

Análisis numérico del sistema para mezcla de pintura entre fluidos y sólidos en suspensión
Numerical Analysis Of The Mixture System Between Fluids And Solids In Suspension

Mgtr. Cristian Orlando Guilcaso Molina, MSc. Cristian Paúl Topa Chuquitarco, Mgtr. Ángel Isaac Simbaña Gallardo, Mgtr. Leonidas Esteban Ramírez Gangotena, Mgtr. Oscar Gabriel Toapanta Cunalata

APRENDIZAJE

Junio, V°4-N°1; 2023

- ✓ **Recibido:** 02/03/2023
- ✓ **Aceptado:** 18/04/2023
- ✓ **Publicado:** 30/06/2023

INSTITUCIÓN

- Universidad Técnica De Cotopaxi
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Instituto Superior Universitario Sucre
- Universidad Politécnica Salesiana
- Instituto Superior Pelileo

CORREO:

- ✉ cristian.guilcaso6706@utc.edu.ec
- ✉ ctopac@uteq.edu.ec
- ✉ isimbana@tecnologicosucre.edu.ec
- ✉ iramirezq@ups.edu.ec
- ✉ otoapanta@itsbenjaminaraujo.edu.ec

ORCID:

- <https://orcid.org/0000-0003-4745-8951>
- <https://orcid.org/0000-0002-2780-5488>
- <https://orcid.org/0000-0002-3324-3071>
- <https://orcid.org/0000-0003-2569-2974>
- <https://orcid.org/0000-0002-5816-1785>

FORMATO DE CITA APA.

Guilcaso, C. Topa, C. Simbaña, A. Ramírez, L. Toapanta, O. (2023) *Análisis numérico del sistema para mezcla de pintura entre fluidos y sólidos en suspensión*. Revista G-ner@ndo, V°4 (N°1),. 1076- 1090

Resumen

Esta investigación tiene por objetivo realizar el análisis por elementos finitos mediante un software el diseño un sistema de mezcla de fluidos, para lo cual se analizó las cargas que resultan en un eje de acero inoxidable AISI 304 (Agitador), utilizado para mezcla de sólidos en suspensión para pinturas con un porcentaje de 30 a 50% de sólidos. Se escogió un sistema de agitadores de uso axial debido a que este se adapta con mayor rapidez ante cualquier flujo resultante en la mezcla y también porque de acuerdo a su flujo descendente se logra obtener mejores resultados en la mezcla de fluidos con sólidos en suspensión al elevar los posibles elementos que se asientan en el tanque. Con la información de los requerimientos del producto, se validó el dimensionamiento de los elementos principales del sistema de agitación, ya que el eje y espas llegan a cumplir con un factor de seguridad admisible, sin incrementar los costos durante su proceso de construcción. Se evaluaron dos dimensiones de diámetros de espas de agitadores, 600 y 650 mm, obteniendo mejor resultado en el de menor valor, generando un aumento en el caudal vehiculado y mejorando los tiempos de mezcla del producto. Es importante mencionar que el agitador incluso puede fabricarse con ejes vacíos, para disminuir sus costos.

Palabras clave: Sólidos en suspensión, Agitador axial, Análisis Numérico, AISI 304 steel.

Abstract

This investigation analyzed a fluid mixture system by finite elements, in a specialized software. The resultant loads on the agitator were considered on an AISI 304 stainless steel shaft, used for mixing solids in suspension for paint, with a solid content between 30 to 50 %. An axial use agitator system was selected due to it adapts faster than to any resulting flow in the mixture. In accordance to the downward flow, the system also reaches better results in the mixture between fluids with solids in suspension, by raising the possible elements that settle in the tank. By analyzing the product requirements, the sizing of the main elements of the mixture system was validated, since the shaft and blades comply with an admissible safety factor, without increasing costs during the manufacturing process. Two dimensions of agitator blade diameters were evaluated, 600 and 650 mm, being the smaller one which obtained better results, generating an increase in the flow rate and improving product mixing times. It is important to mention that the agitator can even be manufacture with hollow shafts, to reduce costs.

