



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**DISEÑO DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA
OPERACIÓN UNITARIA DE AGITACIÓN.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

HERNÁNDEZ ALONSO JESÚS ANTONIO

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE 2014





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: ANTONIO VALIENTE BARDERAS**

VOCAL: **Profesor: GENOVEVO SILVA PICHARDO**

SECRETARIO: **Profesor: MARIA LUISA GALICIA PINEDA**

1er. SUPLENTE: **Profesor: JUAN PABLO AGUAYO VALLEJO**

2° SUPLENTE: **Profesor: LETICIA VALLE ARIZMENDI**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE QUIMICA

ASESOR DEL TEMA:

DR. ANTONIO VALIENTE BARDERAS

SUSTENTANTE:

HERNÁNDEZ ALONSO JESUS ANTONIO



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO I. ¿QUÉ ES LA AGITACIÓN? EMPLEO, USOS, TIPOS.	6
1.1 DEFINICIÓN DE AGITACIÓN	6
1.2 OBJETIVOS DE LA AGITACIÓN	6
1.2.1 <i>Agitación o mezclado de dos líquidos miscibles</i>	7
1.2.2 <i>Dispersar un gas en el seno de un líquido en forma de pequeñas burbujas.</i>	10
1.2.3 <i>Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para crear una emulsión o suspensión de gotas diminutas.</i>	10
1.2.4 <i>Producción de una suspensión de un sólido finamente dividido en un líquido.</i>	12
1.2.5 <i>Agitación de un fluido para mejorar la transferencia de calor entre dicho fluido y un serpentín o una camisa en las paredes del recipiente.</i>	13
1.3 CLASES DE AGITADORES	14
1.4 TIPOS DE FLUJOS EN TANQUES AGITADOS.....	15
1.5 FORMAS DE EVITAR LOS REMOLINOS.....	17
1.6 VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN	20
1.7 GRADIENTES Y PERFILES DE VELOCIDAD	21
CAPITULO II. EQUIPO EMPLEADO (NOMENCLATURA, USOS, ETC.).....	24
2.1 EQUIPO DE AGITACIÓN	24
2.2 TIPOS DE AGITADORES	26
2.2.1 <i>Agitador de tres aspas (propulsor de hélice)</i>	26
2.2.2 <i>Agitadores de paletas (palas)</i>	28
2.2.3 <i>Agitadores de turbina.</i>	30
2.2.4 <i>Agitadores de banda helicoidal.</i>	33
2.3 SELECCIÓN DEL AGITADOR E INTERVALOS DE VISCOSIDAD.....	33
2.3.1 <i>Selección de agitadores de alta viscosidad.</i>	34
2.4 VARIACIONES INTRODUCIDAS EN EL AGITADOR PARA CONSEGUIR UNA MEJOR MEZCLA	35
2.4.1 <i>Baffles</i>	35
2.4.2 <i>Ubicación de los agitadores D_o</i>	37
2.4.3 <i>Tubos de aspiración.</i>	39
CAPITULO III. OBTENCIÓN DE POTENCIAS, SELECCIÓN DE LOS AGITADORES Y ESCALAMIENTO DE AGITADORES, ETC.	40
3.1 POTENCIA CONSUMIDA EN LOS RECIPIENTES DE AGITACIÓN	40
3.2 CORRELACIONES DE POTENCIA	43
3.3 NÚMEROS ADIMENSIONALES IMPORTANTES.....	44
3.3.1 <i>Número de Potencia (N_p)</i>	44
3.3.2 <i>Número de Reynolds (N_{Re})</i>	45
3.3.3 <i>Número de Froude (N_{Fr})</i>	46
3.4 CÁLCULO DEL CONSUMO DE POTENCIA.....	47
3.4.1 <i>Cálculo de potencia: Casos límite</i>	47
3.5 CÁLCULO DE POTENCIA: USO DE GRÁFICOS	49
3.5.1 <i>Potencia para tanques con placas deflectoras</i>	49
3.5.2 <i>Potencias para tanques sin placas deflectoras.</i>	50
3.6 EFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA	51
3.7 DISEÑO “NORMAL” TÍPICO DE UNA TURBINA	52
3.8 REQUISITOS DE POTENCIA EN LA AGITACIÓN Y MEZCLA DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	60



3.8.1	<i>Fluidos pseudoplásticos</i>	62
3.9	AUMENTO DE ESCALA DE AGITADORES	65
3.9.1	<i>Introducción</i>	65
3.9.2	<i>Procedimiento de aumento de escala</i>	65
3.10	TÉRMINOS USUALES EN UN SISTEMA DE AGITACIÓN	70
3.10.1	<i>Número de flujo y rapidez de circulación en la agitación</i>	71
3.10.2	<i>Velocidad en el extremo del agitador (tip speed)</i>	72
3.10.3	<i>Torque</i>	72
3.10.4	<i>Número de mezclado (B)</i>	73
3.11	TIEMPOS DE MEZCLA PARA LOS LÍQUIDOS MISCIBLES	73
CAPITULO IV. DISEÑO DEL MATERIAL AUDIOVISUAL		79
4.1	PRIMER DIAPORAMA DE AGITACIÓN: AGITACIÓN Y MEZCLAS DE LÍQUIDOS (I)	79
4.2	SEGUNDO DIAPORAMA DE AGITACIÓN: AGITACIÓN Y MEZCLAS DE LÍQUIDOS (II)	80
4.3	TERCER DIAPORAMA DE AGITACIÓN: AGITACIÓN Y MEZCLAS DE LÍQUIDOS (III)	82
CAPITULO V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....		84
5.1	RESULTADOS	84
5.2	CONCLUSIONES	88
ANEXO A. PRECIPITACIÓN Y SEDIMENTACIÓN EN LA SEPARACIÓN PARTÍCULA-FLUIDO		90
	INTRODUCCIÓN	90
	TEORÍA DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS A TRAVÉS DE UN FLUIDO	91
ANEXO B. AGITACIÓN.....		95
ANEXO C. AGITADORES DE ALTA VISCOSIDAD.....		102
C.1	AGITADORES TIPO HÉLICE DE TORNILLO.....	102
C.2	AGITADORES TIPO PADDLE (PALETAS O PALAS)	103
C.3	AGITADORES TIPO ANCHOR (ANCLA O ÁNCORA)	104
C.4	AGITADORES DE DOBLE HÉLICE TIPO BANDA	106
ANEXO D. ANÁLISIS DE UN REMOLINO		108
ANEXO E. BOMBAS.....		110
BIBLIOGRAFÍA		113
ÍNDICE DE FIGURAS		115



Introducción

El proceso de agitación es uno de los más importantes dentro de la industria química porque el éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos, por lo tanto el Ingeniero Químico debe ser capaz de enfrentarse a esta operación unitaria tan importante. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos de transporte involucrados, es uno de los procesos más difíciles de analizar y caracterizar. Así, hasta el momento, no existen correlaciones generales para configuraciones arbitrarias de agitación que describan cantidades útiles como la velocidad de mezcla o el grado de homogeneidad alcanzada.

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 cilíndrico y provocando vórtices. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Aquí, una de las fases ha de ser un fluido, mientras que la otra puede ser algo tan variado como otro fluido, partículas sólidas o burbujas.

Un material homogéneo, tal como agua fría en un tanque, 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 pulverizado.

El mezclado y/o agitación de líquidos miscibles o de sólidos en líquidos se efectúa con el objeto de lograr una distribución uniforme de los componentes entre sí por medio del movimiento. Dicho movimiento es producido por medios mecánicos generalmente cuando se mezclan líquidos miscibles o sólidos en líquidos se puede lograr un mezclado íntimo, pero con líquidos inmiscibles y materiales muy viscosos o pastosos el grado de mezclado logrado es menor.

La eficiencia del proceso de mezclado depende de una efectiva utilización de la energía que se emplea para generar el movimiento de componentes. Para lograr proporcionar un suministro de energía adecuado hay que considerar las propiedades físicas de los componentes, el diseño del agitador que transmite la energía y la configuración del tanque de mezclado.



Los materiales a ser mezclados pueden ser líquidos de muy baja viscosidad hasta pastas altamente viscosas.

Otra de las dificultades que aparece a la hora de caracterizar la mezcla y la agitación es la gran cantidad de sustancias (líquidos y sólidos) que se pueden relacionar en la industria química. Por tanto, el diseño y la optimización de agitadores están confiados en gran medida, a la experimentación.

El objeto de la agitación puede ser incrementar la transferencia de calor en el fluido o incrementar el transporte de materia (transferencia de masa), es decir, simplemente mezclar.

En base al resumen teórico expuesto anteriormente, el objetivo principal de éste trabajo de tesis es:

- ❖ Elaborar material audiovisual (presentaciones en Power Point, imágenes y videos de internet) del tema de la agitación como operación unitaria, con el único fin de que el estudiante de Ingeniería Química pueda reforzar sus conocimientos con respecto al tema de, que antes ya ha estudiado en el curso de Ingeniería de Fluidos.

Se elaborarán tres diaporamas sobre la agitación, en el primer diaporama se describe el concepto de la agitación y sus principales aplicaciones en la industria. En el segundo diaporama se describe al equipo de agitación y los principales tipos de agitadores. En el tercer diaporama se refiere sobre la potencia requerida de un agitador, curvas de potencia y los diferentes números adimensionales involucrados en el cálculo de potencia.

- ❖ Este trabajo no pretende reemplazar la labor del docente de ninguna manera, simplemente se utilizará para complementar su labor académica, ya que la representación de estas operaciones es muy compleja, debido al manejo de los equipos.

Para poder realizar este trabajo se tiene que recurrir a la teoría, ya que es la base que nos dará pie para que se pueda llevar a cabo la elaboración del material audiovisual, cabe recalcar que el material teórico es extraído así tal



como está de la literatura (pasada o reciente) que es recomendada para estudiar el curso, por lo tanto no se han incluido artículos actuales.

Para la elaboración de los tres diaporamas, se tuvieron que realizar con anticipación las siguientes actividades:

- ❖ Presentar una exposición con el material audiovisual elaborado a un grupo de estudiantes de Ingeniería Química que estén cursando la materia de Ingeniería de Fluidos, con el fin de que ellos validen el material expuesto a través de un cuestionario.
- ❖ Analizar los resultados del cuestionario presentado al grupo de estudiantes de Ingeniería Química que estén cursando la materia de Ingeniería de Fluidos, en caso de presentarse una deficiencia en el material audiovisual, mejorar éste, en base a las inquietudes de los estudiantes expresadas.
- ❖ Realizar conclusiones en base a los análisis de resultados sobre la elaboración del material didáctico.



CAPITULO I. ¿Qué es la agitación? Empleo, Usos, Tipos.

1.1 Definición de agitación

El éxito de muchos procesos químicos depende de una eficaz agitación y mezcla de los fluidos que intervienen. Es común que con frecuencia confundan la agitación y mezcla; pero cabe aclarar que estos no son sinónimos.

Por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. [1]

Sin embargo la mezcla es la distribución al azar de dos fases inicialmente separadas.

Otra definición más amplia es la siguiente: Agitación¹, se puede definir como el movimiento circulatorio inducido a un fluido dentro de un contenedor, fundamentalmente de forma circular y provocando vórtices².

En mi punto de vista esta definición se me hace un poco más extensa y concisa.

Por ejemplo, puede agitarse una sola sustancia homogénea, como un tanque de agua fría, pero no puede mezclarse a menos que se añada a la misma otra sustancia (una cierta cantidad de agua caliente o un sólido pulverizado).

1.2 Objetivos de la agitación

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de la agitación y mezclado eficaz de los fluidos. El mezclado implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado o dos fluidos, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí. Aunque la efectividad y consumo de energía de la agitación depende de los principios básicos de flujo de fluidos, los patrones de flujo en el recipiente agitado típico son muy complejos, por lo tanto la aplicación rigurosa de estos principios resulta imposible, por esos recurrimos a la utilización de métodos empíricos.

¹ Según McCabe Smith

² También se le conoce como remolino



Los líquidos se agitan con un cierto número de fines, que dependen del objeto que se pretende en una etapa del proceso. Estos fines pueden ser:

1. Agitación o mezclado de dos líquidos miscibles.
2. Dispersar un gas en el seno de un líquido en forma de pequeñas burbujas.
3. Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para crear una emulsión o suspensión de gotas diminutas.
4. Producción de una suspensión de un sólido finamente dividido en un líquido
5. Agitación de un fluido para mejorar la transferencia de calor entre dicho fluido y un serpentín o una camisa (chaqueta) en las paredes del recipiente.

Resulta obvio ver de esta lista, que si deseamos que la agitación sea efectiva, esta debe llevarse a cabo cuidadosamente hasta obtener el resultado específico deseado.

Con frecuencia un agitador cumple diversos fines simultáneamente, por ejemplo lo que ocurre en la hidrogenación catalítica de un líquido. En el tanque de hidrogenación, el gas es dispersado a través del líquido en el cual están en suspensión las partículas sólidas de catalizador, siendo eliminado al mismo tiempo el calor producido en la reacción, por medio de un serpentín o una camisa de refrigeración.

1.2.1 Agitación o mezclado de dos líquidos miscibles

Los líquidos miscibles son aquellos que tienen la propiedad de poder mezclarse en forma proporcional con otros líquidos formando una mezcla homogénea, por ejemplo: el alcohol y el agua; o el metanol y el agua (Ver **Figura A**).



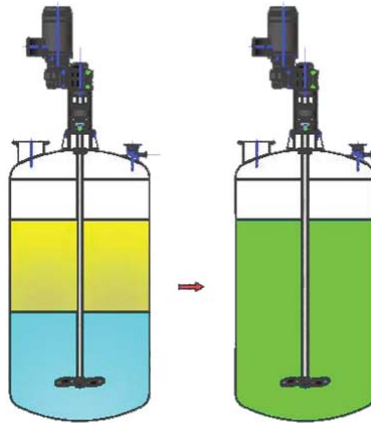


Figura A. Homogeneización de líquidos miscibles.

El principal obstáculo para obtener una mezcla de líquidos miscibles es la viscosidad dinámica (también se le conoce como viscosidad absoluta), la cual es una medida que nos indica la facilidad con que un fluido fluye cuando actúan fuerzas externas sobre él. También se le considera como una conductividad de momento, análoga, a la conductividad de calor o al coeficiente de difusión.

La unidad de viscosidad en el Sistema Internacional de Unidades (SIU) es el Pa*s que corresponde exactamente a 1 N.s/m² o 1 kg/ (m.s), pero es más frecuente su medición en centipoise. En el sistema **CGS**³ un poise equivale a 1 g/ (cm.s) y un centipoise=1 cp= 0.01 poise. [3]

Dependiendo de la viscosidad, los líquidos los podemos clasificar como:

TIPO DE LIQUIDO	INTERVALO (cp)
BAJA VISCOSIDAD	MENOR A 500
VISCOSIDAD MEDIA	ENTRE 500-50,000
MUY VISCOSOS	MAYOR A 50,000



³ Sistema Cegesimal de Unidades

La viscosidad de un fluido dependerá siempre de su temperatura. Es por eso que en los líquidos a mayor temperatura la viscosidad disminuye mientras que en los gases sucede todo lo contrario lo contrario.

Los líquidos móviles (newtonianos) de escasa viscosidad se mezclan fácilmente entre sí; mientras que los líquidos viscosos son más difíciles de agitar y mezclar. [4]

La viscosidad de un fluido disminuye con la reducción de densidad que tiene lugar al aumentar la temperatura. En un fluido menos denso hay menos moléculas por unidad de volumen que puedan transferir impulso desde la capa en movimiento hasta la capa estacionaria. Esto, a su vez, afecta a la velocidad de las distintas capas. El momento se transfiere con más dificultad entre las capas, y la viscosidad disminuye.

En algunos líquidos, el aumento de la velocidad molecular compensa la reducción de la densidad.

Los aceites de silicona, por ejemplo, cambian muy poco su tendencia a fluir cuando cambia la temperatura, por lo que son muy útiles como lubricantes cuando una máquina está sometida a grandes cambios de temperatura. [5]

Lo más importante en la agitación o mezclado de los líquidos es mantener un movimiento constante o circulación, para que ésta logre vencer la barrera de la viscosidad y así obtener una mezcla homogénea, ya sea en estado estacionario o intermitente.

Las aplicaciones industriales más importantes son: en elaboración de perfumes y cremas (cosmética); también en la elaboración de jarabes, bebidas, pinturas, solventes (productos químicos en general), homogeneización en tanques de almacenamiento de gasolinas y aceites (petroquímica), neutralizaciones ácido/base, diluir disoluciones de alta concentración, mezcla de fluidos con temperaturas distintas, distribución de polímeros en suspensiones para floculación; finalmente en el tratamiento y producción de agua potable.

No es una operación al que se le preste mucha atención, aunque muchas veces la calidad de un producto dependa completamente de la agitación.



1.2.2 Dispersar un gas en el seno de un líquido en forma de pequeñas burbujas.

En los procesos de dispersión de gas-líquido, el gas se introduce por debajo del agitador, que corta el gas en burbujas sumamente finas. El tipo de agitación determina el tamaño de las burbujas y el área interfacial total. Los más típicos de estos procesos son la aeración en plantas de tratamiento de aguas negras, la hidrogenación de líquidos mediante hidrógeno gaseoso en presencia de un catalizador, la absorción del soluto de un gas mediante un líquido, y la fermentación (Ver **Figura B**). Se dispone de correlaciones para predecir el tamaño de la burbuja, la demora y la potencia en kilowatts necesaria.

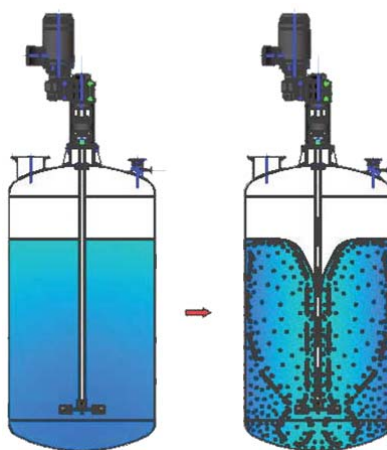


Figura B. Dispersión de un gas en el seno de un líquido.

La potencia requerida por el agitador en los sistemas de dispersión gas-líquido puede ser hasta del 10 al 50% menos de la que se necesita cuando no hay gas presente. [6]

1.2.3 Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para crear una emulsión o suspensión de gotas diminutas.

(W= Water, O= Oil)

Las emulsiones son dispersiones de un líquido inmiscible en otro líquido y se clasifican como emulsiones agua en aceite (W/O) o se aceite en agua (O/W). También hay emulsiones más complejas, como las emulsiones múltiples, en las cuales las gotas dispersas tienen a su vez pequeñas gotas distribuidas dentro



de ellas, en este caso se habla de emulsiones agua/aceite/agua ($W_1/O/W_2$) o de aceite/agua/aceite ($O_1/W/O_2$).

Adicionalmente, la fase acuosa puede ser sustituida por otro líquido inmiscible en aceites y obtener de esta manera emulsiones como etanol/benceno (E/O), por ejemplo. Las emulsiones mencionadas deben ser estabilizadas por componentes con actividad interfacial, de los cuáles los más utilizados son los surfactantes, así la composición de las mismas son al menos dos líquidos inmiscibles y un (o varios) agentes que la estabilizan (surfactantes) (Ver **Figura C**).

