

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química

Metodología para el Diseño y Cálculo de los agitadores - mezcladores de fluidos.



Autora: Beatriz Alina Ortiz

Sainz

Tutores:

Dr. C. Rafael Antonio

Goytisol Espinosa

Ing. Raúl Alfonso Rodríguez

Junio 2014

“Año 56 de la Revolución

DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Firma del Tutor
Nombre y Apellidos. Firma

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

Pensamiento.

*¿Qué es la verdad? Pregunta difícil, pero la he
resuelto en lo que a mi concierne diciendo que es lo
que te dice tu voz interior.*

Mahatma Gandhi

Dedicatoria.

Esta oportunidad tan grande que me ha dado la vida quiero dedicársela A:

Mi mamítin por cuidarme siempre y estar en cada momento de mi vida guiándome por el buen camino.

Mi padre por estar siempre conmigo, por ayudarme en todo momento y darme buenos consejos.

Mis abuelos en especial a mi abuelo Orlando que aunque lo haya perdido, siempre ha estado en mi corazón y ha sido mi guía en todo.

Agradecimientos.

Quiero agradecer por todo el apoyo dado en todo este tiempo A:

El Señor Jesús por darme la oportunidad de ser alguien en la vida.

Mis padres por darme la vida, por ser tan especiales y estar en todo momento a mi lado apoyándome en cada paso dado.

Mi tutor Rafael Antonio Goytisoló Espinosa por su incondicional ayuda en la realización de la tesis.

Manuel Arturo Solís León que lo quiero como un padre gracias por haberme ayudado tanto en todo momento.

Mi abuela Hídalga que siempre ha estado ayudándome en lo que ha podido y en especial a mi abuelo que aunque no esté presente físicamente siempre me aconsejó para que siguiera adelante y me convirtiera en una mujer de bien.

Mi tío Carlos Sainz Cruz que aunque está lejos, siempre se ha preocupado que siga adelante preparándome para la vida.

Mis grandes amistades Mailen, Rosalí, Elizabeth, Yesenia, Beatriz, Aymara y Delvis que me han ayudado en estos 5 años y me han soportado tanto.

En fin a la vida que a pesar de que veces nos da golpes muy duros y nos quita a personas muy importantes en nuestras vidas supe demostrarle que si se puede.

Resumen.

Resumen

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, agitación y mezcla no son sinónimas. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero, en cambio, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, tal como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido en forma de polvo. En el trabajo se abordan los componentes de los agitadores-mezcladores, así como las características de cada tipo de impulsores que existen en la industria y las particularidades fundamentales de su funcionamiento. Se describe en distintas bibliografías la metodología de cálculo de los agitadores-mezcladores y la operación de mezclado en particular, además de un análisis experimental para determinar el punto óptimo de máxima eficiencia, como es el de obtener el número de revoluciones adecuado para el proceso de agitación y su correspondiente consumo de energía. La metodología descrita y aplicada en el trabajo fue combinada con las metodologías de cálculo descritas en el Capítulo II, necesarias para el diseño del agitador requerido por la empresa LABIOFAM.

Índice.

Índice

Introducción	1
Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos	6
1.1 Conceptos de agitación y mezclado.	6
1.2 Objetivos de la agitación y del mezclado.	6
1.3 Partes componentes de un agitador o mezclador.	7
1.4 Clasificación de los agitadores.	11
1.5 Problemas que se presentan en el proceso de agitado-mezclado.	15
1.6 Conclusiones Parciales del Capítulo I.	17
Capítulo II: Metodología de cálculo de Agitadores-Mezcladores	19
2.1 Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006).....	19
2.2 Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores. (Fuente: McCabe et. al.; 1998).....	30
2.3 Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores. (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).	50
2.4 Propuesta de variante de diseño para Agitadores de Fluidos Industriales en tanques de recirculación (Ing. Roger J. Medina Olivo 1, Dr. C. Rafael Pérez Pupo).	63
2.5 Conclusiones Parciales del Capítulo II.....	66
Capítulo III: Metodología de cálculo de los Agitadores – Mezcladores.	68
3.1 Parámetros geométricos importantes:	68
3.2 Cálculo del Agitador – Mezclador requerido por LABIOFAM.....	71
3.3 Conclusiones Parciales del Capítulo III.....	74
Conclusiones Generales	76
Recomendaciones	77
Bibliografía	78

Introducción.

Introducción

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, agitación y mezcla no son sinónimas. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero, en cambio, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, tal como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido en forma de polvo.

El término mezcla, o mezclado, se aplica a una gran variedad de operaciones que difieren ampliamente en el grado de homogeneidad del material «mezclado». Consideremos, en un caso, dos gases que han de mezclarse totalmente, y un segundo caso en el que arena, grava, cemento y agua que se voltean en un tambor rotatorio durante un largo período de tiempo. En ambos casos se dice que el producto final está mezclado. Es evidente que los productos no son igualmente homogéneos. Las muestras de gases mezclados, aun cuando las muestras sean muy pequeñas, tienen todas las mismas composiciones. Por otra parte, pequeñas muestras de hormigón mezclado difieren mucho en la composición.

En el presente trabajo se abordará la agitación de líquidos de baja o moderada viscosidad, así como de la mezcla de líquidos, de dispersiones líquido-gas y suspensiones líquido-sólido.

Los líquidos se agitan con diversos fines, dependiendo de los objetivos de la etapa del proceso. Dichos fines comprenden:

1. Suspensión de partículas sólidas.
2. Mezclado de líquidos miscibles, por ejemplo, alcohol metílico y agua.
3. Dispersión de un gas en un líquido en forma de pequeñas burbujas.
4. Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas diminutas.

Introducción

5. intensificación de la transferencia de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.

Con frecuencia un agitador cubre varias finalidades al mismo tiempo, como ocurre en el caso de la hidrogenación catalítica de un líquido. En un recipiente de hidrogenación el hidrógeno gaseoso es dispersado en el líquido en el que están suspendidas las partículas sólidas del catalizador, retirando simultáneamente el calor de reacción por medio de un serpentín o camisa de refrigeración.

Los líquidos se agitan o mezclan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente de forma cilíndrica y provista de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar abierta al aire o cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante dependiendo de la naturaleza del problema de agitación o mezcla de que se trate. Sin embargo, en muchas situaciones se utiliza un diseño estandarizado de forma y proporciones preestablecidas sin que se conozcan al detalle la influencia en el consumo de energía y en otros parámetros vinculados con el proceso de agitación o mezclado en sí. Por otro lado existen distintos tipos de rodets el cual como regla va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior, sin embargo en la literatura se muestran otros esquemas de colocación; inclinado, horizontal sin que quede completamente caracterizada su influencia en parámetros como el consumo de energía y las ventajas y desventajas en los procesos de agitación y mezcla específicos. El eje está accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje, pero más frecuentemente acoplado al eje a través de una caja reductora o multiplicadora de velocidad. En la literatura no se profundiza en aspectos como el diseño mecánico de estos. El rodete crea un modelo de flujo en el sistema, dando lugar a que el líquido circule a través del tanque y eventualmente retorne al rodete. Existen diferentes tipos de rodets de diferente forma y número de paletas. En el presente trabajo se aspira también a caracterizar con más detalle la influencia de la forma y número de paletas en los parámetros de energía consumida y de explotación de los procesos de que se trate.

El **Problema Científico** a resolver es por lo tanto el siguiente: En la literatura especializada sobre agitadores y mezcladores de líquidos se ofrecen de forma muy dispersa un conjunto de ecuaciones, recomendaciones, gráficas, tablas, etc. que permiten diseñar un agitador o un mezclador en función de los criterios del autor. No en todos los casos se caracteriza como influyen los parámetros geométricos y de explotación en el diseño mecánico del equipo o a la inversa no se precisa como influyen los parámetros de diseño mecánico en los parámetros de explotación y sobre todo en la potencia consumida y por ende la energía consumida en la explotación. En el (Programa de Desarrollo de la Fuentes Nacionales de Energía, 1993) se recalcan entre las acciones fundamentales para la elevación de la eficiencia energética: la apropiada explotación de los equipos e instalaciones, los mantenimientos oportunos y de mayor calidad, ya que estas medidas pueden dar resultados prácticamente sin inversiones o con inversiones menores y de rápida recuperación.

De todo lo expuesto se evidencia que resulta de vital importancia para nuestro país, disponer de herramientas de trabajo que permitan evaluar la influencia de los parámetros geométricos y de explotación, sobre el comportamiento de los agitadores o mezcladores y su interrelación a través de modelos matemáticos adecuados.

La **Hipótesis** formulada es la siguiente: Resulta posible elaborar una Metodología de cálculo en la cual conociendo los parámetros de operación requeridos en el agitador o en el mezclador, se puedan elegir los parámetros geométricos necesarios y evaluar otros aspectos como: consumo de energía y se pueda evaluar su resistencia mecánica

En la Investigación se emplearán los siguientes **Métodos Científicos**:

1. Método Hipotético – Deductivo al elaborar el Problema Científico y la posible solución del mismo, la Hipótesis y los Objetivos General y Específicos para darle cumplimiento.

Introducción

2. Método Analítico – Sintético, este es el Método Fundamental que será empleado en la Investigación: Mediante el análisis se evaluarán las expresiones de cálculo, tablas, gráficos, etc. existentes en la literatura y la síntesis permitirá integrar todos estos elementos de la bibliografía hasta conformar la Metodología de Cálculo deseada.
3. Métodos Matemáticos, se utilizarán Modelos Matemáticos simples para poder investigar la influencia de los parámetros geométricos y de operación en el diseño de los agitadores y mezcladores de fluidos

El presente trabajo está orientado entonces a cumplimentar el siguiente **Objetivo General:** Elaborar una Metodología de Cálculo en la cual conociendo los parámetros de operación requeridos en el agitador o en el mezclador, se puedan elegir los parámetros geométricos necesarios y evaluar la influencia de los parámetros geométricos y de operación en el diseño de los agitadores y mezcladores de fluidos

Sobre la base de estos antecedentes se han planteado para el presente trabajo los siguientes **Objetivos Específicos:**

1. Investigar en la literatura las propiedades de los sistemas de agitación y mezcla de líquidos haciendo particular énfasis en aquellos parámetros geométricos, proporciones, parámetros de operación y particularidades constructivas que permitan caracterizar la influencia en los aspectos mencionados. Investigar en particular el empleo de estos equipos en las industrias nacional y extranjera para evaluar las experiencias concretas en los aspectos vinculados con su diseño y comportamiento.
2. Desarrollar una Metodología de Diseño y Cálculo de estos equipos y establecer los aspectos fundamentales del cálculo para los diferentes elementos que componen los agitadores y mezcladores en función de la

Introducción

investigación teórica realizada que permita ampliar el horizonte sobre estos equipos de la Ingeniería Química. Nacional.

3. Realizar los cálculos de los parámetros fundamentales de un mezclador – agitador para los medicamentos elaborados por la Empresa “LABIOFAM”.

Capítulo 1.

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos

1.1 Conceptos de agitación y mezclado.

La agitación consiste en inducir a que un fluido adquiera un movimiento dentro de un recipiente por medio de la utilización de instrumentos mecánicos llamados agitadores. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas, creando un cierto tipo de flujo dentro del sistema, haciendo que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva al agitador; así nace la importancia en las industrias alimenticias, química, farmacéutica, cosmética, de pinturas, entre otras; en donde sus procesos de fabricación involucran operaciones como: suspensión, disolución, dispersión, emulsión, mezclado, homogeneización, circulación, dilución, empastado, rompimiento de partícula, etc. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

1.2 Objetivos de la agitación y del mezclado.

- Mezclar dos líquidos miscibles (ejemplo: alcohol y agua).
- Realizar una disolución de sólidos en líquido (ejemplo: azúcar y agua).
- Mejorar la transferencia de calor (ejemplo: en calentamiento o enfriamiento).
- Realizar la dispersión de un gas en un líquido (ejemplo: oxígeno en caldo de fermentación).
- Dispersión de partículas finas en un líquido.
- Dispersión de dos fases no miscibles (ejemplo: grasa en la leche).

Con frecuencia un agitador no cumple sólo la función simple de agitar el fluido, sino que como regla está implícito el mezclado, o sea, que puede cumplir diversos fines al mismo tiempo, como ocurre en la hidrogenación catalítica de un líquido ya que en el tanque de hidrogenación, el gas es dispersado a través del líquido donde se localizan las partículas sólidas de catalizador que se encuentran en suspensión, eliminándose al mismo tiempo, el calor producido en la reacción por medio de un serpentín o una camisa de refrigeración.

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

Los procesos de agitación y mezcla están entre los más importantes dentro de la industria química porque el éxito de muchas operaciones industriales depende de una agitación y mezcla eficaz. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos de transporte involucrados, es uno de los procesos más difíciles de analizar y sobre todo de caracterizar. Para aumentar la eficiencia del mezclado, se pueden instalar unos deflectores en la pared del tanque; así se evita que el fluido gire como un sólido rígido y que exista la formación de vórtices y se incremente por lo tanto la turbulencia y el efecto de mezclado. (Mc Cabe et. al.; 1998)

1.3 Partes componentes de un agitador o mezclador.

En la Figura 1.1 (Mc Cabe et. al.; 1998) se muestra un agitador o mezclador típico con sus diferentes partes componentes.

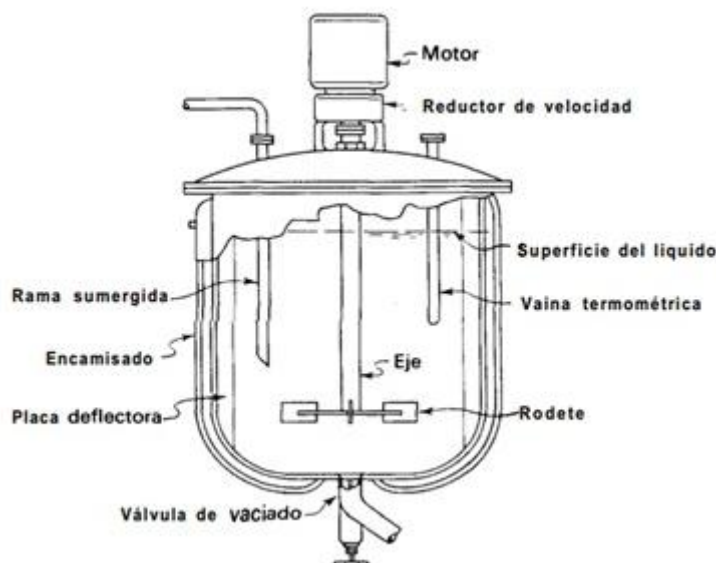


Figura 1.1 Partes de un agitador-mezclador típico (Fuente: Mc Cabe et. Al.; 1998).

El agitador o mezclador en si un recipiente dentro del cual se encuentra el o los fluidos impulsados por un rodete que se utiliza para homogenizar la solución que se encuentra en un recipiente. Es importante mencionar que el tipo de agitador o mezclador se debe elegir de acuerdo a la viscosidad del fluido que se agitará. Generalmente el equipo consiste en un recipiente cilíndrico (cerrado o abierto), y un agitador mecánico, montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. Las proporciones del tanque varían ampliamente, dependiendo de la naturaleza del

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

problema de agitación. El fondo del tanque debe ser redondeado, con el fin de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido. La altura del líquido, es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Sobre un eje suspendido desde la parte superior, va montado un agitador. El eje está accionado por un motor, conectado a veces, directamente al mismo, pero con mayor frecuencia, a través de una caja de engranajes reductores. El agitador crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva de vez en cuando al agitador. Los agitadores son instrumentos que forman parte de un biorreactor, los biorreactores en el proceso de mezclado proporcionan a las células de todos los sustratos necesarios para su crecimiento y reproducción. Para que la mezcla sea efectiva, el fluido impulsado por el rodete debe recorrer todo el recipiente en un tiempo razonable. Además, la velocidad del fluido impulsado por el rodete debe ser suficiente para arrastrar al material hacia las partes más alejadas del tanque y formar turbulencias. (Mc Cabe et. al.; 1998)

- **Placas Deflectoras.**

Son aquellos elementos soldados dentro del tanque según su comodidad y disponibilidad, los cuales ayudan a reducir los vórtices del fluido que se forma en el tanque; es decir para aumentar la eficiencia del mezclado. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

Características

- La anchura de los deflectores depende del diseño del rodete y la viscosidad del fluido. También estos suelen tener un ángulo de inclinación con respecto al eje del tanque.
- En un tanque sin deflectores, el flujo circular es inducido por todo tipo de rodetes; si los remolinos son intensos, el tipo de flujo dentro del tanque es esencialmente el mismo independientemente del diseño del rodete.

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

- Por lo general, se coloca cuatro deflectores regularmente espaciados, pero también se pueden colocar 6 u 8.
- Para líquidos de alta velocidad, su misma resistencia a fluir, amortigua la formación del vórtice al grado que el ancho de los deflectores puede reducirse. En el caso de fluidos viscosos se puede colocar los baffles a una distancia de la pared igual al ancho del baffle para poder evitar zonas estancadas detrás de ellos.
- Los deflectores obligan al líquido a realizar un recorrido sinuoso a través del tanque; desviando a las partículas cuando aparecen dentro de su región, rompen el movimiento circular que imponen las paletas de la turbina o el agitador al líquido y generan mayor turbulencia, mejoran el mezclado y generan una mayor transferencia de calor.
- La velocidad del flujo producido por el móvil depende directamente de la velocidad relativa del móvil respecto del líquido por lo que cuanto más gire la masa de líquido menor agitación se observará. Los baffles o interruptores de flujo tienen la misión de evitar o reducir este giro. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

Principales funciones de las Placas Deflectoras:

- Evitar la canalización de la mezcla.
- Minimizar los problemas de turbulencia.
- Orientar el sendero óptimo que deben seguir los fluidos dentro del tanque.
- Reducir el grado de inestabilidad térmica, debido a diferencias de temperatura dentro del tanque.
- Existen limitaciones técnico económicas que impiden que los sistemas deflectores usados se alcancen eficiencias de asentamiento del orden del 100%. Sin embargo, un patrón de deflectores adecuado ayuda a reducir apreciablemente los costos de inversión en tanque. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

Tipos de Placas Deflectoras.

- **Transversales:** Los deflectores transversales tienen dos funciones, la más importante es la de mantener a los tubos en la posición adecuada durante la

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

operación y evita la vibración producida por los vórtices inducidos por el flujo. En segundo lugar ellos guían al fluido del lado de la carcasa para acercarse en lo posible a las características del flujo cruzado.