Keywords: Solids in suspension, Axial agitator, Numerical Analysis, AISI 304 steel.

Introducción

Los recipientes con agitación mecánica por acción axial o radial se utilizan ampliamente en la industria debido a su simplicidad en la fabricación y su buena eficiencia (Grenville et al., 2015). El objetivo principal de estos sistemas es mantener la circulación y homogenización del compuesto. El estudio y la comprensión del flujo producido por los mezcladores en estos recipientes con agitador son de gran importancia al permitir cuantificar el rendimiento de un agitador. Posterior a ello, plantear una propuesta de optimización para alcanzar resultados deseados (Trans IChemE, 2001). Dentro de la producción de pintura, es necesario conseguir un mejor proceso de mezcla de las sustancias para evitar pérdidas de lotes debido a una ineficiente homogenización. Por este motivo, es necesario considerar la disminución en el tiempo de mezclado para aumentar la producción de la línea. Para el caso de estudio, actualmente se dispone de un tanque rectangular donde se tiene la formación de grumos de aditivos, sin alcanzar una mezcla homogénea con un tiempo de agitación de tres horas. Jhamb et al. (2020) revisaron la literatura sobre preparación de pinturas y recubrimiento mediante asistencia por computadora. Se definió el uso necesario de una configuración de tanque adecuado y la selección de un sistema de agitación, que permita alcanzar la máxima disolución posible de los ingredientes de la mezcla en el menor tiempo. El agitador seleccionado es el tipo turbina con aspas inclinadas a 45°, similar al analizado por Kabra et al. (2021). Este tipo de impulsor combina flujo radial con flujo axial y se utiliza especialmente para homogeneizar y mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines dispuestos en el interior del tanque. La configuración de la geometría del agitador es

fundamental para el diseño, por lo que surge la necesidad de estudiarla para establecer sus dimensiones y material adecuado (Ibrahim et al., 2015).

Es importante considerar el uso de tanque con deflectores, ya que, al agitar un líquido en un recipiente mediante un agitador posicionado axialmente, existe una tendencia para que se desarrolle un flujo de remolino, independientemente del tipo de impulsor que se utilice (Wang et al., 2012). Al encontrarse el líquido en rotación, se produce un vórtice debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre el líquido que gira (Ayranci et al., 2012). Esto se previene con la instalación de deflectores que son placas planas en disposición vertical, situadas radialmente a lo largo de la longitud del tanque en cuestión. Para el caso específico de suspensión de sólidos, se debe considerar adicionalmente la cantidad, tamaño de partícula y velocidad de sedimentación (Brucato et al., 2010). Los efectos de estas variables para los procesos de agitación determinan la potencia que se requiere para llegar al nivel de suspensión de sólidos deseada. Así, determinar la energía que se necesita entregar a las partículas, para que la velocidad de éstas sea mayor que la velocidad de sedimentación (Mishra y Ein-Mozaffari, 2022). Este documento se encuentra distribuido de la siguiente manera, en Materiales y Métodos se describen las ecuaciones y el procedimiento experimental realizado. En Análisis de Resultados se presentan los valores de propiedades mecánicas y deformación obtenidos mediante simulación. Por último, en Conclusiones, se sintetiza la información presentada en el documento, considerando la perspectiva de los autores.

Materiales Y Métodos

El diseño de los agitadores se realizó considerando los parámetros indicados por (Oldshue, 1983), características del fluido utilizado para la mezcla, descarga y envasado

del producto con agitación, potencia y velocidad de moto-reductores. Además, las investigaciones de (Jin et al., 2022) y (Wojtowicz, 2014) se utilizaron como referencia para la definición de los requerimientos durante el proceso de mezcla, para las condiciones actuales de operación, calidad de mezcla, grado de sólidos en suspensión y tiempo de mezcla. Los agitadores deben garantizar una mezcla homogénea del producto, sobre todo porque éste presenta una elevada viscosidad. Entonces, se debe evitar la formación de grumos y de burbujas de gas durante el proceso de mezcla de aditivos, para que las características del producto final obtenido cumplan con los requerimientos para envase. La cantidad de sólidos utilizada varía de manera considerable las propiedades físicas del fluido, en particular la densidad y la viscosidad. La Tabla 1 describe las propiedades de la pintura en análisis.