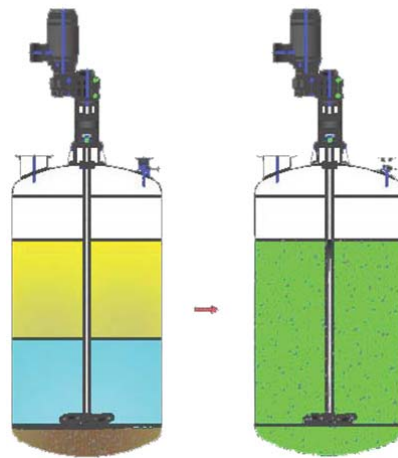


Figura C. Dispersión de dos líquidos inmiscibles para formar una emulsión.

Las emulsiones son muy importantes a nivel industrial y en la vida diaria, pueden ser útiles o perjudiciales según sea el caso. La mayonesa es un ejemplo claro de lo que es una emulsión aceite en agua, estabilizada por la lecitina que proviene de uno de sus ingredientes, el huevo. Otro ejemplo de emulsiones es la que se forma con gotas de agua en petróleo cuando éste último se extrae del pozo. Estas emulsiones son generalmente de agua en aceite y se estabilizan por los componentes naturales que hay en el crudo (asfaltenos y resinas). Estas emulsiones son indeseadas, ya que el contenido de agua debe reducirse al mínimo en el crudo para poder comercializarlo (menor al 1% en peso en crudos pesados y menos al 0,5% en peso en crudos livianos). Existe una infinidad de ejemplos que se pueden mencionar para resaltar la importancia de las emulsiones a nivel de nuestra vida cotidiana o



nivel industrial: emulsiones parenterales (usadas en medicina), emulsiones de corte (usadas en la elaboración de piezas metálicas en tornos), muchas salsas hechas en la cocina (además de la mayonesa), emulsiones para producir polímeros (método de emulsionar), etc.

Para preparar las emulsiones existen varios métodos, el más antiguo y común consiste en agitar dos líquidos inmiscibles en presencia de uno (o más) surfactantes de manera de dispersar una fase en otra y de esta forma obtener una emulsión. También se puede dispersar un líquido en otro, formando directamente la emulsión. Otra forma es cambiando la formulación fisicoquímica del sistema y llevarlo a una condición en la cual se forme la emulsión de manera espontánea con muy poca agitación. Este método tiene la ventaja de que consume muy poca energía, a diferencia del método clásico de agitación.

Con los equipos de emulsionar convencionales tales como agitadores, sistemas rotor-estator y homogeneizadores de alta presión, bajo condiciones de esfuerzos de corte leves, sólo se obtienen gotas de gran tamaño y con una amplia distribución de tamaño de gotas, lo cual puede generar productos inestables con propiedades indeseadas. [7]

1.2.4 Producción de una suspensión de un sólido finamente dividido en un líquido.

En algunos sistemas de agitación se suspende un sólido en el líquido agitado. Hay ejemplos en los que un sólido finalmente disperso se debe disolver en el líquido, se suspenden microorganismos en la fermentación, se debe producir una mezcla homogénea de sólido y líquido para alimentar un proceso o se usa un sólido suspendido como catalizador para apresurar una reacción. La suspensión de sólidos es un tanto parecida a un lecho fluidizado (Ver **Figura D**). En el sistema agitado, las corrientes de circulación del líquido conservan las partículas en suspensión.



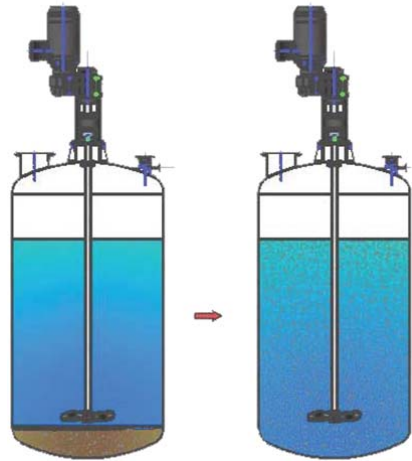


Figura D. Suspensión de un sólido en un medio líquido.

La cantidad y tipo de agitación necesaria depende principalmente de la *velocidad terminal de sedimentación de las partículas*, la cual puede calcularse usando las ecuaciones del **Anexo A** [8]. En las referencias (A1, A2) se dan ecuaciones empíricas para predecir la potencia requerida para suspender partículas.

Corpstein y colaboradores (A3) dan ecuaciones para turbinas de hojas inclinadas y agitadores de alta eficiencia.

1.2.5 Agitación de un fluido para mejorar la transferencia de calor entre dicho fluido y un serpentín o una camisa en las paredes del recipiente.

Muchos procesos químicos y biológicos requieren frecuentemente del uso de recipientes agitados. Con mucha frecuencia es necesario enfriar o calentar el contenido del recipiente durante la agitación. Esto suele hacerse con superficies de transferencia de calor, que pueden tener en forma de chaquetas de enfriamiento en las paredes, serpentines de tubería sumergidos en el líquido.

Muchos procesos se realizan dentro de recipientes donde es necesario emplear la agitación para favorecer el intercambio de calor entre un fluido y superficie de fluidos a distinta temperatura; en éstos casos se utilizan chaquetas o serpentines como medio de transferencia (Ver **Figura E**).



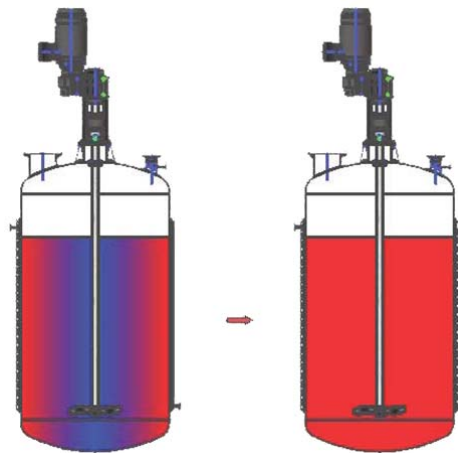


Figura E. Transmisión de calor en un recipiente agitado.

Por lo tanto el mecanismo de transferencia de calor asociado a todo fluido en movimiento sometido a un gradiente de temperaturas, se le define el tipo de convección.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el interés de la transferencia de calor por convección se centra en el intercambio entre un fluido y una superficie sólida.

El empleo de la agitación solo afecta la resistencia de la película del fluido del proceso.

El coeficiente de transferencia de calor del líquido en el proceso (h_i) es solo uno de los coeficientes de transferencias que determinan el coeficiente total de transferencia de calor (U).

1.3 Clases de Agitadores

Los agitadores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos, agitadores de flujo radial.



En la **Figura 1.a** podemos ver representada la distribución del flujo dentro del tanque.

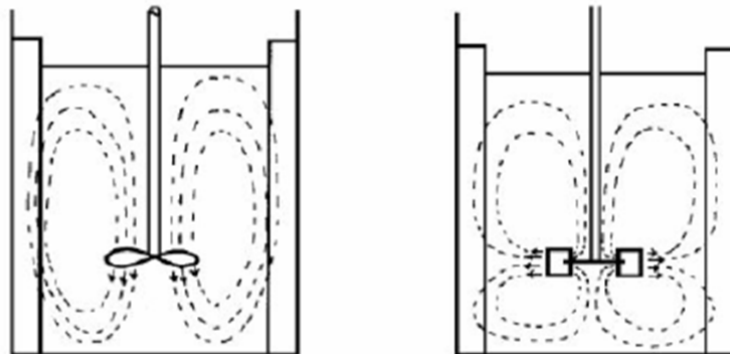


Figura 1.a. Izquierda: patrón de flujo generado por una turbina axial, Derecha: patrón de flujo generado por una turbina radial.

1.4 Tipos de flujos en tanques agitados

El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado, depende del tipo del agitador, de las características del fluido; del tamaño y proporciones del tanque, y placas deflectoras. La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes, y el tipo de flujo global en el mismo depende de las variaciones de estas tres componentes de la velocidad, de un punto a otro. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del agitador. La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje.

La tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el agitador.

Para el caso corriente de un eje vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal y la componente longitudinal es vertical. Las componentes radial y longitudinal son útiles por cuanto dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla. Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de velocidad es generalmente perjudicial para la mezcla. El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y, según se representa en la **Figura 1.b**,



crea un vórtice en la superficie del líquido que, debido a la circulación en flujo laminar, da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles de sustancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro. Si están presentes partículas sólidas, las corrientes circulatorias tienden a lanzar las partículas contra la pared del tanque, debido a la fuerza centrífuga, desde donde caen acumulándose en la parte central del fondo del tanque. Por consiguiente, en vez de mezcla se produce la acción contraria, o sea, concentración. En el flujo circulatorio el líquido fluye según la dirección del movimiento de las palas del agitador y, por consiguiente, disminuye la velocidad relativa que existe entre las palas y el líquido, con lo cual se limita la potencia que puede ser absorbida por el líquido. En un tanque sin placas deflectoras, el flujo circulatorio es inducido por todos los tipos de agitador, tanto si el flujo es axial como radial. En efecto, si los remolinos son intensos, el tipo de flujo dentro del tanque es esencialmente el mismo, independientemente del diseño del agitador.

Para velocidades elevadas de giro del agitador, la profundidad del vórtice puede ser tan grande que llegue al agitador mismo, dando lugar a que en el líquido se introduzca el gas que está encima de él, lo cual normalmente debe evitarse.

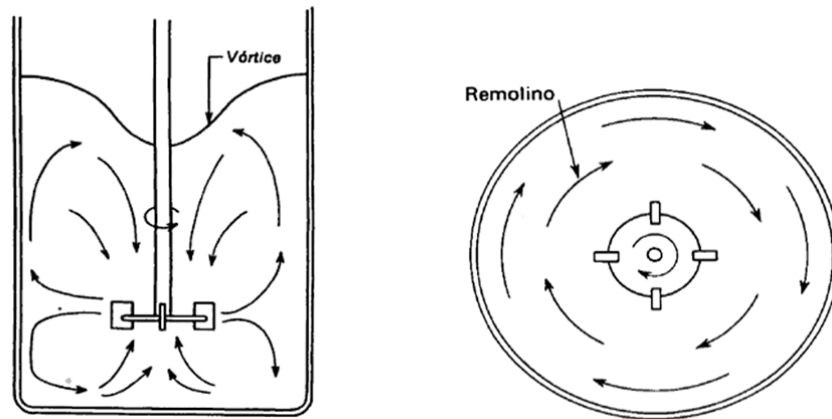


Figura 1.b. Formación de vórtice y tipo de flujo en un tanque agitado.

(Según Lyons).



1.5 Formas de evitar los remolinos

El flujo circulatorio y los remolinos, pueden evitarse por uno de los tres métodos siguientes. En tanques de pequeño tamaño, se dispone el agitador separado del centro del tanque, según indica la **Figura 2**.

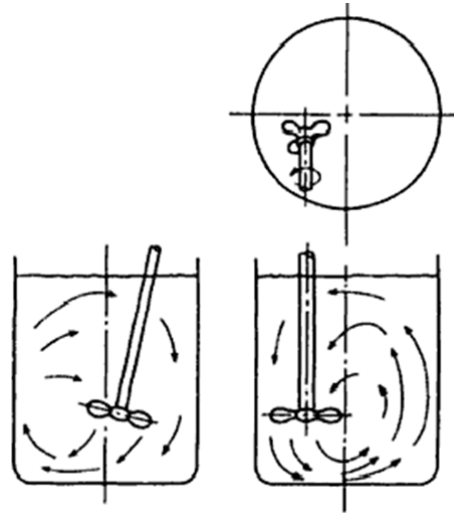


Figura 2. Agitador no centrado (Cortesía AIChE)

El eje se mueve así alejado de la línea que pasa por el centro del tanque, inclinándose después según un plano perpendicular a la dirección del movimiento. En los tanques de mayor tamaño, el agitador puede montarse en la parte lateral del tanque, con el eje en un plano horizontal, pero formando un cierto ángulo con el radio, según se indica en la **Figura 3**.

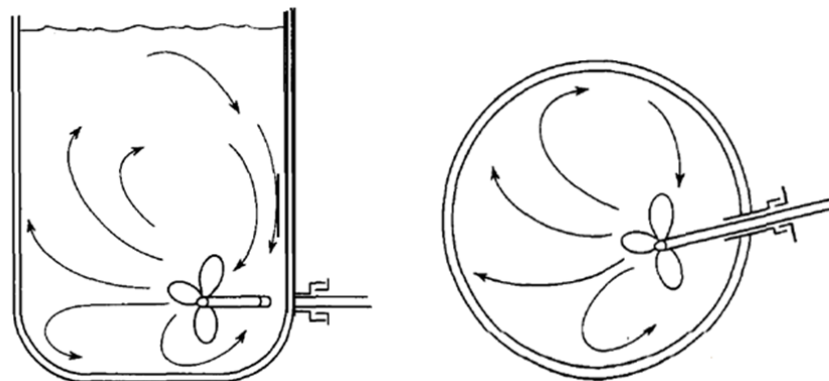


Figura 3. Agitador con entrada lateral (Según Bissel, Hesse, Everett y Rushton)



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. Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En la **Figura 4** se representan placas deflectoras de este tipo, y el tipo de flujo a que dan lugar. 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 deflectora no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque; para agitadores de hélice, basta con un octavo. Cuando el agitador entra al tanque lateralmente, está inclinado, o desplazado del centro, no son necesarias placas deflectoras.

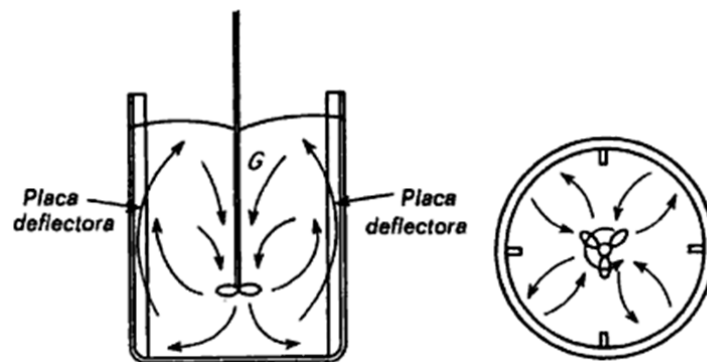


Figura 4. Tipo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de hélice montado en el centro (*Cortesía AIChE*)

Para eliminar los remolinos en los agitadores de turbina, pueden emplearse agitadores cerrados y anillos difusores, en lugar de placas deflectoras, según se indica en la **Figura 11-d**. Estos dispositivos están tomados de las bombas centrífugas, pero su principal efecto es aumentar la fricción y reducir la circulación. Los anillos difusores tienden a evitar también las corrientes que llegan a los rincones lejanos del tanque y son difíciles de instalar y mantener. Son útiles cuando se desean turbulencias y esfuerzos cortantes especialmente intensos en la descarga del agitador.

Una vez eliminados los remolinos, el tipo de flujo específico dentro del tanque, depende del tipo de agitador. Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia



el fondo del tanque, donde la corriente se extiende radialmente en todas las direcciones hacia las paredes, fluye sobre las mismas hacia arriba y retorna hacia la succión de la hélice, desde la parte superior. Esta forma de flujo se representa en la **Figura 4**. Los agitadores de hélice se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales, por ejemplo, cuando se han de mantener en suspensión partículas sólidas pesadas. Ordinariamente no se emplean cuando la viscosidad del líquido es superior a los 5,000 centipoises.

Los agitadores de paletas producen un flujo radial intenso en el plano próximo a las palas, pero prácticamente no dan lugar a corrientes verticales. Esta es la limitación principal de los agitadores de paletas, y por consiguiente, estos agitadores no son eficaces para poner sólidos en suspensión.

Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque, y allí la corriente se divide, una parte de ella fluye hacia abajo, hasta el fondo del tanque y vuelve al centro del agitador por la parte inferior, la otra parte fluye hacia la superficie del líquido y regresa al agitador por la parte superior. Según la **Figura 1.b**, se producen dos corrientes de circulación separadas. Los agitadores de turbina son especialmente eficaces en producir flujos radiales pero inducen al mismo tiempo flujos verticales, especialmente cuando se disponen placas deflectoras. Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa.

En un tanque cilíndrico vertical, la altura del líquido debe ser igual o algo mayor que el diámetro del tanque. Si se desea una altura mayor, se montan dos o más agitadores sobre el mismo eje, actuando independientemente. Como se indica en la **Figura 5**, cada agitador produce dos corrientes de circulación. El agitador inferior, bien sea de turbina o de hélice, se monta a una distancia aproximadamente igual al diámetro del agitador, sobre el fondo del tanque.



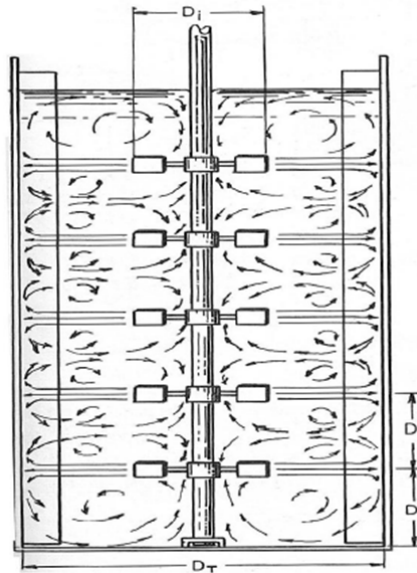


Figura 5. Turbinas múltiples en un tanque de gran altura. En la figura se muestran 5 agitadores de flujo radial distribuidos equiespaciadamente.

1.6 Velocidad de Circulación

Se denomina velocidad de circulación o capacidad de bombeo del agitador, al volumen de fluido puesto en movimiento por el agitador en la unidad de tiempo. Para que el proceso de agitación dentro del tanque sea eficaz, independientemente de la naturaleza del problema de agitación, la velocidad volumétrica de flujo ha de ser suficiente para renovar el volumen total del mezclador en un tiempo razonable. Por otra parte la velocidad de la corriente que abandona el agitador ha de ser lo suficientemente elevada, para que su influencia llegue a las partes más alejadas del tanque, ya que de lo contrario las sustancias que ocupan esas partes no llegarían a mezclarse. La corriente que abandona el agitador, transporta una cantidad definida de energía cinética y esta energía se disipa por fricción debido a los esfuerzos cortantes, a medida que la corriente fluye a través de la masa del líquido. Si la energía cinética es demasiado pequeña, la corriente no llega a alcanzar los rincones más alejados del tanque, por consiguiente, es necesario que la velocidad del fluido sea tal que proporcione una energía cinética superior a un cierto valor mínimo.

La velocidad de flujo de una agitador de turbina o de paletas, de tamaño y forma determinados y que opera dentro de un tanque que contiene un líquido



determinado, es proporcional a la magnitud ND_a , siendo N la velocidad de giro del agitador en rpm y D_a el diámetro del agitador. Para agitadores de hélice, la velocidad de flujo es proporcional a ND_a .

En las operaciones de mezcla, la velocidad de circulación no es el único factor importante, ya que es posible la existencia de corrientes que se muevan unas al lado de otras, durante un cierto recorrido, sin que prácticamente se mezclen entre sí. La turbulencia de la corriente es también importante, con frecuencia es de mayor importancia que la velocidad de circulación.

Mediante la turbulencia se consigue arrastrar la masa global del líquido del tanque e incorporarla a la corriente. La turbulencia se produce como consecuencia de corrientes dirigidas adecuadamente y de los gradientes de velocidad elevados existentes en el seno del líquido.