- **Longitudinales:** El propósito de los deflectores longitudinales es controlar la dirección general del flujo del lado de la carcasa. El deflector más utilizado es el simple segmentado. El segmento cortado debe ser inferior a la mitad del diámetro para asegurar que deflectores adyacentes se solapen en al menos una fila completa de tubos. Para flujos de líquidos en el lado de la carcasa el corte del deflector generalmente es del 20 a 25 por ciento; para flujos de gas a baja presión de 40 a 45 por ciento, con el objetivo de minimizar la caída de presión. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

- **Tubos de aspiración.**

Son tubos cilíndricos de diámetro poco mayor que el impulsor, el largo va desde un poco más del diámetro del impulsor hasta la altura del líquido, dependiendo de la aplicación. Normalmente se utilizan con impulsores axiales (propulsores) para dirigir los flujos de succión y descarga. Son especialmente útiles para mantener sólidos suspendidos y dispersar gases en estanques profundos. El flujo de retorno a un rodete de cualquier tipo llega al rodete desde todas las direcciones, ya que no está bajo el control de superficies sólidas. Por ejemplo, el flujo hacia y desde un rodete es esencialmente similar al flujo de aire hacia y desde un ventilador que opera en una habitación. En la mayor parte de las aplicaciones de los mezcladores de rodete esto no constituye una limitación, pero cuando es preciso controlar la dirección y velocidad de flujo en la succión del rodete, se utilizan tubos de aspiración como los que se muestran en la Figura 1.2. Estos dispositivos pueden resultar útiles cuando se desea un elevado esfuerzo constante en el rodete, tal como ocurre en la preparación de ciertas emulsiones, o cuando es preciso dispersar en el líquido partículas sólidas que tienden a flotar sobre la superficie del líquido en el tanque. Los tubos de aspiración para rodetes se montan alrededor de los mismos, mientras que en el caso de turbinas se montan inmediatamente encima. Los tubos de aspiración aumentan la fricción del fluido en el sistema y,

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

para una potencia de entrada dada, reducen la velocidad de flujo, de forma que no se usan si no son absolutamente necesarios. (Claudio Gelmi Weston, 2006)

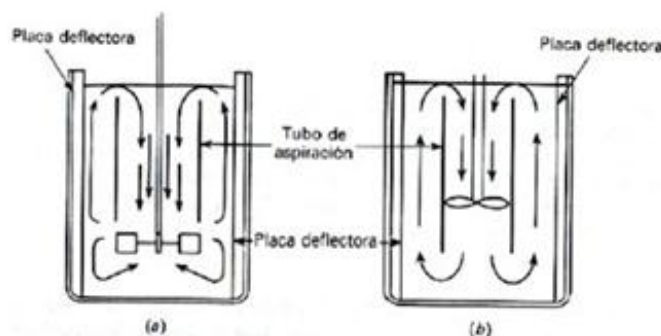


Figura 1.2 Tubos de aspiración en un tanque con placas deflectoras: a) Turbina; b) Hélice. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)

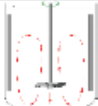
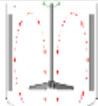
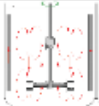
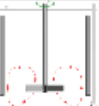
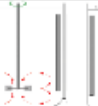
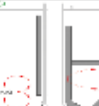
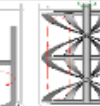
1.4 Clasificación de los agitadores.

Los agitadores se dividen en dos clases:

- **Agitadores de flujo axial:** Los cuales generan corrientes paralelas al eje del agitador.
- **Agitadores de flujo radial:** Dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial.

En la referencia (Agitadores, (2011) se muestra la siguiente Tabla donde aparecen los distintos tipos de rodets que se utilizan en general en los agitadores y mezcladores y sus características fundamentales.

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

Tabla 1.1 Distintos tipos de rodets empleados en los agitadores industriales y sus características. (Fuente: Agitadores, 2011).								
Denominación	Hélice	Hidrofoil	Versafoil	Turbina Axial	Turbina Radial	Cowles	Ancora	Cinta helicoidal
Proporciones geométricas standard								
Situación	centrada descentrada sin baffles lateral	centrada descentrada sin baffles lateral	centrada con baffles	centrada con baffles	centrada con baffles	centrada descentrada sin baffles	centrada sin baffles	centrada sin baffles
Flujo primario	axial	axial	axial	axial y radial	radial	radial	tangencial	axial
Rango de utilización	d/D	0'1 - 0'5	0'2 - 0'7	0'5 - 0'98	0'2 - 0'6	0'2 - 0'4	0'1 - 0'5	0'9 - 0'98
	Vel Tang	3 - 15	2 - 10	1 - 12	2 - 6	4 - 10	5 - 20	1 - 5
	Re	$Re > 10^4$	$Re > 10^4$	$Re > 20$	$Re > 10^4$	$Re > 10^4$	$Re > 10^4$	$Re > 10^4$
Comentarios	Viscosidad (Pa.s)	$\eta < 20$	$\eta < 50$	$\eta < 100$	$\eta < 20$	$\eta < 20$	$\eta < 20$	$\eta < 20$
		Tanques pequeños Baja agitación en tanques grandes Baja viscosidad	Buen rendimiento Permite bajos consumos y accionamientos más económicos	Muy versátil Apta para altas y bajas viscosidades Agitación uniforme en todo el tanque	Construcción económica Fácilmente adaptable a tanques muy grandes	Indicada casi exclusivamente para dispersión de gases y transferencia térmica	Alta cizalladura Potencia muy sensible a la viscosidad Especial para emulsiones, pinturas, etc.	Para agitación cerca de paredes A menudo con rascadores Para transferencia térmica

Los tres tipos principales de rodete utilizados en la industria son:

- De Hélice
- Paletas
- Turbina

Características de los agitadores de hélice:

Un agitador de hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Los agitadores de hélice más pequeños, giran a toda la velocidad del motor (500 rpm). Las corrientes de flujo, que parten del agitador, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque. Las palas de la hélice cortan o friccionan vigorosamente el líquido. Debido a la

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran tamaño. Poseen elementos impulsores de hojas cortas (menos de $\frac{1}{4}$ del diámetro del tanque). La columna de remolinos de líquido de elevada turbulencia, que parte del agitador, arrastra en su movimiento al líquido estancado, generando un efecto considerablemente mayor que el obtenido mediante una columna equivalente creada por una boquilla estacionaria.

La velocidad de flujo creada, en un depósito, por un mezclador de hélice tiene tres componentes:

- Una componente radial que actúa en dirección perpendicular al eje.
- Una componente longitudinal que actúa paralelamente al eje.
- Una componente rotatoria que actúa en dirección tangencial al círculo de rotación del eje.

Tanto la componente radial como la longitudinal contribuyen, generalmente, a la mezcla, pero no siempre la componente rotatoria. (Mc Cabe et. al.; 1998)

En la Figura 1.3 se muestran un modelo de agitador de hélice.



Figura 1.3 Agitador de Hélice. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

Características de los Agitadores de Paletas:

Para problemas sencillos, es un agitador eficaz está formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Son corrientes los agitadores formados por dos y 3 paletas. Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo. Las paletas también pueden adaptarse a la forma del fondo del tanque, de tal manera que en su movimiento rascan la superficie o pasan sobre ella con una holgura muy pequeña. Un agitador de este tipo se conoce como agitador de ancla. Estos agitadores son útiles cuando se desea evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, como ocurre en un tanque enchaquetado, pero no son buenos mezcladores. Generalmente trabajan conjuntamente con un agitador de paletas de otro tipo, que se mueve con velocidad elevada y que gira normalmente en sentido opuesto. (Mc Cabe et. al.; 1998)

En los agitadores industriales, las paletas giran a una velocidad comprendida entre 20 y 150 rpm, con una longitud del rodete aproximadamente de 50 al 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la paleta es de un sexto a un décimo de su longitud. Hay que tomar en cuenta que a velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave, en un tanque sin placas deflectoras o cortacorrientes, las cuales son necesarias para velocidades elevadas; de lo contrario el líquido se mueve como un remolino que gira alrededor del tanque, con velocidad elevada pero con poco efecto de mezcla. (Mc Cabe et. al.; 1998)



Figura 1.4 Agitadores de Paletas. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

Características de los Agitadores de Turbina.

La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con numerosas palas cortas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en él. Las placas

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semi-cerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que el de las palas, variando entre el 30 y el 50 por 100 del diámetro del tanque. Las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del rodete hay una zona de corrientes rápidas, elevada turbulencia e intensa cizalladura. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y remolinos, que deben ser destruidos por placas deflectoras o por un anillo difusor para que la agitación sea más eficaz. (Mc Cabe et. al.; 1998)

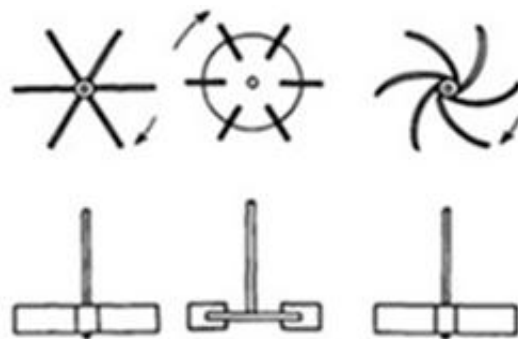


Figura 1.5 Agitadores de Turbina. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)

1.5 Problemas que se presentan en el proceso de agitado-mezclado.

Flujo circular: En este tipo de flujo, el líquido se mueve de manera laminar y existe poca mezcla entre el fluido situado a diferentes alturas del tanque; el fluido circular tiende a su vez a formar vórtices. A velocidades altas de rotación el vórtice puede alcanzar incluso la parte inferior del rodete por lo que el gas del ambiente se introduce en el líquido. En el diseño de tanques agitados, la prevención del flujo circular es indispensable y se consigue mediante la instalación de deflectores que interrumpen el flujo circular y crean turbulencias en el fluido. (Mc Cabe et. al.; 1998)

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

Cuando no se presentan remolinos, el tipo de flujo específico depende del tipo de rodete: Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia el fondo del tanque, desde donde la corriente se extiende subiendo por las paredes y retornando hacia la hélice. Se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales, por ejemplo para mantener en suspensión partículas sólidas pesadas. No se emplean cuando la viscosidad del líquido es superior a los 5.000cp. Los agitadores de paletas producen un flujo radial intenso en el plano próximo a las palas, pero prácticamente no dan lugar a corrientes verticales. Estos agitadores no son eficaces para mantener sólidos en suspensión. Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque, desde donde la corriente se divide, una parte fluye hacia arriba y otra parte hacia el fondo, retornando ambas al rodete. Por lo que producen dos corrientes de circulación separadas. Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa. (Mc Cabe et. al.; 1998)

Formas de evitar remolinos.

Colocando el agitador fuera del eje central del tanque. En tanques pequeños se debe colocar el rodete separado del centro del tanque, de tal manera que el eje del agitador no coincida con el eje central del tanque. En tanques mayores el agitador puede montarse en forma lateral, con el eje en un plano horizontal, pero no en la dirección del radio. En los tanques de gran tamaño, con agitadores verticales, el método más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectoras, que impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal. (www.simulaciónprocesos.wikispaces.com)

Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. Excepto en tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la formación de vórtice. Para agitadores de turbina, la anchura de la placa defletores no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque; para agitadores de hélice, basta con un octavo. Cuando el rodete entra al tanque

Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

lateralmente, está inclinado, o desplazado del centro, no son necesarias placas deflectoras. Una vez que el flujo circulatorio ha cesado, el modelo específico de flujo en el tanque depende del tipo de rodete. Los agitadores de hélice generalmente dirigen el líquido hacia el fondo del tanque, donde la corriente se esparce radialmente en todas las direcciones hacia la pared, asciende a lo largo de la pared y retorna desde la parte superior hasta el punto de succión del rodete. Se utilizan agitadores de hélice cuando se desean fuertes corrientes verticales, por ejemplo, cuando han de mantenerse partículas sólidas en suspensión. No se utilizan ordinariamente cuando la viscosidad del líquido es superior a aproximadamente 50 P. Con el fin de obtener un fuerte flujo axial para la suspensión de sólidos también se utilizan turbinas con una inclinación de las placas de 45°. Los agitadores de palas y las turbinas de placas planas producen un buen flujo radial en el plano del rodete, dividiendo el flujo hacia la pared para formar dos modelos distintos de circulación. Una parte fluye hacia abajo a lo largo de la pared y retorna hacia el centro del rodete desde el fondo, mientras que otra asciende hacia la superficie y retorna al rodete desde la parte superior. En un tanque sin placas deflectoras hay un fuerte flujo tangencial así como formación de vórtices para moderadas velocidades de giro del agitador. Cuando se instalan placas deflectoras, aumenta el flujo vertical y se produce una mezcla más rápida del líquido. En un tanque cilíndrico vertical la profundidad del líquido deberá ser igual, o algo mayor, que el diámetro del tanque. Si se desea una mayor profundidad de líquido se pueden instalar dos o más rodetes sobre el mismo eje, actuando cada rodete como un mezclador separado. Para cada rodete se generan dos corrientes de circulación. El rodete inferior, bien de tipo turbina o de hélice, se instala a aproximadamente un diámetro del rodete por encima del fondo del tanque. (Mc Cabe et. al.; 1998).

1.6 Conclusiones Parciales del Capítulo I.

1. En el capítulo se caracterizan en primer lugar los procesos de agitación y mezclado y se destaca como estos procesos se encuentran sustancialmente unidos en muchos procesos industriales.

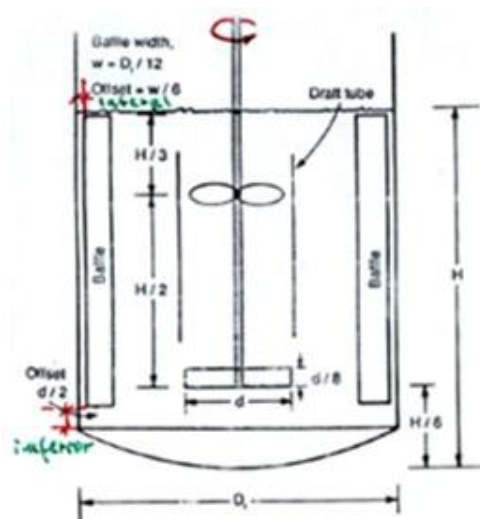
Capítulo I: Marco teórico sobre Agitación y Mezcla de fluidos.

2. Se describen las distintas partes que componen un agitador o mezclador y se destaca el papel que juega cada una de esas partes.
3. Se clasifican los equipos agitadores – mezcladores en sus dos grandes grupos y también desde el punto de vista del rodete que se emplee y se caracterizan los de tipos de rodete más comunes. Se mencionan algunos con rodetes muy específicos poco tratados en la literatura.
4. Se describen finalmente algunos de los problemas que se presentan durante la agitación o el mezclado y algunas de las formas de resolver estos problemas.

Capítulo 2.

(Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)

En la Figura (2.1) se muestran las proporciones básicas de un agitador según (McCabe, 1998)



- **Propiedades y parámetros de diseño:**
 - Viscosidad (μ)
 - Densidad(ρ)
- **Parámetros geométricos importantes:**
 - Diámetro del impulsor (d)
 - N^{ro.} de revoluciones (N)

- Altura del líquido (H)
- N^{ro.} de Placas deflectoras (4 es lo estándar)
- Diámetro del estanque (D_t)
- Espesor de las placas deflectoras (w)
- Offset lateral e interior de las placas deflectoras
- Posición del impulsor
- Ancho de la hoja del impulsor
- **Placas Deflectoras.**
 - Salvo en el caso de utilizar R_e muy grandes, las placas deflectoras son necesarias para evitar vórtices y rotación del fluido como un todo. La configuración más estándar de una placa deflectora es:
 - Espesor $w = \frac{D_t}{12}$ (4 placas equiespaciadas es lo estándar)
 - Largo: desde $\frac{d}{2}$ desde la sección recta del fondo del estanque hasta cerca del nivel del líquido.
 - Para el caso de líquidos con sólidos suspendidos o bien cuando se requiere transferencia de calor con las paredes, las placas se ubican a una distancia equivalente a $\frac{1}{6}$ de su espesor, de la pared del estanque.
- **El tanque.**

Normalmente el fondo tiene forma de plato, pues el consumo de energía en la agitación es menor, además de evitar “espacios muertos”. La relación óptima $\frac{H}{D_t}$ para el caso de un impulsor es 1, en que el impulsor se ubica en el centro del estanque. Si $\frac{H}{D_t} > 1$ entonces estamos en presencia de zonas muertas.
- **Impulsores.**
 - Tamaño: Este depende del tipo de impulsor, propiedades del fluido, objetivos de la agitación y geometría del estanque. Por ejemplo, para el impulsor de turbina:

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

- $0,3 \leq \frac{d}{D_t} \leq 0,6$
- O bien: $0,2 \leq \frac{d}{D_t} \leq 0,5$ (turbulento) y $0,7 \leq \frac{d}{D_t} \leq 1$ (laminar)
- Velocidad: La velocidad de los motores y moto-reductores se encuentran solo en ciertos valores: 37, 45, 56, 68, 84, 100, 125, 155, 190 y 320 RPM. Normalmente no se justifica sistemas de velocidad variable. Cuando el torque es muy grande, se requieren sistemas con dos velocidades.
- **Ubicación de los impulsores.**

Aquí se puede encontrar gran variedad de opiniones. En principio se puede ubicar $\frac{H}{6}$ del fondo del estanque. Para el caso de suspensión de sólidos, se recomienda $\frac{d}{3}$ del fondo.

La siguiente tabla da recomendaciones más generales.