Tabla 1.

Requerimiento de Tanques de completado

| Tipo | Características del fluido | Unidad | Lim. Sup | Lim. Inf. |
|-------------|-----------------------------------|---------------|-----------------|------------------|
| | Densidad | [kg/L] | 1200 | 1500 |
| Pintura en | Porcentaje de Sólidos | [kg/L] | 40 | 50 |
| Base agua | Viscosidad final producto | [cP] | 1700 | 5000 |
| | Viscosidad inicial agua | [cP] | 1 | 1 |

Fuente: Pinturas Cóndor (2019)

Parámetros de diseño

A continuación, se detallan los parámetros de diseño para el sistema de agitación, 2000 L de volumen útil del tanque para la mezcla a una velocidad de agitación de 175

rpm. Es importante mencionar que se seleccionó las aspas para flujo axial por su eficiencia en el ablandamiento de líquidos y sólidos en suspensión, además de la estabilidad mecánica del agitador, dependiendo de la viscosidad final que alcance el producto. La Tabla 2 enlista las características de la geometría para el sistema de mezcla.

Tabla 2.

Configuración geométrica del sistema de mezcla.

| Tipo PBT-4-45 ° | Simbología | Unidad | Magnitud |
|-------------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| Ángulo de paletas | α | [°] | 45 |
| Diámetro de las paletas | D | [mm] | 600 |
| Diámetro del Hub | D_s | [mm] | 88,9 |
| Número de paletas total | n_b | [mm] | 6 |
| Altura total de paletas | h | [mm] | 1230 |
| Ancho de las paletas | W | [mm] | 70 |
| Número de Rodetes | r | [adimensional] | 3 |
| Número de bafles | N_b | [adimensional] | 4 |
| Ancho de bafles | B | [mm] | 120 |
| Velocidad | N | [rpm] | 175 |

Fuente: (Paul et al., 2003)

La Figura 1 presenta el sistema de mezcla como esquema, con las dimensiones consideradas, además del modelado utilizado para realizar la simulación. Se visualiza los componentes del eje axial, que fueron definidos para el establecimiento de condiciones de contorno y condiciones iniciales.

Ecuaciones del diseño

Para realizar el diseño del sistema de agitación, se utilizó las ecuaciones presentadas en el Manual Industrial de Mezcla (Paul et al., 2003), que se enlistan en la Tabla 3.

Figura 1.