1.7 Gradientes y perfiles de velocidad

El gradiente de velocidad en un tanque agitado, varía ampliamente de un punto a otro del fluido. Así, por ejemplo, si el chorro de líquido que sale de un agitador, pasa a través de un fluido prácticamente estancado, el gradiente de velocidad en el extremo del chorro puede llegar a ser muy grande comparado con los gradientes que existen en la masa del líquido. Por otra parte, el gradiente en el extremo del chorro varía con la distancia.

A medida que el chorro se aleja del agitador, arrastra algo del líquido adyacente, con lo cual el chorro es desacelerado, y parte del líquido global acelerado, en la dirección del movimiento del chorro, con lo cual disminuye el gradiente de velocidad en el extremo del chorro. Los gradientes de velocidad son por lo tanto mayores en las inmediaciones de la descarga del agitador; en cualquier otra parte del tanque, aunque existen grandes gradientes de velocidad, son generalmente pequeños, comparados con los que existen en las proximidades del agitador.

En la **Figura 6** se representan las corrientes de fluido que se observan en un tanque de 30 cm, que contiene agua fría, provisto de un agitador de turbina de 6 palas de 15 cm de diámetro y que gira a 200 rpm. El plano de observación,



es un corte diametral que pasa por el eje del agitador y dos placas deflectoras. El fluido abandona el agitador en dirección radial, se separa en corrientes longitudinales que fluyen hacia arriba o hacia abajo sobre las placas deflectoras, se dirigen después hacia el eje del agitador y finalmente regresan a la zona de aspiración del mismo. En el fondo del tanque, justamente debajo del eje, el fluido se mueve con un movimiento de remolino; en el resto del tanque, las corrientes son principalmente radiales o longitudinales.

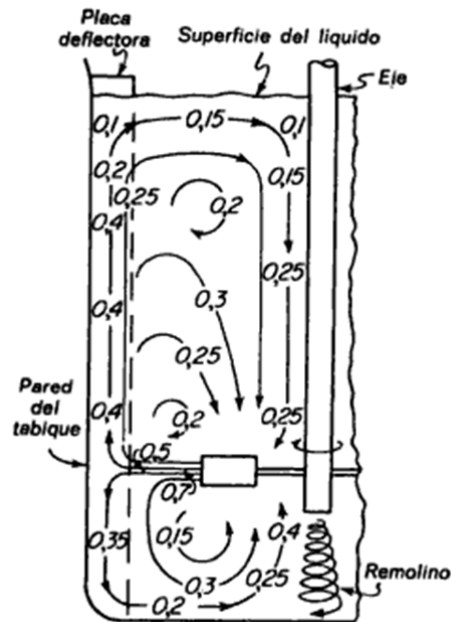


Figura 6. Perfiles de velocidad en un agitador de turbina

Los números de la **Figura 6**, indican la magnitud absoluta de la velocidad del fluido en los distintos puntos del tanque, expresada como fracciones de la velocidad en el extremo de las palas del agitador. En las condiciones utilizadas, la velocidad en el extremo de las palas era de 1.5 m/s, la velocidad del chorro cae rápidamente desde la velocidad máxima, hasta un valor relativo de 0.4 en la pared del tanque. Las velocidades en otros puntos del tanque son del orden de 0.25 veces la velocidad en el extremo de las palas, si bien existen dos regiones con forma de bucle en que el fluido prácticamente está estancado, una en la parte superior del agitador y otra por debajo, en las cuales la velocidad es solamente superior 0.10 a 0.15 veces la velocidad máxima.



Al aumentar la velocidad de giro del agitador, aumenta la velocidad máxima y la velocidad de circulación. Sin embargo, la velocidad del fluido en un determinado punto, no aumenta en la misma proporción, debido a que cuando la velocidad del chorro es elevada, el arrastre de líquido es mucho mayor que cuando la velocidad es pequeña, y la velocidad del chorro disminuye muy rápidamente al aumentar la distancia desde el agitador.

Para un punto dentro del tanque, situado a 6 cm del agitador, según se indica en la **Figura 6**, se ha encontrado, que la velocidad del fluido aumenta con la raíz cúbica de la velocidad del agitador. [2]



CAPITULO II. Equipo Empleado (Nomenclatura, Usos, etc.)

2.1 Equipo de agitación

Los líquidos se agitan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente de forma cilíndrica y con el 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. Sin embargo, en muchas situaciones se utiliza un diseño estandarizado como el que se muestra en la **Figura 7-1**. El fondo del tanque es redondeado y no plano, con el fin de eliminar los rincones escarpados o regiones en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. [8] Normalmente el fondo del tanque tiene forma de plato, pues el consumo de energía en la agitación es menor, además de evitar “espacios muertos”. La relación óptima H/D_t para el caso de un agitador es 1, en que el agitador se ubica en el centro del tanque.

Si $H/D_t > 1 \rightarrow$ zonas muertas. [10]

El agitador va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior. Un motor eléctrico impulsa al agitador, que está montado en un eje, pero más frecuentemente acoplado al eje a través de una caja reductora de velocidad.

Generalmente se incluyen también las conducciones de entrada y salida, serpentines, camisas y oquedades para termómetros u otros instrumentos de medida de la temperatura.

El agitador crea un cierto tipo de flujo en el sistema, dando lugar a que el líquido circule a través del tanque y eventualmente retorne al agitador.



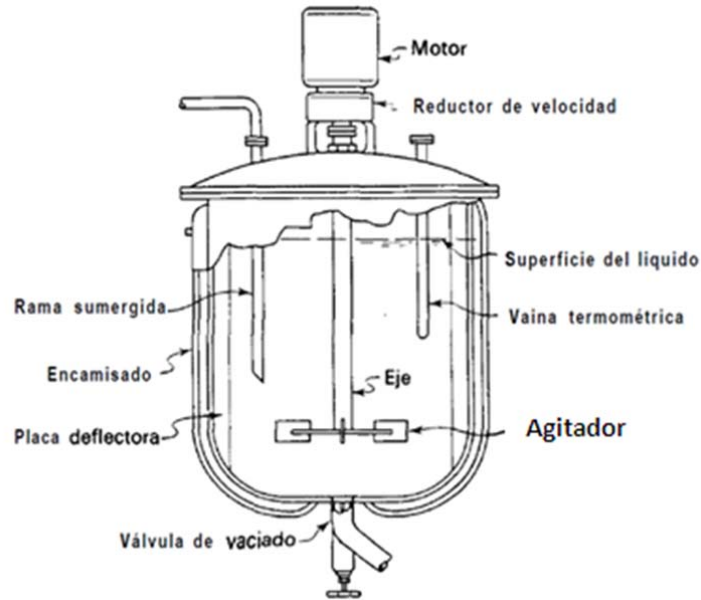


Figura 7-1. Tanque típico de agitación

Para aumentar la eficiencia del mezclado, se pueden instalar unos deflectores (Ver sección 2.4.1) en la pared del tanque; así se evita que el fluido gire como un sólido rígido y se logra aumentar la vorticidad. En la **Figura 7-2** podemos ver el esquema estándar de un equipo y en la **Tabla 2** las dimensiones del tanque.

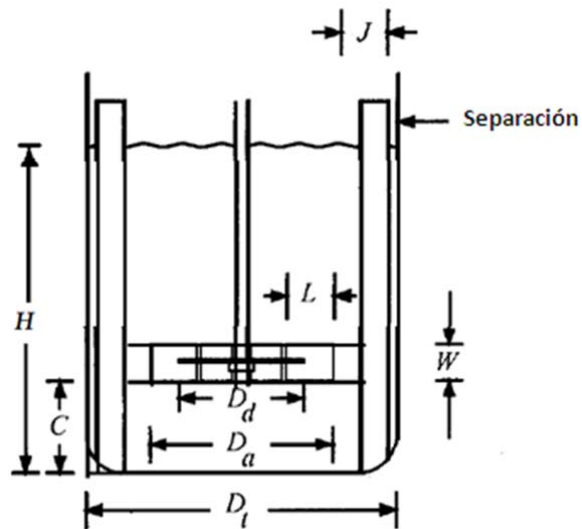


Figura 7-2. Esquema estándar de un equipo de agitación (En este caso se presenta una turbina de seis aspas con disco).



Tabla 2.Parámetros geométricos del tanque de agitación.

Parámetros geométricos	Abreviatura
Diámetro del tanque	D_t
Profundidad del líquido	H
Diámetro del agitador	D_a
Anchura de la pala	L
Altura de la pala	W
Anchura del baffle	J
Altura del agitador	C

2.2 Tipos de Agitadores

Los tres principales tipos de agitadores son de **hélice**, de **paletas** y de **turbina**. Cada uno de ellos comprende muchas variantes y subtipos que no se considerarán aquí. Para mayor información de las diferentes variantes y subtipos de agitadores revisar la bibliografía [12], en el apartado Equipos de Mezcla.

Otros agitadores especiales resultan también útiles en situaciones especiales, pero los tres tipos principales mencionados resuelven tal vez el 95 % de todos los problemas de agitación de líquidos. [8]

En el **Anexo B** existen relaciones fundamentales (las encontraremos en la **Gráfica B.1** y **Tabla 4.10**) para diferentes diseños de agitadores. [13]

2.2.1 Agitador de tres aspas (propulsor de hélice)

Existen varios tipos de agitadores de uso común. Uno de los más conocidos es el agitador de tres aspas de tipo marino, similar a la hélice de un motor fuera de borda para lanchas. [9]



Una hélice es un agitador cuya misión es enviar fundamentalmente el flujo en dirección axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Este tipo de flujo se presenta con un Reynolds de entre 200 a 600, y se transforma en flujo radial cuando el número de Reynolds disminuye. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor, entre 1150 y 1750 rpm (revoluciones por minuto) con transmisión directa; las grandes giran entre 400 y 800 rpm con transmisión por engranajes.

Para la suspensión de sólidos es habitual utilizar las unidades de transmisión por engranajes, mientras que para reacciones o dispersiones rápidas son más apropiadas las unidades de alta velocidad. [12]

El agitador puede ser móvil para introducirlo lateralmente en el tanque o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. En la **Figura 4** se muestra el patrón de flujo en un tanque con deflectores y con un propulsor colocado en el centro del tanque. Este tipo de patrón de flujo se llama flujo axial, ya que el flujo fluye axialmente hacia abajo en el eje central o eje de la hélice y hacia arriba a los lados del tanque, como se muestra en la citada figura. [9]

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. 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 que se obtendría mediante una columna equivalente creada por una boquilla estacionaria. Las palas de la hélice cortan o friccionan vigorosamente el líquido.

Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran tamaño. Para tanques extraordinariamente grandes, del orden de 1500 m³ se han utilizado agitadores múltiples, con entradas laterales al tanque.

Una hélice giratoria traza una hélice en el fluido y, si no hubiese deslizamiento entre el fluido y la hélice, una revolución completa provocaría el desplazamiento longitudinal del líquido una distancia fija, dependiendo del ángulo de inclinación de las palas de la hélice. La relación que existe entre esta



distancia y el diámetro de la hélice se conoce como **paso** de hélice. Una hélice con un paso de 1,0 se dice que tiene **paso cuadrado**.

En la **Figura 8-a** se representa una hélice típica. Las más frecuentes son las hélices marinas de tres palas con paso cuadrado; para fines especiales se utilizan hélices de cuatro palas, ruedas dentadas y otros diseños.

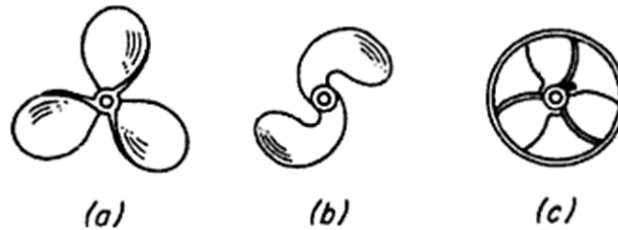


Figura 8. Hélices de mezcla a) Normal de tres palas b) De cuchilla c) Protegida

El diámetro de los agitadores de hélice, raramente es mayor de 45 cm, independientemente del tamaño del tanque. En tanques de gran altura, pueden disponerse dos o más hélices sobre el mismo eje, moviendo el líquido generalmente en la misma dirección. A veces dos agitadores operan en el sentido opuesto o en un <<push pull>>, creando una zona de elevada turbulencia en el espacio comprendido entre ellos.

2.2.2 Agitadores de paletas (palas)

En la **Figura 9** se representan distintos tipos de agitadores de paletas para los problemas más sencillos, un agitador eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. A veces las palas están inclinadas, pero lo más frecuente es que sean verticales. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, sin que haya prácticamente movimiento vertical excepto que las palas están inclinadas. Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo.

En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras, en un mismo eje. En algunos diseños las palas se adaptan a la forma de las paredes del



tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura.

Una pala de este tipo recibe el nombre de **agitador de ancla (áncora)**. Las anclas resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, tal como un tanque encamisado, pero en cambio son malos mezcladores. Casi siempre operan conjuntamente con un agitador de alta velocidad que generalmente gira en sentido contrario. [8]

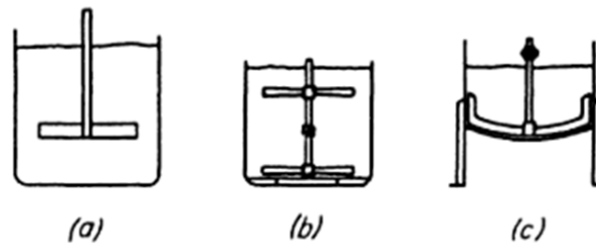


Figura 9. Agitadores de paletas (a) Paletas planas (b) Paletas inclinadas (c) Agitador de ancla. [8]

Para velocidades de 20 a 200 rpm se emplean diversos tipos de de agitadores de paletas. Tal como se muestra en la **Figura 10** se tienen sistemas de dos a cuatro paletas planas. La longitud total del agitador de paletas mide del 60 al 80% del diámetro del tanque y la anchura de la paleta es de 1/6 a 1/10 de su longitud. A bajas velocidades se consigue una agitación suave en un recipiente sin deflectores. A veces a velocidades más altas se usan deflectores porque, sin ellos, el líquido simplemente hace remolinos y en realidad casi no se mezcla. El agitador de paletas no es efectivo para sólidos en suspensión porque, aunque hay un buen flujo radial, hay poco flujo axial o vertical. Se puede usar una paleta de ancla o compuerta, ilustrada en la **Figura 10-b**, la cual barre o raspa las paredes del tanque y a veces a su fondo. Se emplea con líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes y para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero no es buen mezclador. Se suele usar para procesar pastas de almidón, pinturas, adhesivos y cosméticos. [9]



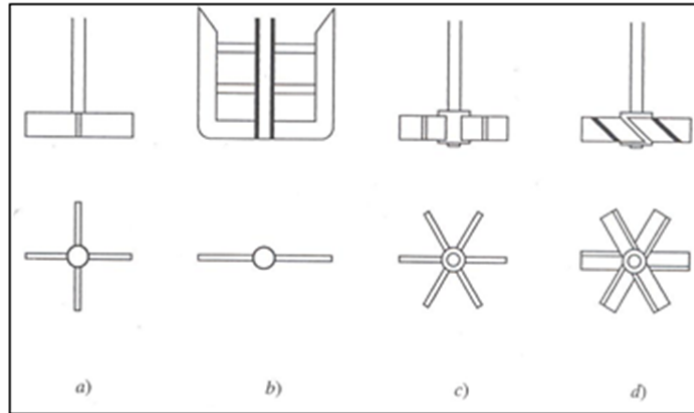


Figura 10. Varios tipos de agitadores: (a) Paleta de cuatro aspas, (b) Paleta de compuerta o ancla, (c) Turbina abierta de seis aspas, (d) Turbina de aspas inclinadas (45°). [9]

2.2.3 Agitadores de turbina.

En la **Figura 11-b, c y d** se representan algunos de los numerosos diseños de turbinas. La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con múltiples y cortas paletas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente dentro del tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El agitador puede ser abierto, semicerrado o cerrado.

En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del agitador hay una zona de corrientes rápidas, elevada turbulencia e intensos esfuerzos cortantes. 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 (**Figura 11-d**).



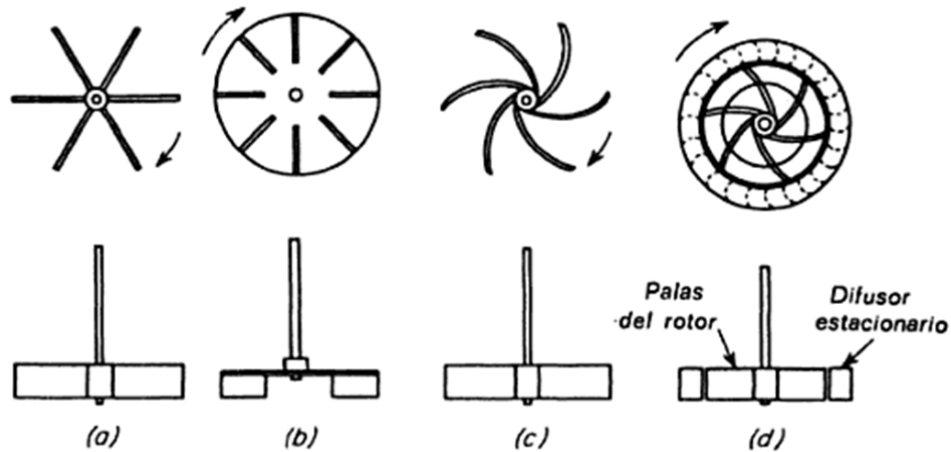


Figura 11. Diversos agitadores de turbina (a) Abierto de palas verticales (b) De disco con aletas (c) De paletas verticales curvas (d) Cerrado de paletas curvas con anillo difusor. [8]

Cuando se procesan líquidos con amplia diversidad de viscosidades se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. [8]

El diámetro de una turbina suele medir del 30 al 50% del diámetro del tanque. Normalmente las turbinas tienen cuatro o seis aspas. En la **Figura 12** se muestra un agitador de turbina de seis aspas, con disco; en la **Figura 13-a** se ilustra una turbina plana abierta de seis aspas. Las turbinas con aspas planas producen un flujo radial, como se muestra en la **Figura 12**. Para dispersar un gas en un líquido, el gas puede hacerse penetrar justo por debajo del agitador de la turbina en su eje; de esa manera las paletas dispersan el gas en muchas burbujas finas. Con la turbina de hojas inclinadas que se muestra en la **Figura 10-d**, con las aspas a 45° se imparte cierto flujo axial, de modo que hay una combinación de flujos radial y axial. Este tipo es útil para sólidos en suspensión, ya que las corrientes fluyen hacia abajo y luego se levantan los sólidos depositados. [9]

El agitador de turbina semiabierto, conocido como agitador de disco con aletas, que se representa en la **Figura 11-b**, se emplea para dispersar o disolver un gas en un líquido. El gas entra en la parte inferior del eje del agitador; las aletas lanzan las burbujas grandes y las rompen en muchas pequeñas, con lo cual se



aumenta grandemente el área interfacial entre el gas y el líquido. A veces se dirige el gas hacia abajo del eje del agitador, aunque resulta menos eficaz que tomarlo desde abajo; o puede formarse intencionalmente un vórtice, que dirija el gas desde el espacio situado por encima del líquido hacia la zona de mezcla. [8]

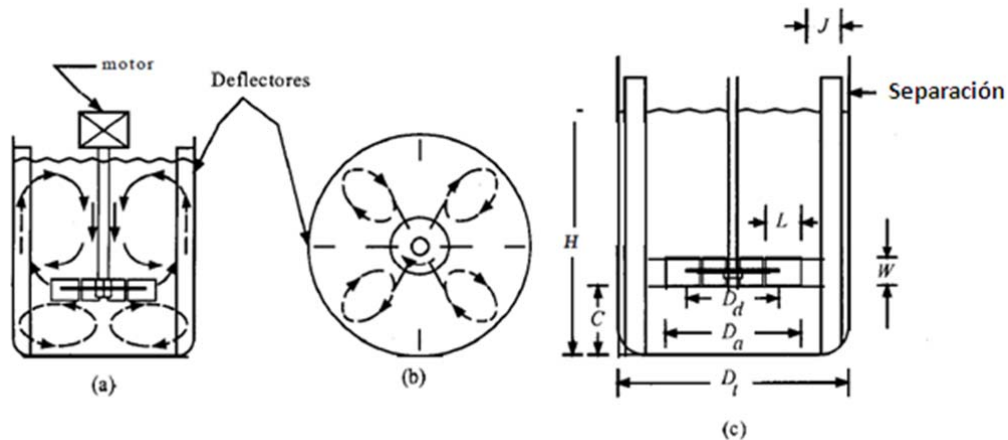


Figura 12. Tanque con deflectores con un agitador de turbina de seis aspas con disco, que muestra patrones de flujo: (a) vista lateral, (b) vista superior, (c) dimensiones de la turbina y el tanque. [9]

A menudo se emplea una turbina de hoja inclinada con solo cuatro hojas para la suspensión de sólidos. El agitador de alta eficiencia de tres hojas que se muestra en la **Figura 13** es semejante a una turbina inclinada de cuatro hojas; sin embargo, presenta un ángulo de inclinación mayor de 30-60° en el centro y un ángulo más pequeño de 10-30° en la punta. Este agitador de flujo axial produce más movimiento de fluido y mezclado por unidad de potencia, y es muy útil para la suspensión de sólidos.