Tabla 2.1 Recomendaciones sobre el número y ubicación de los impulsores. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)				
Viscosidad (cP)	Nivel Max. H/D_t	Número de Impulsores.	Ubicación desde el fondo.	Ubicación desde nivel superior.
$< 25 \times 10^3$	1.4	1	H/3	
$< 25 \times 10^3$	2.1	2	$D_t/3$	$(2/3)H$
$> 25 \times 10^3$	0.8	1	H/3	
$> 25 \times 10^3$	1.6	2	$D_t/3$	$(2/3)H$

- **Torque.**
 - Define el costo de inversión (motor, eje, etc.)

$$Tq = \frac{P}{2\pi N} = \rho N^2 d^5 (\text{régimen turbulento}) \quad Ec (2.1)$$

$$Tq = \mu N d^3 (\text{régimen laminar}) \quad Ec (2.2)$$

El torque por unidad de volumen, se puede expresar en función de la velocidad angular de la siguiente manera:

$$\frac{T_q}{V} = (\rho U t^2) \left(\frac{d}{D_t} \right)^3 \quad \text{Ec (2.3)}$$

$$\frac{T_q}{V} = \mu N \left(\frac{d}{D_t} \right)^3 \quad \text{Ec (2.4)}$$

- **Velocidad en el extremo del impulsor (tip speed)**

Corresponde a la velocidad angular ($2\pi N$) multiplicado por el radio del impulsor ($\frac{d}{2}$)

$$U_t = \pi N d \quad \text{Ec (2.5)}$$

- **Numero de Reynolds (R_e)**

$$R_e = \frac{d^2 N \rho}{\mu} = \frac{U_t d \rho}{\pi \mu} \quad \text{Ec (2.6)}$$

El número de Reynolds representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. En agitación se presentan tres regímenes de flujo: laminar, transición (10-10.1000) y turbulento.

- **Número de Potencia (N_p)**

Es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del rodete y la fuerza inercial. Este número presenta una buena correlación con el N° de Reynolds con placas deflectoras. Para régimen turbulento, N_p , es independiente de Re (valor constante).

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \quad \text{Ec (2.7)}$$

- **Número de Froude (Fr)**

Es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Es útil en el análisis y escalamiento de estanques sin placas.

$$Fr = \frac{N^2 d}{g} \quad \text{Ec (2.8)}$$

- **Número de mezclado (B)**

Es la velocidad de rotación (N), multiplicado por el tiempo de mezclado. Define un tiempo de mezclado adimensional.

$$B = Nt \quad \text{Ec (2.9)}$$

- **Cálculo de Potencia**

Para poder estimar la potencia que se requiere para hacer girar un rodete dado con una velocidad determinada, es necesario disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o N_p) en función de otras variables del sistema. Se requiere conocer las medidas importantes del estanque y agitador: distancia del rodete al fondo del estanque, profundidad del líquido, dimensiones de placas deflectoras, número y disposición de éstas, número de palas de rodete, propiedades del fluido. Las características antes mencionadas pueden convertirse en relaciones adimensionales, llamadas factores de forma. Se calculan dividiendo cada uno de los términos por uno que se tome como base. Ejemplo: diámetro del rodete.

Dos mezcladores que tienen las mismas proporciones geométricas, pero diferentes tamaños tendrán iguales factores de forma. En este caso podremos decir que son geoméricamente semejantes o que poseen semejanza geométrica. La potencia consumida define el costo de la operación.

- **Cálculo de potencia: casos límite**

Para bajos números de Re ($Re < 10.000$) las líneas de N_p v/s Re coinciden para un estanque con y sin placas deflectoras (ver gráfico de próxima página), y la pendiente de la línea en coordenadas logarítmicas es (-1). En este intervalo el flujo es laminar, la densidad no influye y la ecuación de potencia se transforma en:

$$P = K_L N^2 d^3 \mu \quad \text{Ec (2.10)}$$

En estanques con placas deflectoras, para números de Reynolds superiores a 10.000, el número de potencia es independiente del número de Re y la viscosidad ya no influye. En este intervalo el flujo es totalmente turbulento. Cuando el flujo en el tanque es turbulento, la potencia necesaria puede estimarse a partir del producto del flujo generado por el rodete y la energía cinética por unidad de volumen del fluido, resultando la siguiente ecuación:

$$P = K_T N^2 d^3 \rho \quad \text{Ec (2.11)}$$

Valores K_T y K_L típico quedan representados en la siguiente Tabla:

Tabla 2.2 Valores de las constantes K_L y K_T de acuerdo con el tipo de rodete. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006).		
Tipo de Rodete.	K_L	K_T
Hélice paso cuadrado, tres palas.	41,0	0,32
Paso de 2, tres palas.	43,5	1,00
Turbina, seis palas planas.	71,0	6,30
Seis palas curvas.	70,0	4,80
Turbina de ventilador, seis palas.	70,0	1,65
Palas planas, dos palas.	36,5	1,70
Turbina cerrada, seis palas curvas.	97,2	1,08
Con estator, sin deflectores.	172,5	1,12

- **Potencia para agitadores con placas deflectoras**

En la Figura (2.2) se muestran las proporciones del rodete y en la Figura (2.3) y Figura (2.4) se representan curvas típicas para N_p v/s Re en el caso de estanques con placas deflectoras, equipados con turbinas de 6 placas planas localizadas centralmente.

Las letras S_i corresponden a los factores de forma. En términos de las dimensiones del reactor y agitador:

$$S1 = d/D_t \quad S2 = E/d \quad S3 = L/d$$

$$S4 = h/d \quad S5 = w/D_t \quad S6 = H/D$$

(E: altura del rodete sobre el fondo del estanque)

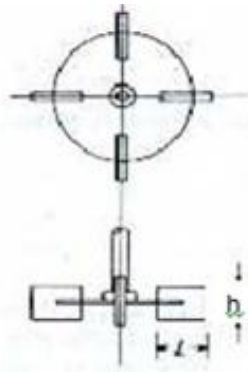


Figura 2.2 Proporciones del rodete. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006).

La curva A corresponde a palas verticales con $S_4 = 0.25$; la curva B es para un rodete similar pero con palas más estrechas ($S_4 = 0.125$). La curva C es para una turbina de palas y muy similar a la curva B. La curva D es para un estanque sin placas deflectoras.

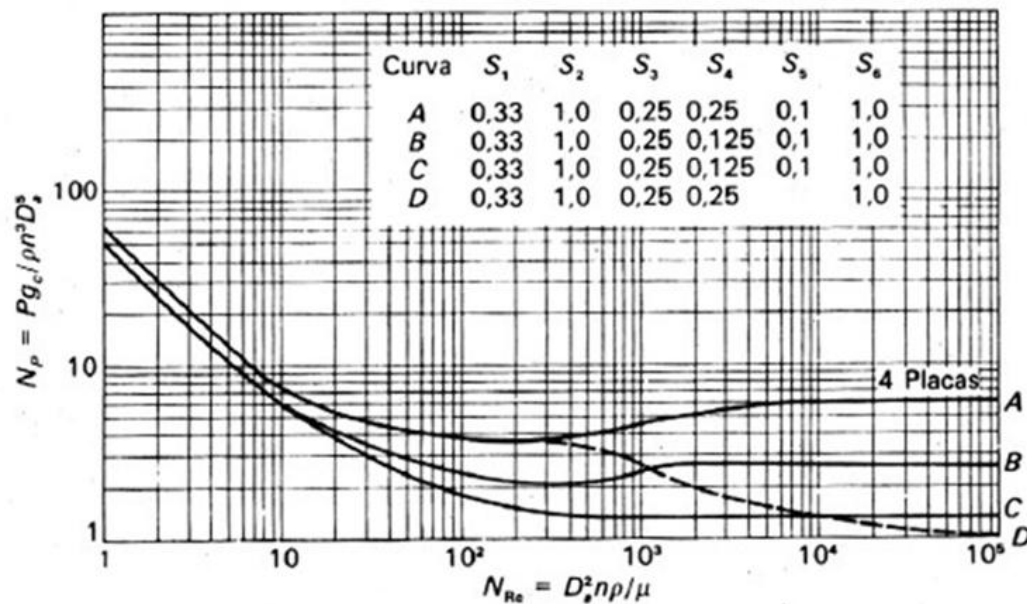


Figura 2.3 Número de potencia N_p vs. N_{Re} para turbinas de seis palas. Para el tramo discontinuo de la curva D, el valor de N_p se multiplica por N_{frm} . (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)

La curva A de la Figura (2.4) corresponde a un rodete de tres palas instalado centralmente es un estanque con placas deflectoras. Las hélices y las turbinas con

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

placas deflectoras presentan un consumo de potencia considerablemente menor que una turbina con placas verticales.

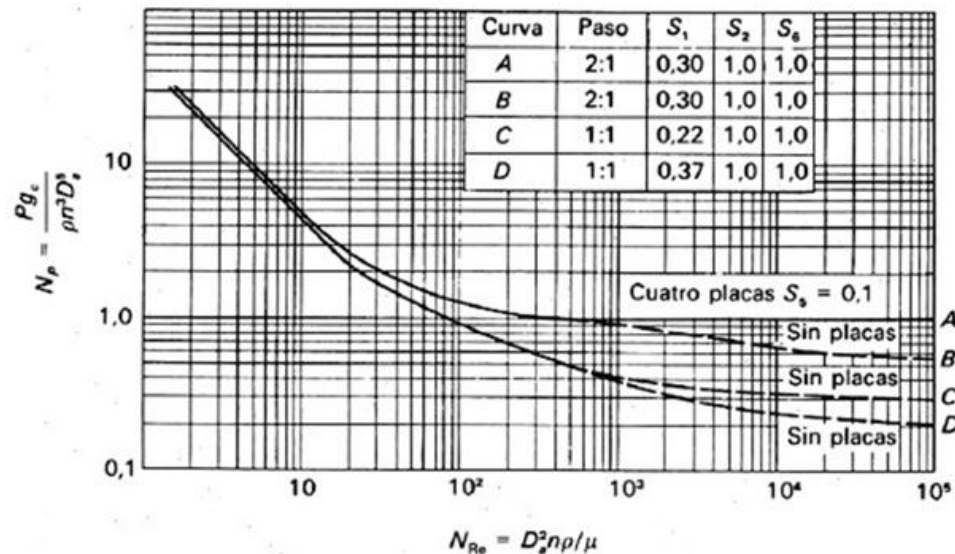


Figura 2.4 Número de potencia N_p vs. N_{Re} para turbinas de tres palas. Para los tramos discontinuos de las curvas B, C y D, el valor de N_p se multiplica por $N_{frm.}$ (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006).

- **Potencia para estanques sin placas deflectoras.**

Para bajos números de Re (< 300), las curvas para estanques con y sin placas deflectoras son idénticas. Sin embargo, las curvas divergen para Re más elevados (ver Fig. 2.3 y las curvas B, C y D de Fig. 2.4). En esta región se forma un vórtice y tiene influencia el número de Froude. La ecuación para N_p se modifica, de tal forma que:

$$N_p' = N_p (N_{Fr})^m \quad \text{Ec (2.12)}$$

El exponente de la ecuación anterior, para un conjunto dado de factores de forma, está empíricamente relacionado con el número de Re por la ecuación:

$$M = \frac{(a - \log_{10}(Re))}{b} \quad \text{Ec (2.13)}$$

donde a y b son constantes. La siguiente tabla da valores de las constantes a y b para las curvas de la figuras (2.3) y (2.4). Para utilizar las curvas de línea punteada de las figuras (2.3) y (2.4) hay que corregir el número de potencia (N_p),

leído de la escala de ordenadas, multiplicándolo por $(NFr)^m$.

Tabla 2.3 Constantes a y b de la ecuación 2.13. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)			
Figura	Línea	a	b
2.3	D	1,0	40,0
2.4	B	1,7	18,0
2.4	C	0	18,0
2.4	D	2,3	18,0

- Potencia para impulsores de hélice**

Estos equipos se utilizan para régimen laminar o de transición. Las correlaciones son:

$$Re < 100 \quad NP = (350/Re) \cdot f_{geo} \quad Ec \quad (2.14)$$

$$Re > 100 \quad NP = 1.12 \cdot \exp(6.15 - 1.37 \cdot \ln(Re) + 0.0613 \cdot (\ln(Re))^2) \cdot f_{geo} \quad Ec \quad (2.15)$$

En que f_{geo} es un adimensional de geometría, y está definido por:

$$F_{geo} = (d/Pi)^{0.5} \cdot (h/d) \cdot (10 \cdot w/d)^{0.16} \cdot (d/(24 \cdot (Dt-d)))^{0.5} \cdot (n_f/2)^{0.5} \quad Ec \quad (2.16)$$

Pi = Pitch, y corresponde a la altura de la hoja en una vuelta n_f es el número de hojas. Para un agitador estándar: $n_f = 2$; $w/d = 0.1$; $h/d = 1$; $d/D_t = 0.96$ y $Pi = d \Rightarrow f_{geo} = 1$.

- Potencia para impulsores de ancla**

Estos impulsores, por lo general se operan a Re menores que los de hélice, en los regímenes laminar y de transición.

$$Re < 10$$

$$NP = (400/Re) \cdot f_{geo} \quad Ec \quad (2.17)$$

$$10 < Re < 10.000$$

$$NP = 1.05 \cdot \exp(5.64 - 0.783 \cdot \ln(Re) - 0.0523 \cdot (\ln(Re))^2 + 0.00674 \cdot (\ln(Re))^3) \cdot f_{geo} \quad Ec \quad (2.18)$$

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Al igual que en el caso anterior, f_{geo} es un adimensional que depende de la geometría del impulsor:

$$f_{geo} = (h/d) (10 \cdot w/d)^{0,16} (d/49/(D_t-d))^{0,5} \quad \text{Ec (2.19)}$$

f_{geo} vale 1 para una configuración estándar:

$$h = d; w/d = 0.1; d/D_t = 0.98 \quad \text{Ec (2.20)}$$

- **La operación de mezclado.**

La operación de mezcla es más difícil de estudiar y describir que la operación de agitación.

¿Cómo se puede medir la mezcla?

A través de un criterio visual (fenómenos de interferencia), cambio de color mediante indicador ácido-base, etc.

A partir de datos experimentales, se ha visto que la concentración de un material al ser mezclado, en un estanque, puede ser modelada como una respuesta sinusoidal amortiguada:

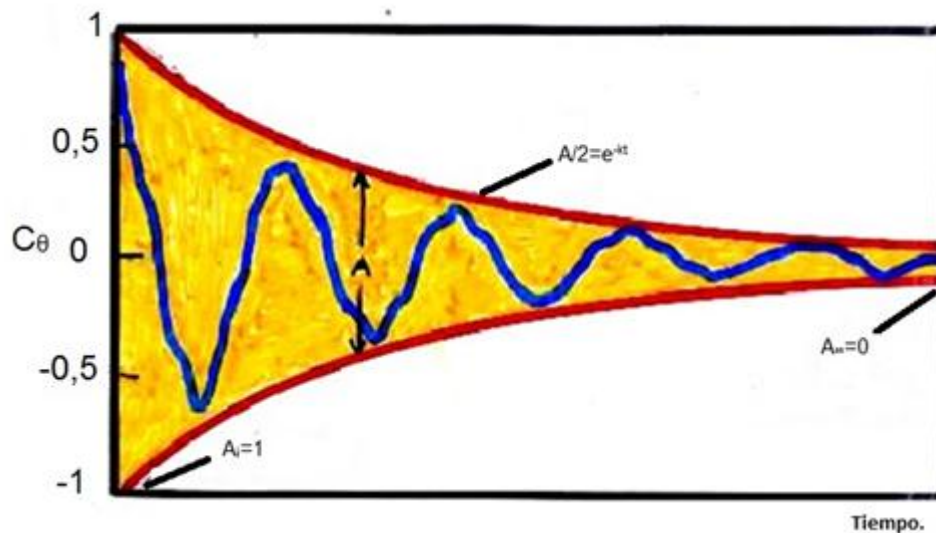


Figura 2.5 Modelo de respuesta amortiguada. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)

La máxima concentración en el tiempo t será $A/2 = \exp(-k \cdot t)$, en que k es la constante de mezcla, la cual depende del sistema. $A/2$ se puede entender como el grado de heterogeneidad de la mezcla. Así, podemos definir como el grado o fracción de uniformidad (u homogeneidad) a :

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

$$U = (1-A/2) = 1 - \exp(-k \cdot t) \quad \text{Ec (2.21)}$$

El tiempo requerido para un cierto nivel de uniformidad, se puede obtener fácilmente de las ecuaciones anteriores:

$$t_u = \frac{\ln(1-U)}{k} \quad \text{Ec (2.22)}$$

La constante de mezcla depende del número de Reynolds y la geometría del sistema:

$$k/N = f(\text{Re}, d/D_t, D_t/H, \text{tipo de impulsor}) \quad \text{Ec (2.23)}$$

Para $\text{Re} > 5.000$, k es una constante que no depende de Re . Así para $\text{Re} > 5.000$ se cumple:

$$k = aN (d/D_t)^b (D_t/H)^{0,5} \quad \text{Ec (2.24)}$$

Donde a y b son parámetros del impulsor

Las constantes a y b para los impulsores más comunes son:

Tabla 2.4 Constantes a y b para impulsores más comunes. (Fuente: Claudio Gelmi Weston)		
Tipo de impulsor.	a	b
De disco y hojas (6).	1,06	2,17
De hojas planas (4).	1,01	2,30
De hojas inclinadas (4).	0,641	2,19
Propulsor marino.	0,274	1,73

Estos valores consideran la adición de material desde la superficie del líquido.

Además, para relaciones dentro del siguiente intervalo:

$$0.15 \leq d/D_t \leq 0.55 \quad \text{Ec (2.25)}$$

$$0.50 \leq H/D_t \leq 1.50 \quad \text{Ec (2.26)}$$

Impulsor de hélice estándar.

$$\left. \begin{array}{l} d/D_t = 0.96 \\ h/d = 1.0 \end{array} \right\} w/d = 0.10 \text{ y } \text{Re} \leq 100 \Rightarrow t_{95\%} = 75/N \quad \text{Ec (2.27)}$$

Para líquidos muy viscosos los tiempos de mezcla son mucho más cortos para un mismo consumo de potencia. En cambio, son más lentos que los agitadores de turbina para fluidos poco viscosos.

Para una misma velocidad de agitación, el consumo de potencia para agitadores de hélice es de un orden de magnitud inferior que los de turbina.

Impulsor de ancla.

Para factores de forma típicos, tendremos:

$$\left. \begin{array}{l} w/d = 0.1 \\ H/D_t = 1 \end{array} \right\} d/D_t = 0.98 \text{ y } 100 \leq Re \leq 10.000 \Rightarrow t_{95\%} = \exp(12.9 \cdot Re^{-0.135}) \quad \text{Ec (2.28)}$$

2.2 Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores.

(Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

En esta bibliografía el autor solo se refiere al diseño de un tanque agitador-mezclador con rotor tipo turbina.