Esquema y modelado del sistema de mezcla

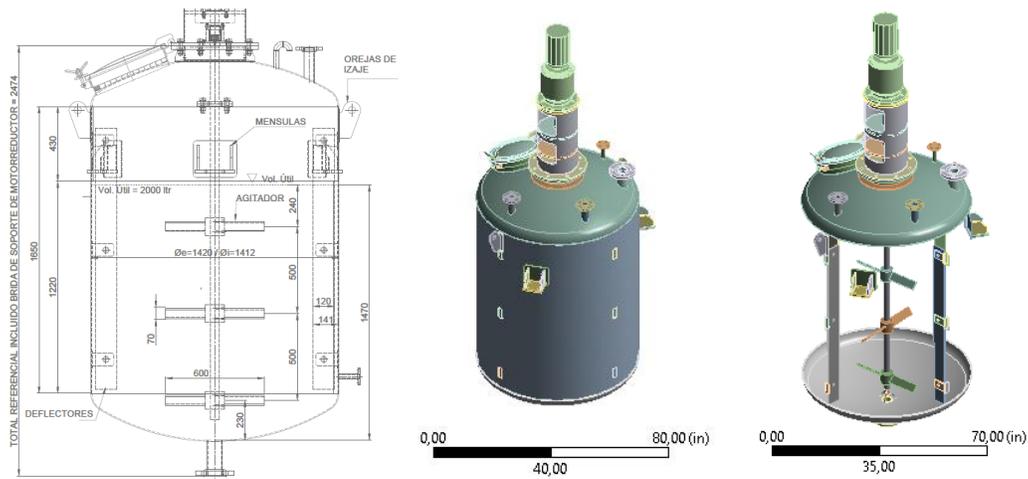


Tabla 3

Ecuaciones utilizadas para el modelado

| Parámetro | Ecuación | Factor | Valor |
|-----------------------|--|------------------------------------|-------|
| Díámetro de agitación | $d^3 = \frac{16}{\pi \cdot \tau} \sqrt{(K_S \cdot T)^2 + \left(\frac{FD}{3}\right)^2}$ | N_p | 1.55 |
| Potencia de agitación | $P = \frac{N_p \cdot \delta \cdot N^3 \cdot D^5}{g_c}$ | Corrección $N_b \cdot \frac{B}{T}$ | 1.09 |
| Caudal | $Q = N_q \cdot N \cdot D^3$ | Corrección $\frac{S}{D}$ | 1.75 |
| Torque | $T = \frac{63025 \cdot P}{N}$ | N_q | 0,5 |

Momento

$$M_{\text{máx}} = \sum_{i=1}^n \frac{19000 P_i \cdot L_i \cdot F_{Hi}}{N \cdot D_i}$$

Máximo

Fuerza

$$F = \frac{T}{D}$$

Esfuerzo

cortante

$$\sigma_s = \frac{16 \cdot \sqrt{(T a_{\text{máx}})^2 + (M_{\text{máx}})^2}}{\pi} \cdot \frac{d_o}{(d_o)^4 - (d_i)^4}$$

Esfuerzo

normal

$$\sigma_t = \frac{16 * (M_{\text{máx}} + \sqrt{(T a_{\text{máx}})^2 + (M_{\text{máx}})^2}}{\pi} \cdot \frac{d_o}{(d_o)^4 - (d_i)^4}$$

Peso de las

aspas

$$W_{bp} = \sqrt{\frac{0.3 \cdot D^3 \cdot \delta}{N}}$$

Espesor de las

aspas

$$t = 615 \left\{ \frac{P \cdot Fl \cdot (D/2) - Dh_{ub}/2}{N \cdot n_B \cdot \sin \alpha \cdot [Fl \cdot (D/2)] \cdot w \cdot \sigma_b} \right\}^{1/2}$$

Fuente: Paul et al. (2003)

Análisis de Resultados

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos, para la potencia de cada rodete sobre el eje de acero AISI 304, además de los valores de cada variable para los diámetros de aspas, de 600 y 650 mm, respectivamente.

Tabla 4.

Resultados de potencia en cada rodete

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------|--------|-------|
| RODETES | | |

| | | | |
|------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Rodete 1 | [HP] | 8.5700 | |
| Rodete 2 | [HP] | 6.4275 | |
| Rodete 3 | [HP] | 6.4275 | |
| | | ASPA 600 mm | ASPA 650 mm |
| d | [in] | 2 | 2 |
| P | [HP] | 15 | 22.38 |
| Q | [L/h] | 1134 | 1441.78 |
| T | [lb·in] | 5402.15 | 8060.53 |
| M_{max} | [lb·in] | 4753.34 | 6547.62 |
| σ_s | [lb·in ²] | 4580.89 | 6611.14 |
| σ_t | [lb·in ²] | 7607.03 | 10779.48 |
| W_{b1} | [lb] | 13.91 | 22.17 |
| W_{b2} | [lb] | 12.05 | 16.60 |
| W_{b3} | [lb] | 12.05 | 16.60 |
| t | [in] | 0.39 | 0.48 |