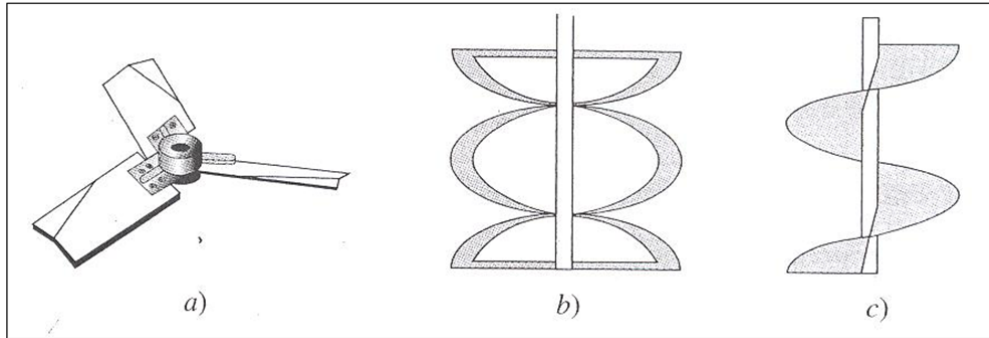


Figura 13. Otros tipos de agitadores: (a) Agitador de tres hojas de alta eficiencia, (b) Cinta de doble hélice, (c) Tornillo helicoidal. [Copyright by the American Institute of Chemical Engineers].

2.2.4 Agitadores de banda helicoidal.

Este tipo de agitadores se usa para soluciones sumamente viscosas y opera a pocas rpm, en la región laminar. La banda se forma en una trayectoria helicoidal y está unida a un eje central. El líquido se mueve en una trayectoria de flujo tortuosa hacia abajo en el centro y hacia arriba a los lados, con movimiento de giro. Otros tipos semejantes son el de la banda helicoidal doble (**Figura 13-b**) y el de banda helicoidal con tornillo (**Figura 13-c**).

2.3 Selección del agitador e intervalos de viscosidad.

La viscosidad del fluido es uno de los diferentes factores que influyen en la selección del tipo de agitador. En seguida se dan algunas indicaciones de los intervalos de viscosidad de esos agitadores. Como se puede observar en la **Figura 14** vemos los diferentes tipos de agitadores dependiendo del rango de viscosidad.

- Los **propulsores** (agitadores tipo hélice) se usan para viscosidades del fluido inferiores a 3 Pa*s (3000 cp)
- Las **turbinas** pueden usarse por debajo de unos 100 Pa*s (100 000 cp)
- Las **paletas modificadas** como los agitadores tipo ancla se pueden usar desde más de 50 Pa*s hasta unos 500 Pa*s (500 000 cp);



- Los agitadores **helicoidales** y de **tipo banda** se suelen usar desde arriba de este intervalo hasta cerca de 1000 Pa*s y se han utilizado hasta para más de 25 000 Pa*s.

Para viscosidades mayores de unos 2.5 a 5 Pa*s (5000 cp) o más, los deflectores no se necesitan porque hay poca turbulencia. [9]

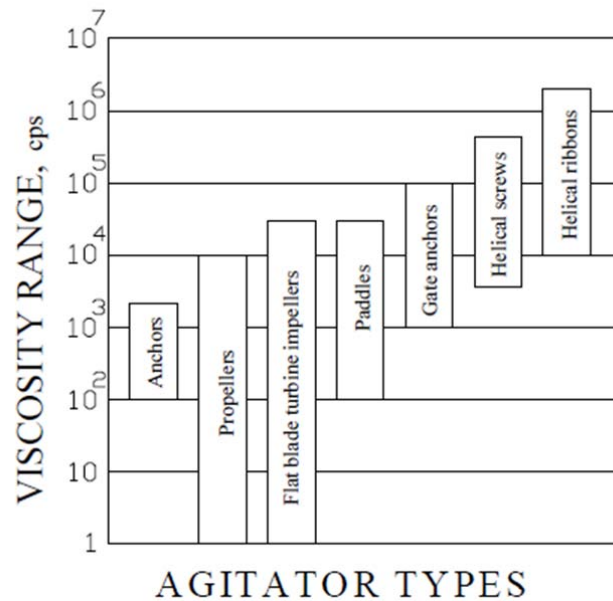


Figura 14. Recomendaciones de diseñadores de agitadores de acuerdo a los distintos requerimientos de viscosidad del fluido de trabajo. De izquierda a derecha, los tipos de agitadores son: Agitador tipo ancla, Hélices, Turbinas de paleta plana, Agitadores de paletas o palas, Anclajes de puerta, Hélice de tornillo y Hélices de banda. [11]

2.3.1 Selección de agitadores de alta viscosidad

En líquidos con viscosidad mayor a 10.000 cp, la generación de turbulencia, usando turbinas y agitadores clásicos llega a ser muy difícil. En flujos líquidos de alta velocidad se disipa mucha energía tratando de vencer las fuerzas de avance. Las turbinas y agitadores resultan ser muy ineficientes cuando se trabaja con líquidos viscosos.

En el **Anexo C** se muestra la recopilación de antecedentes realizada para estos otros agitadores de alta viscosidad. [11]



2.4 Variaciones introducidas en el agitador para conseguir una mejor mezcla

El diseño de un tanque agitado está orientado a lograr el grado de mezcla requerido, con el menor consumo posible de energía.

Existen correlaciones empíricas que permiten dimensionar cierto tipo de agitadores, dada una configuración geométrica estándar del tanque.

Aparte de cambiar el tipo de agitador, se pueden variar otros parámetros de la instalación, como la forma del tanque, la posición del eje, etc., consiguiéndose distintos efectos, generalmente encaminados a la consecución de una mejor mezcla.

2.4.1 Baffles

Una primera modificación podría ser la introducción de **placas deflectoras** (“en inglés baffles”) (Ver Gráfica 1).

Las **placas deflectoras** (“baffles”) son bandas planas verticales, situadas radialmente y a lo largo de la pared del tanque, que generan una mayor turbulencia en el fluido, con la consiguiente mejora del proceso de mezcla. Generalmente, cuatro deflectores suelen ser suficientes. La anchura habitual para estos dispositivos es de 1/10 a 1/12 el diámetro del tanque (dimensión radial). Para números de Reynolds superiores a 2000, los deflectores se usan conjuntamente con agitadores de tipo turbina y con propulsores de flujo axial centrados. Los patrones de flujo generados en ambos casos son diferentes, pero tienen en común una importante circulación desde la parte superior al fondo, evitando la formación de vórtices. En la región de transición ($10 < Re < 10000$) la anchura del tabique deflector puede reducirse con frecuencia a la mitad de la estándar. En la región de flujo laminar ($Re < 10$), el agitador consume la misma energía con o sin deflectores, por lo que no se utilizan frecuentemente. [12]

Salvo en el caso de utilizar NRe muy grandes, los baffles son necesarios para evitar vórtices y rotación del fluido como un todo. La configuración más estándar de un baffle es:



Espesor → $W = D_t / 12$ (4 baffles equiespaciados es lo estándar)

Largo → Desde $D_d / 2$ desde la sección recta del fondo del tanque 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, los baffles se ubican a una distancia equivalente a $1/6$ de su espesor, de la pared del tanque. [10]

A medida que la viscosidad del fluido aumenta, la necesidad de baffles para menguar la formación de vórtices decrece. Cuando se mezcla líquidos de alta viscosidad, el ancho de los baffles podría ser reducido a $1/20$ veces el diámetro del estanque. Para fluidos muy viscosos, los baffles son más efectivos cuando se posicionan alejados de la pared del estanque o con un ángulo con respecto al eje de simetría del estanque. Un espacio entre pared y baffle de 1.0 veces el ancho del mismo es suficiente para permitirle al líquido moverse a través de la pared del estanque, y así evitar áreas de estancamiento detrás de los baffles. Cuando las turbinas y las hélices marinas son usadas para mezclar líquidos de viscosidades mayores que 20000 cp, los baffles simplemente no son requeridos. Varias configuraciones de baffles son mostradas en la **Figura 15**. [11]

En ocasiones estos elementos no sólo tienen la misión de aumentar la turbulencia, sino que también desempeñan otras funciones. Un ejemplo de esta situación serían los tubos de un intercambiador de calor instalado dentro del tanque de agitación: además de realizar la función de intercambio de calor, actúan también como placas deflectoras, provocando turbulencia y mejorando, por tanto, el proceso de mezcla. [12]



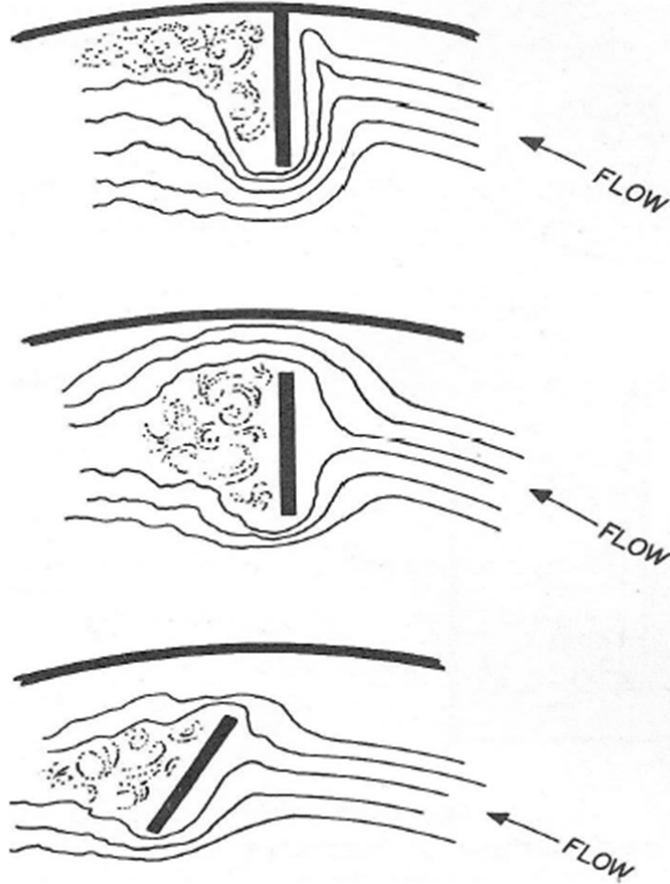


Figura 15. Distintos tipos de baffles para distintas aplicaciones. La primera configuración es la más conocida y está apegada a la pared del tanque, la segunda configuración tiene baffles separados y la tercera baffles separados e inclinados. [11]

2.4.2 Ubicación de los agitadores D_a

Otra variación consiste en montar el **eje del agitador en posición excéntrica (Ver Figura 2 y Gráfica 2)**, lo que permite alcanzar velocidades verticales del fluido mucho mayores, en disminución de la velocidad centrífuga asociada a los vórtices, que no favorece en ningún caso el proceso de mezcla. La colocación es crítica, ya que una excentricidad excesiva o insuficiente podría provocar la aparición de vórtices erráticos, así como tensiones peligrosamente elevadas sobre el eje de giro. Los montajes excéntricos han resultado particularmente eficaces en la agitación de suspensiones de pulpa de papel. [12]



Aquí se puede encontrar gran variedad de opiniones. En principio se puede ubicar a $H/6$ del fondo del tanque. Para el caso de suspensión de sólidos; se recomienda $D_a/3$ del fondo.

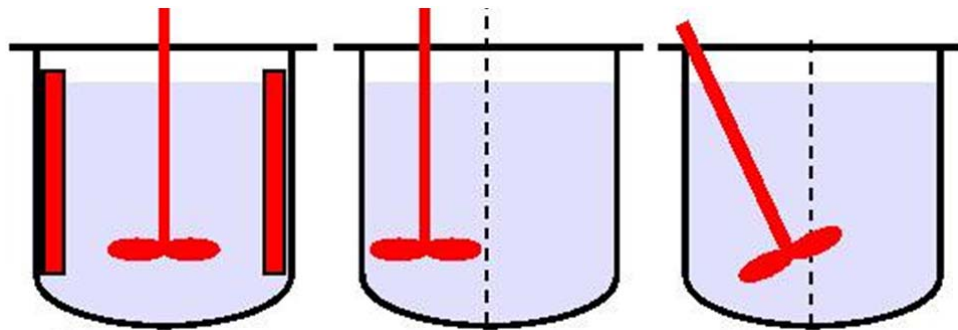
La siguiente tabla da recomendaciones más generales:

Tabla 2.4.2. Recomendaciones generales para la ubicación de los agitadores.

[10]

Viscosidad [cP]	Nivel Max. H/D_t	Nº de agitadores	Ubicación desde el fondo	Ubicación desde nivel superior
$< 25 \cdot 10^3$	1.4	1	$H/3$	--
$< 25 \cdot 10^3$	2.1	2	$D_t/3$	$(2/3) \cdot H$
$> 25 \cdot 10^3$	0.8	1	$H/3$	--
$> 25 \cdot 10^3$	1.6	2	$D_t/3$	$(2/3) \cdot H$

Con esta misma finalidad, existe otra variante: **colocar el eje inclinado** con un ángulo de alrededor de 15° (Ver Figura 3 y Gráfica 3).



Gráfica 1

Gráfica 2

Gráfica 3

Otra medida que podría mejorar la mezcla a lo largo del tanque sería instalar más de un agitador en el eje (Ver Figura 5). Del mismo modo, la geometría del propio tanque influye también en el grado de mezcla alcanzado: los tanques de fondo cuadrado pueden, en algunos casos, aumentar la turbulencia del fluido.

[12]



2.4.3 Tubos de aspiración.

El flujo de retorno a un agitador, de cualquier tipo, llega al mismo procedente de todas las direcciones, siempre que el líquido no esté sometido al control de superficies sólidas. El flujo hacia o desde la hélice, es esencialmente igual al flujo de aire hacia o desde un ventilador instalado en una habitación. En la mayor parte de las aplicaciones de los mezcladores de hélice, este tipo de flujo no es un inconveniente, pero cuando se desea controlar la dirección y velocidad de flujo hacia la succión del agitador, se emplean tubos aspiradores, según se indica en la **Figura 16**. Estos dispositivos pueden ser útiles cuando se desean intensos esfuerzos cortantes en el agitador, como ocurre en la obtención de determinadas emulsiones, o cuando se quieren dispersar en el seno de un líquido partículas sólidas que tienden a flotar en el mismo. Los tubos de aspiración para agitadores de hélice se disponen alrededor del agitador, según se indica en la **Figura 16**.

Los tubos de aspiración aumentan la fricción del fluido, y para una potencia suministrada, disminuyen la velocidad de flujo, de forma que no se utilizan a menos que sean necesarios. [8]

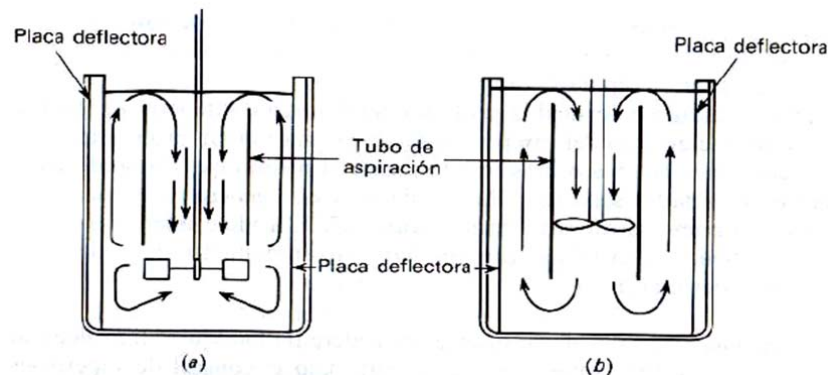


Figura 16. Tubos de aspiración en un tanque agitado: a) Agitador de turbina
b) Agitador de hélice (Según Bissel, Hesse, Everett y Rushton). [8]



CAPITULO III. Obtención de potencias, selección de los agitadores y escalamiento de agitadores, etc.

3.1 Potencia consumida en los recipientes de agitación

Un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia necesaria para mover el agitador. Puesto que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, aún en los sistemas agitados más sencillos, sino que es preciso determinarla por el mismo tipo de experimentos cuantitativos, basados en el análisis dimensional, que se ha aplicado con éxito a otros problemas de la mecánica de fluidos.

Para poder estimar la potencia que se requiere para hacer girar un agitador dado con una velocidad determinada, es necesario disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o N_P) en función de otras variables del sistema. [14]

Entonces el suministro de potencia al agitador puede expresarse a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} = C \left(\frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right)^a \left(\frac{D_a \cdot N^2}{g} \right)^b \dots (1)$$

$$N_P = C(N_{Re})^a (N_{Fr})^b \dots (2)$$

En donde a, b y c dependen del sistema y su geometría;

$$\frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} = \text{Número de potencia adimensional } (N_P) \dots (3)$$

$$\left(\frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right) = \text{Número de Reynolds } (N_{Re}) \dots (4)$$

$$\left(\frac{D_a \cdot N^2}{g} \right) = \text{Número de Froude } (N_{Fr}) \dots (5)$$

El N_{Re} representa la relación de la fuerza aplicada a las fuerzas viscosas de resistencia.



El N_{Fr} representa la relación de las fuerzas aplicadas a las fuerzas gravitacionales. Más adelante profundizaremos en el análisis de estos grupos adimensionales tan importantes en el cálculo de la potencia.

