

Artículo Original

***EL SISTEMA DE AGITACIÓN EN EQUIPOS EMPLEADOS
EN LA INDUSTRIA QUÍMICA***

***THE AGITATION SYSTEM IN EQUIPMENT USED
IN THE CHEMICAL INDUSTRY***

Eusebio Vladimir Ibarra Hernández^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8119-8431>
Marlene Dupin Fonseca¹ <https://orcid.org/0000-0002-8366-7489>
Belkis F. Guerra Valdez² <https://orcid.org/0000-0002-9929-7064>
Blanca R. Cruz Cal¹ <https://orcid.org/0000-0001-6013-4500>
Adriel Gallardo García³ <https://orcid.org/0009-0001-1782-6517>

¹ Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA). Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Sociedad Mercantil Parque Científico Tecnológico de Villa Clara, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Noviembre 26, 2024; Revisado: Diciembre 12, 2024; Aceptado: Diciembre 22, 2024

RESUMEN

Introducción:

La industria química exige de equipos productivos y eficientes lo que se logra con la introducción de una energía mecánica adicional a fin de mejorar significativamente la eficiencia de los procesos en ellos realizados. Por esta razón en los equipos químicos se destacan los diseños que incluyen equipos con sistemas de agitación que poseen elevadas características técnico-económicas.

Objetivo:

Brindar los conocimientos necesarios que permitan al personal técnico encargado tanto la selección como el diseño de los elementos y partes componentes del sistema de agitación de los equipos químicos.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Eusebio V. Ibarra, Email: eusebioih@uclv.edu.cu



Materiales y Métodos:

El trabajo se ha realizado teniendo en cuenta los requerimientos de las normas internacionales, así como de la bibliografía técnica consultada. Ofrece la información técnica necesaria que permite el diseño y selección de los elementos componentes del sistema de agitación en el menor tiempo posible y de forma segura.

Resultados y Discusión:

En el artículo se brinda una secuencia de pasos que permiten tanto la selección como el diseño del mismo de manera sencilla, segura y en el menor tiempo posible. La flexibilidad de la secuencia de pasos descrita radica en la posibilidad de aplicar cualquiera de los métodos de cálculo tradicionales en la solución de los mismos.

Conclusiones:

Pone en las manos de los diseñadores de equipos químicos una herramienta que brinda una secuencia de pasos lógicos, así como las recomendaciones pertinentes para el diseño seguro del sistema de agitación de los equipos químicos.

Palabras clave: diseño de equipos químicos; equipos químicos; sistema de agitación.

ABSTRACT

Introduction:

The chemical industry requires productive and efficient equipment, which is achieved by introducing additional mechanical energy in order to significantly improve the efficiency of the processes carried out. For this reason, designs that include equipment with agitation systems that have high technical and economic characteristics stand out in chemical equipment.

Objective:

To provide the necessary knowledge to enable the technical staff in charge of both the selection and the design of the elements and component parts of the agitation system of chemical equipment.

Materials and Methods:

The work has been carried out taking into account the requirements of international standards, as well as the technical bibliography consulted. It offers the necessary technical information that allows the design and selection of the component elements of the agitation system in the shortest possible time and in a safe way.

Results and Discussion:

The article provides a sequence of steps that allow both the selection and the design of the same in a simple, safe manner and in the shortest possible time. The flexibility of the described sequence of steps lies in the possibility of applying any of the traditional calculation methods in the solution of the same.

Conclusions:

Provides chemical equipment designers with a tool that offers a sequence of logical steps and relevant recommendations for the safe design of the chemical equipment agitation system.

Keywords: chemical equipment design; chemical equipment; agitation system.

1. INTRODUCCIÓN

Para satisfacer una de las exigencias fundamentales de la industria de procesos moderna, el diseño y fabricación de equipos cada vez más productivos y eficientes, se necesita la introducción en el proceso de una energía mecánica adicional a fin de crear grandes campos de fuerzas centrífugas, agitar de forma turbulenta los componentes en reacción intensificando significativamente los procesos de intercambio de calor y masa, aumentar las superficies de contacto de fases, (Foukrach y col., 2020). Esta energía adicional se consigue concibiendo equipos en los que se incluyan potentes sistemas de agitación.