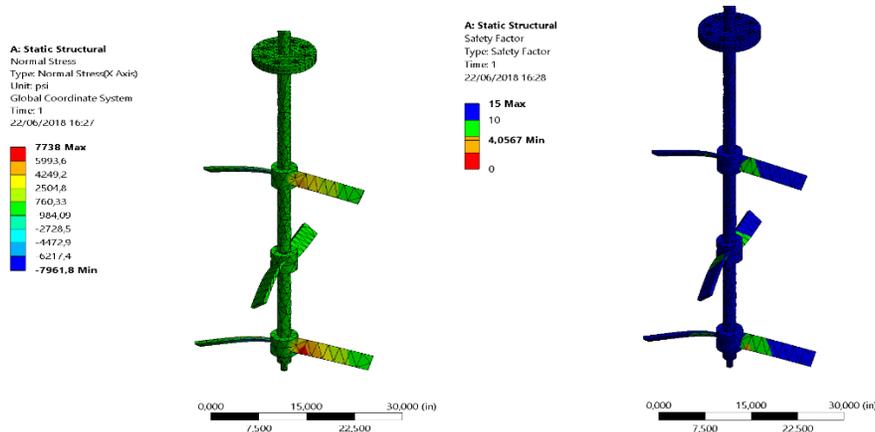
Para realizar una comparación de los resultados de los cálculos analíticos, se utilizó ANSYS como programa de simulación, considerando las investigaciones realizadas en agitadores presentadas por Hosseini et al. (2010), Chambergo et al. (2017) y Lu et al. (2023)

Análisis 1

Para un eje sólido de acero AISI 304 con diámetro de 50 mm y longitud de espas de 600 mm, se obtuvo que el esfuerzo normal resultante fue de 7738 psi. De esta manera, se valida el valor teórico calculado teniendo un factor de seguridad de 4 como mínimo. La Figura 2 muestra estos resultados obtenidos en el análisis numérico, indicando una larga vida de operación del sistema de agitación.

Figura 2.

Análisis de esfuerzo normal y factor de seguridad del eje



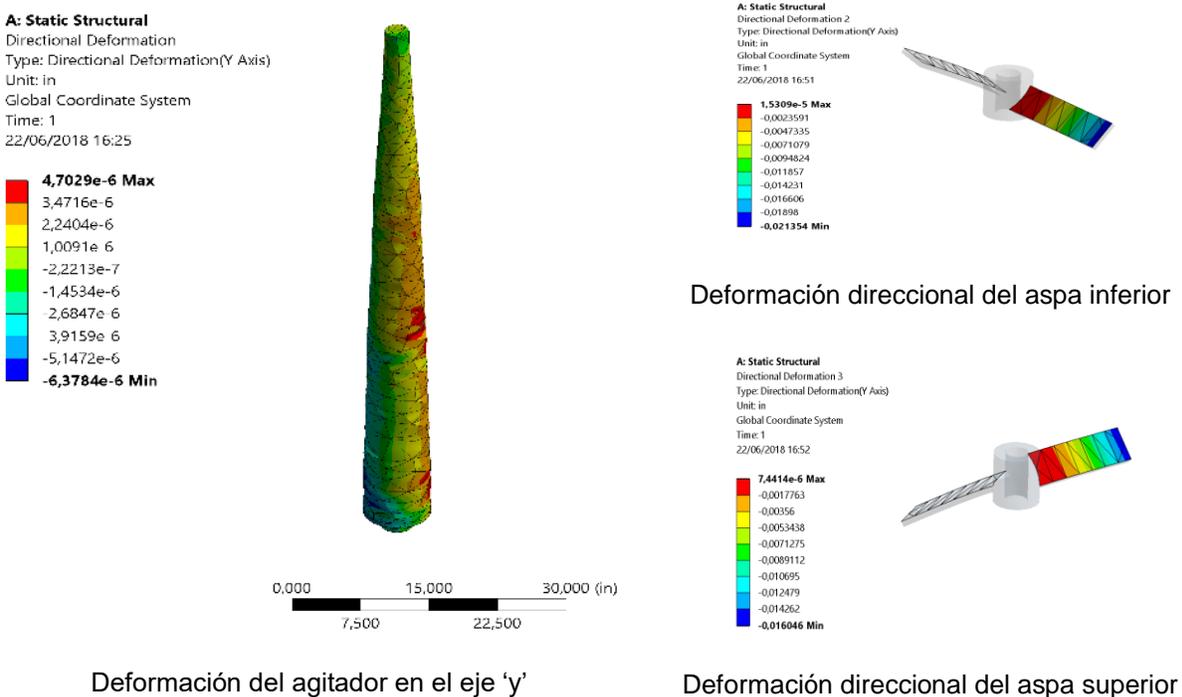
La Figura 3 presenta los resultados de deformación del eje entre sus apoyos. Es importante señalar que esta deformación es mínima lo que indica que el esfuerzo de flexión no existiría. En el diseño de un agitador es importante establecer el análisis del efecto que tiene la aspas en el agitador, validando los resultados con el análisis de investigación desarrollada por Devarajulu y Loganathan (2016). Se verificó la deformación generada por efectos de mezcla de producto que se ejerce en las aspas del rodete. Se ha obtenido un valor de deformación aceptable, inferior a 1 mm, dando validez al factor de seguridad (Magelli et al., 2013).

