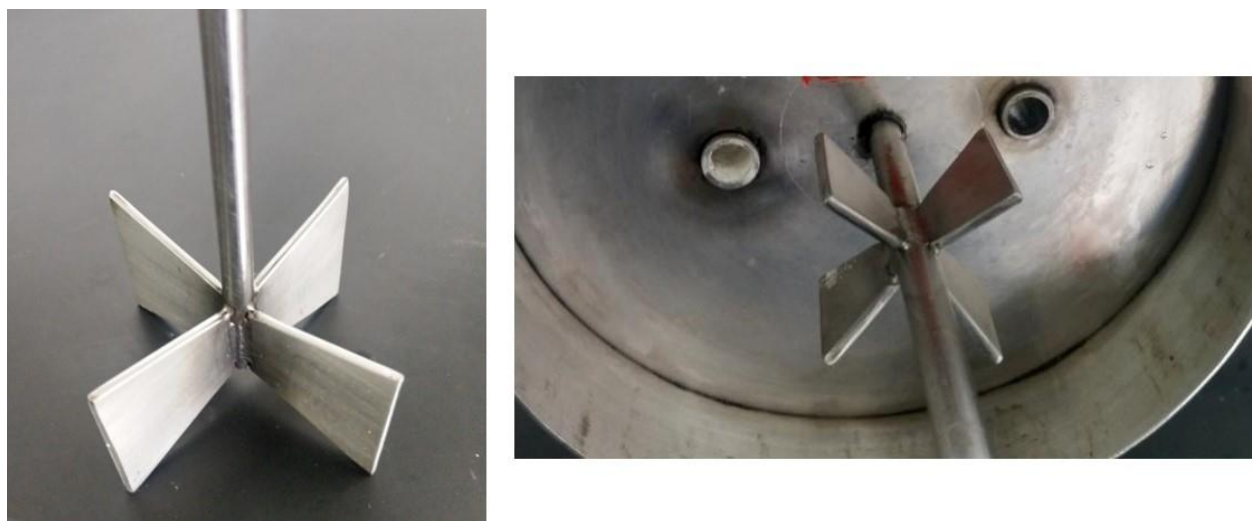


Figura 12. Aspas inferiores (izq.) y superiores (der.) del agitador propulsor.

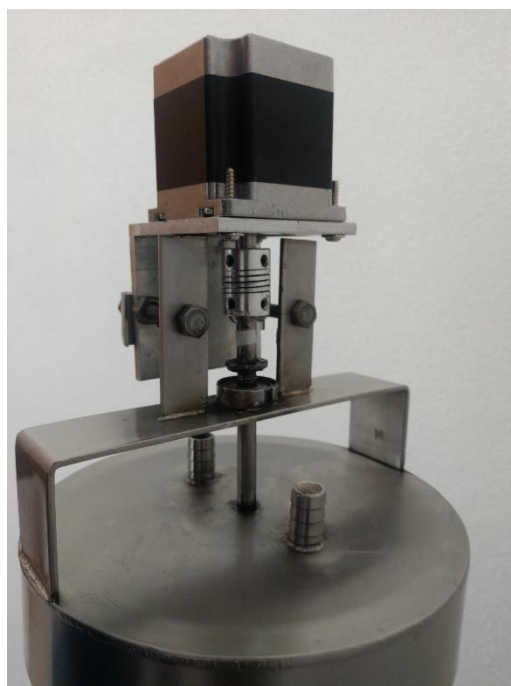


Figura 13. Acercamiento del sistema de agitación. Se observa la abrazadera, actuador, cople, eje del agitador, entradas de alimentación, rodamiento, soporte actuador y tornillería de sujeción.

La primera estrategia definida para comprobar la funcionalidad del reactor diseñado y construido fue ejecutar el diseño experimental ortogonal de Taguchi $L_4(2^3)$ definido. Donde uno de los parámetros que sugieren que el reactor trabajó correctamente fue la obtención de biodiésel bajo las condiciones de operación establecidas. En la Figura 14, se presenta un aspecto de dos experimentos llevados a cabo en el reactor construido y puesto en operación. Se aprecia la formación de capas en el residuo donde la capa inferior y superior se sugiere es formación de glicerina y biodiésel (con aceite no reaccionante), respectivamente. Demás pruebas de los arreglos ortogonales resultaron con aspectos similares. Ninguna prueba de caracterización de biodiésel fue realizada. Tampoco se probaron otras condiciones de operación.