- **Diseño estándar de turbina.**

El diseñador de un tanque agitado dispone de un gran número, que no es habitual, de elecciones sobre el tipo y localización del agitador, las proporciones del tanque, el número y dimensiones de las placas deflectoras, etc. Cada una de estas decisiones que afectan a la velocidad de circulación del líquido, los modelos de velocidad y el consumo de potencia. Como punto de partida en el diseño de los problemas ordinarios de agitación, generalmente se utiliza un agitador de turbina. Las proporciones típicas son:

$$\frac{D_a}{D} = \frac{1}{3} \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_a} = 1 \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

El número de placas deflectoras es generalmente de 4; el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente es de 6 u 8. Situaciones especiales pueden, por supuesto, aconsejar proporciones diferentes de las que se acaban de indicar; por ejemplo, puede resultar ventajoso colocar el agitador más alto o más bajo en el tanque, o bien puede ser necesario utilizar un tanque más profundo para alcanzar el resultado apetecido. Con todo, las proporciones estándar antes relacionadas son ampliamente aceptadas y en ellas se basan muchas de las correlaciones publicadas sobre el funcionamiento de agitadores.

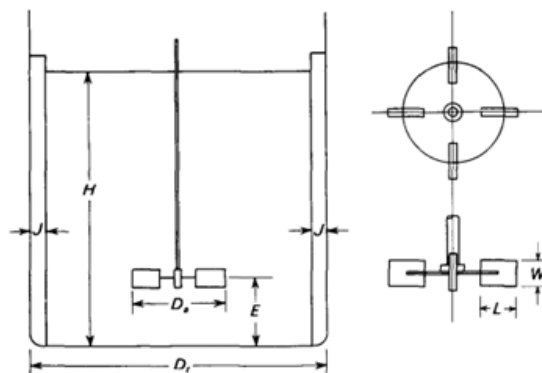


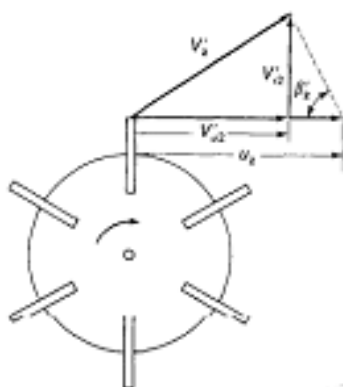
Figura 2.6 Medidas de un agitador de turbina. (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

- **Circulación, velocidades y consumo de potencia en Tanques agitados.**

Para que un tanque de proceso sea eficaz, con independencia del problema de agitación, el volumen de fluido movido por el agitador debe ser suficiente para llevar las corrientes hasta las partes más remotas del tanque. En las operaciones de mezcla y dispersión la velocidad de circulación no es el único factor, ni siquiera el importante, sino que con frecuencia la turbulencia de la corriente controla la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que en las corrientes estén adecuadamente dirigidas y de que se generen grandes gradientes de velocidad en el líquido. Tanto la circulación como la generación de turbulencia consumen energía. Más adelante se estudia las relaciones entre el consumo de potencia y los parámetros de diseño de tanques agitados. Según se verá, algunos problemas de agitación requieren grandes flujos o elevadas velocidades medias, mientras que otros necesitan una elevada turbulencia o disipación local de potencia. Aun cuando tanto la velocidad de flujo como la disipación de potencia aumentan con la velocidad del agitador, la selección del tipo y tamaño del agitador influye sobre los valores relativos de la velocidad de flujo y la disipación de potencia. En general, se utilizan grandes agitadores que se mueven a velocidades medias para promover el flujo, y agitadores más pequeños a velocidad elevada cuando lo que se requiere es una elevada turbulencia interna.

- **Número de flujo.**

Un agitador de turbina o de hélice es, en esencia, un rodete de una bomba que funciona sin carcasa y con flujos de entrada y salida no dirigidos. Consideremos el rodete de turbina de palas rectas que se muestra en la Figura (2.8): u_2 es la velocidad de las puntas de las palas; V_1 , y V_2 son las velocidades tangencial y radial del líquido que abandona los extremos de las palas, y V_i es la velocidad total del líquido en el mismo punto.



**Figura 2.7 Vectores de velocidad en el extremo de la pala de un rodete de turbina
(Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).**

Supóngase que la velocidad tangencial del líquido es una fracción k de la velocidad en el extremo de la pala, o sea:

$$V_{u2} = ku_2 = k\pi D_a n \quad \text{Ec 2.29}$$

Puesto que $u_2 = \pi D_a n$ De acuerdo con la Ecuación $q_r = V_{r2} A_p$, la velocidad volumétrica de flujo es

$$q = V_{r2} A_p \quad \text{Ec 2.30}$$

Donde A_p es el área del cilindro barrido por los extremos de las palas del rodete

$$A_p = \pi D_a W \quad \text{Ec 2.31}$$

Donde D_a = Diámetro del rodete.

W = Anchura de las palas.

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

De acuerdo con la geometría de la Figura 2.7

$$V_{r2}' = (u_2 - V_{u2}') \tan \beta_2' \quad \text{Ec 2.32}$$

Sustituyendo de la Ecuación $V_{u2}' = ku_2 = k\pi D_a n$ para V_{u2}' se obtiene:

$$V_{r2}' = \pi D_a (1 - k) \tan \beta_2' \quad \text{Ec 2.33}$$

Por tanto, la velocidad volumétrica de flujo, según las Ecuaciones (2.30) a (2.32), es:

$$q = \pi^2 D_a^2 n W (1 - k) \tan \beta_2' \quad \text{Ec 2.34}$$

Para rodetes geoméricamente semejantes W es proporcional a D_a y, por tanto, para valores dados de k y β_2' :

$$q \propto n D_a^3 \quad \text{Ec 2.35}$$

La relación de estas dos magnitudes recibe el nombre de número de flujo N_Q , que está definido por:

$$N_Q = \frac{q}{n D_a^3} \quad \text{Ec 2.36}$$

Las ecuaciones (2.32) a la (2.34) indican que si β_2' está fijado, N_Q es constante. Para hélices marinas β_2' y N_Q pueden considerarse constantes; para turbinas, N_Q es una función de los tamaños relativos del rodete y el tanque. Para el diseño de tanques agitados provistos de placas deflectoras, se recomiendan los siguientes valores:

Para hélices marinas (paso cuadrado) $N_Q = 0,5$

Para una turbina de 4 palas con 45° ($\frac{W}{D_a} = \frac{1}{6}$) $N_Q = 0.87$

Para una turbina con 6 palas planas ($\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$) $N_Q = 1.3$

Estas ecuaciones calculan el flujo de descarga desde el borde del rodete y no el flujo total generado. La corriente de alta velocidad del líquido que sale del extremo del rodete arrastra algo de la masa de líquido que se mueve lentamente y que decelera el chorro, pero en cambio aumenta la velocidad total de flujo. Para turbinas de palas planas, el flujo total, estimado a partir del tiempo medio de circulación de las partículas o trazadores en disolución, es:

$$q = 0.92nD_a^3\left(\frac{D_t}{D_a}\right) \quad \text{Ec 2.37}$$

Para una relación típica $\frac{D_t}{D_a} = 3$, q es $2.76nD_a^3$, o bien 2.1 veces el valor para el rodete ($N_Q = 1.3$). La ecuación 2.36 deberá utilizarse solamente para relaciones $\frac{D_t}{D_a}$ comprendidas entre 2 y 4.

- **Modelos de velocidad y gradientes de velocidad.**

Más detalles acerca de los modelos de flujo, de las velocidades locales y del flujo total generado por el rodete se han obtenido utilizando pequeñas sondas de velocidad o mediante medidas fotográficas de partículas trazadoras. En la Figura (2.9) se presentan algunos de los resultados de Cutter para una turbina de 4 pulg de palas rectas en un tanque de 11,5 pulg. Cuando el fluido sale de las palas del rodete, la componente radial de la velocidad del fluido V_r' en la línea central del rodete es aproximadamente 0,6 veces la velocidad u_2 en el extremo. La velocidad radial disminuye con la distancia vertical desde la línea central, pero el chorro se extiende más allá del borde de las palas a causa del arrastre, y la integración conduce a un flujo total de $0,75q_B$ donde q_B , es el flujo que existiría si todo el fluido se moviese con una velocidad u_2 a través de las paredes del cilindro barrido por las palas.

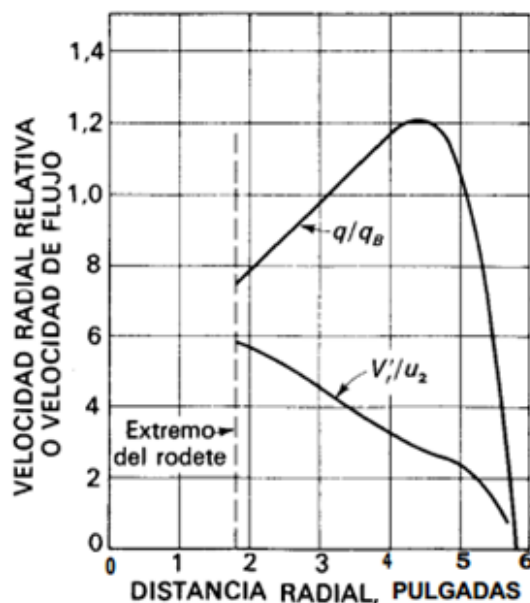


Figura 2.8 Velocidad radial $\frac{V_r'}{u_2}$ y velocidad volumétrica de flujo $\frac{q}{q_B}$ en un tanque agitado con una turbina (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998)

A medida que el chorro se desplaza hacia fuera del rodete, se va retardando debido a que aumenta el área disponible para el flujo y a que hay más arrastre de líquido. A lo largo de la línea central del rodete la velocidad cae más o menos linealmente con la distancia radial y, tal como ha sido demostrado por otros estudios, el producto $V_r' r$ es prácticamente constante. El flujo volumétrico total aumenta con el radio hasta aproximadamente $1,2q_B$, debido al arrastre adicional, y después cae cerca de la pared del recipiente debido a que el flujo comienza a dividirse en corrientes de circulación ascendentes y descendentes. El flujo máximo de $1,2q_B$, comparado con la velocidad radial de descarga de $0,6u_2$, indica que el flujo total duplica a la descarga directa del rodete, que concuerda con el factor 2,1 calculado utilizando la Ecuación (2.37).

Los gradientes de velocidad en un tanque agitado varían linealmente de un punto a otro en el fluido. El gradiente será muy grande cerca del borde del chorro que sale del rodete, debido a que la velocidad es elevada y el chorro es relativamente

estrecho. El gradiente de velocidad en el extremo de la pala, basado en la velocidad vertical en dicho punto, es aproximadamente $0,9u/0,75W$, donde $0,9u$ es la resultante de las velocidades radial y tangencial, y $0,75 W$ es la mitad de la anchura del chorro que sale del rodete. Puesto que $u = \pi n D_a$ y $W = \frac{D_a}{5}$ esto corresponde a un gradiente de velocidad de $19n$, que puede servir como una estimación de la máxima cizalladura en la región próxima al rodete de la turbina. A medida que el chorro se desplaza hacia fuera del rodete, se retarda y el gradiente de velocidad en el borde del chorro disminuye. Detrás de las palas de la turbina hay vórtices intensos, donde la cizalladura local puede ser tan elevada como $50n$.

La Figura (2.10) muestra las corrientes de fluido en una turbina de seis palas, de 6 pulgadas de diámetro, girando a 200 rpm en un tanque que contiene agua fría. El plano de observación pasa a través del eje vertical del rodete e inmediatamente delante de una placa deflectora radial. El fluido sale del rodete en dirección radial, se separa en corrientes longitudinales que fluyen hacia arriba y abajo sobre la placa deflectora, luego fluyen hacia dentro del eje del rodete y, por último, retornan a la entrada del rodete. En el fondo del tanque, inmediatamente debajo del eje, el fluido circula con un movimiento de remolino. En todas partes las corrientes son fundamentalmente radiales y longitudinales.

Los números de la Figura (2.9) indican el valor escalar de la velocidad del fluido en distintos puntos, como fracciones de la velocidad del extremo de las palas del rodete. Para las condiciones utilizadas, la velocidad de dicho extremo es de 4,8 pie-s. La velocidad en el chorro cae bruscamente desde la velocidad en el extremo de la pala hasta aproximadamente 0,4 veces dicha velocidad cerca de la pared del tanque. Las velocidades en otras localizaciones del tanque son del orden de 0,25 veces la velocidad en el extremo, aunque hay dos regiones toroidales de fluido casi estancado, una encima y otra debajo del rodete, donde la velocidad es solamente 0,10 a 0,15 veces la velocidad en el extremo de la pala. Al aumentar la velocidad del rodete aumenta la velocidad del extremo de las palas, así como la velocidad de circulación. Sin embargo, esto no da lugar a que la velocidad del

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

fluido en una determinada localización aumente en la misma proporción; un chorro que se mueve rápidamente arrastra mucho más material desde la masa global de líquido que un chorro que se mueve más lentamente, y la velocidad del chorro disminuye muy rápidamente al aumentar la distancia al rodete.

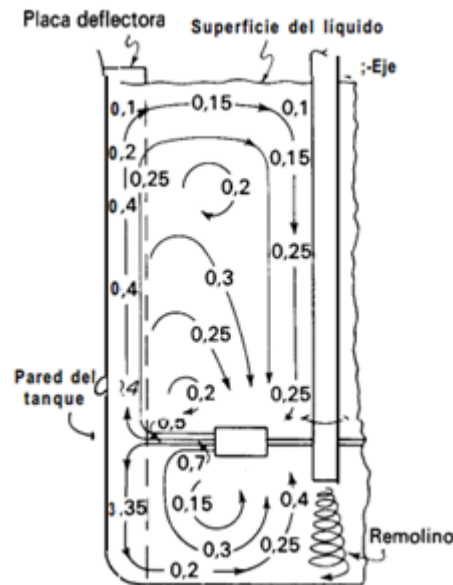


Figura 2.9 Modelos de velocidad de un agitador de turbina. (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

- **Consumo de potencia.**

Un importante factor en el diseño de un tanque agitado es la potencia que se requiere para mover el rodete. Cuando el flujo en el tanque es turbulento, la potencia necesaria puede estimarse a partir del producto del flujo q generado por el rodete y la energía cinética E_k por unidad de volumen de fluido.

$$q = nD_a^3 N_Q$$

O bien
$$E_k = \frac{\rho(V_2')^2}{2g_c}$$

La velocidad V_2' es ligeramente menor que la velocidad en el extremo u_2 . Si la relación $\frac{V_2'}{u_2}$ se representa por α , $V_2' = \alpha \pi n D_a$ y la potencia necesaria es

$$P = nD_a^3 N_Q \frac{\rho}{2g_c} (\alpha \pi n D_a)^2.$$

$$= \frac{\rho n^3 D_a^5}{g_c} \left(\frac{\alpha^2 \pi^2}{2} N_Q \right) \quad \text{Ec 2.38}$$

En forma adimensional

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \frac{\alpha^2 \pi^2}{2} N_Q. \quad \text{Ec 2.39}$$

El primer miembro de la Ecuación (2.39) recibe el nombre de número de potencia, N_p , definido por:

$$N_p = \frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho}. \quad \text{Ec 2.40}$$

Para una turbina estándar de seis palas, $N_Q = 1,3$, y si α se toma como 49, $N_p = 5,2$. Como se verá más adelante, este resultado concuerda bien el valor observado.

- **Correlación de la potencia.**

Para estimar la potencia que se requiere para hacer girar un rodete dado con una velocidad determinada, es preciso disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o del número de potencia) en función de otras variables del sistema. La forma de tales correlaciones puede encontrarse por análisis dimensional, en función de las medidas importantes del tanque y del rodete, la distancia del rodete al fondo del tanque, la profundidad del líquido, así como las dimensiones de las placas deflectoras cuando se utilizan. También deben de estar fijados el número y disposición de las placas deflectoras, así como el número de palas del rodete. Las variables que intervienen en el análisis son las medidas importantes del tanque y del rodete, la viscosidad μ y la densidad ρ líquido, la velocidad de giro n , y, puesto que se aplica la ley de Newton, la constante adimensional g_c . Por otra parte, salvo que se tomen precauciones para evitarlo, se formará un vórtice en la superficie del líquido. Algo de líquido se elevará por encima del nivel medio de la superficie del líquido, correspondiente al tanque no agitado, y esta elevación tiene que vencer la fuerza de la gravedad. Por tanto, hay que introducir la aceleración de la gravedad g como un factor en el análisis.

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Las distintas medidas lineales pueden convertirse todas en relaciones adimensionales, llamadas factores de forma, dividiendo cada uno de los términos por uno de ellos que se toma como base. El diámetro del rodete D_a , es una elección adecuada para esta medida de base, y los factores de forma se calculan dividiendo cada una de las restantes medidas por el valor de D_a , o D_r . Supongamos que los factores de forma, así definidos, se representan por $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$. El diámetro del rodete se toma así también como una medida del tamaño del equipo y se utiliza como una variable en el análisis, de la misma forma que el diámetro de la tubería en el análisis dimensional de la fricción en tuberías. Dos mezcladores que tienen las mismas proporciones geométricas, pero diferentes tamaños, tendrán idénticos factores de forma, pero diferirán en el valor de D . Los diseños que cumplen este requerimiento se dice que son geoméricamente semejantes, o bien, que poseen semejanza geométrica.

Cuando se ignoran temporalmente los factores de forma y se supone que el líquido es newtoniano, la potencia P es una función de las restantes variables, O sea

$$P = \Psi(n, D_a, g_c, \mu, g, \rho) \quad \text{Ec 2.41}$$

Aplicando el método del análisis dimensional se obtiene:

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \Psi\left(\frac{n D_a^2 \rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}\right) \quad \text{Ec 2.42}$$

Teniendo en cuenta los factores de forma, la Ecuación (9.14) puede escribirse así

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \Psi\left(\frac{n D_a^2 \rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}, S_1, S_2, \dots, S_n\right) \quad \text{Ec 2.43}$$

El primer grupo adimensional de la Ecuación (2.42), $\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho}$, es el número de potencia N_p . El segundo, $\frac{n D_a^2 \rho}{\mu}$ es el número de Reynolds N_{Re} ; el tercero $\frac{n^2 D_a}{g}$ es el número de Froude N_{Fr} . La ecuación (2.43), puede por tanto escribirse:

$$N_p = \Psi(N_{Re}, N_{Fr}, S_1, S_2, \dots, S_n) \quad \text{Ec 2.44}$$

Significado de los grupos adimensionales:

Los tres grupos adimensionales de la ecuación (2.42) pueden interpretarse de una forma sencilla. Consideremos el grupo $\frac{nD_a^2\rho}{\mu}$. Puesto que la velocidad del extremo del rodete u_2 es igual a $\pi D_a n$,

$$N_{Re} = \frac{nD_a^2\rho}{\mu} = \frac{(nD_a)D_a\rho}{\mu} * \frac{u_2 D_a \rho}{\mu} \quad \text{Ec 2.45}$$

y este grupo es proporcional al número de Reynolds calculado a partir del diámetro y de la velocidad periférica del rodete. Esta es la razón del nombre del grupo.