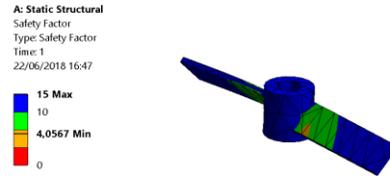
Análisis 2

A continuación, se presentan los resultados de simulación obtenidos con la modelación para el eje solido AISI 304, con diámetro de 50 mm y longitud de aspas de 650 mm. La Figura 4 muestra los resultados de esfuerzo normal resultante y deformación de las aspas, con valores de 11000 psi y 1.22×10^{-5} in, respectivamente. De esta manera, se afirma que la validez del procedimiento, entre el cálculo analítico y el análisis numérico utilizando software. Es importante señalar que el factor de seguridad para este caso fue de 1.6, menor que al utilizar una longitud de aspas de 600mm. Por lo que se tendría una menor vida de operación del sistema de agitación.

Figura 3.

Análisis de deformación y factor de seguridad del aspa diámetro 600 mm.

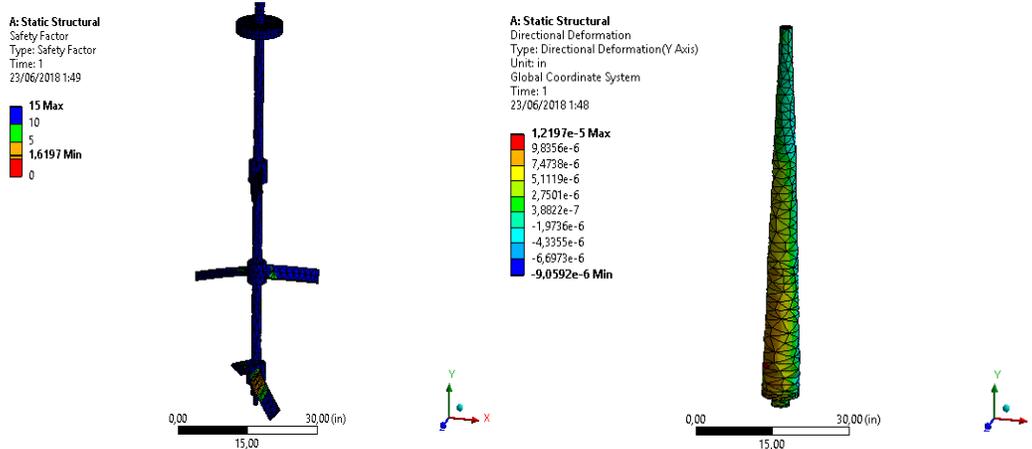




Factor de seguridad

Figura 4.

Análisis de factor de seguridad y deformación en el agitador para aspas de 650 mm