Como la formación de un vórtice es debido a fuerzas gravitacionales, si se suprime el vórtice el N_{Fr} puede ignorarse. El N_{Fr} puede desprejarse; 1) en sistemas con deflectores; y 2) cuando el $N_{Re} < 300$ (región laminar), en éstos casos el exponente b en el número de Froude es cero y consecuentemente $N_{Fr}^b = 1$.

Para estas dos condiciones la ecuación de potencia se puede escribir como:

$$\frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} = C \left(\frac{D_a^5 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right)^a \dots (6)$$

➤ Para la región laminar adopta la forma:

$$\log N_P = \log C - \log N_{Re} \dots (7)$$

$$\log N_P + \log N_{Re} = \log C \rightarrow N_P \times N_{Re} = C = K_T \dots (8)$$

➤ Para régimen de transición ($10 \leq N_{Re} \leq 10000$) a y C varían continuamente ya que hay presencia de flujo turbulento en la hélice y laminar en otras partes

➤ Para régimen turbulento (RT)

❖ Tanques con placas deflectoras

$$N_P = C = K_T \rightarrow \frac{P \cdot g_c}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} = K_T \dots (9)$$

❖ Tanques sin placas deflectoras

N_{Fr} es importante. Hay que considerar la ecuación general:

$$\log N_P = \log C + \log N_{Re} + b * \log N_{Fr} \dots (10)$$

Gráficas de N_P vs N_{Re} en coordenadas log. vs log., se denominan como curvas de potencia. Estas curvas permiten calcular la potencia de agitación requerida para distintas velocidades de agitación, así como viscosidades y densidades



del líquido; en la literatura se encuentran reportadas diferentes curvas de potencia para configuraciones específicas de agitadores. [15]

Una determinada curva de potencia es válida para una configuración geométrica particular pero resulta independiente del tamaño del tanque. Así por ejemplo, una misma curva de potencia puede utilizarse para correlacionar tanto datos de potencia de un tanque de 20 lt. como uno de 20,000 lt., siempre que la configuración geométrica sea la misma para ambos sistemas.

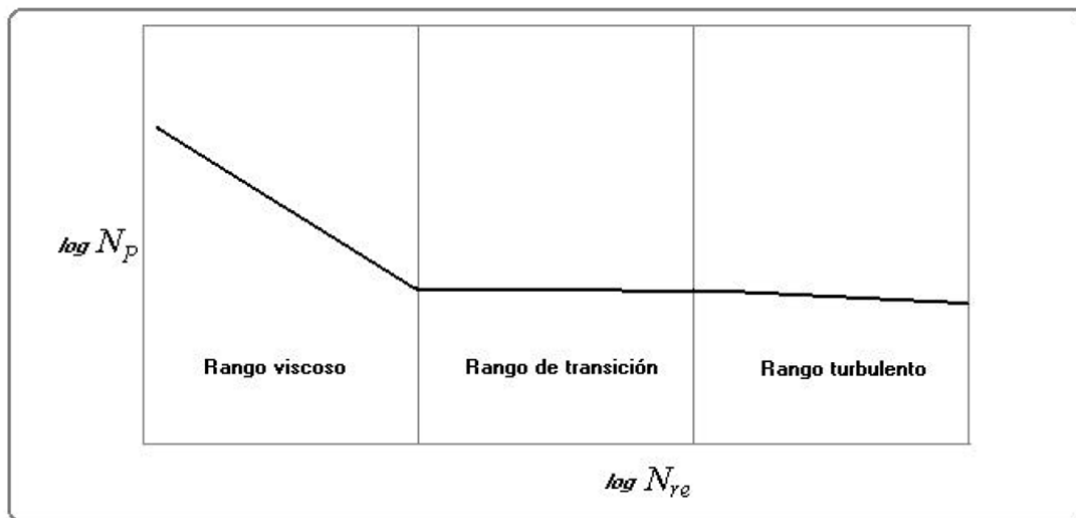


Figura 17. Esquematización de una curva de potencia.

Existen varias curvas de potencia reportadas en la literatura para diferentes sistemas y en las cuales generalmente se distinguen tres zonas, como se muestra en la **Figura 17**:

I. Rango viscoso: a números de Reynolds bajos dominan las fuerzas viscosas y la curva sigue una relación lineal.

II. Rango de transición: al incrementarse el número de Reynolds el sistema entra en un régimen en el cual se le transmite suficiente energía al líquido para que forme un vórtice, sin embargo, la presencia de baffles suele ser efectiva en evitar éste fenómeno y sólo se tiene dependencia con el número de Reynolds.

III. Rango turbulento: a números de Reynolds relativamente altos, el flujo se torna completamente turbulento y la curva de potencia se vuelve horizontal, independientemente de ambos números de Reynolds y el número de Froude.



3.2 Correlaciones de potencia

Para conocer la potencia requerida para accionar un agitador que gira a una velocidad N se utilizan *correlaciones empíricas* que vinculan la P o N_P con las variables del sistema.

La forma general de estas correlaciones pueden ser obtenidas mediante el análisis dimensional.

Las variables que pueden ser controladas y que influyen en la potencia consumida por el agitador son:

- Dimensiones principales del tanque y del agitador: Diámetro del tanque (D_t), Diámetro del agitador (D_a), Profundidad o altura del líquido (H), Ancho de la placa deflectora o baffle (J), Distancia del fondo del tanque hasta el agitador o altura del agitador (C), y dimensiones de las paletas.
- Viscosidad (μ) y densidad (ρ) del fluido.
- Velocidad de giro del agitador (N).

Se incluyen además: g (formación de vórtice) y g_c (se aplica la ley de Newton)

Las características antes mencionadas pueden convertirse en relaciones adimensionales, llamados factores de forma. Se calculan dividiendo cada uno de los términos por uno que se tome como base. Ejemplo: diámetro del agitador.

Dos sistemas son geoméricamente semejantes cuando tienen diferentes tamaños, pero idénticos S_i (factores de forma).

Las letras S_i corresponden a los factores de forma. En términos de las dimensiones del tanque y del agitador (ver **Figura 18** y **Tabla 2**):

$$S_1 = D_t / D_a \quad S_2 = C / D_a \quad S_3 = L / D_a$$

$$S_4 = W / D_a \quad S_5 = J / D_t \quad S_6 = H / D_t$$



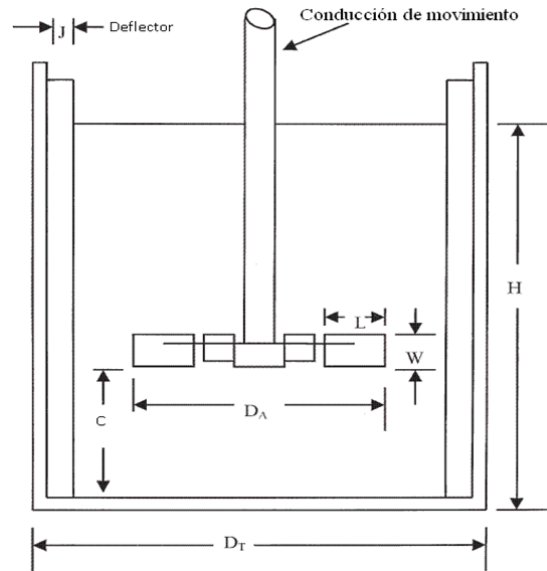


Figura 18. Parámetros geométricos de un tanque de agitación (C: altura del agitador sobre el fondo del tanque)

El cálculo de la potencia consumida se hace a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de Potencia. Estas gráficas dependerán de las características geométricas del agitador y de si están presentes o no, las placas deflectoras.

La potencia consumida define el costo de operación. [16]

3.3 Números adimensionales importantes

3.3.1 Número de Potencia (N_p)

El consumo de potencia de un fluido durante el proceso de agitación no es más que la disipación de la energía mecánica proveniente del agitador en el fluido por medio de la fricción entre las capas del fluido. En el estado estacionario del proceso de agitación, la potencia suministrada por el agitador es igual a la potencia consumida por el fluido. El consumo de potencia de un agitador en un tanque agitado con un líquido newtoniano se puede predecir con bastante exactitud a partir del número de potencia. Este número adimensional forma parte de las correlaciones que describen la hidrodinámica de un sistema de agitación, las cuales, de forma general, se expresan con la siguiente correlación:



$N_P = f(N_{Fr}, N_{Re}, \text{relaciones geométricas simples})$

Donde N_P es el número de potencia, N_{Fr} el número de Froude y N_{Re} es el número de Reynolds. En esta correlación la influencia de la fuerza gravitatoria sobre la hidrodinámica del sistema puede ser despreciada si el sistema tiene suficientes deflectores. Hay que señalar que los factores geométricos que componen la ecuación pueden ser divididas en dos grupos: el primero, representado por las relaciones geométricas simples que describen los cambios geométricos del agitador, y el segundo, integrado por los que caracterizan los cambios en la geometría del resto del sistema de agitación. Los factores geométricos que componen el segundo grupo tienen una influencia indirecta sobre las variaciones en el consumo de potencia y su efecto se expresa, fundamentalmente, en la caída de presión del líquido que recircula en el tanque.

El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido ρ , su viscosidad μ , la velocidad de rotación N y el diámetro del agitador D_a por medio de gráficas de número de potencia N_P en función de N_{Re} . El número de potencia es

$$N_P = \frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} \dots (\text{SI}) \dots (11)$$

$$N_P = \frac{P \cdot g_c}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} \dots (\text{unidades del sistema inglés}) \dots (12)$$

Donde P = Potencia en J/s o Watts.

En unidades del sistema inglés, $P = \text{pie} \cdot \text{lb}_f / \text{seg}$.

3.3.2 Número de Reynolds (N_{Re})

El número de Reynolds representa una medida de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los esfuerzos viscosos. Para determinar si un fluido es laminar o turbulento se debe calcular su número de Reynolds. El número de Reynolds es un parámetro adimensional que se calcula, para el caso de sistema con agitadores rotatorios, a través de la ecuación (13).



$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \dots (13)$$

D_a = diámetro del agitador (m)

N = velocidad de rotación (revoluciones \times segundo)

ρ = densidad del fluido $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

μ = viscosidad (Pa. s)

En agitación se presentan tres regímenes de flujo: laminar, de transición y turbulento. La bibliografía no suele coincidir exactamente en el valor de los límites que separan cada uno de estos regímenes, así que a groso modo se expone una clasificación aproximada que es válida para flujos creados por el funcionamiento de turbinas dentro de depósitos:

- Régimen laminar: $Re \leq 10^2$
- Régimen transitorio: $10^2 < Re \leq 10^3$
- Régimen turbulento: $Re > 10^3$

3.3.3 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.

$$N_{Fr} = \left(\frac{\text{Fuerzas asociadas con la energía cinética}}{\text{Fuerzas asociadas con la gravedad}} \right)$$

Es útil en el análisis y escalamiento de tanques sin baffles (placas deflectoras). Si el tanque no tiene baffles se presenta el vórtice.

En el **Anexo C** se hace un análisis dimensional detallado de un vórtice también comúnmente llamado remolino.

Cuando se presenta el vórtice se requiere un número adimensional llamado de Froude, que toma en cuenta los efectos del vórtice:

$$N_{Fr} = \frac{D_a \cdot N^2}{g} \dots (14)$$



D_a = diámetro del agitador (m)

N = velocidad de rotación (revoluciones \times segundo)

g = constante de la gravedad (m/s²)

El número de Froude interviene en dinámica de fluidos siempre que existe un movimiento de ondas importante sobre la superficie del líquido. Es especialmente importante en el diseño de barcos.

3.4 Cálculo del consumo de potencia

La potencia suministrada al líquido se calcula a partir de la expresión general:

$$\varphi = \frac{N_P}{N_{Fr}^m} = \frac{P \cdot g_c}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho \cdot N_{Fr}^m} \dots (15)$$

Donde φ es la función de potencia

En el cálculo se pueden distinguir los siguientes casos:

3.4.1 Cálculo de potencia: Casos límite

I) N_{Re} bajos (< 300) o tanques con placas deflectoras (N_{Fr} no es importante)

$$\varphi = N_P = \frac{P \cdot g_c}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho \cdot N_{Fr}^m} \rightarrow P = \varphi \frac{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho}{g_c} \dots (16)$$

II) $N_{Re} > 300$ tanques sin placas deflectoras (N_{Fr} debe ser considerado). Hay que aplicar ecuación general (16).

III) $N_{Re} < 10$ tanques con o sin placas deflectoras

Para ($N_{Re} < 10$) las líneas de N_P vs N_{Re} coinciden para un tanque con o sin placas deflectoras (ver gráfico de próxima página), y $\varphi = f(N_{Re})$ es una recta de pendiente con valor de -1. En este intervalo el flujo es laminar, la densidad deja de ser un factor importante y la ecuación de potencia se transforma en:



$$N_p \cdot N_{Re} = cte = K_L = \frac{P \cdot g_c}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} \times \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{P \cdot g_c}{D_a^3 \cdot N^2 \cdot \mu} \dots (17)$$

$$P = \frac{D_a^3 \cdot N^2 \cdot \mu}{g_c} \dots (18)$$

$$P = K_L \cdot D_a^3 \cdot N^2 \cdot \mu \dots (19)$$

IV) $N_{Re} > 10.000$ tanque con placas deflectoras ϕ es independiente del N_{Re}

En tanques con placas deflectoras, para $N_{Re} > 10000$, el número de potencia es independiente del N_{Re} y la viscosidad ya no influye. En este intervalo el flujo es totalmente turbulento. Cuando el flujo de un tanque es turbulento, la potencia necesaria puede estimarse a partir del producto del flujo generado por el agitador y la energía cinética por unidad de volumen del fluido, resultando la siguiente ecuación:

$$N_p = \phi = K_T = \frac{P \cdot g_c}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} \rightarrow P = K_T \frac{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho}{g_c} \dots (20)$$

$$P = K_T \cdot D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho \dots (21)$$

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

Tabla 3.4.1. Valores de las constantes K_L y K_T en las ecuaciones (19) y (21) para tanques provistos de cuatro placas deflectoras situadas en la pared y con una anchura igual al 10 % del diámetro del tanque.

Tipo de agitador	K_L	K_T
Hélice (paso cuadrado, tres palas)	41,0	0,32
Hélice (paso igual a 2, tres palas)	43,5	1,00
Turbina (seis palas planas)	71,0	6,30
Turbina (seis palas curvadas)	70,0	4,80
Ventilador de turbina (seis paletas)	70,0	1,65
Paletas planas (dos palas)	36,5	1,70
Turbina cerrada (seis palas curvadas)	97,5	1,08
Turbina cerrada (con stator, sin placas deflectoras)	172,5	1,12

* De J. H. Rushton, Ind. Eng. Chem., **44** :2931 (1952).



3.5 Cálculo de potencia: Uso de gráficos

Estas correlaciones corresponden a valores específicos de los factores de forma definidos en las páginas anteriores (S_i), del tipo y disposición del equipo, debiendo especificarse también el número de palas del agitador y el número de placas deflectoras.

3.5.1 Potencia para tanques con placas deflectoras

En la **Figura 19** se representan curvas típicas para N_P vs N_{Re} en el caso de tanques con placas deflectoras, equipados con turbinas de 6 placas planas localizadas centralmente.

La curva A corresponde a palas verticales con $S_4=0.25$; la curva B es para un agitador 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 tanque sin placas deflectoras.

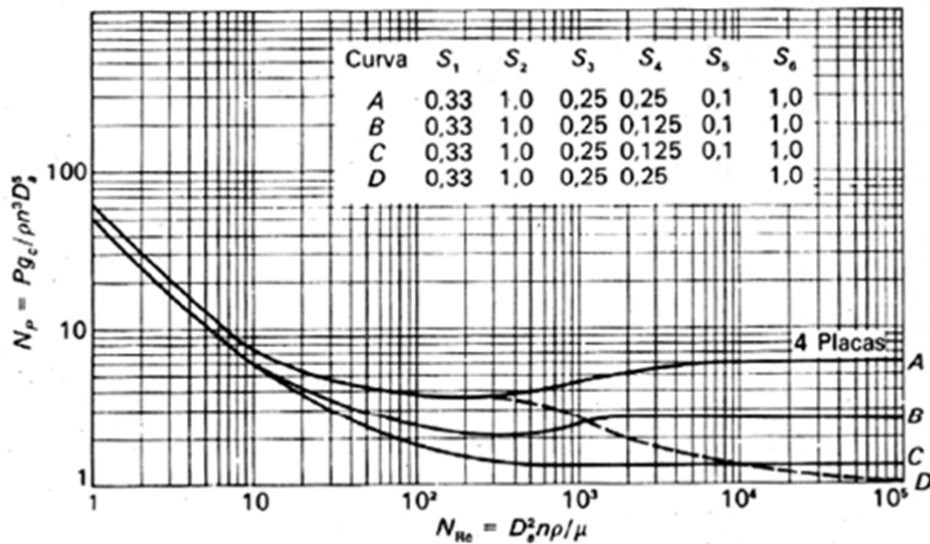


Figura 19. Número de potencia N_P versus N_{Re} para turbina de seis palas. Para la porción de trazos de la curva D, el valor de N_P que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por N_{Fr}^m .



La curva A de la **Figura 20** corresponde a un agitador de tres palas instalado centralmente en un tanque con placas deflectoras. Las hélices y las turbinas con placas deflectoras presentan un consumo de potencia considerablemente menor que una turbina con placas verticales.

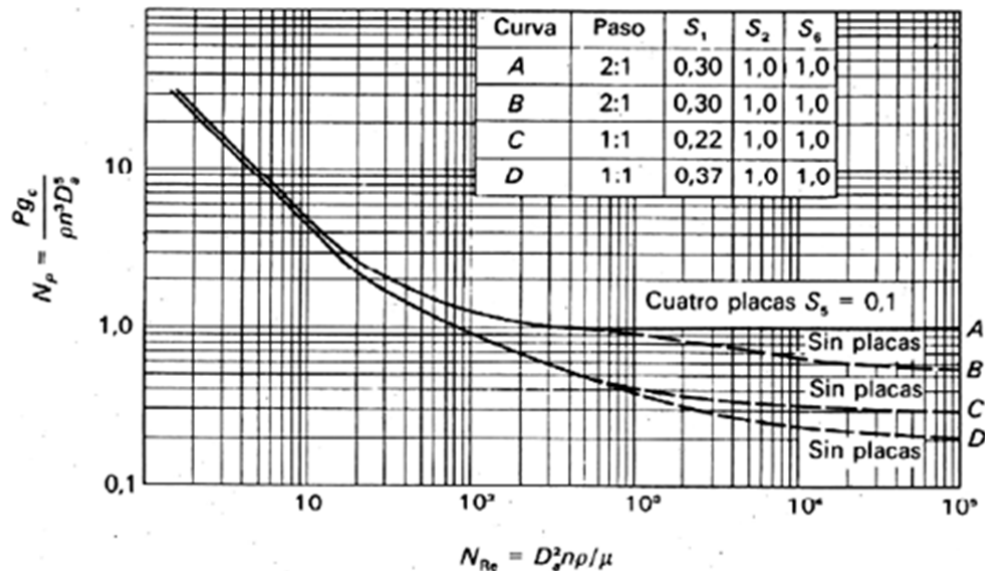


Figura 20. Número de potencia N_P versus N_{Re} para turbina de tres palas. Para las porciones de trazos de las curvas B, C y D, el valor de N_P que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por N_{Fr}^m .