El número de potencia N_P es análogo a un factor de fricción o a un coeficiente de rozamiento. Es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del rodete y la fuerza inercial. La fuerza inercial, a su vez, está relacionada con el flujo de cantidad de movimiento correspondiente al movimiento global del fluido.

El número de Froude (N_{Fr}) es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Interviene en situaciones fluido dinámicas donde hay un movimiento de olas significativo sobre la superficie del líquido. Es especialmente importante en el diseño de barcos. Puesto que las fuerzas individuales están arbitrariamente definidas y varían mucho de un punto a otro del recipiente, sus valores numéricos locales no son significativos. Sin embargo, los valores de los grupos adimensionales para todo el sistema son importantes, ya que proporcionan magnitudes de correlación que conducen a ecuaciones empíricas mucho más sencillas que las basadas en la Ecuación (2.41). A continuación se consideran ecuaciones para el número de potencia que son ejemplos de tales correlaciones.

Correlaciones de potencia para rodetes específicos. Los distintos factores de forma de la Ecuación (2.44) dependen del tipo y disposición del equipo. Las

medidas necesarias para un tanque típico agitado con una turbina se muestran en la Figura (2.7); los correspondientes factores de forma para este mezclador son

$$S_1 = \frac{D_a}{D_t}; S_2 = \frac{E}{D_a}; S_3 = LID; S_4 = \frac{W}{D_a}; S_5 = \frac{J}{D_t} \text{ y } S_6 = \frac{H}{D_t}$$

Además, tienen que estar especificados el número de placas deflectoras y el número de palas del rodete. Si se utiliza una hélice, son importantes el paso y el número de palas.

- **Tanques con placas deflectoras.**

En la Figura (2.10) se representan curvas típicas con N_p vs N_{Re} para tanques con placas deflectoras, equipados con turbinas de seis placas planas localizadas centralmente. La curva A corresponde a palas verticales con $S_4 = 0,25$; la curva para un rodete similar pero con palas más estrechas ($S_4 = 0,125$). La curva C es para una turbina de palas y, por lo demás, similar a la correspondientes a la curva B. La curva D es para un tanque sin placas deflectoras.

La curva A de la Figura (2.11) corresponde a un rodete de tres palas instalado centralmente en un tanque con placas deflectoras. Las hélices y las turbinas con placas inclinadas presentan un consumo de potencia considerablemente menor que una turbina con placas verticales.

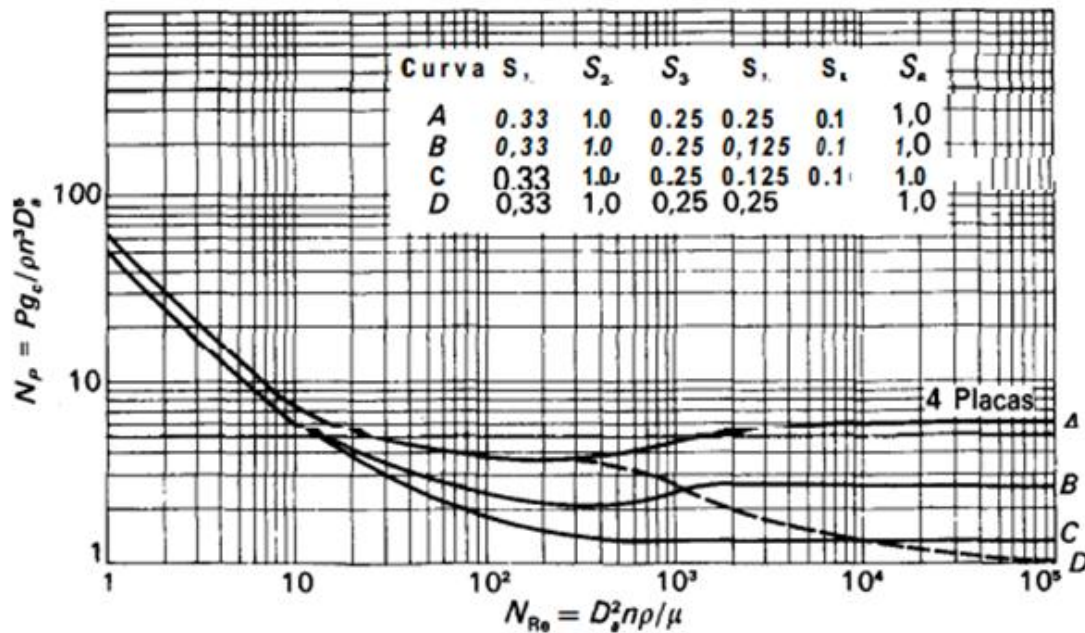


Figura 2.10 Numero de potencia N_p frente a N_{Re} para turbinas de seis palas. (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

Para la porción de trazos de la curva D, el valor de N_p que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por N_{Fr}^m .

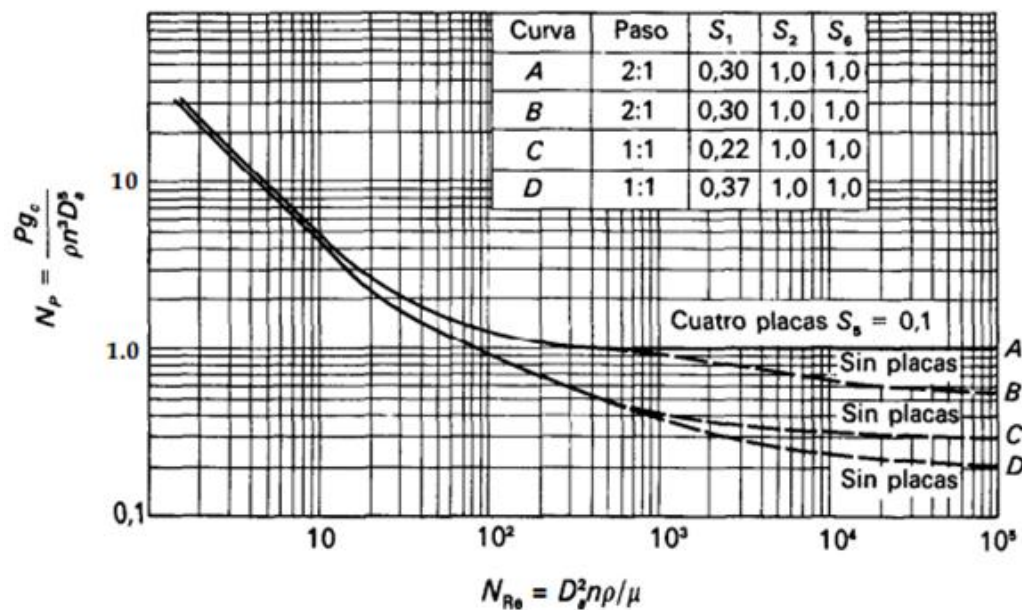


Figura 2.11 Numero de potencia N_p frente a N_{Re} para rodetes de tres palas (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

Para las porciones de trazos de las curvas B, C y D, el valor de N_p que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por N_{Fr}^m .

- **Tanque sin placas deflectoras.**

Para bajos números de Reynolds, inferiores a 300, las curvas para tanque con y sin placas deflectoras son idénticas. Sin embargo, las curvas divergen para números de Reynolds más elevados, tal como muestran la porción de trazos de la curva D de la Figura (2.10) y las curvas B, C y D de la Figura (2.12). En esta región de los números de Reynolds, que habitualmente se evita en la práctica cuando se utilizan tanques sin placas deflectoras, se forma un vórtice y tiene influencia el número de Froude. La Ecuación (2.44) se modifica entonces de esta forma.

$$\frac{N_p}{N_{Fr}^m} = \Psi(N_{Re}, S_1, S_2, \dots, S_n) \quad \text{Ec 2.46}$$

El exponente m de la Ecuación 2.17, para un conjunto dado de factores de forma, está empíricamente relacionado con el número de Reynolds por la ecuación:

$$m = \frac{a - \log_{10} N_{Re}}{b} \quad \text{Ec 2.47}$$

donde a y b son constantes. En la Tabla (2.5) se dan los valores de a y b para las curvas de las Figuras (2.11) y (2.12). Para utilizar las curvas de trazos de las Figuras (2.11) y (2.12) hay que corregir el número de potencia N_p , leído de la escala de ordenadas, multiplicándolo por N_{Fr}^m

Tabla 2.5 Constantes a y b de la ecuación 2.46 (Fuente: McCabe et. al.; 1998).			
Figura	Línea	a	b
2.10	D	1,0	40,0
2.11	B	1,7	18,0
2.11	C	0	18,0
2.11	D	2,3	18,0

- **Efecto de la geometría del sistema.**

Los efectos de los factores de forma $S_1, S_2, \dots, S_n$, sobre N_p son unas veces pequeños y otras muy grandes. A veces, dos o más factores están relacionados entre sí; por ejemplo, el efecto de variar S_1 puede depender del valor de S_2 o S_3 . Con una turbina de palas planas que opera a elevados números de Reynolds en un tanque con placas deflectoras, los efectos de modificarla geometría del sistema pueden resumirse como sigue:

- Al disminuir S_1 relación entre el diámetro del rodete y el diámetro del tanque, N_p aumenta cuando las placas deflectoras son pocas y estrechas, mientras que N_p disminuye cuando las placas son muchas y anchas. Por tanto, los factores de forma S_1 y S_5 se están interrelacionados. Con cuatro placas deflectoras y S_5 , igual a 11-12, como ocurre frecuentemente en la práctica industrial, una modificación de S_1 , casi no tiene efecto sobre N_p .
- El efecto de modificar S_2 , la holgura, depende del diseño de la turbina. Al aumentar S_2 aumenta N_p para una turbina de disco. En una turbina de palas inclinadas, al aumentar S_2 disminuye considerablemente N_p , mientras que para una turbina de placas rectas N_p disminuye ligeramente.
- Con una turbina abierta de palas rectas, el efecto que produce la variación de S_4 , la relación entre la anchura de las palas y el diámetro del reactor, depende del número de palas. Para una turbina de seis palas, N_p es directamente proporcional a S_4 , mientras que para una turbina de cuatro palas N_p aumenta con S_4 .
- Dos turbinas de palas rectas instaladas sobre el mismo eje consumen del orden de 1,9 veces la potencia de una sola turbina, siempre que el espaciado entre los dos rodets sea al menos igual al diámetro del rodete. Dos turbinas poco separadas entre sí pueden consumir hasta 2,4 veces la potencia de una sola turbina.
- La forma del tanque tiene relativamente poca influencia sobre N_p . La potencia consumida en un tanque cilíndrico horizontal, con placas deflectoras o no, o en un tanque vertical de sección cuadrada provisto de placas deflectoras es la

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

misma que en un tanque cilíndrico vertical. En un tanque de sección cuadrada sin placas deflectoras, el número de potencia es aproximadamente 0,75 veces la de un tanque cilíndrico con placas deflectoras. Los modelos de circulación están, por supuesto, afectados por la forma del tanque, pero el consumo de potencia no.

Calculo del consumo de potencia. La potencia comunicada al líquido se calcula combinando la Ecuación (2.46) y la definición de N_P para dar

$$P = \frac{N_P n^3 D_a^5 \rho}{g_c} \quad \text{Ec 2.48}$$

Para bajos números de Reynolds las líneas de N_P vs. N_{Re} coinciden para un tanque con y sin placas deflectoras, y la pendiente de la línea en coordenadas logarítmicas es 1. En este intervalo el flujo es laminar, la densidad no influye y la Ecuación 2.44 se transforma en

$$N_P N_{Re} = \frac{P g_c}{n^2 D_a^3 \mu} = K_L = \Psi_L(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad \text{Ec 2.49}$$

De donde

$$P = \frac{K_L n^2 D_a^3 \mu}{g_c} \quad \text{Ec 2.50}$$

Las Ecuaciones (2.52) y (2.53) pueden utilizarse para valores de N_{Re} menores que 10. En tanques con placas deflectoras, para números de Reynolds superiores a aproximadamente 10 000, el número de potencia es independiente del número de Reynolds y la viscosidad ya no influye. En este intervalo el flujo es totalmente turbulento y la Ecuación (2.49) se transforma en:

$$N_P = K_T = \Psi_T(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad \text{Ec 2.51}$$

De donde

$$P = \frac{K_T n^3 D_a^5}{g_c} \quad \text{Ec 2.52}$$

En la siguiente tabla se muestran valores de K_T y K_L para distintos tipos de rodets y tanques.

Tabla 2.6 Valores de K_T y K_L para distintos tipos de rodets y tanques (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).		
Tipo de Rodete.	K_L	K_T
Hélice paso cuadrado, tres palas.	41,0	0.32
Paso de 2, tres palas.	43,5	1,00
Turbina, seis palas planas.	71,0	6,30
Seis palas curvas.	70,0	4,80
Turbina de ventilador, seis palas.	70,0	1,65
Palas planas, dos palas.	36,5	1,70
Turbina cerrada, seis palas curvas.	97,2	1,08
Con estator, sin deflectores.	172,5	1,12

- **Operación de mezclado.**

La operación de mezcla es mucho más difícil de estudiar y describir que la agitación. Los tipos de flujo de la velocidad de un líquido en un tanque agitado, aunque complejos, son bastante definidos y reproducibles. El consumo de potencia se mide fácilmente. Los resultados de los estudios de mezcla, sin embargo, son difíciles de reproducir y dependen en gran medida de cómo se defina la «mezcla» por el experimentador. Con frecuencia el criterio de mezcla es visual, como ocurre en la utilización de fenómenos de interferencia para seguir la mezcla de gases en una conducción 23 o en el cambio de color de un indicador ácido-base, para la determinación del grado de mezcla de líquidos. Otros criterios que han sido utilizados son, la velocidad de caída de las fluctuaciones de concentración que tienen lugar cuando un fluido contaminante se inyecta en la corriente del fluido; la variación de composición de pequeñas muestras tomadas al azar, en distintos puntos de la mezcla; la velocidad de transferencia de un soluto

de una fase líquida a otra; y en mezclas sólido-líquido, la uniformidad que se observa visualmente en la suspensión.

- **Mezcla de líquidos miscibles.**

La mezcla de líquidos miscibles en un tanque es un proceso rápido si el régimen de flujo es turbulento. El rodete produce una corriente de alta velocidad y el fluido probablemente se mezcla con rapidez en la región próxima al rodete debido a la intensa turbulencia. A medida que la corriente se modera, arrastrando algo de líquido y fluyendo a lo largo de la pared, hay algo de mezcla radial debido a que los grandes remolinos se rompen en otros más pequeños, pero probablemente hay poca mezcla en la dirección de flujo. El líquido completa un lazo de circulación y retorna a la entrada del rodete, donde ocurre de nuevo una vigorosa mezcla. Los cálculos basados en este modelo ponen de manifiesto que debería alcanzarse una mezcla esencialmente completa (99 por 100) si el contenido del tanque circulase alrededor de 5 minutos. El tiempo de mezcla puede, por tanto, predecirse a partir de las correlaciones para el flujo total producido por distintos rodetes. Para una turbina estándar de seis palas.

$$q = 0.92nD_a^3 \left(\frac{D_t}{D_a} \right) \quad \text{Ec 2.53}$$

$$t_T \approx \frac{5V}{4} = 5 \frac{\pi D_t^2 H 1}{4 \cdot 0.92nD_a^3 D} \quad \text{O bien} \quad \text{Ec 2.54}$$

$$nt_T \left(\frac{D_a}{D_t} \right)^2 \left(\frac{D_t}{H} \right) = cte = 4.3 \quad \text{Ec 2.55}$$

Para un tanque y agitador dados, o para sistemas geoméricamente semejantes, el tiempo de mezcla predicho es inversamente proporcional a la velocidad del agitador, lo cual se ha confirmado mediante estudios experimentales. En la figura 2.13 se presentan los resultados para distintos sistemas, representando nt_T frente a N_{Re} . Para una turbina con $\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$ y $\frac{D_T}{H} = 1$ el valor de nt_T es 36 para $N_{Re} > 10^3$ y el valor predicho es de 38.

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Los tiempos de mezcla son apreciablemente mayores cuando los números de Reynolds están comprendidos en el intervalo de 10 a 1000, si bien el consumo de potencia no es muy diferente que el correspondiente al intervalo turbulento. Tal como muestra la Figura (2.13), el tiempo de mezcla utilizando turbinas con placas deflectoras varía aproximadamente con la potencia $-1,5$ de la velocidad del agitador en esta región, y después aumenta más bruscamente a medida que se reduce todavía más el número de Reynolds. En la Figura (2.14) se muestra una correlación general propuesta por Norwood y Metzner. Su factor del tiempo de mezcla puede reordenarse para ver cómo difiere de la predicción para el régimen turbulento de la Ecuación (2.55).

$$f_t = \frac{t_T (n D_a^2)^{2/3} g^{1/3} D_a^{1/2}}{H^{1/2} D_t^{3/2}} = n t_T \left(\frac{D_a}{D_t} \right)^2 \left(\frac{D_t}{H} \right)^{1/2} \left(\frac{g}{n^2 D_a} \right)^{1/6} \quad \text{Ec 2.56}$$

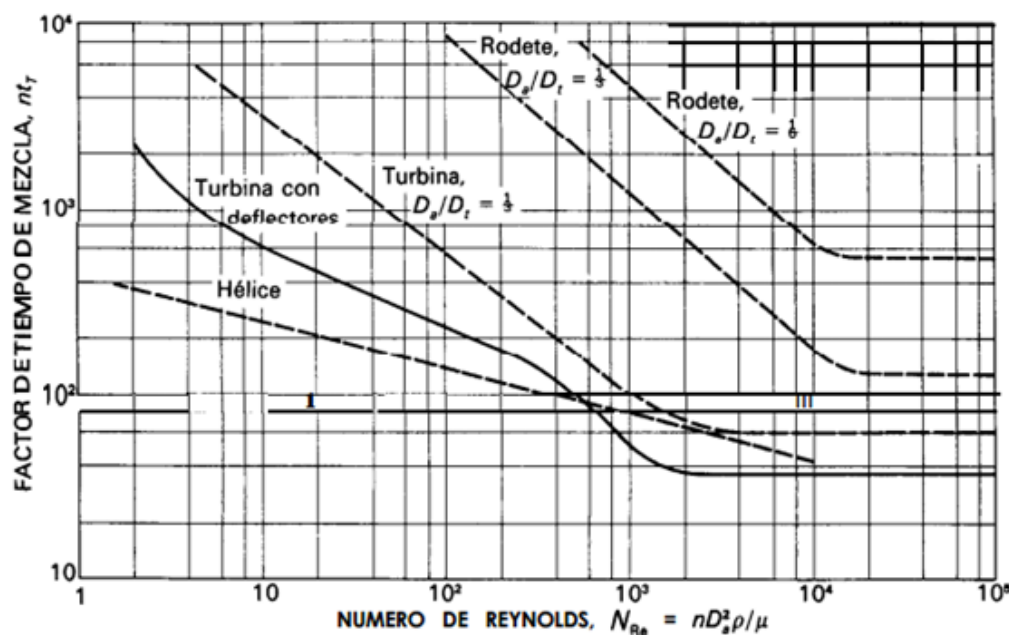


Figura 2.12 Tiempos de mezcla en tanques agitados (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

Las líneas de trazos son para tanques sin placas deflectoras, la línea continua es para un tanque con placas deflectoras.