El sistema de agitación es el responsable de lograr, con los mecanismos adecuados, la transmisión de la potencia desde la fuente de energía (motor o moto- variador) hasta el dispositivo de trabajo del equipo químico que necesite ser agitado, los diferentes tipos de agitadores, (Foukrach y col., 2020). Este sistema es considerado, por varios autores, como el sistema principal de numerosos procesos de fabricación (Benyamina y col., 2017). Los sistemas de agitación utilizados resultan diversos y dependerán en lo fundamental de los requerimientos de la operación del proceso a que se dirige y de las características que se deseen dar al mismo. Se distinguen dos tipos fundamentales en función del modo de sujeción del árbol de agitación; aquellos donde el árbol está sujeto por uno de sus extremos, árbol en voladizo, Figura 1, y en los que el árbol se sujeta por sus dos extremos, árbol de un tramo ASME (2010) y (Dickey y Fasano, 2004).

Los ingenieros químicos tienen muy en cuenta los requerimientos del proceso para realizar el diseño tecnológico del sistema de agitación del equipo químico (Foukrach y col., 2020); los ingenieros mecánicos toman del diseño tecnológico los datos de partida para llevar a cabo el diseño mecánico y fabricación o la selección de los elementos estándar que componen estos sistemas (Sumit y col., 2016). Los ingenieros mecánicos y los químicos deben trabajar de común acuerdo con el fin de garantizar tanto la resistencia mecánica como la finalidad y seguridad del proceso de agitación (Dickey y Fasano, 2004).

El hecho de que el diseño y selección de los sistemas de agitación deba realizarse tanto por ingenieros químicos como mecánicos, hace que este importante tema esté en “terreno de nadie” y sólo se encuentren en la literatura especializada procedimientos aislados, que responden ya sea al diseño tecnológico o al mecánico, que no brindan una guía metodológica de cómo debe realizarse dicho diseño (Guma y col., 2019). Lo anteriormente expuesto conlleva a que el objetivo propuesto para este trabajo consista en brindar los conocimientos necesarios que permitan al personal técnico encargado tanto la selección como el diseño de los elementos y partes componentes del sistema de agitación de los equipos químicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los autores de este trabajo recomiendan que el diseño y fabricación o la selección de los elementos estándar del sistema de agitación de los equipos químicos con tales requerimientos se deba realizar siguiendo una secuencia de pasos lógicos. La misma se reduce a dos pasos fundamentales:

- La recopilación de la información relacionada con los diferentes métodos de diseño y selección del equipo estándar del sistema de agitación de los equipos químicos.
- El ordenamiento y desarrollo de estos métodos y procedimientos de manera sencilla y flexible.

2.1. Sistema de agitación del equipo químico agitado

En la Figura 1 se muestra un sistema de agitación típico con árbol en voladizo (Sumit y col., 2016).