Figura 14. Productos resultantes de la operación del reactor con reacciones transesterificación: experimento 1 y 3 del arreglo ortogonal 3.

La segunda estrategia de validación del reactor se define por el tipo de flujo obtenido durante las pruebas de operación del equipo. La velocidad de giro del paso lineal del motor se estableció en 1.9 ms que permite que la agitación sea prácticamente continua. En la Tabla 4, se muestran los rpm, el tipo de flujo y N_R que se obtuvieron en cada experimento. En cada prueba se tomaron lecturas de rpm con el tacómetro a los 10, 20 y 30 minutos de reacción para obtener un promedio. Los resultados indican que se logró tener un flujo turbulento en cada experimento, por lo que se sugiere que el funcionamiento del reactor fue el correcto. El flujo turbulento que se logra en el reactor permitió validar el diseño cónico del tanque, así como la geometría del agitador propulsor de doble aspas tipo corbatín.

Tabla 4. Tipo de flujo obtenido en cada experimento durante las pruebas de validación.

Prueba	Arreglo ortogonal	Promedio Lecturas (rpm)	N_R promedio	Tipo de Flujo
1	1	551	11387	Turbulento
2		466	9624	Turbulento
3		470	9713	Turbulento
4		641	13254	Turbulento
1	2	551	11394	Turbulento
2		542	11208	Turbulento
3		562	11608	Turbulento
4		555	11477	Turbulento
1	3	566	11690	Turbulento
2		501	10361	Turbulento
3		512	10588	Turbulento
4		500	10340	Turbulento

Finalmente, la tercera estrategia de validación de la construcción del reactor fue el uso de la herramienta SolidWorks Flow Simulation. En la Figura 15, se presenta el diseño del tanque y del agitador propulsor empleado para la simulación. El resultado es consistente con las estrategias de validación anteriores pues se observa una

agitación de tipo flujo turbulento. Se estudiaron simulaciones (visualización en “esferas”) en todas las opciones de parámetros de turbulencia del software. En todos los casos anteriores, la simulación es idéntica. En la Figura 16, se muestra una captura de pantalla de una de las simulaciones obtenidas (demás simulaciones y animaciones están disponibles gratuitamente por los autores previa solicitud). Ninguna otra interpretación es realizada sobre las simulaciones obtenidas.

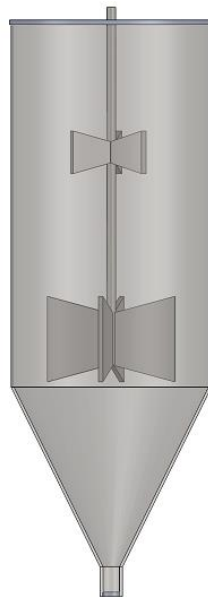


Figura 15. Diseño empleado en Flow Simulation: tanque y agitador propulsor.