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

La presencia del número de Froude en la Ecuación (2.56) implica que hay algo de efecto de vórtice, que puede existir para bajos números de Reynolds, pero es dudoso si este término debe de incluirse o no para un tanque con placas deflectoras a elevados números de Reynolds. Para mezclar ciertos tipos de líquidos pueden ser preferibles otros tipos de rodets. Un agitador de cinta helicoidal da lugar a tiempos de mezcla mucho más cortos para el mismo consumo de potencia con líquidos muy viscosos, pero es más lento que la turbina para líquidos poco viscosos. Los tiempos de mezcla con hélices son altos en comparación con las turbinas, pero el consumo de potencia es más de un orden de magnitud inferior para la misma velocidad del agitador. Los datos de la Figura (2.13) están tomados de una correlación general de Fox y Gex, cuya función del tiempo de mezcla difiere tanto de la Ecuación (2.55) como de la (2.56):

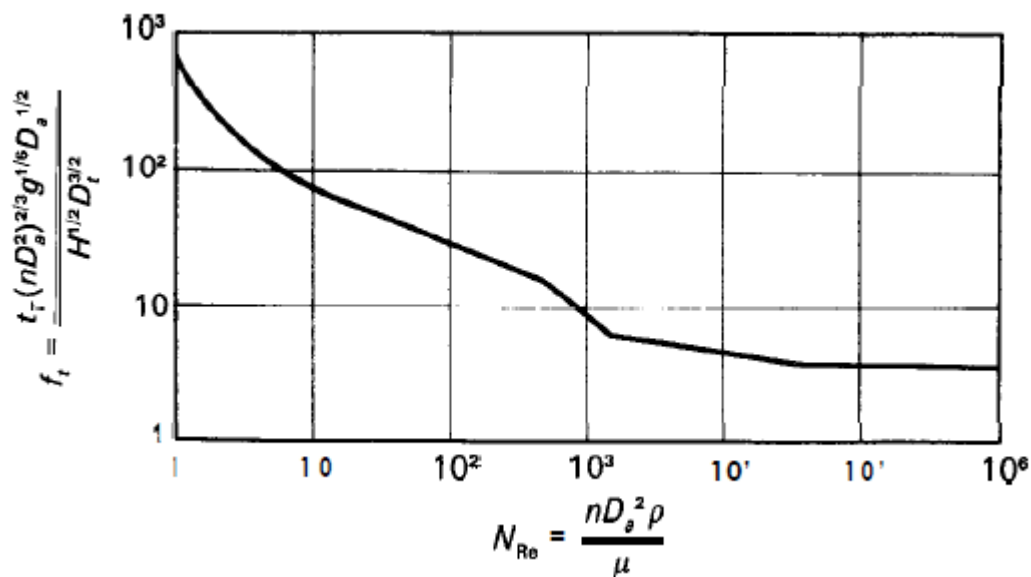


Figura 2.13 Correlación de tiempos de mezcla para líquidos miscibles en un tanque con placas deflectoras agitado con una turbina (Fuente: Mc Cabe et. al.; 1998).

$$f'_t = \frac{t_T (n D_a^2)^{2/3} g^{1/6}}{H^{1/2} D_t^{3/2}} = n t_T \left(\frac{D_a}{D_t}\right)^{3/2} \left(\frac{D_t}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{g}{n^2 D_a}\right)^{1/6} \quad \text{Ec 2.57}$$

Sus datos fueron para $D_a/D_t=0,07$ hasta $0,18$; la extrapolación para $D_a/D_t = 1/3$ en la Figura (2.13) es algo incierta. En un líquido pseudoplástico, los tiempos de mezcla, para números de Reynolds inferiores a aproximadamente 1000, son mucho mayores que en líquidos newtonianos para las mismas cantidades del

rodete. En las regiones de bajo esfuerzo constante, lejos del rodete, la viscosidad aparente del líquido pseudoplástico es mayor que en las proximidades del mismo. En estas regiones remotas los remolinos turbulentos se amortiguan rápidamente y con frecuencia se forman zonas de líquido casi estancado. Ambos efectos conducen a mal mezclado y largos tiempos de mezcla. A elevados números de Reynolds hay poca diferencia entre las características de mezcla de líquidos newtonianos y pseudoplástico. Cuando se dispersan en líquido burbujas de gas, gotas de líquido o partículas sólidas, aumenta el tiempo de mezcla para la fase continua, aun cuando la comparación se realice para la misma entrada de potencia específica. El efecto aumenta con la viscosidad, y para líquidos viscosos el tiempo de mezcla puede aumentar hasta el doble del valor normal cuando la retención de gas es solamente del 10 por 100.

2.3 Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores.

(Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

- **Variables que pueden afectar al sistema:**

Potencia para accionar el agitador, P

Velocidad de rotación del rodete, n

Diámetro del rodete, D_a .

Anchura de las paletas, J .

Altura del agitador sobre el fondo, E

Densidad del líquido, ρ

Viscosidad del líquido, μ .

Altura del nivel del líquido, H

Diámetro del depósito, D_t

Aceleración de la gravedad, g

Las distintas medidas lineales pueden convertirse todas en relaciones adimensionales, llamadas factores de forma, dividiendo cada uno de los términos por uno de ellos que se toma como base. El diámetro del rodete D_a es una elección adecuada para esta medida de base, y los factores de forma se calculan dividiendo cada una de las restantes medida por

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

el valor de D_a o D_t Supongamos que los factores de forma, así definidos se representan por $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$. Cuando se ignora temporalmente los factores de forma y se supone que el líquido es newtoniano, la potencia P es una función de las restantes variables, o sea:

$$P = \Psi(n, D_a, \mu, g, \rho) \quad \text{Ec 2.58}$$

$$\frac{P}{n^3 D_a^5 \rho} = \Psi\left(\frac{n D_a^5 \rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}\right) \quad \text{Ec 2.59}$$

Teniendo en cuenta los factores de forma, la ecuación anterior puede escribirse así:

$$\frac{P}{n^3 D_a^5 \rho} = \Psi\left(\frac{n D_a^5 \rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}, S_1, S_2, \dots, S_n\right) \quad \text{Ec 2.60}$$

El primer grupo adimensional $P / n^3 D_a^5 \rho$, es el número de potencia N_p . El segundo $n D_a^5 \rho / \mu$ es el número de Reynolds N_{Re} . El tercero, $n^2 D_a / g$, es el número de Froude (N_{Fr})

Significado de los grupos. Adimensionales: Los tres grupos adimensionales pueden interpretarse de una forma sencilla. Consideremos el grupo $n D_a^2 \rho / \mu$ Puesto que la velocidad del extremo del rodete u_2 es igual a $D_a n$.

$$N_{Re} = \frac{n D_a^2 \rho}{P} = \frac{(n D_a) D_a \rho}{\mu} = \frac{u_2 D_a \rho}{\mu} \quad \text{Ec 2.61}$$

Este grupo es proporcional al número de Reynolds calculado a partir del diámetro y de la velocidad periférica del rodete. Esta es la razón del nombre del grupo.

El número de potencia N_p es análogo a un factor de fricción o a un coeficiente de rozamiento. Es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del rodete y la fuerza inercial. La fuerza inercial, a su vez, está relacionada con el flujo de cantidad de movimiento correspondiente al movimiento global del fluido.

El número de Froude N_{Fr} , es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Interviene en situaciones fluido dinámicas donde hay un movimiento de olas significativo sobre la superficie del líquido. Es especialmente importante en el diseño de barcos.

A continuación se realizará un análisis experimental:

- **Selección del modelo a construirse para el Análisis Experimental.**

En la refinación de azúcar en los ingenios, se utiliza los agitadores de tipo rotativos, ya que son los adecuados para el tratamiento del licor derretido, el mismo que consiste en un tanque cilíndrico en donde se colocará el eje en cuyo extremo estará el rodete, el tanque estará provisto de placas deflectoras, el eje será accionado por un motor eléctrico acoplado a un sistema de banda polea, la parte superior del recipiente estará abierta al aire. Los rodetes a utilizar son: hélice de 3 - 4 palas y turbina de 4 paletas. La densidad del líquido es de 981,95 Kg / m³ y su viscosidad es de 1,4 poise a 37°C.

- **Análisis Experimental.**

El experimento se realiza en un tanque abierto al aire, equipado con 4 placas deflectoras móviles y espaciadas 90. La agitación es provista por un motor eléctrico, conectado a una transmisión polea-banda. La velocidad angular es medida por un tacómetro. Para realizar el experimento es necesario usar un medidor de torque que consta de un transmisor y de un amplificador. El eje del rodete es equipado con dos strain gages (galgas extensométricas). Los strain gages son conectados por medio de alambres al transmisor, el cual envía la señal al amplificador en donde se visualiza el esfuerzo medido por los strain gages. El torque es proporcional a esta medición.

La potencia consumida P está dada por ΩT donde $\Omega = 2 \pi n$ entonces $P = 2\pi n K \Phi$ donde Φ es la medición que entrega el amplificador en voltios y K es la constante de calibración.

- **Establecimiento de los parámetros variables para determinar las curvas.**

Los parámetros variables son los siguientes: los rodetes, placas deflectoras y el número de revoluciones.

Rodetes:

- Hélice, paso cuadrado, tres palas.
- Hélice paso de 2, tres palas.
- Hélice, paso cuadrado, 4 palas.

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

- Turbina, 4 palas planas.

Placas deflectoras

- Con cuatro placas deflectoras.
- Sin placas deflectoras.

Número de revoluciones:

- Intervalos de 100rpm en 100 r.p.m.

- **Diseño del equipo experimental.**

El diseñador de un tanque agitado dispone de un gran número, que no es habitual, de elecciones sobre el tipo y localización del agitador o rodete, las proporciones del tanque, el número y dimensiones de las placas deflectoras, etc. Cada una de estas decisiones afecta a la velocidad de circulación del líquido, los modelos de velocidad y el consumo de potencia.

Para realizar este experimento, se escogió las siguientes proporciones:

Tabla 2.7 Proporciones del equipo de agitación. (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).						
Tipo de Rodete	D_t/D_a	H/D_t	E/D_a	J/D_t	L/D_a	W/D_a
Hélice, paso cuadrado, tres palas.	2,4	1	1	0,083		
Hélice, paso cuadrado, 4 palas.	2,4	1	1	0,083		
Hélice, paso 2, tres palas.	3	1	1,25	0,083		
Turbina, cuatro palas planas	2,4	1	1	0,083	0,25	0,2

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

El Diámetro del tanque es de 0.3048 m. El Diámetro de la hélice de paso 2, tres palas es de 0.1016 y de los demás rodets es de 0.127 m. La altura del nivel del líquido es 0.3048 m. El número de placas deflectoras es de cuatro y su ancho de 0.0254 m.

Para la turbina el ancho de las palas es 0.032 m y la longitud es 0.0254 m. El sistema de transmisión banda polea se diseña de acuerdo al espacio existente entre el motor y el árbol, el diámetro de las poleas es el mismo ya que se necesita una transmisión con una relación 1 a 1. El sistema de transmisión banda polea es un conjunto que puede desmontarse fácilmente del tanque de agitación, el árbol está sostenido por dos chumaceras sujetas a una carcasa, la polea del árbol está conectada a la polea del motor por una banda tipo A26, y el motor está asentado en una base que a su vez se sujeta a la carcasa a través de un sistema de bisagra que sirve de templador de la banda.

El motor es de 1700 r.p.m. de 0.37 kW, y el árbol es de 19 mm de diámetro, es de acero de transmisión SAE 1018. El tanque de agitación tiene una altura de $1.25 D_t$, en la parte inferior de la pared tiene una válvula para evacuar el líquido, y está sostenido por cuatro pilares.

- **Determinar las curvas de los resultados experimentales.**

La calibración del equipo medidor de torque: El nombre de este equipo es Tete-Trak 3000 que consta de un transmisor F-3000 que convierte la señal obtenida de los strain gages en una señal de voltaje.

En el eje en donde se va a medir el torque se coloca los strain gages, se suelda los cables y estos se conectan al transmisor con su respectiva batería de 9 voltios. La parte donde se encuentra los strain gages se protege con una cinta adhesiva la batería y el transmisor se aseguran al eje del agitador por medio de una cinta adhesiva para que giren conjuntamente con el eje.

Para la calibración del equipo es necesario llevar el eje a una prensa y someterlo a torsión por medio de una palanca cuyo extremo se colocan pesos, de esta manera se aplica una fuerza que multiplicada por la longitud de la palanca me da el torque y veo la señal de salida de los strain gages en el amplificador, obteniendo para un determinado torque su respectiva medición en voltios, estos valores están en la siguiente tabla y están graficados en la figura (2.16), y aplicando estimación lineal obtengo la respectiva constante de calibración cuyo

valor es de $K = 41$, esta calibración se realizó con la máxima ganancia del amplificador. Una vez realizado esto se coloca el eje en su respectivo lugar de trabajo.

Tabla 2.8 Valores de Torque en voltios y Nm (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002.)

Torque (voltios)	Torque (Nm)
0,018	0,54
0,028	1,07
0,04	1,61
0,052	2,15
0,065	2,69
0,077	3,23

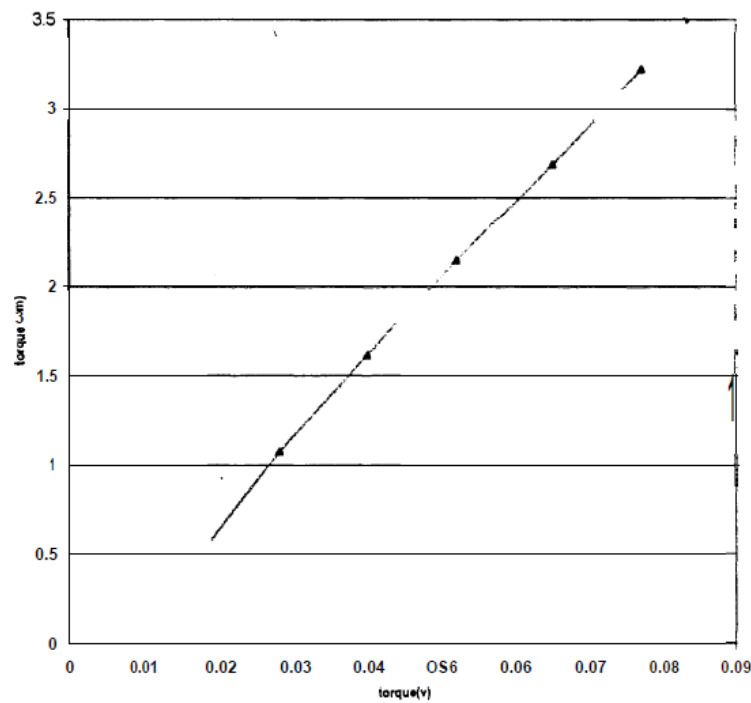


Figura 2.16 Curva de Calibración (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002.)

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Conexión del variador de frecuencia al motor: El variador de frecuencia como su nombre lo indica es un equipo que se conecta al motor para variar su frecuencia y a su vez obtener diferentes números de revoluciones y así poder variar el Número de Reynolds.

Pruebas experimentales: Estas pruebas se realizaron en un tanque con y sin placas deflectoras, variando las revoluciones por minuto de cien en cien, y para los rodets de la tabla (2.7).

La prueba consiste en poder determinar el torque y con las r.p.m. determinar la potencia consumida por el agitador y así poder realizar la gráfica de N_P vs N_{Re} . Las pruebas primero se realizaron en el tanque con placas deflectoras, con todos los rodets y luego sin placas deflectoras.

Con el tacómetro en el eje se leyó el número de rpm., se ajusta a las revoluciones que se desea variando la frecuencia del motor; luego se anotó algunas mediciones que se leen en el amplificador, puesto que el rango de la medición es variable.

Para cada prueba en el tanque con placas deflectoras se anoto el número de revoluciones donde hay una buena intensidad de agitación.

Resultados experimentales: Estos resultados se muestran en las tablas (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), (2.13), (2.14), (2.15), (2.16). Las gráficas de N_P vs N_{Re} se muestran en las figuras 2.17, (2.18), (2.19), (2.20).