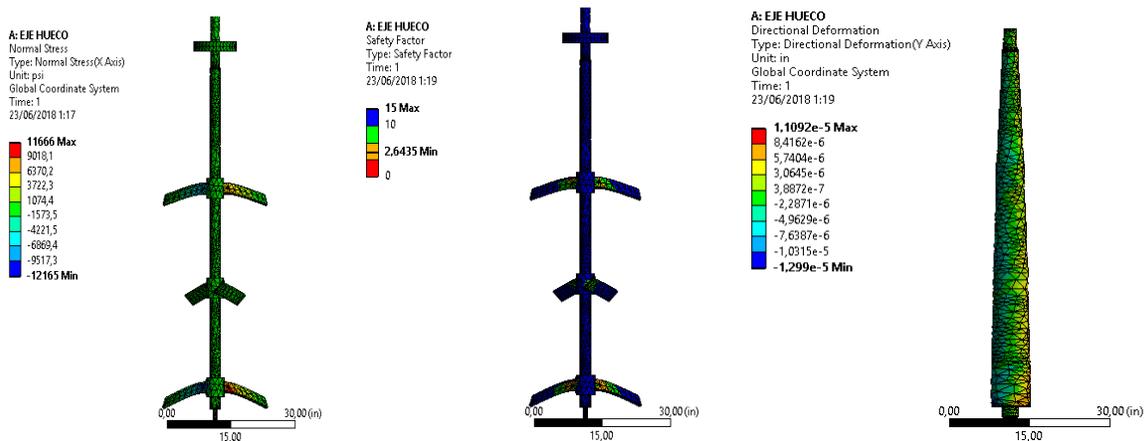
Análisis 3

Esta investigación se complementó realizando un análisis para economizar costos de fabricación utilizando menos material con un eje hueco de acero AISI 304 “tubo de 2in cédula 40” con un diámetro de aspas de 600 mm. Los resultados obtenidos indican que el esfuerzo normal y el factor de seguridad mínimo fueron de 11666 psi y 2,64, respectivamente. Con la deformación, se mantiene la tendencia, el valor obtenido entre el eje hueco y sus apoyos es mínima, es decir, el esfuerzo por flexión es despreciable.

La Figura 5 presenta estos valores obtenidos mediante simulación, validando el valor teórico calculado e indicando que el sistema de mezcla presenta una adecuada operación con esta geometría para el eje.

Figura 5.

Análisis de esfuerzo normal, factor de seguridad y deformación para el eje hueco.



Conclusiones

Se realizó la validación del diseño de un sistema de mezcla para pinturas mediante análisis numérico. Se determinó que, al aumentar la longitud de las aspas de 600 a 650 mm, se disminuyen los tiempos de mezcla del fluido, pero se requiere que el motor

entregue mayor potencia al eje, debido al incremento de esfuerzos, torque y caudal. La reducción de tiempo obtenida fue de 22.8 minutos para mezclar un volumen de 2000 L. También es necesario considerar la disposición de las paletas, que las investigaciones previas recomiendan un ángulo de 45° y en forma ascendente del fluido. De esta manera, se obtenga una mejor miscibilidad del compuesto debido a la formación de un flujo axial, más eficiente para fluidos con sólidos en suspensión. La disposición de paletas hacia abajo generan un flujo descendente para obtener menores potencias de entrega del motor, conllevando a un ahorro económico.

Otra alternativa para reducir costos en el diseño es variar el eje del agitador por un eje hueco de acero inoxidable AISI 304, tubo 2in cédula 40. El factor de seguridad fue de 2.64, siendo menor, pero el valor cumple con las condiciones de diseño. Por otra parte, se analizó la longitud de las aspas y a 600 mm en el eje hueco de acero inoxidable, se evidencia el aumento del esfuerzo normal y cortante, pero se mantiene los valores de potencia, caudal y torque. El esfuerzo máximo en el eje y aspas fue 760 y 7738 psi, respectivamente, obteniendo similitud respecto a los valores calculados analíticamente. lo que se asemeja a los datos que se obtienen de manera analítica. Para el eje de acero AISI 304, el factor de seguridad alcanzó un valor de 4.06, bajo las mismas condiciones y longitud de aspas de 600 mm. Es importante mencionar que, con un eje hueco, el factor de seguridad se reduce y los esfuerzos aumenta, lo que conlleva a una menor vida útil del sistema. Para investigaciones futuras, se recomienda estudiar la vida útil de cada sistema, con un análisis costo-beneficio, para establecer si el ahorro económico en el diseño y construcción es respaldado por las horas de uso que se obtenga.