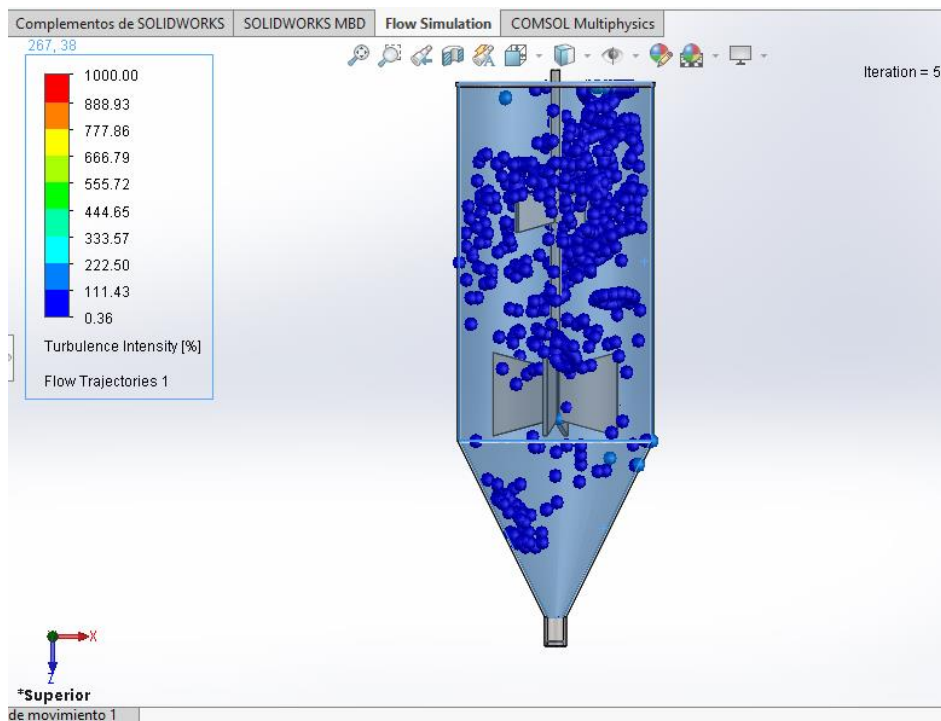


Figura 16. Flow Simulation en unidades de intensidad de turbulencia con valor máximo de 111.43 %.

4. CONCLUSIONES

La metodología de diseño y construcción de un reactor de bajo volumen (3.65 L) para la producción de biodiésel por reacciones de transesterificación resultó ser adecuada.

Los diseños elaborados en SolidWorks, permitieron asegurar que las dimensiones máximas cilíndricas (400.05 mm de altura y diámetro de base de 168.275 mm), la geometría (tubular con terminación cónica), el volumen máximo de trabajo (3.65 L) y el tipo de agitador (propulsor de doble aspas tipo corbatín) propuestos fueron adecuados para llevar a cabo la producción de biodiésel.

Las reacciones de transesterificación se llevaron a cabo en flujos turbulentos (rangos entre 450-650 rpm, 9600-13300 N_R). Los resultados anteriores fueron consistentes entre las pruebas experimentales, las mediciones de velocidad de agitación del actuador y las simulaciones construidas en SolidWorks Flow Simulation.

En este trabajo se operó el reactor bajo un proceso semicontinuo automatizado (técnicas de automatización no presentadas).

La construcción del reactor fue bajo el diseño propuesto. Se utilizaron materiales de lámina de acero galvanizado y/o de acero inoxidable para su fabricación, así como la integración de un sistema de calentamiento y de agitación. Lo anterior, permitió operar el reactor en flujo semicontinuo de manera adecuada y llevar a cabo las reacciones de obtención de biodiésel sin haberse presentado contaminación de los productos, presiones altas de trabajo, fugas o derramamientos de fluidos.

Como trabajo futuro se estudiará la respuesta del reactor bajo condiciones de operación diferentes y en flujos continuos o discontinuos. Dentro de este tenor, se contempla cuantificar y caracterizar el biocombustible logrado.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es producto del proyecto r24p15 (11474) convocatoria 2021: proyectos de investigación científica del Tecnológico Nacional de México Los autores agradecen el soporte financiero y académico del Tecnológico Nacional de México/I. T. de Pabellón de Arteaga para su realización.

REFERENCIAS

- [1] Pérez-Salinas, C. F., Núñez-Núñez, D. F., Sanaguano-Salguero, H.-del R. and Sánchez-Quinchuela, L. F. (2021). Diseño y construcción de un reactor discontinuo con recirculación externa para obtener biodiésel a partir de aceite de fritura en condiciones subcríticas. *INGENIUS*, 25, 32-40.
- [2] Almeida-Nascimento, F. and Pimentel-Cavalcanti, L. A. (2017). Sustainable biodiesel reactor prototype energetically powered by solar energy. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(2), 72-77.
- [3] Zahan, K.-A. and Kano, M. (2019). Technological progress in biodiesel production: an overview on different types of reactors. *Energy Procedia*, 156, 452-457.
- [4] Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Dehghani, M., Shariat-P., H. K., Mollahosseini, A., Hosseini, M. and Mojarab-S., M. (2019). Reactor technologies for biodiesel production and processing: a review. *Progress in Energy and Combustion Sci.*, 74, 239-303.
- [5] Achara, N., Ozoekwe, N. C., Haruna, A. and Owolabi, L. (2019). Scalable biodiesel reactor build and trial. *World Journal of Innovative Research*, 6(5), 52-55.
- [6] Nwaigwe, K.-N., Ogueke, N.-V., Kamalu, C. and Anyanwu, E.-E. (2014). Design and construction of a biodiesel batch reactor with improved settling capability. *Proceedings of the ASME 2014-IMECE2014*, Montreal, Quebec, Canada, p20.
- [7] Rahmat, B., Setiasih, I.-S. and Kastaman, R. (2013). Biodiesel reactor design with glycerol separation to increase biodiesel production yield. *Makara Seri Teknologi*, 17(1), 11-16.