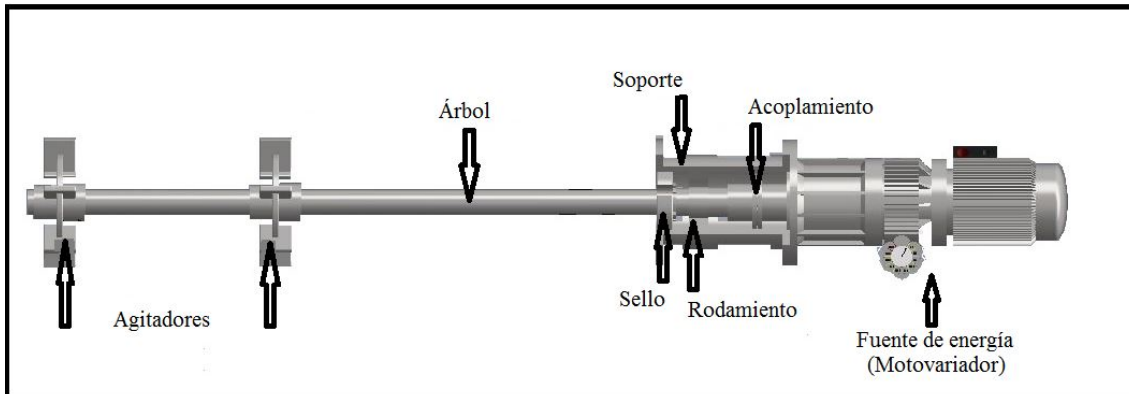


Figura 1. Elementos que componen el sistema de agitación, con árbol en voladizo

El diseño y fabricación como la selección de los elementos estándar de estos sistemas, se debe llevar a cabo por equipos de trabajo, y si bien su comienzo está centrado en las características del proceso tecnológico, el diseño mecánico resultará esencial para que el proceso se pueda desarrollar exitosamente, el conocimiento de los requerimientos mecánicos del sistema de agitación ayudará al ingeniero a guiar su trabajo hacia un diseño que unirá ambos criterios, los de proceso y los mecánicos (Dickey y Fasano, 2004).

El sistema de agitación mostrado en la Figura 1, está formado por varios componentes individuales, unos se seleccionan (elementos estándar) mientras que otros se diseñan y fabrican. Dentro de los componentes estándar a seleccionar se encuentran; la fuente de energía, el acoplamiento, rodamientos y sellos. Como elementos a diseñar y fabricar se tienen; soporte, acoplamiento, árbol y los agitadores. El acoplamiento es un elemento que puede ser seleccionado o diseñado y fabricado.

2.2. Aspectos a tener en cuenta para la selección, el diseño y fabricación del sistema de agitación

Como ya se ha expresado, para la selección de los elementos estándar o el diseño y fabricación de estos, se toma como base su diseño tecnológico. La selección o el diseño de sus componentes se realiza siguiendo los códigos, normas y estándares internacionales, ASME (2010), los cuales coinciden en que para lograr un correcto diseño mecánico del sistema de agitación se debe partir del diseño de sus partes componentes, resultando estas las siguientes:

- **Fuente de energía:** suministra la potencia y velocidad al sistema de agitación utilizándose diferentes tipos de motores en dependencia de los requerimientos

del proceso, pero sin duda alguna el motor eléctrico resulta, por varios motivos, el de mayor uso para estos tipos de aplicaciones.