3.5.2 Potencias para tanques sin placas deflectoras

Para bajos N_{Re} ($N_{Re} < 300$), las curvas para tanques con o sin placas deflectoras son idénticas. Sin embargo, las curvas divergen para N_{Re} más elevados (Ver **Figura 19** y las curvas B, C y D de **Figura 20**) 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:

$$N_P = N_{P_0} \cdot (N_{Fr})^m \dots (22)$$

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

$$m = \frac{(a - \log N_{Re})}{b} \dots (23)$$



Donde a y b son constantes. La siguiente tabla de valores de las constantes a y b para las curvas de las **Figuras 19 y 20**. Para utilizar las curvas de línea punteada de las **Figuras 19 y 20** hay que corregir el número de potencia (N_P), leído de la escala de las ordenadas, multiplicándolo por $(N_{Fr})^m$. [16]

Tabla 3.5.2. Constantes a y b de la ecuación (23)

Figura	Línea	a	b
18	D	1,0	40,0
19	B	1,7	18,0
19	C	0	18,0
19	D	2,3	18,0

3.6 Efecto de la geometría del sistema

Los efectos de los S_i sobre N_P son algunas veces muy pequeños y otras veces importantes.

Muchas veces el efecto de un factor de forma depende del valor que adopta otro factor de forma. (Ejemplo: el efecto de S_1 depende de S_4 o S_5).

Para el caso de turbinas de palas planas que opera a N_{Re} elevados el efecto de la geometría del sistema puede resumirse como sigue:

1) $S_1 = D_a / D_t$ $S_1 \downarrow$ $N_P \uparrow$ pocas placas de ancho pequeño

$N_P \downarrow$ muchas placas de buen ancho

2) $S_2 = C / D_a$ $S_2 \uparrow$ $N_P \uparrow$ turbina de disco

$N_P \downarrow$ turbina con palas inclinadas

$N_P \downarrow$ turbina de palas rectas

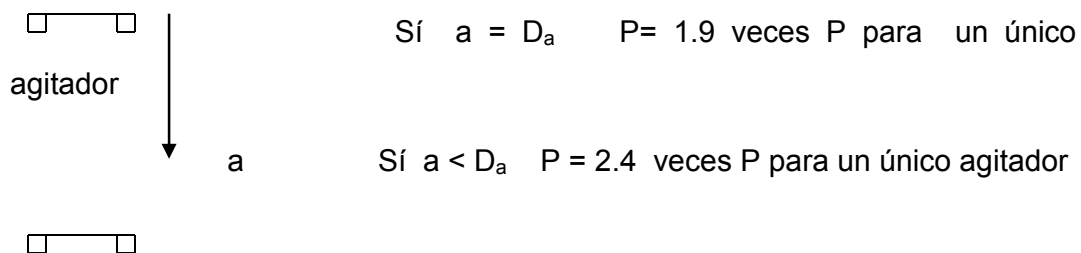


3) $S_4 = W / D_a$ turbinas de palas rectas f (número de palas)

$$S_4 \uparrow \quad N_P \uparrow \propto S_4 \text{ (turbina de 6 palas)}$$

$$N_P \uparrow \propto S_4^{1.25} \text{ (turbina de 4 palas)}$$

4) Dos agitadores de turbina situados sobre el mismo eje consumen una potencia que es:



5) La influencia de la forma del tanque es de poca importancia.

6) La inclinación de las palas

- ❖ palas inclinadas < Potencia que uno de palas rectas
- ❖ inclinación de palas de 45° N_P es $0.4 N_P$ con palas rectas [15]

3.7 Diseño “normal” típico de una turbina

El agitador de turbina que se muestra en la **Figura 7-2** es el más usado en las industrias de proceso. Para diseñar un sistema de agitación ordinario, generalmente se usa este tipo de agitador en el diseño inicial. Las proporciones geométricas del sistema de agitación que se considera como el diseño “normal” típico se muestra en la **Tabla 3.7**. Estas proporciones relativas son la base de las correlaciones principales del desempeño de los agitadores en muchas publicaciones. (Véase la nomenclatura de la **Tabla 2**).



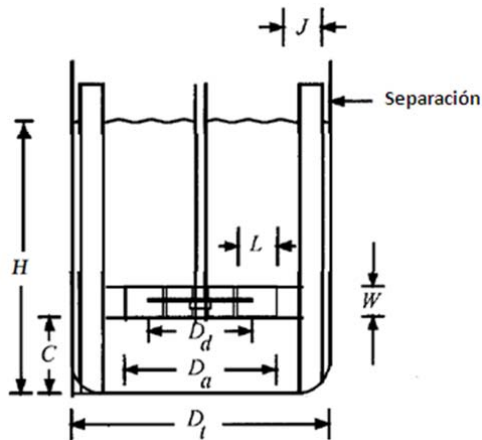


Figura 7-2. Esquema estándar de un equipo de agitación (*En este caso se presenta una turbina de seis aspas con disco*)

Tabla 2. Parámetros geométricos del tanque de agitación.

Parámetros geométricos	Abreviatura
Diámetro del tanque	D_t
Profundidad del líquido	H
Diámetro del Agitador	D_a
Anchura de la pala	L
Altura de la pala	W
Anchura del baffle	J
Altura del agitador	C

Tabla 3.7. Proporciones geométricas para un sistema de agitación “normal”.

$\frac{D_a}{D_t} = 0.3 \text{ a } 0.5$	$\frac{H}{D_t} = 1$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$
$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$
		$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$

En algunos casos, para las correlaciones del agitador $W/D_a = 1/8$. El número de deflectores en la mayoría de los usos es 4. El claro o brecha entre los



deflectores y la pared suele ser de 0.10 a 0.15 J para asegurar que el líquido no forme bolsas estancadas cerca de esa zona. En pocas correlaciones la relación entre el deflector y el diámetro del tanque es $J/D_t = 1/10$ en lugar de $1/12$.

La presencia o ausencia de turbulencia puede correlacionarse por el número de Reynolds del agitador N_{Re} como lo definimos en la sección 3.3.2 con la ecuación (13).

La **Figura 21** es una correlación [B3, R1] de agitadores de uso común con líquidos newtonianos contenidos en recipientes cilíndricos con deflectores.

En la **Figura 7-2** se incluyen mediciones dimensionales de los tamaños de los deflectores, el tanque y el agitador. Estas curvas también son prácticas para tanques sin deflectores cuando N_{Re} vale 300 o menos [B3, R1]. Cuando N_{Re} es superior a 300, el consumo de potencia en un recipiente sin deflectores es considerablemente menor que en uno con deflectores. Existen también curvas para otros tipos de agitadores [B3, R1].

La curva del número de potencia para N_P , para el agitador de tres hojas de alta eficiencia se muestra como la curva 6 en la **Figura 21**.

Las diversas relaciones geométricas que difieren del diseño “normal” pueden tener diferentes efectos en el número de potencia N_P en la región turbulenta de los distintos agitadores de turbina, como se indica en [B3].

1. Para la turbina abierta de seis aspas planas, $N_P \propto (W / D_a)^{1.0}$.
2. Para la turbina abierta de seis aspas planas, si se hacen varias D_a / D_t de 0.25 a 0.50 prácticamente no hay efectos sobre N_P .
3. Para dos turbinas abiertas de seis aspas instaladas en el mismo eje, y si el espaciamiento entre los dos agitadores (la distancia vertical entre los bordes inferiores de las dos turbinas) es al menos igual a D_a , la potencia total es 1.9 veces la de un agitador de un aspa plana. Para dos turbinas de seis aspas inclinadas (45°), la potencia también es de cerca de 1.9 veces la de un agitador de aspa inclinada.



4. Un tanque cuadrado vertical con deflectores y un tanque cilíndrico horizontal tiene el mismo número de potencia que un tanque cilíndrico vertical, pero en ellos se producen patrones de flujos marcadamente diferentes.

El número de potencia de un agitador simple tipo ancla, semejante al de la **Figura 10-b** pero sin las dos barras transversales horizontales, es como se muestra a continuación para $N_{Re} < 100$ [H2]:

$$N_P = 215(N_{Re})^{-0.955} \dots (24)$$

Donde $D_a / D_t = 0.90$, $W / D_t = 0.10$ y $C / D_t = 0.05$.

El número de potencia para un agitador de banda helicoidal para líquidos muy viscosos, $N_{Re} < 20$, es como se indica [H2, P3].

$$N_P = 186(N_{Re})^{-1} \dots \left(\frac{\text{paso del agitador}}{\text{diámetro del tanque}} = 1.0 \right) \dots (25)$$

$$N_P = 290(N_{Re})^{-1} \dots \left(\frac{\text{paso del agitador}}{\text{diámetro del tanque}} = 0.5 \right) \dots (26)$$

Las proporciones dimensionales típicas que se usan son $D_a / D_t = 0.95$, con algunas tan bajas como 0.75, y $W / D_t = 0.095$. La inclinación del agitador es la distancia vertical de un solo vuelo de la hélice en una rotación de 360° . [B6]

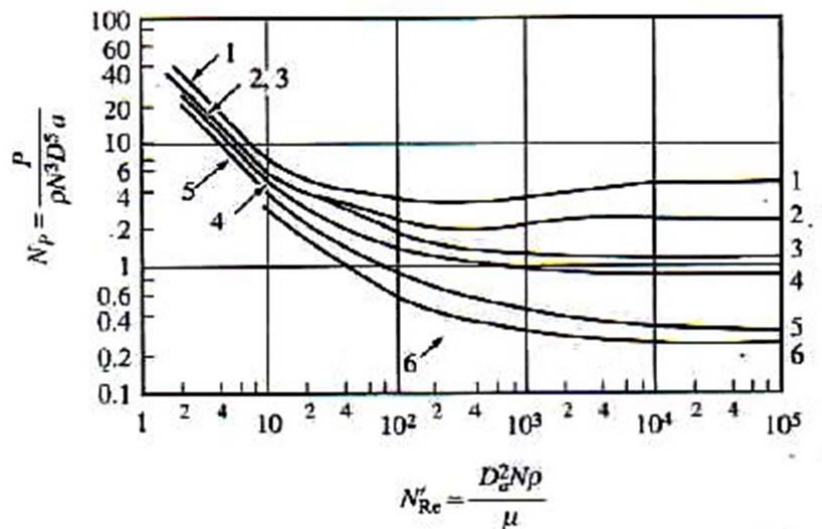


Figura 21. Correlaciones de potencia para diversos agitadores y deflectores (véase la Figura 7-2 las Dimensiones D_a , D_t , J y W).



Curva 1. Turbina de seis aspas planas con disco (igual a la **Figura 7-2** pero con seis aspas) $D_a / W=5$; cuatro deflectores cada uno con $D_t / J=12$.

Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas (igual a la **Figura 10-c** pero con seis aspas) $D_a / W=8$; cuatro deflectores con $D_t / J=12$.

Curva 3. Turbina abierta de seis aspas a 45° (igual a la **Figura 10-d** pero las aspas a 45°) $D_a / W=8$; cuatro deflectores con $D_t / J=12$.

Curva 4. Propulsor; inclinación= $2 D_a$, cuatro deflectores con $D_t / J=10$; también es válida para el mismo propulsor en posición angular y desplazado del centro sin deflectores.

Curva 5. Propulsor; inclinación= D_a , cuatro deflectores con $D_t / J=10$; también es válida para un propulsor en posición angular y desplazada del centro sin deflectores.

Curva 6. Propulsor de alta eficiencia (igual que la **Figura 13-a**); cuatro deflectores con $D_t / J=12$.

[Curvas 1,2 y 3 reproducidas con permiso de R.L. Bates, P.L. Fondy y R.R. Corpstein, Ind.Eng. Chem. Proc.Des. Dev.2,310 (1963).Derechos registrados por la American Chemical Society.Curvas 4 y 5 tomadas con permiso de J.H. Rushton, E. W. Costich y H.J. Everett, Chem.Eng. Progr., 46, 395,467(1950) Usado con permiso.]

Ejemplo 3.1

Consumo de potencia en un agitador

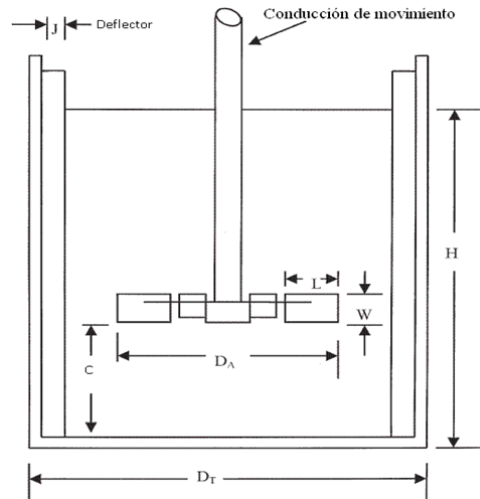
En un tanque similar al de la **Figura 7-2** se instala un agitador de turbina de aspas planas con disco que tiene seis aspas. El diámetro del tanque D_t mide 1.83 m, el diámetro de la turbina D_a es de 0.61 m, $D_t=H$ y el ancho W , de 0.122 m. El tanque tiene cuatro deflectores, todos ellos con un ancho $J=0.15$ m. La turbina opera a 90 rpm y el líquido del tanque tiene una viscosidad de 10 cp y densidad de 929 kg/m^3 .

a) Calcúlense los kilowatts requeridos para el mezclador.



- b) Con las mismas condiciones (excepto que la solución tiene una viscosidad de 100 000 cp), calcúlese la potencia requerida en kW.

3.1 Traducción (Basado en la Figura 18)



3.2 Planteamiento

Para el inciso a) se cuenta con los datos siguientes $D_a=0.61$ m, $W=0.122$ m, $D_t=1.83$ m, $J=0.15$ m, $N=90/60=1.50$ rev/s, $\rho=929$ kg/m³ y

$$\begin{aligned}\mu &= (10.0 \text{ cp})(1 \times 10^{-3}) = 0.01 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \\ &= 0.01 \text{ Pa} \cdot \text{s}\end{aligned}$$

3.3 Cálculos

Al aplicar la ecuación (13), el número de Reynolds es

$$N_{\text{Re}} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{(0.61)^2 (1.50) 929}{0.01} = 5.185 \times 10^4$$

Parámetros geométricos	Valor
Diámetro del tanque (D_t)	1.83 m
Altura del líquido (H)	1.83 m
Diámetro del Agitador (D_a)	0.61 m
Altura de la pala (W)	0.122 m
Anchura del baffle (J)	0.15 m
Datos del fluido	Valor
Viscosidad (μ)	10 cp
Densidad (ρ)	929 kg/m ³
Datos del agitador	Valor
Velocidad de giro del agitador (N)	90 rpm



Considérese la **Curva 1** en la **Figura 21**, puesto que $D_a/W=5$ y $D_t/J=12$, $N_p=5$ para $N_{Re}=5.185 \times 10^4$.

Al despejar P de la ecuación (11) y sustituir los valores conocidos,

$$P = N_p \cdot D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho = 5(0.61)^5(1.50)^3(929)$$

$$P = 1\,324 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1.324 \text{ kW (1.77 hp)}.$$

Para el inciso b),

$$\mu = (100\,000 \text{ cp})(1 \times 10^{-3}) = 100 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = 100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{(0.61)^2(1.50)929}{100} = 5.185$$

Esta es la región de flujo laminar. Con base en la **Figura 21**, $N_p=14$.

$$P = N_p \cdot D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho = 14(0.61)^5(1.50)^3(929)$$

$$P = 3707 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 3.71 \text{ kW (4.98 hp)}.$$

3.4 Resultados

Por lo anterior, un aumento de 10 000 veces en la viscosidad solo incrementa el consumo de potencia de 1.324 a 3.71 kW.

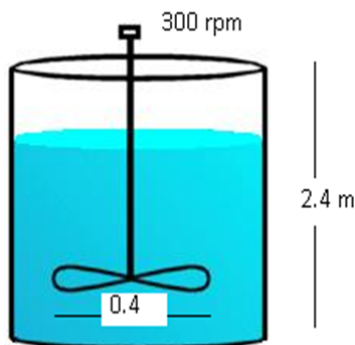
- Otro ejemplo que podemos mostrar es el Problema 11.20 extraído del libro Problemas de Flujo de Fluidos del Dr. Antonio Valiente Barderas.

Problema 11.20

Calcule la potencia requerida por un agitador de hélice de tres palas y paso igual a su diámetro. De 40 cm de diámetro y que gira a 300 rpm en una solución de sosa caústica al 30% (en peso) a 20°C en un tanque sin deflectores, de 3 m de diámetro. La profundidad del líquido de 2.4 m. La densidad de la solución es de 1297 kg/m³ y la viscosidad, de 13 cp.



1. Traducción



Parámetros geométricos	Valor
Diámetro del tanque (D_t)	3 m
Altura del líquido (H)	2.4 m
Diámetro del Agitador (D_a)	0.4 m
Datos del fluido	
Viscosidad (μ)	13 cp
Densidad (ρ)	1297 kg/m ³
Datos del agitador	
Velocidad de giro del agitador (N)	300 rpm

2. Planteamiento

2.1 Potencia

En este caso la potencia está relacionada con el número de Froude y con el número de Reynolds.

En este caso corresponde a la curva 28 del **Anexo B**.

3. Cálculos

3.1 Reynolds

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{300 \cdot (0.4)^2 \cdot (1297)}{60 \times 13 \times 10^{-3}} = 79815$$

Del **Anexo B** y de la **Gráfica B.1** y para curvas señaladas con °, la influencia de la superficie libre es considerable, por lo que se ha tenido en cuenta el número de Froude con una variación, por lo tanto éste quedaría de la siguiente manera $Fr = g/N^2 D_a$ para números de Reynolds superiores a 300.

Como $N_{Re} > 300$, se presenta vórtice.



3.2 Froude

$$Fr = \frac{g}{N^2 \cdot D_a} = \frac{9.81}{(5)^2(0.4)} = 0.9$$

Para el caso indicado de la **Tabla 3.5.2**

$$a = 2.1$$

$$b = 18$$

$$Fr^{\frac{a-\log Re}{b}} = (0.9)^{\frac{2.1-\log 79800}{18}} = 1.0165$$

3.3 Potencia

De la gráfica del **Anexo B**:

$$\frac{N_p}{Fr^{\frac{a-\log Re}{b}}} = 0.245$$

$$\therefore N_p = 0.249$$

$$0.249 = \frac{P (9.81)}{(5)^3(0.4)^5(1297)}$$

$$P = 42.14 \frac{\text{kgm}}{\text{s}} = 413.47 \text{ W}$$

4. Resultado

Se requieren 413.4 Watts

3.8 Requisitos de potencia en la agitación y mezcla de fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no obedecen la ley de Newton, ecuación (27)

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} \text{ (SI) ... (27)}$$



$$\tau = -\frac{\mu}{g_c} \frac{dv}{dr} \text{ (unidades del sistema inglés) ... (28)}$$

donde μ , la viscosidad es una constante independiente de la velocidad cortante. En la **Figura 22** se muestra una gráfica del esfuerzo cortante τ en función de la velocidad cortante $-dv/dr$. La gráfica de un fluido newtoniano es una recta con pendiente igual a μ .