- [8] Topare, N.-S., Patil, K.-D., Khedkar, S.-V. and Inamdar, N. (2020). Lab scale batch reactor design, fabrication and its application for biodiesel production. *Techno-Societal*, 17(1), 819-828.
- [9] Campos-Castelo, J. P. and Rodríguez-Freire, J. A. (2016). *Automatización de un reactor tipo batch para la obtención de biodiésel en el laboratorio de procesos industriales de la facultad de Ciencias* (Tesis de Licenciatura). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- [10] Solís-Ulloa, J. C. (2017). *Diseño y construcción de un reactor híbrido tipo batch para la producción de biocombustibles: biodiésel y bioetanol como caso d estudio* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
- [11] Arbeláez-Marín, A. M. and Rivera-Quiroz, M. P. (2007). *Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiésel a partir de algunos aceites vegetales colombianos* (Tesis de Licenciatura). Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- [12] Nouredini, H and Zhu, D. (1997). Kinetics of transesterification of Soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74 (11), 1457-1463.
- [13] Medina-Ramírez, I. E., Chávez-Vela, N. A. and Jáuregui-Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 55, 62-70.
- [14] Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6a. ed.). Naucalpan de Juárez, México, México: Pearson Educación.
- [15] Minitab.com. (2019). Catálogo de diseños de Taguchi. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/catalogue-of-taguchi-designs/>
- [16] Varty, A. and Lishawa, S. (s.f.). Haciendo biodiesel de aceite vegetal usado. Recuperado de <https://greenteacher.com/article%20files/haciendobiodiesel.pdf>