- **Motores eléctricos, reductores y variadores:** se pueden clasificar en función de: su tamaño, potencia, tipo de carcasa e incluso por su aplicación. Los catálogos, por donde se seleccionan estos equipos, brindan una amplia información tanto técnica como geométrica. Su combinación con otros dispositivos mecánicos, reductores (moto-reductores) o variadores (moto-variadores), amplía su rango de aplicación a toda clase de máquinas y equipos de uso industrial, que necesitan reducir su velocidad en una forma segura y eficiente, estos se seleccionan al igual que los motores de catálogos.
 - **Acoplamientos:** aseguran la unión entre la fuente de energía y el árbol, garantizando además de una correcta alineación entre ambos, la rigidez de la unión, debe transmitir además la potencia y velocidad al árbol. Se pueden clasificar en acoplamientos rígidos y flexibles, resultando los rígidos los de mayor uso en los equipos químicos agitados. Dentro de estos los de platillos son los más utilizados. Para destinos muy específicos se utilizan los acoplamientos por sujeción cónica, Tulio (2014). Estos dispositivos pueden ser diseñados o seleccionados de los catálogos existentes.
 - **Rodamientos:** estos solo encuentran uso en los sistemas complejos y sobre estos se tratará en próximos trabajos (Budynas y Keith, 2008). Los rodamientos se calculan siguiendo las recomendaciones de la bibliografía especializada y de los propios catálogos donde se seleccionan.
 - **Sellos:** deben garantizar el hermético sellado de la zona por donde el árbol entra al equipo por lo que se acoplan de una u otra forma al árbol de agitación. Se utilizan de diferentes tipos entre los que destacan; los prensaestopas, mecánicos, hidráulicos magnéticos y los de borde de retén. Su uso dependerá de las exigencias del proceso. Estos elementos, en lo fundamental, se seleccionan de sus respectivos catálogos.
 - **Soporte:** su función fundamental es la de servir de apoyo a la fuente de energía, aunque en sistemas de agitación complejos se utiliza además como la base del rodamiento. Este puede ir o no fijo a la tapa del equipo y en la generalidad de los casos se diseña tomando en consideración los requerimientos del proceso.
 - **Árbol:** según (Dickey y Fasano, 2004) y (Sumit y col., 2016), es el elemento de mayor responsabilidad del sistema de agitación y de su correcto diseño dependerá el tiempo de servicio del sistema en general. Funcionan normalmente acoplados directamente al eje de salida de la fuente de energía, se clasifican en varios tipos en función de las características del proceso a que se destina. Su chequeo exige el cumplimiento simultáneo de las condiciones de resistencia y rigidez y como criterio más importante la resistencia a la vibración (velocidad crítica) (Sumit y col., 2016), (Guma y col., 2019) y ASME (2010).
 - **Agitadores:** existen diferentes tipos de agitadores, (Foukrach y col., 2020) y (Grenville y col., 2017), los que están relacionados con los modelos de flujo fundamentales. El tipo de agitador es un dato que se recibe del diseño tecnológico del equipo, mientras que desde el punto de vista de diseño mecánico
-

la tarea consiste en calcular el espesor tanto del cubo como de las palas y chequear las uniones soldadas, por chavetas o atornilladas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en consideración los elementos anteriormente analizados se desarrolló una secuencia de pasos mostrados en la Figura 2, que servirá de guía al personal técnico encargado del diseño y que basa su flexibilidad en la posibilidad del uso de cualquiera de los métodos de diseño y selección tradicionales en la solución de los pasos que la conforman Pérez (2016). A continuación, se detallan los pasos que la conforman:

3.1. Consideraciones generales sobre el diseño del sistema de agitación, paso 1

En este primer paso las partes involucradas (ingenieros mecánicos, químicos y otros) de mutuo acuerdo, definirán las consideraciones generales del sistema de agitación para lo cual se deben tener en cuenta los datos del diseño tecnológico (características y destino del equipo, materias primas que intervendrán en la producción y sus características (si son tóxicas o no, adhesividad).

3.2 Selección de la fuente de energía, paso 2

Para la selección de la fuente de energía (motor, moto-reductor o moto-variador) se tomarán del punto anterior el valor de la potencia y la velocidad, con estos valores se va a los catálogos especializados.

Es importante estudiar las recomendaciones que cada fabricante brinda sobre sus equipos con respecto a la instalación, manejo y mantenimiento.

3.3 Cálculo y diseño del árbol de agitación, paso 3

Para el diseño del árbol del sistema de agitación en la literatura especializada, se pueden encontrar diferentes métodos que varían en función del autor, pero que brindan resultados similares, en este paso no se define un método específico para el diseño del árbol, pero sí se recomienda, que se comience por determinar un diámetro tentativo del árbol partiendo del criterio de resistencia mecánica y posteriormente chequear este diámetro a velocidad crítica. A modo de ejemplo, se puede comenzar calculando el diámetro del árbol por uno de los métodos que plantea la bibliografía (Guma y col., 2019), tomándose como diámetro del árbol el mayor de los resultados que se obtenga de las ecuaciones 1 y 2.

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{16\sqrt{T_s^2 + M^2}}{\pi \tau_{m\acute{a}x}}} \quad (1)$$

$$d_t = \sqrt[3]{\frac{32\left(M + \sqrt{T_s^2 + M^2}\right)}{\sigma_{m\acute{a}x}}} \quad (2)$$

donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Tensión admisible de corte del material del árbol (Mpa)

$\sigma_{\text{máx}}$ = Tensión admisible normal del material del árbol (MPa),

T_s = Torque máximo sobre el árbol (MNm),

M = Momento flector máximo sobre el árbol (MNm).