Cuando un fluido no obedece la ecuación (27), se trata de un fluido no newtoniano. En estas condiciones, una gráfica de τ en función de $-dv/dr$ no es lineal a través del origen. Los fluidos no newtonianos pueden dividirse en dos categorías principales con base en su comportamiento de esfuerzo cortante/velocidad cortante: fluidos en los que el esfuerzo cortante es independiente del tiempo o duración de la acción cortante (independientes del tiempo), y aquellos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante (dependientes del tiempo). Además de su comportamiento anormal en relación con el esfuerzo cortante, algunos fluidos no newtonianos también tienen características elásticas (como el caucho) que están en función del tiempo y como resultado de las cuales se les llama fluidos viscoelásticos. Estos fluidos exhiben esfuerzos normales perpendiculares a la dirección del flujo, además de los esfuerzos tangenciales usuales.

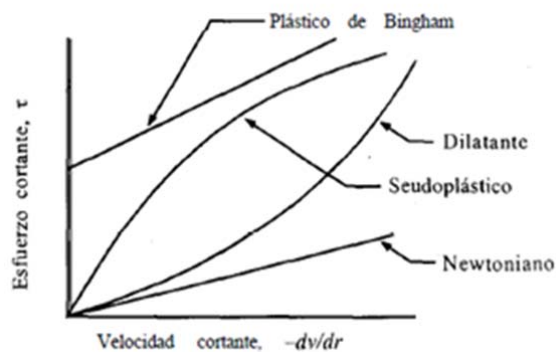


Figura 22. Diagrama de esfuerzo cortante para fluidos newtonianos y no newtonianos independientes del tiempo.

Para correlacionar los requisitos de potencia en la agitación y mezcla de fluidos no newtonianos, el número de potencia N_p está definido por la ecuación (12), que es la misma ecuación que se usa para los fluidos newtonianos. Sin



embargo, la definición del número de Reynolds es mucho más complicada que para los fluidos newtonianos, ya que la viscosidad aparente no es constante en los fluidos no newtonianos y varía con las velocidades de corte o con los gradientes de velocidad en el recipiente.

3.8.1 Fluidos pseudoplásticos.

La mayoría de los fluidos no newtonianos pertenecen a esta categoría e incluyen las soluciones o fusiones de polímeros, las grasas, las suspensiones en almidón, la mayonesa, ciertos fluidos biológicos, las suspensiones de detergentes, los medios de dispersión de algunos productos farmacéuticos y las pinturas. En la **Figura 22** se muestra la curva de flujo, que por lo general puede representarse mediante una ecuación exponencial (que a veces se llama ecuación de Ostwald- de Waele)

$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \dots (29)$$

Donde K es el índice de consistencia en $N \cdot s^n / m^2$ o $lb_f \cdot s^n / pie^2$ y n es el índice de comportamiento de flujo, adimensional. La viscosidad aparente μ_a en la ecuación (30) es obtenida de las ecuaciones (27) y (29) y disminuye al aumentar el esfuerzo cortante.

$$\mu_a = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \dots (30)$$

En varias investigaciones [G1, M1] se ha usado una viscosidad aparente promedio μ_a , que se utiliza en el número de Reynolds como sigue:

$$N_{Re,n} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu_a} \dots (31)$$

La viscosidad aparente promedio puede relacionarse con la velocidad de corte promedio o con el gradiente de velocidad promedio por el siguiente método. Para un fluido que obedece la ley de potencia:



$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)_{\text{prom}}^n \dots (32)$$

Para un fluido newtoniano,

$$\tau = \mu_a \left(-\frac{dv}{dy} \right)_{\text{prom}} \dots (33)$$

Al combinar las ecuaciones (32) y (33),

$$\mu_a = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)_{\text{prom}}^{n-1} \dots (34)$$

Metzner y otros [G1, M1], encontraron experimentalmente que la velocidad de corte promedio $(dv/dy)_{\text{prom}}$ para los líquidos pseudoplásticos ($n < 1$) varía aproximadamente como sigue con la velocidad de rotación:

$$\left(-\frac{dv}{dy} \right)_{\text{prom}} = 11 \cdot N \dots (35)$$

Por consiguiente, combinando las ecuaciones (34) y (35),

$$\mu_a = (11 \cdot N)^{n-1} \cdot K \dots (36)$$

Al sustituir la ecuación (31)

$$N_{\text{Re},n} = \frac{D_a^2 \cdot N^{2-n} \cdot \rho}{11^{n-1} \cdot K} \dots (37)$$



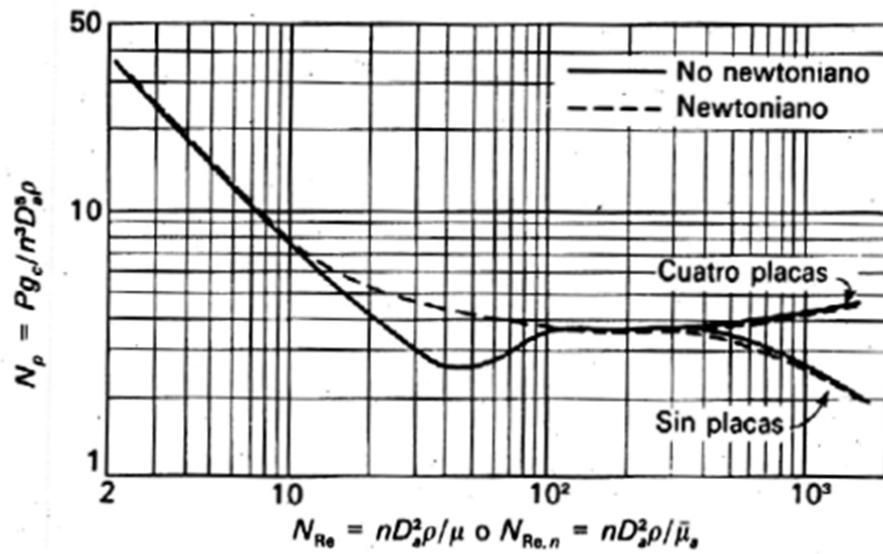


Figura 23. Correlación de potencia en la agitación para una turbina plana de seis aspas con disco en fluidos pseudoplásticos no newtoniano y newtoniano.

La ecuación (37) se ha usado para correlacionar los datos correspondientes a una turbina de seis aspas planas con disco en líquidos pseudoplásticos, y la curva punteada de la **Figura 23** muestra esta correlación. La curva sólida se aplica a fluidos newtonianos. Ambos conjuntos de datos se obtuvieron para cuatro deflectores con $D_t / J = 10$, $D_a / W = 5$, y $L / W = 5/4$. Sin embargo, dado que se ha demostrado que la diferencia entre los resultados para $D_t / J = 10$ y $D_t / J = 12$ es muy pequeña, esta línea newtoniana puede considerarse igual que la curva 1 de la **Figura 21**.

Las curvas de la **Figura 23** muestran que los resultados son idénticos para el intervalo de números de Reynolds de 1 a 2000, excepto solo que difieren solo en el intervalo de 10 a 100, donde los fluidos pseudoplásticos usan menos potencia que los fluidos newtonianos. En el agitador, los patrones de flujo de los fluidos pseudoplásticos muestran cambios de gradiente de velocidad mucho mayores que los fluidos newtonianos. El fluido que se encuentra lejos del agitador puede moverse en flujo laminar lento con una gran viscosidad aparente. También se dispone de datos para hélices y turbinas de ventilador.

[18]



3.9 Aumento de escala de agitadores

3.9.1 Introducción.

En las industrias de procesos los datos experimentales suelen estar disponibles a partir de un sistema de agitación de tamaño laboratorio o de unidad piloto, y se desea aumentar la escala de los resultados para diseñar una unidad a escala completa. Como hay una gran diversidad en los procesos cuya escala se debe aumentar, no hay un solo método que pueda manejar todos los tipos de problema de aumento de escala, y hay muchas maneras de hacer esto. La semejanza geométrica es importante, por supuesto, y es la más fácil de lograr. La semejanza cinemática puede definirse en términos de razones de velocidades o de tiempos [R2]. La semejanza dinámica requiere proporciones fijas de fuerzas viscosas, inerciales o gravitatorias.

Aun así se logra la semejanza geométrica, las semejanzas dinámica y cinemática no siempre se pueden obtener al mismo tiempo. Por consiguiente, a veces lo que el diseñador debe hacer es confiar en su buen juicio y experiencia para hacer el aumento de escala.

En muchos casos, los objetivos principales que se presentan en un proceso de agitación son los siguientes: *igual movimiento de líquidos*, como en la mezcla de líquidos, donde el movimiento o velocidad correspondiente de los líquidos es aproximadamente igual en ambos casos; *igual suspensión de sólidos*, donde los niveles de suspensión son iguales; e *iguales tasas de transferencia de masa*, donde la transferencia de masa ocurre en una fase líquida y una sólida, entre dos fases líquidas, etc., y las tasas son iguales.

3.9.2 Procedimiento de aumento de escala.

En seguida se sugiere un procedimiento paso a paso para aumentar de escala desde las condiciones iniciales, donde los tamaños geométricos dados en la **Tabla 3.7** son D_{a1} , D_{T1} , H_1 , W_1 , y así sucesivamente, hasta las condiciones finales de D_{a2} , D_{T2} , y así sucesivamente.



1. Calcule la razón de aumento de escala R. Suponiendo que el recipiente original en un cilindro estándar con $D_{T1} = H_1$, el volumen V_1 es

$$V_1 = \left(\frac{\pi D_{T1}^2}{4} \right) (H_1) = \left(\frac{\pi D_{T1}^3}{4} \right) \dots (38)$$

Por tanto, la relación entre los volúmenes es

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\pi D_{T2}^3/4}{\pi D_{T1}^3/4} = \frac{D_{T2}^3}{D_{T1}^3} \dots (39)$$

Así, la relación de aumento de escala es

$$R = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{D_{T2}}{D_{T1}} \dots (40)$$

2. Al usar este valor de R, aplíquelo a todas las dimensiones de la **Tabla 3.7** para calcular las nuevas dimensiones. Por ejemplo,

$$D_{a2} = R D_{a1}, \quad J_2 = R J_1, \dots \dots (41)$$

3. Después de elegirse una regla de aumento de escala y aplicarse para determinar la rapidez del agitador N_2 que debe usarse para duplicar los resultados a pequeña escala que se obtuvieron empleando N_1 . Esta ecuación es la siguiente (R2):

$$N_2 = N_1 \left(\frac{1}{R} \right)^n = N_1 \left(\frac{D_{T1}}{D_{T2}} \right)^n \dots (42)$$

Donde $n=1$ para igual movimiento de líquidos, $n=3/4$ para igual suspensión de sólidos, y $n=2/3$ para iguales tasas de transferencia de masa (lo que equivale a igual potencia por volumen unitario). Este valor de n se basa en consideraciones empíricas y teóricas.

4. Al conocer N_2 , la potencia necesaria puede determinarse usando la ecuación (11) y la **Figura 21**.



Para ayudar al diseñador de nuevos sistemas de agitación y para que sirvan como guía para evaluar los sistemas existentes, en seguida se dan algunas indicaciones aproximadas para líquidos de viscosidades normales (M2): para agitación y mezclado suave, 0.1 a 0.2 kW/m³ de fluido (0.0005 a 0.001 hp/gal); para agitación vigorosa, 0.4 a 0.6 kW/m³(0.002 a 0.003 hp/gal); para agitación intensa o cuando la transferencia de masa es importante, 0.8 a 2.0 kW/m³(0.004 a 0.010 hp/gal). Esta potencia en kilowatts es la potencia real proporcionada al fluido como se indica en la **Figura 21** y en la ecuación (11). Esto no incluye la potencia que se usa en las cajas de engranajes y chumaceras. Las eficiencias típicas de los motores eléctricos se dan en la **Anexo E**. Como una aproximación, la pérdida de potencia en las cajas de engranajes y chumaceras y en la ineficiencia del motor eléctrico es de entre 30 y 40% de P, la entrada de potencia real en el fluido.

Ejemplo 9.1

Deducción del exponente de la regla de aumento de escala

Para el exponente n de la regla de aumento de escala de la ecuación (42), demuestre lo siguiente para la agitación turbulenta.

- a) Que cuando $n=2/3$, la potencia por volumen unitario es constante en el aumento de escala.
- b) Que cuando $n=1.0$, la velocidad de la punta es constante en el aumento de escala.

Solución.

Para el inciso a), se ve en la **Figura 21** que N_p es constante en la región turbulenta. Entonces a partir de la ecuación (11),

$$P_1 = N_p \cdot D_{a1}^5 \cdot N_1^3 \cdot \rho \dots (43)$$



Así, para igual potencia por volumen unitario, $P_1/V_1 = P_2/V_2$, o, usando la ecuación (36)

$$\frac{P_1}{V_1} = \frac{P_1}{\pi D_{T1}^3/4} = \frac{P_2}{V_2} \frac{P_2}{\pi D_{T1}^3/4} \dots (44)$$

Al sustituir P_1 de la ecuación (43) y también de la ecuación semejante para P_2 en la ecuación (44) y combinándolas con la ecuación (40)

$$N_2 = N_1 \left(\frac{1}{R}\right)^{2/3} \dots (45)$$

Para el inciso b), usando la ecuación (42) con $n=1.0$, reordenando y multiplicando por π , empleando Nl . Esta ecuación es la siguiente:

$$N_2 = N_1 \left(\frac{D_{T1}}{D_{T2}}\right)^{1.0} \dots (46)$$

$$\pi D_{T2} N_2 = \pi D_{T1} N_1 \dots (47)$$

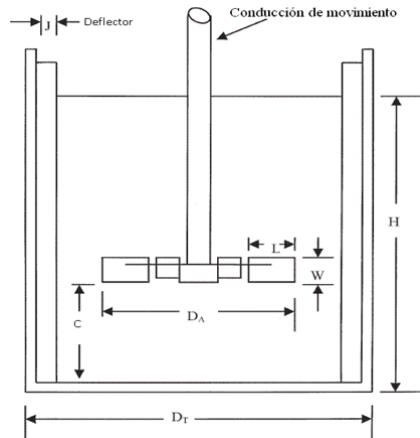
donde $\pi \cdot D_{T2} \cdot N_2$ es la velocidad del extremo en m/s.

Ejemplo 9.2

Aumento de escala de un sistema de agitación de turbina

Cierto sistema de agitación existente es igual al del **Ejemplo 3.1** para una turbina de aspa plana con un disco y seis aspas. Las condiciones y los tamaños son $D_{T1}=1.83\text{m}$, $D_{a1}= 0.61\text{m}$, $W_1= 0.122\text{m}$, $J_1= 0.15\text{m}$, $N_1= 90/60=1.50$ rev/s, $\rho= 929 \text{ kg/m}^3$ y $\mu= 0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Se desea aumentar la escala de estos resultados para un recipiente cuyo volumen es 3.0 veces mayor. Realice esto para los siguientes objetivos del proceso.





Traducción Ejemplo 3.1

- a) Cuando se desea igual cantidad de transferencia de masa
- b) Cuando se necesita igual movimiento de líquido

Solución:

Puesto que $H_1 = D_{T1} = 1.83\text{m}$, el volumen del tanque original

$$V_1 = \left(\frac{\pi D_{T1}^2}{4} \right) (H_1) = \left(\frac{\pi (1.83)^3}{4} \right) = 4.813 \text{ m}^3$$

El volumen es $V_2 = 3.0 (4.813) = 14.44 \text{ m}^3$. Siguiendo los pasos del procedimiento de aumento de escala, y usando la ecuación (40)

$$R = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{14.44}{4.813} \right)^{1/3} = 1.442$$

Las dimensiones del sistema de agitación más grande son como siguen

$$D_{T2} = R \cdot D_{T1} = 1.442(1.83) = 2.64\text{m}, \quad D_{a2} = 1.442(0.61) = 0.880\text{m},$$

$$W_2 = 1.442(0.122) = 0.176\text{m}, \quad J_2 = 1.442(0.15) = 0.216\text{m}.$$

Para el inciso a), para igual transferencia de masa, $n = 2/3$ en la ecuación (42).



$$N_2 = N_1 \left(\frac{1}{R} \right)^{\frac{2}{3}} = (1.50) \left(\frac{1}{1.442} \right)^{\frac{2}{3}} = 1.175 \frac{\text{rev}}{\text{s}} (70.5 \text{ rpm})$$

Al usar la ecuación (11)

$$N_{\text{Re}} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{(0.880)^2 (1.175) 929}{0.01} = 8.453 \times 10^4$$

Utilizando $N_p = 5.0$ en la ecuación (11)

$$P_2 = N_p \cdot \rho \cdot N_2^3 \cdot D_{a2}^5 = 5.0 (9.29) (1.175)^3 (0.880)^5 = 3977 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 3.977 \text{ kW}$$

La potencia por volumen unitario es

$$\frac{P_1}{V_1} = \frac{1.324}{4.813} = 0.2752 \text{ kW/m}^3$$

$$\frac{P_2}{V_2} = \frac{3.977}{14.44} = 0.2752 \text{ kW/m}^3$$

El valor de 0.2752 kW/m^3 es un poco menor que el de las indicaciones aproximadas de 0.8 a 2.0 para la transferencia de masa.

Para el inciso b), para igual movimiento de líquido, $n = 1.0$

$$N_2 = (1.50) \left(\frac{1}{1.442} \right)^{1.0} = 1.040 \text{ rev/s}$$

$$P_2 = 5.0 (9.29) (1.040)^3 (0.880)^5 = 2757 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 2.757 \text{ kW}$$

$$\frac{P_2}{V_2} = \frac{2.757}{14.44} = 0.1909 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \cdot [17]$$

3.10 Términos usuales en un sistema de agitación

Es importante definir algunos términos que son empleados frecuentemente en un sistema de agitación. Estos términos son:



- Número de flujo y rapidez de circulación en la agitación (capacidad de bombeo)
- Velocidad en el extremo del agitador (tip speed)
- Torque
- Número de mezclado (B)

3.10.1 Número de flujo y rapidez de circulación en la agitación

Un agitador funciona como un impulsor de bomba centrífuga sin carcasa y genera un flujo con cierta carga de presión. Esta tasa de circulación Q en m^3/s a partir del borde del impulsor es la cantidad de flujo perpendicular el área de descarga del impulsor. Las velocidades de flujo se han medido en las mezcladoras y se han usado para calcular la rapidez de circulación. Los datos para los recipientes con deflectores se han correlacionado usando el número de flujo adimensional (N_Q):

$$N_Q = \frac{Q}{ND_a^3} \dots (48)$$

$$N_Q = 0.5 \text{ propulsor marino(hélice) (paso = diámetro)}$$

$$N_Q = 0.75 \text{ turbina de seis aspas con disco } \left(\frac{W}{D_a} = 1/5\right)$$

$$N_Q = 0.5 \text{ turbina de seis aspas con disco } \left(\frac{W}{D_a} = 1/8\right)$$

$$N_Q = 0.75 \text{ turbina de seis aspas inclinadas } \left(\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}\right) \cdot [17]$$



3.10.2 Velocidad en el extremo del agitador (tip speed)

Corresponde a la velocidad angular ($2\pi.N$) multiplicado por el radio del agitador ($D_a / 2$).

$$U_t = \pi.N.D_a \dots (49)$$

3.10.3 Torque

Para poder generar una curva de potencia de agitación de líquidos se requiere de mediciones de potencia P , a valores específicos de la densidad del fluido (ρ), velocidad de agitación (N), y del diámetro del agitador (D_a). La potencia puede determinarse a partir de mediciones del par, o torque, necesario para hacer girar el agitador. El torque puede medirse con instrumentos mecánicos o eléctricos. En los primeros instrumentos se suele emplear un dinamómetro para medir la fuerza que opone al líquido a la agitación; para los segundos, por otro lado, se emplea un Wattímetro para medir la potencia eléctrica que se suministra al motor, la cual se corrige por las pérdidas de potencia en el motor de origen eléctrico y mecánico.