7. ANEXOS

Anexo 1. Dibujos Técnicos de los diseños del reactor

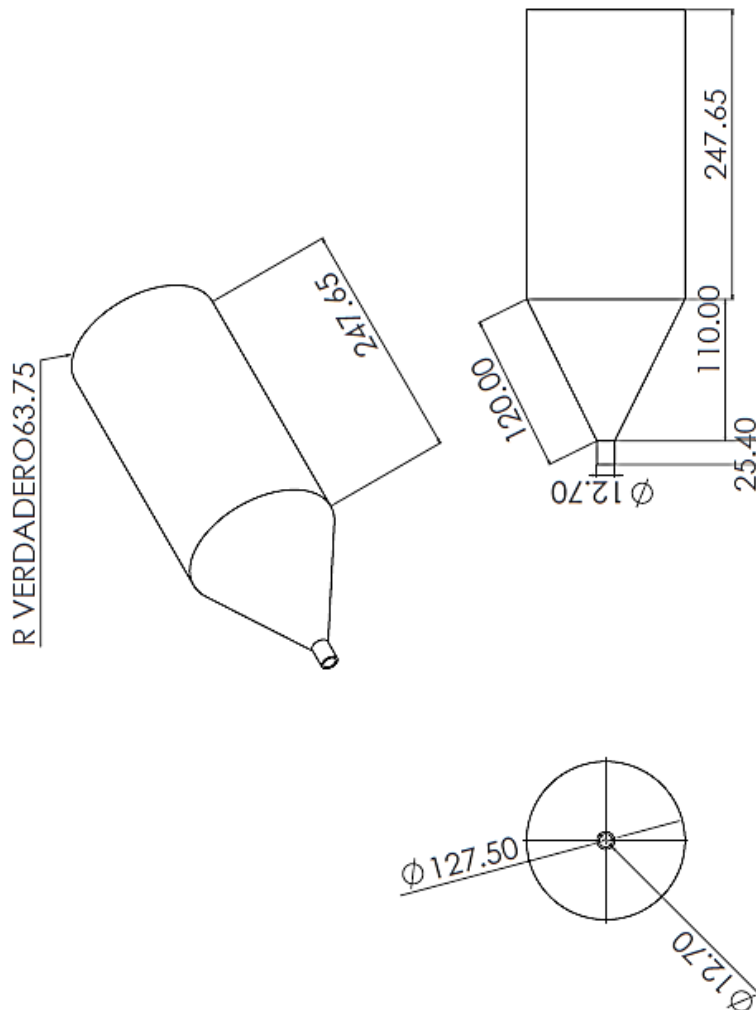


Figura 17. Dibujos técnicos del tanque.

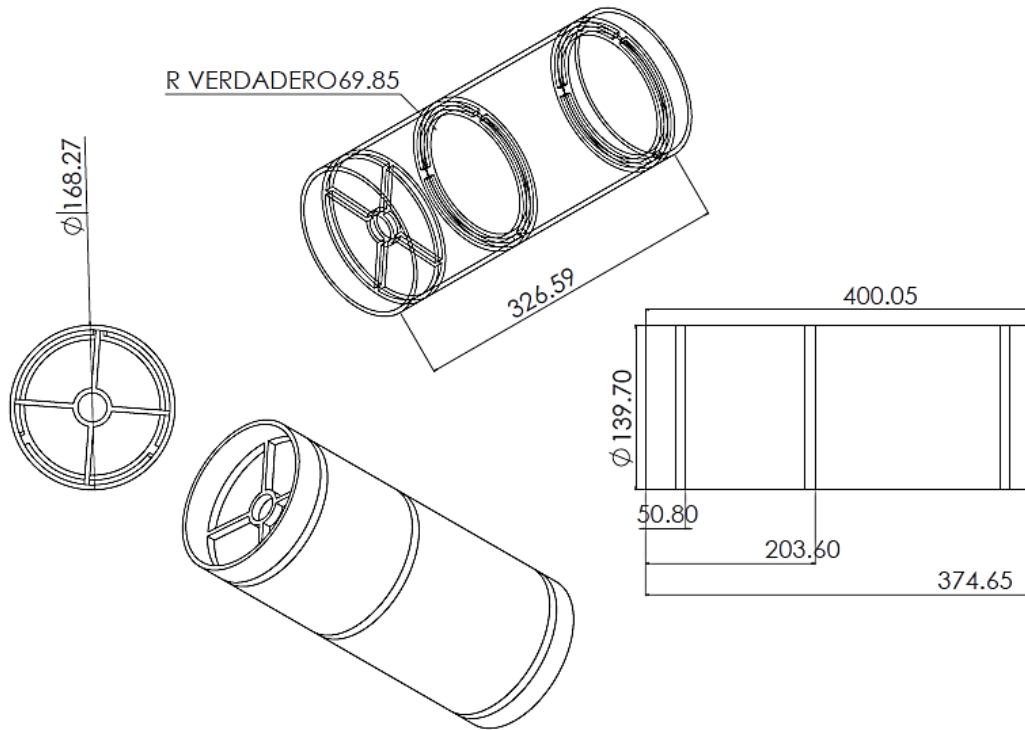


Figura 18. Dibujos técnicos de la carcasa.