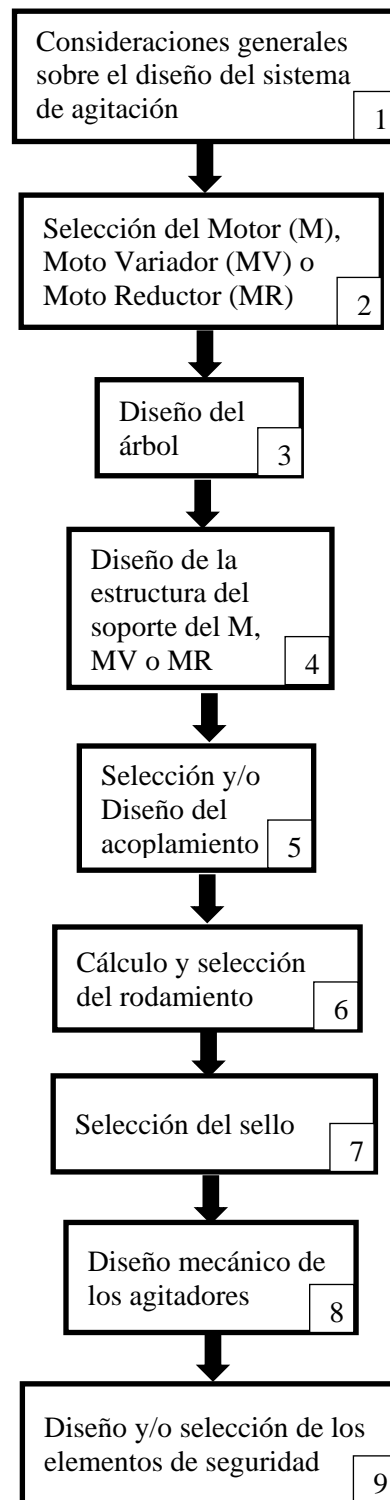


Figura 2. Secuencia de pasos para el diseño del sistema de agitación

Una vez conocido el diámetro del árbol se realizan el chequeo a velocidad crítica (Sumit y col., 2016).

3.4 Diseño de la estructura soporte, paso 4

Tomando como base los datos obtenidos del punto 1 se definirá el tipo de soporte a utilizar. Una vez diseñado, se le realizan los chequeos de resistencia mecánica y estabilidad pertinentes. Se recomienda prestar especial atención en la fabricación de aquellas estructuras soportes en las que se necesite instalar un rodamiento adicional.

3.5. Selección y/o diseño del acoplamiento, paso 5

Siguiendo los requerimientos tecnológicos y los datos del primer punto de esta metodología se selecciona el tipo de acoplamiento a utilizar de los catálogos pertinentes o se diseñan y fabrican.

3.6 Cálculo y selección de los rodamientos, paso 6

Los rodamientos, como ya se ha planteado, encuentran mayormente uso en los sistemas complejos, los que no son tratados en este trabajo (Budynas y Keith, 2008). Estos, de ser necesarios, se colocan en la estructura soporte de la fuente de energía. Los rodamientos se calculan por los métodos ya conocidos y se eligen de los catálogos.

3.7 Selección del tipo de sello, paso 7

Conocidos los parámetros del proceso y sus requerimientos fundamentales, se elige el tipo de sello adecuado y se selecciona de los catálogos pertinentes. Los autores de este trabajo recomiendan para el equipamiento de la industria química el uso de sellos mecánicos.

3.8 Diseño mecánico de los agitadores, paso 8

El diseño mecánico de los agitadores debe realizarse según lo recomendado en el epígrafe 2.2 de este trabajo, agitadores.