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Tabla 2.9 Resultado hélice de paso cuadrado de tres palas con placas deflectoras. (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002)

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
100	1.67	0.003	0.12	1.3	188.6	8.6
200	3.33	0.009	0.37	7.7	377.1	6.4
300	5.00	0.016	0.66	20.6	565.7	5.1
400	6.67	0.025	1.03	42.9	754.2	4.5
500	8.33	0.032	1.31	68.7	942.8	3.7
600	10.0	0.040	1.64	103.0	1131.3	3.2
700	11.67	0.051	2.09	153.3	1319.9	3.0
800	13.33	0.060	2.46	206.1	1508.4	2.7
900	15.00	0.067	2.75	258.9	1697.0	2.4
1000	16.67	0.071	2.91	304.8	1885.5	0

Tabla 2.10 Resultado hélice de paso cuadrado de tres palas sin placas deflectoras. (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002)

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
200	3.3	0.009	0.369	7.7	377.1	6.4
300	5.0	0.015	0.615	19.3	565.7	4.8
400	6.7	0.023	0.943	39.5	754.2	4.1
500	8.3	0.030	1.230	64.4	942.8	3.4
600	10.0	0.036	1.476	92.7	1131.3	2.9
700	11.7	0.039	1.599	117.2	1319.9	2.3
800	13.3	0.045	1.845	154.6	1508.4	2.0
900	15.0	0.050	2.050	193.2	1697.0	1.8
1000	16.7	0.052	2.132	223.3	1885.5	1.5

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Tabla 2.11 Resultado experimental turbina de cuatro palas planas con deflectores (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
100	1.67	0.005	0.21	2.1	188.6	14
200	3.33	0.012	0.49	10.3	377.1	8.6
300	5	0.023	0.94	29.6	565.7	7.3
400	6.67	0.040	1.64	68.7	754.2	7.1
500	8.33	0.067	2.75	143.8	942.8	7.7
600	10	0.099	4.06	254.9	1131.3	7.9
700	11.7	0.140	5.74	420.6	1319.9	8.2

Tabla 2.12 Resultado experimental turbina de cuatro palas planas sin deflectores (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
100	1.67	0.005	0.21	2.1	188.6	14
200	3.33	0.014	0.51	12.0	377.1	10
300	5	0.023	0.94	29.6	565.7	7.3
400	6.67	0.035	1.44	60.1	754.2	6.3
500	8.33	0.048	1.97	103.0	942.8	5.5
600	10	0.060	2.46	154.5	1131.3	4.8
700	11.7	0.074	3.03	222.3	1319.9	43

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Tabla 2.13 Resultado experimental hélice de paso cuadrado, cuatro palas, con deflectores
(Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
200	3.33	0.018	0.74	15.5	377.1	13
300	5	0.023	0.94	29.6	565.7	7.3
400	6.67	0.032	1.31	55.0	754.2	5.7
500	8.33	0.042	1.72	90.2	942.8	4.8
600	10	0.053	2.17	136.5	1131.3	4.2
700	11.7	0.065	2.67	195.4	1319.9	3.8
800	13.3	0.075	3.08	257.6	1508.4	3.3
900	15	0.085	3.49	328.5	1697.0	3
1000	16.7	0.095	3.9	407.9	1885.5	2.7

Tabla 2.14 Resultado experimental, hélice de paso cuadrado, cuatro palas sin deflectores
(Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
200	3.33	0.018	0.74	15.5	377.1	13
300	5	0.023	0.94	29.6	565.7	7.3
400	6.67	0.030	1.23	51.5	754.2	5.4
500	8.33	0.040	1.64	85.9	942.8	4.6
600	10	0.048	1.97	123.7	1131.3	3.8
700	11.7	0.055	2.26	165.3	1319.9	3.2
800	13.3	0.065	2.67	223.3	1508.4	2.9
900	15	0.075	3.08	289.8	1697.0	2.6
1000	16.7	0.080	3.28	343.5	1885.5	2.3

Capítulo II: Metodologías de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

Tabla 2.15 Resultado experimental hélice de paso 2, tres palas con placas deflectoras (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).						
n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
200	3.33	0.004	0.16	3.4	241.3	8.7
300	5	0.007	0.29	9.0	362.0	6.8
400	6.67	0.011	0.45	18.9	482.7	6
500	8.33	0.016	0.66	34.3	603.3	5.6
600	10	0.020	0.82	51.5	724.0	4.8
700	11.7	0.026	1.07	78.1	844.7	4.6
800	13.3	0.032	1.31	109.9	965.3	4.4
900	15	0.039	1.6	150.6	1086.0	4.2
1000	16.7	0.044	1.8	188.8	1206.7	3.8
1500	25	0.080	3.28	515.0	1810.0	3.1

Tabla 2.16 Resultado experimental, hélice de paso 2, tres palas sin deflectores (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).						
n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	N _{Re}	N _P
200	3.33	0.004	0.16	3.4	241.3	8.7
300	5	0.007	0.29	9.0	362.0	6.8
400	6.67	0.011	0.45	18.9	482.7	6
500	8.33	0.015	0.62	32.2	603.3	5.2
600	10	0.019	0.78	48.9	724.0	4.6
700	11.7	0.024	0.98	72.1	844.7	4.3
800	13.3	0.028	1.15	96.2	965.3	3.8
900	15	0.033	1.35	127.5	1086.0	3.6
1000	16.7	0.038	1.56	163.2	1206.7	3.3
1500	25	0.07	2.87	450.8	1810.0	2.7

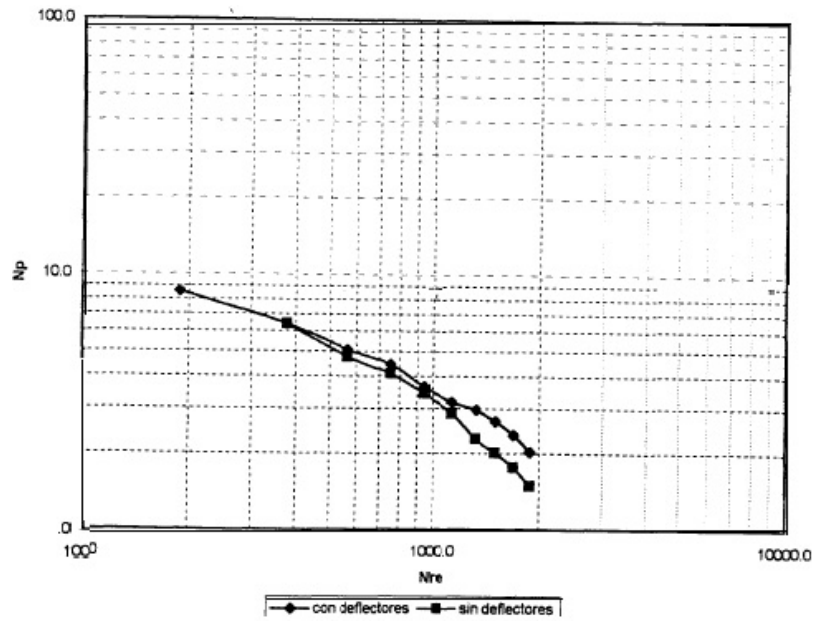


Figura 2.17 N_p v/s N_{Re} , Hélice, paso cuadrado, tres palas (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

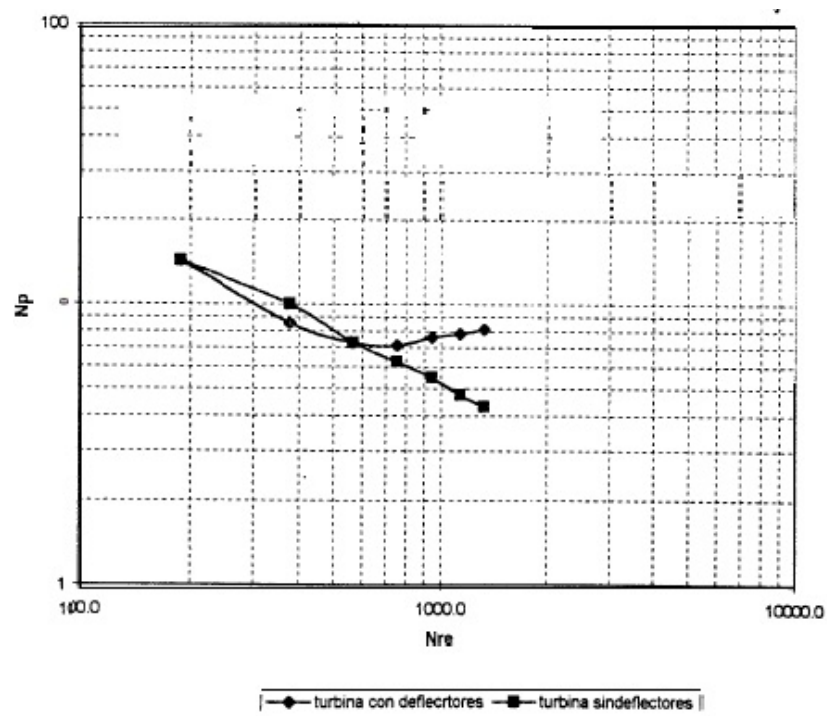


Figura 2.18 N_p v/s N_{Re} , Turbina de cuatro palas planas (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

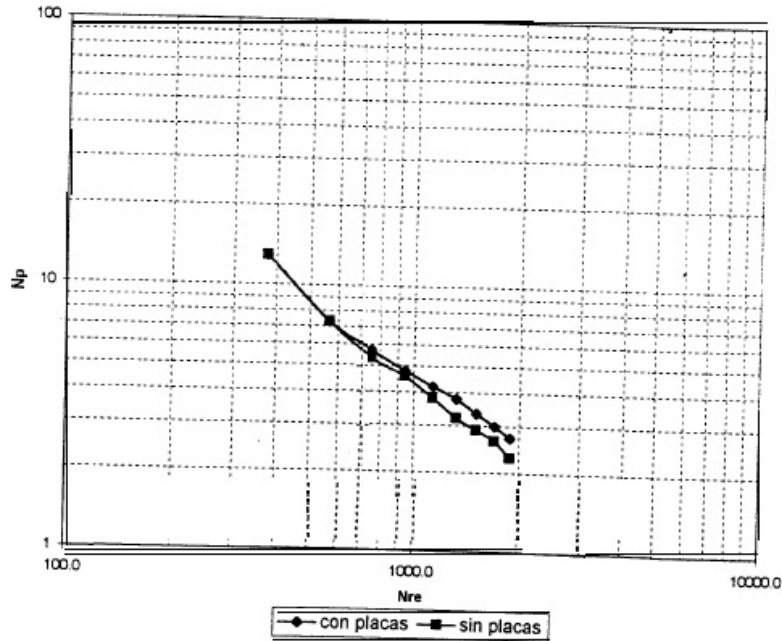


Figura 2.19 N_p v/s N_{Re} , Hélice de paso cuadrado, cuatro palas (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

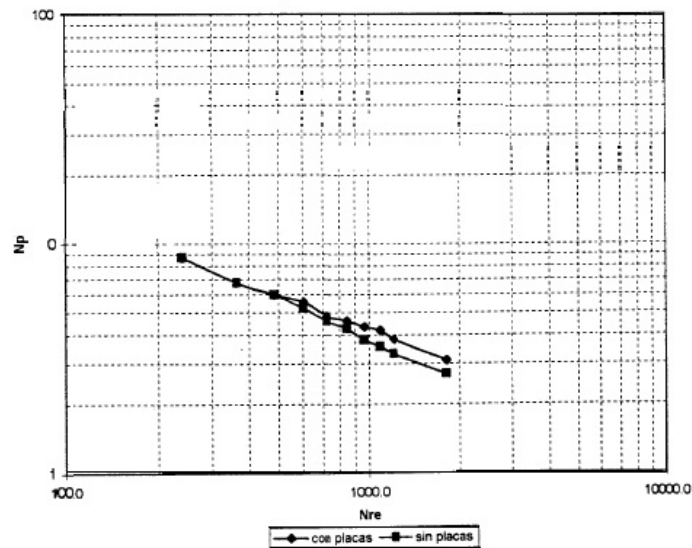


Figura 2.20 N_p v/s N_{Re} , Hélice de paso dos, tres palas (Fuente: Tesis de Grado Wilson Geovanny Pesantez Molina, 2002).

2.4 Propuesta de variante de diseño para Agitadores de Fluidos Industriales en tanques de recirculación (Ing. Roger J. Medina Olivo 1, Dr. C. Rafael Pérez Pupo).

Hay diferentes propósitos para agitar líquidos y éstos dependen directamente del objetivo del proceso en sí, los que pudieran ser: mezcla de dos líquidos miscibles (por ejemplo: alcohol y agua), dispersión de partículas finas en un líquido (tanque de recirculación), dispersión de dos fases no miscibles (grasa en la leche), dispersar un gas en un líquido mediante la formación de pequeñas burbujas, entre otros. Tanto la agitación como el mezclado, se lleva a cabo en un tanque donde va a ocurrir la homogeneización o dispersión de las sustancias o líquidos, y debe de poseer las dimensiones necesarias para poderle proveer un tiempo de residencia adecuado. De allí, que resulte conveniente la selección adecuada de impulsores o agitadores con el propósito de promover la agitación; en este caso SIDOR, utiliza un agitador bipala inclinadas (45°) conformado por cuatro series de brazos montados sobre dos ejes verticales que se acoplan y tienen diferentes longitudes; cada serie lleva dos paletas, dos de estas se ubican a 0,465 metros del fondo del tanque y las restantes a 2,120 metros de las primeras, las cuales se mantienen en movimiento gracias a la energía suministrada por un motor eléctrico. Con respecto al tanque utilizado, este posee forma de cono truncado con diámetros menor y mayor que miden 6240 mm y 11200 mm respectivamente, diseñado para que el fluido alcance el nivel máximo de 7120 mm de altura.

En el estudio llevado a cabo por Ramasubramanian et al. [7], se efectuó un análisis completo en 3D del tanque de mezclado, con refuerzos y el impulsor a través de la dinámica fluido computacional, empleándose el software FLUENT. La geometría de la turbina fue modelada con precisión mediante la interfaz de usuario Mixim. Se observó que las áreas de menor energía cinética turbulenta se encuentran en las esquinas detrás de los deflectores en el tanque, estos son puntos de estancamiento. Los deflectores instalados efectivamente romper el vórtice central grande, sin deflector se observa que en los tanques de mezcla el flujo de recirculación es dominante. Remolinos locales se formaron en la

estela(detrás del deflector, respecto a la dirección de flujo de fluido) de cada deflector. Estos puntos están cerca de los puntos de estancamiento detrás de los deflectores. Así, es posible diseñar la geometría del deflector para obtener una óptima mezcla y dispersión, mientras que minimiza la formación de cuerda.

Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT.

Caso de una turbina Rushton Martínez [4], aborda el estudio de uno de los tres tipos de agitadores que se emplean en la actualidad para llevar a cabo procesos de agitación y mezcla, el trabajo se centra especialmente en un tipo concreto de impulsor radial, la denominada turbina Rushton. Durante la investigación se utilizó un código comercial de CFD (FLUENT) para la simulación del flujo generado por turbinas radiales dentro de recipientes de agitación. Se incluye, además una breve explicación de las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de los fluidos, así como la mención de algunos modelos, métodos y estrategias que FLUENT tiene implementados para predecir los efectos que produce la turbulencia. De igual forma, se presenta la revisión de los diferentes métodos que utiliza FLUENT para simular la agitación. Destacando que existen tres metodologías, las dos que más se parecen entre ellas se usan cuando se quiere simular en estacionario y la última, la que se diferencia más de las otras dos, en transitorio. Así pues, también se comentan dos de estos métodos, en concreto el “Multiple Reference Frame” (MRF) y el “Sliding Mesh” (SM). En ese orden de ideas, se indica que se realizaron muchas simulaciones para determinar cómo se ven afectados algunos de los parámetros básicos de agitación: número de potencia (NP) y número de caudal (NQ), entre otros. Esto cuando se varían parámetros geométricos tanto de la misma turbina como del recipiente en el que se encuentra ésta. Además se incluye en pequeño estudio de transferencia de calor para ver cuál es la relación que hay entre la conducción de calor, que se produce cuando hay un gradiente de temperatura entre la pared del tanque y el fluido, y la velocidad de agitación en régimen altamente turbulento.

Bosch [6], aplicó la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con la idea principal de evaluar el comportamiento que presenta un fluido cuando es sometido a un movimiento rotativo impulsado por un agitador en un recipiente, según unos determinados requisitos de diseño. Se considera, que un diseño preciso de los sistemas de agitación implica un conocimiento más exacto de las características de caudal de descarga de impulsor. Además se requiere un conocimiento de las curvas de número de potencia para factores de forma diversos para poder seleccionar el motor. Para llevar a cabo el proyecto, se utilizó el programa ANSYS / CFX lográndose obtener la simulación de elementos rotativos. El cálculo fluidodinámico fue realizado basándose en el número de Reynolds, en un intervalo que irá desde 20 hasta 200.000. En este intervalo se obtuvieron las curvas de número de caudal y número de potencia, además de otros parámetros característicos de sistemas agitadores como son las eficiencias y los tiempos de mezcla. El procedimiento seguido ha sido el de una realización de unas pruebas iniciales, que posteriormente se compararon con resultados experimentales. Una vez alcanzado los conocimientos necesarios, se procedió a la realización de las simulaciones con los diseños pertinentes, contrastándolas con resultados experimentales, previamente corregidos y adaptados a las condiciones de simulación.

Medina et al.[1], se propuso determinar con detalle la zona de mezclado entre dos rotores de paletas planas cuando se tiene un bajo gasto de un líquido de elevada viscosidad (aceite ISO VG 68), se diseñó y construyó un modelo para visualizar y aplicar velocimetría de imágenes de partículas (PIV) en dos dimensiones. Los resultados de la visualización y medición muestran claramente el plano de separación entre los campos de velocidades a la mitad de la distancia H entre los rotores de diámetro D con una baja comunicación entre ellos localizada en la parte más alejada de la flecha motriz. Esta zona de comunicación aumenta con el paso H y el Reynolds (Re) manteniéndose la mayor parte con velocidad tangencial y ampliando la influencia de la zona de fluido con rotación pura hacia ambos lados del plano en la región adjunta a la flecha motriz. Al aumentar la distancia H/D entre

los rotores, se identifica una zona de muy baja velocidad situada en la periferia que se incrementa al disminuir Re . Adicionalmente, se pueden observar las estructuras vorticosas generadas por las paletas de los rotores con una región de fluido con movimiento exclusivamente tangencial ligada a los rotores. El estudio se efectuó para un rango de H/D de 1 a 2, y un intervalo de Re entre 250 y 1200. Cabe destacar, que fue utilizado un tanque (sin deflectores) acrílico de cavidad cilíndrica para poder ajustar de manera simple el paso entre rotores, junto con los dispositivos adicionales para el control y recirculación del fluido. El control de la velocidad angular de los rotores se hizo mediante un variador de frecuencia comercial acoplado al motor eléctrico, mientras que el control del gasto y recirculación del fluido se logró mediante un circuito cerrado accionado por una pequeña bomba centrífuga, lográndose el gasto deseado con una válvula de aguja aguas arriba del mezclador. Para determinar los campos de velocidad de la zona de interés, se utilizó la técnica PIV-2D, con un equipo compuesto de un láser pulsado de doble cavidad de 200 mJ con un haz de 532 nm y lente cilíndrico para producir la cortina de luz, una cámara CCD de 1024×1280 píxeles conectada al adquisidor y procesador de datos (FlowMapSystem HUB) a través de un módulo sincronizador, y la configuración y operación de todo el sistema mediante una PC con el software de análisis.