Referencias Bibliográfica

- Ayranci, I., Machado, M., Madej, A., Derksen, J., Nobes, D., y Kresta, S. (2012). Effect of geometry on the mechanisms for off-bottom solids suspension in a stirred tank. *Chemical Engineering Science*, 79(10), 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.05.028>
- Brucato, A., Cipollina, A., Micale, G., Scargiali, F., y Tamburini, A. (2010). Particle suspension in top-covered unbaffled tanks. *Chemical Engineering Science*, 65(10), 3001-3008. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.01.026>
- Chambergo, J., Valverde, Q., Pachas, A., y Yépez, H. (2017). Estudio del Comportamiento Fluido-Dinámico de un Agitador a Escala Reducida Mediante Simulación Numérica. *Información tecnológica*, 28(3), 37-46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300005>
- Devarajulu, C., y Loganathan, M. (2016). Effect of Impeller Clearance and Liquid Level on Critical Impeller Speed in an Agitated Vessel using Different Axial and Radial Impellers. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(6), 2753-2761. <https://doi.org/10.29252/jafm.09.06.24824>
- Grenville, R., Mak, A., y Brown, D. (2015). Suspension of solid particles in vessels agitated by axial flow impellers. *Chemical Engineering Research and Design*, 100, 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.026>
- Hosseini, S., Patel, D., Ein-Mozaffari, F., y Mehrvar, M. (2010). Study of Solid-Liquid Mixing in Agitated Tanks through Computational Fluid Dynamics Modeling. *I&EC Research*, 49(9), 4426-4435. <https://doi.org/10.1021/ie901130z>
- Ibrahim, S., Wong, S., Baker, I., Zamzam, Z., Sato, M., y Kato, Y. (2015). Influence of geometry and slurry properties on fine particles suspension at high loadings in a stirred vessel. *Chemical Engineering Research and Design*, 94, 324-336. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.08.008>
- Jhamb, S., Enekvist, M., Liang, X., Zhang, X., Dam-Johansen, K., y Kontogeorgis, G. (2020). A review of computer-aided design of paints and coatings. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 27, 107-120. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.12.005>
- Jin, X., Wang, S., y Shen, Y. (2022). DEM study of the effect of impeller design on mixing performance in a U-shape ribbon mixer. *Advanced Powder Technology*, 33(1), 103334. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.10.026>
- Kabra, A., Nema, A., Karvinkoppa, M., Nema, A., y Thorat, S. (2021). Computational fluid dynamics used by mixing vessels for predicting hydrodynamic behaviour of mixture: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 47(10), 2305-2309. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.292>
- Lu, T., Liu, F., Gao, X., Yue, Y., Shen, H., y Zhao, H. (2023). Numerical simulation of solid-liquid suspension in a slurry electrolysis stirred tank. *Chemical Engineering Research and Design*, 189, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.11.046>
- Magelli, F., Mantante, G., Pinelli, D., y Paglianti, A. (2013). Mixing time in high aspect ratio vessels stirred with multiple impellers. *Chemical Engineering Science*, 101(20), 712-720. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.022>
- Mishra, P., y Ein-Mozaffari, F. (2022). Using tomography to examine the distribution of poly-disperse solid particles in Newtonian and non-Newtonian fluids with the coaxial impellers. *Chemical Engineering Research and Design*, 178, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.032>

- Oldshue, J. (1983). *Fluid Mixing Technology*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Paul, E., Atiemo-Obeng, V., y Kresta, S. (2003). *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471451452>
- Pinturas Cóndor. (2019). *Productos Línea Arquitectónica*. Retrieved 24 de Noviembre de 2022, from <https://www.pinturascondor.com/wp-content/uploads/2019/08/linea-arquitectonica.pdf>
- Trans IChemE. (2001). The Publish or Teach Dilemma in Chemical Engineering. *Institution of Chemical Engineers*, 79(Part A), 1-2.
- Wang, S., Boger, D., y Wu, J. (2012). Energy efficient solids suspension in an agitated vessel–water slurry. *Chemical Engineering Science*, 74(28), 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.02.035>
- Wojtowicz, R. (2014). Choice of an Optimal Agitated Vessel for the Drawdown of Floating Solids. *I&EC Research*, 53(36), 13989-14001. <https://doi.org/10.1021/ie500604q>
-