3.9 Diseño de los elementos de seguridad, paso 9

Estos elementos están comprendidos por todos aquellos dispositivos y mecanismos cuya principal finalidad sea la de garantizar el funcionamiento seguro del sistema. Se utilizarán presillas de fijación, tornillos de seguridad etc. Los que garantizarán la segura fijación de los elementos principales del sistema.

4. CONCLUSIONES

El trabajo propuesto para el diseño y selección del sistema de agitación de los equipos químicos:

1. Brinda los conocimientos generales y específicos que requiere el personal técnico para diseño de los elementos y partes componentes del sistema de agitación de los equipos químicos.
 2. Permite aplicar diferentes métodos de diseño, en cualquiera de los pasos descritos, así como su constante actualización en función de los últimos adelantos reportados en la bibliografía.
 3. Posibilita que el diseño y selección del sistema de agitación sea realizado de manera sencilla, en el menor tiempo posible y garantizando la máxima seguridad
-

de explotación del mismo.

- Facilita el trabajo de los diseñadores de equipos químicos, al poner en sus manos una herramienta que brinda una secuencia de pasos lógicos, así como las recomendaciones pertinentes para el diseño del sistema de agitación.

REFERENCIAS

- Benyamina, L., Bouanini, M., & Abdeldjebar, R., Effect of baffles geometry on hydrodynamics in a mechanically agitated system., *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, No. 19, 2017, pp. 9159-9166. https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n19_153.pdf
- Budynas, G., & Keith, J., *Mechanical Engineering design.*, McGraw-Hill Primis, 2008, pp. 350-398.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code., Section VIII- Division 1, Part UG, UG-27, July 1, 2010, pp. 19-20. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-viii-1-bpvc-section-viii-rules-construction-pressure-vessels-division-1>
- Dickey, D.S., & Fasano, J.B., *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice.*, John Wiley & Sons, Inc., 2004, pp. 1247-1332.
- Foukrach, M., Bouzit, M., Ameer, H., & Kamla, Y., Effect of agitators types on the hydrodynamic flow in an agitated tank., *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 33, No. 37, 2020, pp. 2-18. <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00454-2>
- Grenville, R.K., Giacomelli, J.J., Padrón, G., & Brown, D.A.R., Impeller performance in stirred tanks., *Chemical Engineering*, Vol. 124, No.8, august 2017, pp. 42-51. <https://www.nxtbook.com/accessintelligence/ChemicalEngineering/chemical-engineering-august-2017/index.php#/p/42>
- Guma, T., Agbata, A., & Akor, T., An overview of basic concepts for advancements in designs of mechanical agitators for paint mixing., *Saudi Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 1, January 2019, pp. 5-15. <http://dx.doi.org/10.21276/sjeat.2019.4.1.2>
- Pérez, C.M., Metodología de cálculo y selección del sistema de agitación de un reactor de la industria química., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico, especialidad Ingeniería Mecánica en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba, 2016. <https://dspace.uclv.edu.cu/items/eeb6cddf-2577-4b4d-8f53-0aa5c7581151>
- Sumit, R., Desai., S.Y., & Gajjak., K., Redesign and structural analysis of agitator shaft for reactor pressure vessel., *International Journal of Current Engineering and Technology.*, No. Special 4, March 2016, pp. 268-273. <http://inpressco.com/redesign-and-structural-analysis-of-agitator-shaft-for-reactor-pressure-vessel/>
- Tulio, P.M., Proyecto de elementos de acoplamiento., Capítulo 8, División 2, Descripción y selección de Acoplamientos, UTN-FRBB, Cátedra: Elementos de máquinas, 2014, pp. 1-6.
-

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Eusebio Vladimir Ibarra Hernández. Conceptualización, investigación, análisis formal, redacción - primera redacción.
 - M.Sc. Marlene Dupin Fonseca. Investigación, análisis formal, redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. Belkis F. Guerra Valdez. Investigación, análisis formal, redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. Blanca R. Cruz Cal. Investigación, análisis formal, redacción - revisión y edición.
 - M.Sc. Adriel Gallardo García. Investigación, análisis formal, redacción - revisión y edición.
-