2.5 Conclusiones Parciales del Capítulo II

1. En el Capítulo se han descrito las Metodologías de Cálculo de Agitadores – Mezcladores de Fluidos localizadas en la literatura revisada. Todas las descritas tienen semejanzas y diferencias, a través de todas ellas se puede realizar el cálculo de estos aparatos, pero la que consideramos más simple y cómoda es la propuesta por (Claudio Gelmi Weston, 2006) que en lo fundamental será la que se propondrá en el próximo Capítulo.
2. Se describe también un estudio experimental realizado en su Trabajo de Diploma por Pesantez Molina, Wilson Geovanny (2002). Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores. En la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior

Politécnica del Litoral. Guayaquil Ecuador, que la importancia que se le confirió en el presente Trabajo es que aporta una Metodología de Investigación que pudiera servir para futuros trabajos de Investigación para validar la Metodología de Cálculo elaborada en el presente Trabajo.

3. Se recoge en el trabajo la experiencia industrial realizada por dos venezolanos en la propuesta de variante de diseño para agitadores de fluidos industriales en tanques de recirculación en la empresa Siderúrgica del Orinoco “Alfredo Maneiro” SIDOR S.A. Puerto Ordaz, Venezuela que aunque aporta muy poco al desarrollo de una Metodología de cálculo recoge la problemática industrial de la explotación de estos aparatos que deben ser tomadas en cuenta en el diseño.
4. Finalmente se describen brevemente las experiencias en la simulación computacional de estos aparatos mediante la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) FLUENT para la simulación del flujo generado por turbinas radiales dentro de recipientes de agitación. En otra Investigación se utilizó el Programa ANSYS / CFX lográndose obtener la simulación de elementos rotativos. Esto trabajos permite ampliar el horizonte de investigación relativo al Cálculo y Diseño de estos Aparatos.

Capítulo 3.

Capítulo III: Metodología de cálculo de los Agitadores – Mezcladores.

3.1 Parámetros geométricos importantes:

- Diámetro del impulsor (d)
- N^{ro.} de revoluciones (N)
- Altura del líquido (H)
- N^{ro.} de Placas deflectoras (4 es lo estándar)
- Diámetro del estanque (D_t)
- Espesor de las placas deflectoras (w)
- Offset lateral e interior de las placas deflectoras
- Posición del impulsor
- Ancho de la hoja del impulsor
- **Placas Deflectoras.**
 - Salvo en el caso de utilizar R_e muy grandes, las placas deflectoras son necesarias para evitar vórtices y rotación del fluido como un todo. La configuración más estándar de una placa deflectora es:
Espesor $w = \frac{D_t}{12}$ (4 placas equiespaciadas es lo estándar)
Largo: desde $\frac{d}{2}$ desde la sección recta del fondo del estanque hasta cerca del nivel del líquido.
 - Para el caso de líquidos con sólidos suspendidos o bien cuando se requiere transferencia de calor con las paredes, las placas se ubican a una distancia equivalente a $\frac{1}{6}$ de su espesor, de la pared del estanque.

• **El tanque.**

Normalmente el fondo tiene forma de plato, pues el consumo de energía en la agitación es menor, además de evitar “espacios muertos”. La relación óptima $\frac{H}{D_t}$ para el caso de un impulsor es 1, en que el impulsor se ubica en el centro del estanque. Si $\frac{H}{D_t} > 1$ entonces estamos en presencia de zonas muertas.

- **Impulsores.**

- Tamaño: Este depende del tipo de impulsor, propiedades del fluido, objetivos de la agitación y geometría del estanque. Por ejemplo, para el impulsor de turbina:
 - $0,3 \leq \frac{d}{D_t} \leq 0,6$
 - O bien: $0,2 \leq \frac{d}{D_t} \leq 0,5$ (turbulento) y $0,7 \leq \frac{d}{D_t} \leq 1$ (laminar)
- Velocidad: La velocidad de los motores y moto-reductores se encuentran solo en ciertos valores: 37, 45, 56, 68, 84, 100, 125, 155, 190 y 320 RPM. Normalmente no se justifica sistemas de velocidad variable. Cuando el torque es muy grande, se requieren sistemas con dos velocidades.

- **Ubicación de los impulsores.**

Aquí se puede encontrar gran variedad de opiniones. En principio se puede ubicar $\frac{H}{6}$ del fondo del estanque. Para el caso de suspensión de sólidos, se recomienda $\frac{d}{3}$ del fondo.

La siguiente tabla da recomendaciones más generales.

Tabla 3.1 Recomendaciones sobre el número y ubicación de los impulsores. (Fuente: Claudio Gelmi Weston, 2006)				
Viscosidad (cP)	Nivel Max. H/D_t	Número de Impulsores.	Ubicación desde el fondo.	Ubicación desde nivel superior.
$< 25 \times 10^3$	1.4	1	H/3	
$< 25 \times 10^3$	2.1	2	$D_t/3$	$(2/3)H$
$> 25 \times 10^3$	0.8	1	H/3	
$> 25 \times 10^3$	1.6	2	$D_t/3$	$(2/3)H$

- **Numero de Reynolds (R_e)**

$$R_e = \frac{d^2 N \rho}{\mu} = \frac{U_t d \rho}{\pi \mu} \quad \text{Ec (3.1)}$$

- **Velocidad en el extremo del impulsor (tip speed)**

Corresponde a la velocidad angular ($2\pi N$) multiplicado por el radio del impulsor ($\frac{d}{2}$)

$$U_t = \pi N d \quad \text{Ec (3.2)}$$

- **Número de Froude (Fr)**

Es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Es útil en el análisis y escalamiento de estanques sin placas.

$$Fr = \frac{N^2 d}{g} \quad \text{Ec (3.3)}$$

- **Número de mezclado (B)**

Es la velocidad de rotación (N), multiplicado por el tiempo de mezclado. Define un tiempo de mezclado adimensional.

$$B = N t \quad \text{Ec (3.4)}$$

- **Numero de flujo**

Para una turbina con 6 palas planas ($\frac{w}{d} = \frac{1}{5}$) $N_Q = 1.3$

- **Número de Potencia (N_p)**

Es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del rodete y la fuerza inercial. Este número presenta una buena correlación con el N° de Reynolds con placas deflectoras. Para régimen turbulento, N_p , es independiente de Re (valor constante).

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \quad \text{Ec (3.5)}$$

Según en la bibliografía de Mc Cabe para una turbina estándar con 6 palas planas el $N_p=5,2$.

- **Cálculo de Potencia**

Para poder estimar la potencia que se requiere para hacer girar un rodete dado con una velocidad determinada, es necesario disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o N_p) en función de otras variables del sistema. Se requiere conocer las medidas importantes del estanque y agitador: distancia del rodete al fondo del estanque, profundidad del líquido, dimensiones de placas deflectoras, número y disposición de éstas, número de palas de rodete, propiedades del fluido. Las características antes mencionadas pueden convertirse en relaciones adimensionales, llamadas factores de forma. Se calculan dividiendo cada uno de los términos por uno que se tome como base. Ejemplo: diámetro del rodete.

Dos mezcladores que tienen las mismas proporciones geométricas, pero diferentes tamaños tendrán iguales factores de forma. En este caso podremos decir que son geoméricamente semejantes o que poseen semejanza geométrica. La potencia consumida define el costo de la operación.

Cuando el flujo en el tanque es turbulento, se ignoran temporalmente los factores de forma y se supone que el líquido es newtoniano, la potencia P es una función de las siguientes variables, O sea:

$$P = \Psi(n, d^5, g_c, \rho, N_p)$$

$$P = \frac{N_p n^3 d^5 \rho}{g_c} \quad \text{Ec (3.6)}$$

3.2 Cálculo del Agitador – Mezclador requerido por LABIOFAM.

El cálculo se realiza en un tanque cerrado de 40 L de capacidad, con dimensiones de 60 x 30 cm ($h = 60$ cm; $D_t = 30$ cm), 4 placas deflectoras fijas. Se seleccionó el tipo de impulsor de turbina ya que son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades.

Diámetro del impulsor ($d = 15$ cm = 0,15m)

Altura del líquido ($H = 30$ cm = 0,3 m)

Diámetro del estanque ($D_t = 30$ cm = 0,3m)

Capítulo III: Metodología de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

$N^{ro.}$ de revoluciones ($N = 15 \text{ rpm} = 0,25 \text{ rps}$)

$N^{ro.}$ de Placas deflectoras (4 es lo estándar)

Factor de proporcionalidad de la Ley de Newton (g_c): $9,8 \text{ m/s}^2$

- **El Tanque.**

$\frac{H}{D_t} = 1$ entonces $H = D_t$ Esta es la relación óptima para un impulsor.

- **Impulsor de Turbina.**

Diámetro (d): 30 al 50 de D_t : $d=50\%$ de 30 = 15 cm = 0,15 m

Ancho: 1/6 a 1/10 de d: 1/6 de 15 cm = 2,5 cm = 0,025 m

Ubicación: $\frac{H}{6}$ del fondo del tanque: $\frac{30 \text{ cm}}{6} = \frac{0,3 \text{ m}}{6} = 0,05 \text{ m}$

- **Placas deflectoras.**

Espesor (w): $w = \frac{D_t}{12} = \frac{0,3\text{m}}{12} = 0,025 \text{ m}$

Largo: $\frac{d}{2} = \frac{0,15\text{m}}{2} = 0,075\text{m}$

Los líquidos a agitar y mezclar son veneno de alacrán y agua a temperatura ambiente (25°C). Para el cálculo de los principales parámetros de diseño del agitador se utiliza la densidad y viscosidad del agua ya que la cantidad de veneno que se añade es tan pequeña que no altera dichas propiedades del agua.

Densidad (Agua) = 1000 kg/m^3

Viscosidad (Agua) = $0,894 \text{ cP} = 0,894 \times 1,02 \times 10^{-4} = 9,12 \times 10^{-5} \text{ kg / ms}$

$N = 15 \text{ rpm} = 15 \times 2\pi/60 = 1,57 \text{ rad/s}$

- **Numero de Reynolds (R_e)**

$$R_e = \frac{d^2 N \rho}{\mu} = \frac{(0,15 \text{ m})^2 * 1,57 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 1000 \text{ kg/m}^3}{9,12 \times 10^{-5} \text{ kg / ms}}$$

$$R_e = 386513 \quad (R_e = 386513 > 10000 \text{ Régimen Turbulento})$$

- **Velocidad en el extremo del impulsor (tip speed)**

$$U_t = \pi N d$$

$$U_t = 3,14 * 1,57 \text{ rad/s} * 0,15 \text{ m}$$

$$U_t = 0,74 \text{ m/s}$$

- **Número de Froude (Fr)**

Capítulo III: Metodología de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

No se realiza este cálculo ya que es útil calcularlo para tanques sin placas deflectoras.

- **Número de mezclado (B)**

$$B = Nt$$

$$B = 1,57 \text{ rad/s} * 5\text{min}$$

$$B = 1,57 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 300 \text{ s}$$

$$B = 471$$

- **Numero de flujo**

Para una turbina con 6 palas planas ($\frac{w}{d} = \frac{1}{5}$) $N_Q = 1.3$

- **Número de Potencia (Np)**

$N_P = \frac{P g_c}{n^3 d^5 \rho}$ Según en la bibliografía de Mc Cabe para una turbina estándar con 6 palas planas el $N_P = 5,2$.

- **Cálculo de Potencia.**

En estanques con placas deflectoras, para números de Reynolds superiores a 10.000, el número de potencia es independiente del número de Re y la viscosidad ya no influye. En este intervalo el flujo es totalmente turbulento. Cuando el flujo en el tanque es turbulento, se ignoran temporalmente los factores de forma y se supone que el líquido es newtoniano, la potencia P es una función de las siguientes variables, O sea:

$$P = \Psi(N, d^5, g_c, \rho, N_P)$$

$$P = \frac{N_P N^3 d^5 \rho}{g_c}$$

$$P = \frac{5,2 * (1,57 \text{ rad/s})^3 (0,15 \text{ m})^5 1000 \text{ kg/m}^3}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$P = 1,56 \times 10^{-4} \text{ kgm/s} \times 9,81 \text{ N/kg}$$

$$P = 1,53 \times 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

Capítulo III: Metodología de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

$$P = 1,53 \times 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 0,0153 \text{ W}$$

La potencia requerida en el motor se calcula dividiendo esta potencia demandada por del agitador entre la eficiencia de la transmisión. O sea.

$$P_0 = \frac{P}{\eta} \text{ W}$$

La eficiencia mecánica de un reductor sinfín de una entrada se puede tomar como:

$$\eta = 0,7$$

De donde la potencia requerida en el motor es:

$$P = 0,022 \text{ W}$$

Se seleccionó un motor reductor sinfín de Potencia $P_0 = 0,12 \text{ kW}$ y velocidad de salida de $N = 15 \text{ rpm}$.



Figura 3.1 Motor Reductor (Fuente: Echasa, Transmisión Industrial)

3.3 Conclusiones Parciales del Capítulo III.

1. Combinando todas las Metodologías existentes en la literatura consultada y descrita en el Capítulo anterior se elaboró una Metodología que utiliza

Capítulo III: Metodología de cálculo de Agitadores-Mezcladores.

elementos de casi todas pero permite calcular todos los elementos necesarios de un agitador – mezclador de diferentes tipos.

2. Se aplicó la Metodología elaborado al cálculo de un Agitador – Mezclador para LABIOFAM para mezclar y agitar agua destilada y veneno de alacrán.

Conclusiones Generales

Conclusiones Generales.

Conclusiones Generales

1. Se realizó una amplia revisión bibliográfica para investigar sobre los conceptos básicos de los Procesos de Agitación y Mezclado, los objetivos, las distintas partes de un agitador – mezclador, sus funciones específicas, los distintos tipos de diseño de estos. Se clasificaron los equipos agitadores – mezcladores en sus dos grandes grupos y también desde el punto de vista del rodete que se emplee y se caracterizan los de tipos de rodete más comunes. Se mencionan algunos con rodetes muy específicos poco tratados en la literatura. Se describen finalmente algunos de los problemas que se presentan durante la agitación o el mezclado y algunas de las formas de resolver estos problemas.
2. Se describen las ecuaciones empleadas por distintas metodologías de cálculo de los Agitadores – Mezcladores. Se recoge en el trabajo la experiencia industrial realizada por dos venezolanos en la propuesta de variante de diseño para agitadores de fluidos industriales en tanques de recirculación en la empresa Siderúrgica del Orinoco “Alfredo Maneiro” SIDOR S.A. Puerto Ordaz, Venezuela que aunque aporta muy poco al desarrollo de una Metodología de cálculo recoge la problemática industrial de la explotación de estos aparatos que deben ser tomadas en cuenta en el diseño y se describen brevemente las experiencias en la simulación computacional de estos aparatos mediante la aplicación de diferentes herramientas computacionales.
3. Sobre la base de las Diferentes Metodologías de Cálculo existentes en la literatura se elaboró una Metodología de Cálculo que recoge elementos de todas y permite realizar el cálculo de todos los parámetros operacionales de un equipo Agitador – Mezclador. La misma se aplicó para el cálculo un equipo de este tipo para mezclar agua destilada con veneno de alacrán de la Empresa LABIOFAM.

Recomendaciones

Recomendaciones

Recomendaciones

1. Se recomienda en la continuación de la Investigación elaborar un Algoritmo de Cálculo y un Software para calcular de forma automatizada todos los parámetros de explotación y diseño de un Agitador Mezclador.
2. Aplicar dicho Software al cálculo de algún Agitador Industrial existente para que sirva de validación al Metodología.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- Agitadores. (n.d.). Agitadores. Retrieved June 10, 2014, from <http://www.linkindustrial.es>.
- Aulton, & Michael E. (2004). Farmacia, la ciencia del diseño de las formas farmacéuticas (Segunda Edición.).
- Bosch C, & Josep. (2006). Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) a la generación de datos de diseño de agitadores mecánicos a partir de la simulación de recipientes agitados. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Castro, D. M. (2005). Transporte de momentum y calor, teoría y aplicaciones a la ingeniería de proceso. UADY. Mérida, Yucatán, México.
- Cuba. Comisión Nacional de Energía. (1993). Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía. Comisión Nacional de Energía.
- Díaz Nanclares, & Ma. Guadalupe. (2005). Tecnología Farmacéutica I. Mezclado de sólidos.
- Echesa, S. A. (2013). Transmisión Industrial. Reductores Especiales.
- Gelmi Weston, Claudio. (2006). Fundamentos de Operaciones Unitarias: Serie de clases de Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- L. Garcel Puyans, & A. Díaz García y otros. (1988). Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa. La Habana.
- Magdaleno, D., Navarro, & J., Nieto, H. (2002). Estudio de la potencia requerida en el proceso de agitación de un líquido. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona, EUETIB. Barcelona, España.
- Martínez D, López. (2006). Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT: caso de una turbina Rushton.

Bibliografía

- Mc Cabe W.L. et al. (1998). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Madrid. Mc. Graw Hill.
- Medina Olivo R.J, & Pérez Pupo, Rafael. (2013). Propuesta de variante de diseño para agitadores de fluidos industriales en tanques de recirculación en la empresa Siderúrgica del Orinoco “Alfredo Maneiro” SIDOR S.A. Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”, Guardalavaca, Holguín.
- Medina, E., Chávez, & A., Ramírez., Bolado y otros. (2007). Determinación del campo de velocidades generado en un líquido viscoso por la acción de dos rotores de paletas planas en una cavidad cilíndrica utilizando piv-2d. 8º. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM 8, Cusco, Perú.
- Pavlov, K.F. et. al. (1981). Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. K.F. Pavlov, P.G. Romankov, A.A. Noskov. Moscú: MIR. 611 p.
- Pesantez Molina, Wilson Geovanny. (2002). Fundamentos del diseño y cálculo de tanques agitadores-mezcladores.
- Ramasubramanian, M., Shiffler, & Donald., Jayachandran, Amit. (2008). Modelización de la dinámica de fluidos computacional y estudio experimental del proceso de mezcla para la dispersión de las fibras sintéticas en formación Wet - Lay, Volume 3, Issue 1.
- Simulación y Procesos. (n.d.). Simulación y Procesos. Retrieved from <http://www.simulacionprocesos.wikispaces.com>.
- Ulate, Adolfo, & Vásquez, Alexander. (2010). Determinación de un modelo para el consumo de energía con Suspensión total de sólidos en fluidos newtonianos.
- Vila Jato, José Luis. (2001). Tecnología Farmacéutica, Aspectos fundamentales de los sistemas farmacéuticos y operaciones básicas.