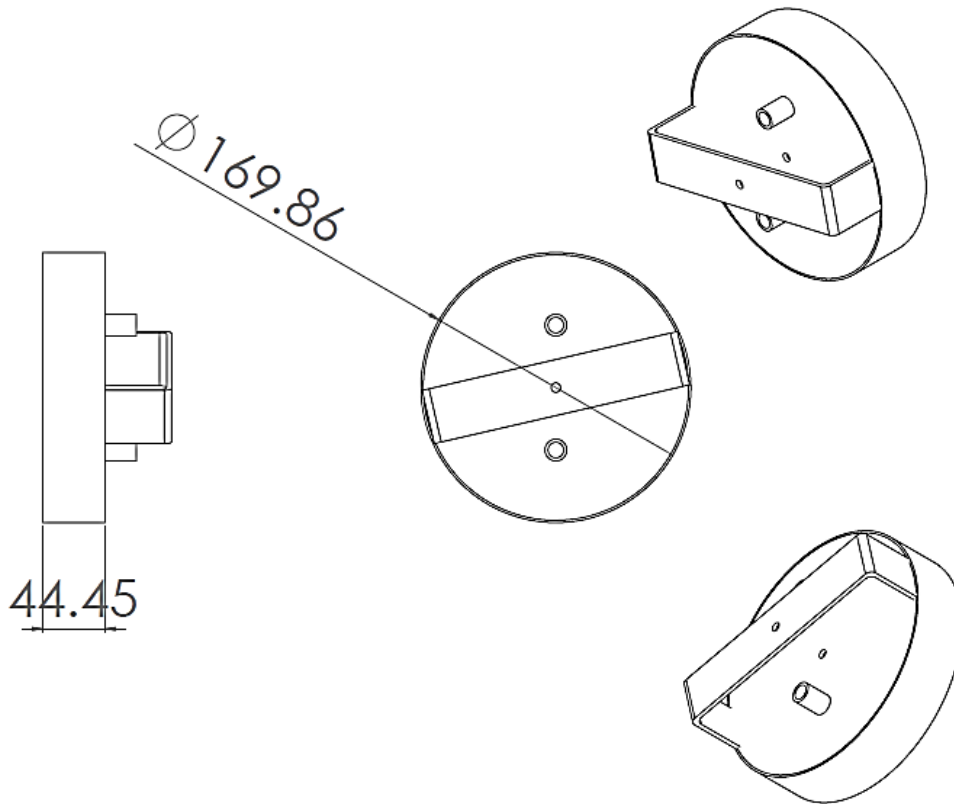


Figura 19. Dibujos técnicos de la tapa cilíndrica superior.

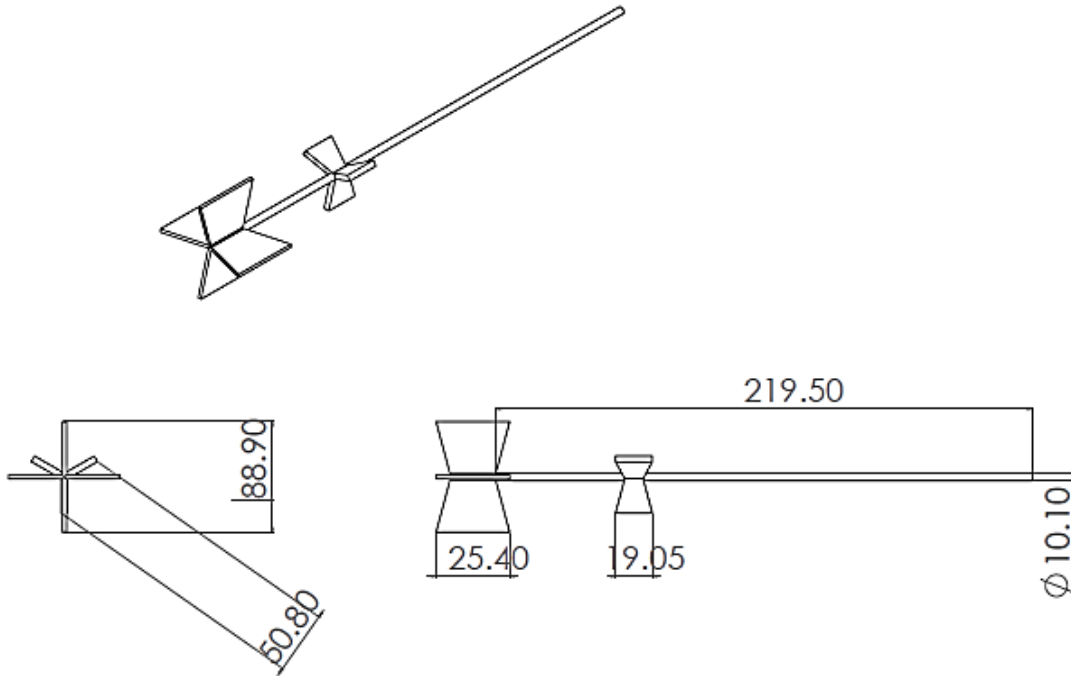


Figura 20. Dibujos técnicos del agitador propulsor.

Correo de autor: josealonso_dena@hotmail.com