La potencia se determina a partir del torque y la velocidad angular mediante la expresión siguiente:

$$P = \tau * \omega \dots (50)$$

Dónde:

τ suele expresarse en lbf-plg.

ω corresponde a radianes/s y la cual se relaciona con las revoluciones por segundo (N) a través de la expresión $\omega = 2\pi N$.

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

$$Tq = \frac{P}{(2\pi.N)} = k1.\rho.N^2.D_a^5(\text{régimen turbulento}) \dots (51)$$



$$Tq = k2. \mu. N. D_a^3 (\text{régimen laminar}) \dots (52)$$

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

$$\frac{Tq}{V} = k3. (\rho. U_t^2). \left(\frac{D_a}{D_t}\right)^3 (\text{régimen turbulento}) \dots (53)$$

$$\frac{Tq}{V} = k4. \mu. N. \left(\frac{D_a}{D_t}\right)^3 (\text{régimen laminar}) \dots (54)$$

3.10.4 Número de mezclado (B)

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

$$B = N. t \dots (55)$$

N = velocidad de rotación (revoluciones \times segundo)

t = tiempo de mezclado(segundos)

3.11 Tiempos de mezcla para los líquidos miscibles

En uno de los métodos que se usan para estudiar el tiempo de mezcla de los líquidos miscibles, se agrega cierta cantidad de ácido clorhídrico a un equivalente de NaOH y se anota el tiempo requerido para que el indicador cambie de color. Esta es una medida del mezclado de las moléculas. También se usan otros métodos experimentales. Cerca del agitador se verifica una mezcla rápida, y una mezcla más lenta (que depende de la tasa de circulación de bombeo) en las zonas más externas.

En la **Figura 24** se da una correlación del tiempo de mezcla para un agitador de turbina.



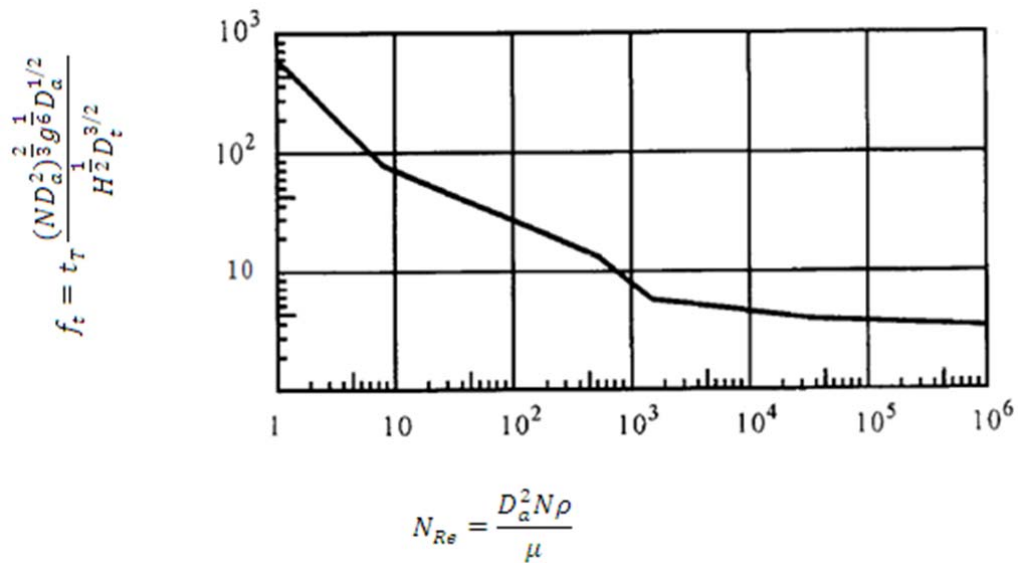


Figura 24. Correlación del tiempo de mezcla para líquidos miscibles usando una turbina en un tanque con deflectores (para turbina simple, una turbina con disco y una turbina con aspas inclinadas).

El factor adimensional de mezcla f_t se define como

$$f_t = t_T \frac{(ND_a^2)^{\frac{2}{3}} g^{\frac{1}{6}} D_a^{1/2}}{H^2 D_t^{3/2}} \dots (56)$$

Donde t_T es el tiempo de mezcla en segundos. Para $N_{Re} > 1000$, como f_t es aproximadamente constante, entonces $t_T N^{2/3}$ es constante. Para algunas otras mezcladoras se ha demostrado que $t_T N$ es aproximadamente constante. Para aumentar la escala del recipiente 1 a otro recipiente 2 de diferente tamaño, pero con igual geometría y con la misma potencia/volumen unitario en la región turbulenta, los tiempos de mezcla se relacionan mediante

$$\frac{t_{T2}}{t_{T1}} = \left(\frac{D_{a2}}{D_{a1}} \right)^{11/18} \dots (57)$$

Por tanto el tiempo de mezcla aumenta para el recipiente más grande. Al aumentar la escala se mantiene el mismo tiempo de mezcla y la potencia/volumen unitario P/V aumenta marcadamente:



$$\frac{P_2/V_2}{P_1/V_1} = \left(\frac{D_{a2}}{D_{a1}}\right)^{11/4} \dots (58)$$

Normalmente, cuando se aumenta la escala para los recipientes de gran tamaño, se utiliza un tiempo de mezcla un tanto mayor, de modo que la potencia/volumen unitario no aumente demasiado.

El tiempo de mezcla para un agitador de banda helicoidal es el siguiente para $N_{Re} < 20$:

$$N_{t_T} = 126 \text{ (paso del agitador/diámetro del tanque = 1.0)}$$

$$N_{t_T} = 90 \text{ (paso del agitador/diámetro del tanque = 0.5)}$$

Para líquidos muy viscosos, la mezcladora de banda helicoidal da un tiempo de mezcla mucho menor que una turbina para la misma potencia/ volumen unitario, pero para líquidos no viscosos, da tiempos mayores.

Biggs da una correlación de tiempo de mezcla para un agitador propulsor en un tanque con deflectores, Fox y Gex la dan para un tanque sin deflectores.

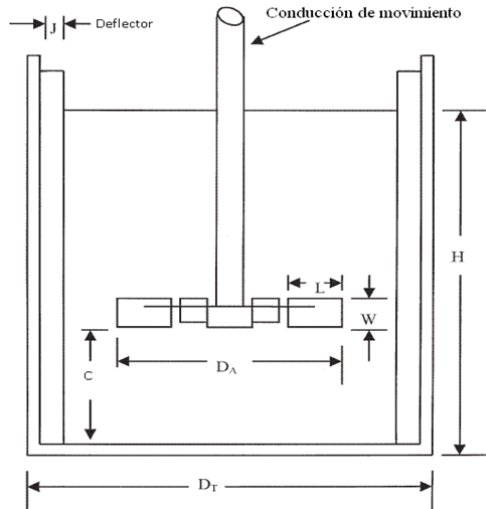
Para un propulsor de alta eficiencia en un tanque con deflectores, las correlaciones del tiempo de mezclado están dadas en la referencia [F2], la cual muestra que los tiempos de mezclado son inferiores para los agitadores de hoja inclinada.

Ejemplo 11.1

Escalamiento del tiempo de mezclado en un sistema de turbina de agitación

Usando las condiciones existentes para la turbina de seis aspas planas en el **Ejemplo 3.1**, inciso a), hágase lo siguiente





Traducción Ejemplo3.1

- Calcúlese el tiempo de mezclado
- Calcúlese el tiempo de mezclado para un recipiente más pequeño con una proporción geométrica similar, donde D_t es 0.30 m en vez de 1.83 m. Hágase esto es para la misma potencia por unidad de volumen que se empleó en el inciso a).
- Usando el mismo tiempo de mezclado calculado para el recipiente más pequeño del inciso b), calcúlese la nueva potencia para el recipiente de mayor tamaño del inciso a).

Solución:

En el inciso a) $D_{T1}=1.83\text{m}$, $D_{a1}= 0.61\text{m}$, $W_1= 0.122\text{m}$, $J_1= 0.15\text{m}$, $N_1= 90/60= 1.50 \text{ rev/s}$, $\rho= 929 \text{ kg/m}^3$ y $\mu= 10 \text{ cp} =0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

De acuerdo con el **Ejemplo 3.1**, $N_{Re}= 5.185 \times 10^4$, $N_p= 5$, $P_1= 1.324 \text{ kW}$. Para el volumen del tanque,

$$V_1 = \left(\frac{\pi(1.83)^2(1.83)}{4} \right) = 4.813 \text{ m}^3$$



La potencia por unidad de volumen es

$$\frac{P_1}{V_1} = \frac{1.324}{4.813} = 0.2751 \text{ kW/m}^3$$

Desde la **Figura 23** para $N_{Re} = 5.185 \times 10^4$, $f_t = 4.0$. Sustituyendo en la ecuación (56),

$$\begin{aligned} f_t = 4.0 &= t_T \frac{(N_1 D_{a1}^2)^{\frac{2}{3}} g^{\frac{1}{6}} D_{a1}^{1/2}}{H_1^{1/2} D_{t1}^{3/2}} \\ &= \frac{t_T (1.5 \times 0.61^2)^{\frac{2}{3}} (9.80665)^{\frac{1}{6}} (0.61)^{1/2}}{(1.83^{\frac{1}{2}})(1.83^{\frac{3}{2}})} \\ t_T &= 17.30 \text{ s} \end{aligned}$$

Para el inciso b) la proporción de escala descendente de R de la ecuación (40) es

$$R = \frac{D_{T2}}{D_{T1}} = \frac{0.30}{1.83} = 0.1639$$

$$D_{a2} = R D_{a1} = 0.1639(0.61) = 0.1000 \text{ m}$$

Además $H_2 = D_{T2} = 0.300 \text{ m}$. Usando la misma $P_1/V_1 = P_2/V_2 = 0.2751 \text{ kW/m}^3$ en la región turbulenta, y la ecuación (54)

$$\frac{t_{T2}}{t_{T1}} = \left(\frac{D_{a2}}{D_{a1}} \right)^{11/18}$$

$$t_{T2} = 17.30 \left(\frac{0.1000}{0.61} \right)^{11/18}$$

Por tanto, $t_{T2} = 5.73 \text{ s}$. Esto indica que el recipiente de mayor tamaño tiene un marcado incremento en el tiempo de mezclado, de 5.73 s a 17.30 s para igual potencia por unidad de volumen.



En el caso inciso c), usando el mismo tiempo de mezclado de 5.73 s para el recipiente más pequeño, la potencia por unidad de volumen del recipiente de mayor tamaño se calcula a partir de la ecuación (56) para tiempos de mezclados iguales.

$$\frac{P_2/V_2}{P_1/V_1} = \left(\frac{D_{a2}}{D_{a1}}\right)^{11/4}$$

$$\frac{0.2751}{P_1/V_1} = \left(\frac{0.100}{0.61}\right)^{11/4}$$

Resolviendo, $P_1V_1 = 39.73 \text{ kW/m}^3$. Éste, por supuesto, es un incremento muy grande e impráctico. [17]



CAPITULO IV. Diseño del material audiovisual

En este capítulo se procedió a diseñar y a generar el material audiovisual, utilizando las técnicas de Power Point y el material que existe en Internet, tal como se presenta en Youtube, haciéndole una mejora a los vídeos de Youtube añadiéndoles audio. Se elaboró un índice general de los tres diaporamas de agitación. Si el alumno desea consultar que tema requiere ver, sólo basta con consultar el índice y éste lo llevara a cada diaporama deseado.

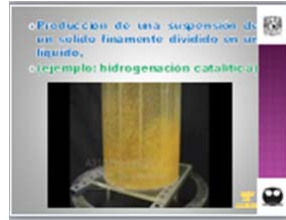


4.1 Primer Diaporama de Agitación: Agitación y mezclas de líquidos (I)

Se da la definición del término de agitación (según la literatura), también mencionamos los diferentes tipos de aplicaciones de la agitación en la industria, adecuado a una etapa del proceso.

Este primer diaporama consta de 11 diapositivas, con una duración aproximada de 12 minutos de contenido. Este primer diaporama se presenta en un disco al final del apéndice de la tesis.

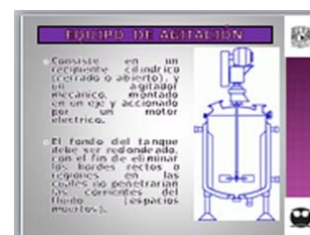




4.2 Segundo Diaporama de Agitación: Agitación y mezclas de líquidos (II)

Se habla sobre el equipo de agitación que se utiliza en la industria y en qué consiste, las dos diferentes clases de agitadores (que clase de flujo generan ya sea axial, radial o tangencial), y como dependiendo de la clase de agitador se dividen en tipos; los más comúnmente utilizados son los de hélice, palas o paletas, de turbina y agitadores. También vemos los diferentes rangos de viscosidades para cada agitador.

Este segundo diaporama consta de 19 diapositivas, con una duración aproximada de 18 minutos de contenido. Este segundo diaporama se presenta en un disco al final del apéndice de la tesis.



EQUIPO DE AGITACION

TANQUE TÍPICO DE AGITACION

CLASES DE AGITADORES

Los agitadores se dividen en 2 clases:

Los que generan corrientes **paralelas** al eje del agitador, estos se denominan agitadores de flujo **axial**;

y aquellos que generan corrientes en dirección **radial** o **tangencial** al eje del agitador se llaman agitadores de flujo **radial**.

TIPOS DE FLUJOS

Tipos de corrientes de flujo que se producen en un agitador axial (A) y radial (B).

Agitador Flujo Axial: Un agitador que genera corrientes paralelas al eje del agitador.

Agitador Flujo Radial: Un agitador que genera corrientes radiales al eje del agitador.

TIPOS DE AGITADORES

Los tres tipos principales de agitadores son:

- Hélice
- Paletas
- Turbina

Tipos de agitador:
 Tipo Hélice (D&R)
 Tipo paleta (D&R)
 Tipo Turbina (D&R)

AGITADORES DE HÉLICE

Un agitador de **hélice**, es un agitador de flujo **axial**, que opera con **alta** velocidad y se emplea para líquidos **pocos** viscosos.

AGITADORES DE HÉLICE

Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces en tanques de gran tamaño.

AGITADORES DE PALETAS O PALEAS

Las paletas giran a velocidades **bajas** o **moderadas** en el centro del tanque, impulsando al líquido **radial** y **consecuentemente**, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas.

AGITADOR DE PALETAS

Es empleado con líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paletas y para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero no es un buen mezclador.

AGITADORES DE PALETAS O PALEAS

AGITADORES DE TURBINA

Los agitadores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. Con líquidos poco viscosos, se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. Estos producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.

AGITADORES DE TURBINA

AGITADORES DE BANDA HELICOIDAL

Este tipo de agitadores se usa para soluciones sumamente viscosas y espesas o pocas espas en la región laminar.

La banda se forma en una trayectoria helicoidal y está unida a un eje central.

AGITADORES DE BANDA HELICOIDAL

RANGO DE VISCOSIDADES PARA AGITADORES

Tipos de agitadores	Rango de viscosidades
Agitadores de hélice	1 - 1000
Agitadores de paletas	100 - 100000
Agitadores de turbina	1 - 100000
Agitadores de banda helicoidal	10000 - 1000000

¡¡¡GRACIAS POR SU ATENCION!!!



4.3 Tercer Diaporama de Agitación: Agitación y mezclas de líquidos (III)

Hablamos sobre la potencia requerida de un agitador, ya que es un factor muy importante para el diseño del agitador, algunas curvas de potencia dependiendo en que región de un fluido nos encontremos; los números adimensionales involucrados en el cálculo de la potencia; así como las distintas variaciones introducidas en el agitador para conseguir una mejor mezcla, por ejemplo los baffles y sobre la formación de vórtices.

También hablamos sobre otros parámetros de la instalación, como la forma del tanque, la posición del eje, etc., y las diferentes variables involucradas para el diseño de un tanque de agitación. Al final mostramos las tablas para los diferentes tipos de agitadores y nos muestra su gráfica de potencia.

The image displays a series of 16 presentation slides related to liquid agitation and mixing. The slides cover the following topics:

- ÍNDICE:** A table of contents listing topics such as 'Formación de remolinos', 'Formas de evitar remolinos', 'Baffles o placas deflectoras', 'Potencia consumida por el agitador', 'Enquematización de una curva de potencia', and 'Parámetros geométricos'.
- FORMACIÓN DE REMOLINOS O VORTICES:** Discusses the formation of vortices in stirred tanks, mentioning the role of baffles and the relationship between tank diameter and impeller diameter.
- FORMAS DE EVITAR REMOLINOS:** Shows diagrams of different agitator designs, including those with baffles, to prevent vortex formation.
- BAFFLES O PLACAS DEFLECTORAS:** Explains the function of baffles in preventing vortexing and improving mixing efficiency.
- POTENCIA CONSUMIDA POR EL AGITADOR:** Discusses the power requirements for different agitator types and the influence of fluid properties.
- ENQUEMATIZACIÓN DE UNA CURVA DE POTENCIA:** Shows a graph of power consumption versus Reynolds number, illustrating the transition from laminar to turbulent flow.
- PARÁMETROS GEOMÉTRICOS:** Lists key geometric parameters for agitator design, such as tank diameter, impeller diameter, and baffle width.



CÁLCULO DE POTENCIA

El cálculo de la potencia consumida se hace a través de cuatro datos básicos, el coeficiente de potencia del agitador, el número de Reynolds y el número de Potencia.

Las gráficas siguientes de las características geométricas del agitador y de la viscosidad de los líquidos definen:

$$N_p = C(N_{Re})^x (N_{Fr})^y$$

Donde: N_p = Potencia
 N_{Re} = Número de Reynolds
 N_{Fr} = Número de Froude

Número de Potencia (Np)

El número de Potencia (Np) tiene parte de las características que definen la hidrodinámica de un sistema de agitación, las cuales, de forma general, se expresan con la siguiente ecuación:

$N_p = f(N_{Re}, N_{Fr})$, Relaciones geométricas simples

Número de Potencia = esfuerzo de torsión / esfuerzo de inercia

$$N_p = \frac{P}{D^5 N^3 \rho}$$

Donde: P = Potencia en [W]
 D = Diámetro del Agitador [m]
 N = Velocidad de rotación (revoluciones / segundo)
 ρ = Densidad del líquido [kg/m³]

Número de Froude (NFr)

Número de Froude (NFr) representa la relación de las fuerzas aplicadas a las fuerzas gravitacionales.

(NFr) = esfuerzo de inercia / esfuerzo gravitacional

$$N_{Fr} = \frac{D_a N^2}{g}$$

Donde: D_a = Diámetro del Agitador [m]
 N = Velocidad de rotación (revoluciones / segundo)
 g = Gravedad de la gravedad [m/s²]

Número de Reynolds (NRe)

Número de Reynolds (NRe) representa una medida de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los esfuerzos viscosos.

(NRe) = esfuerzo de inercia / esfuerzo cortante

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu}$$

- Agitador de tipo 10^3
- Agitador de tipo 10^4 a 10^5
- Agitador de tipo 10^6

Donde: D_a = Diámetro del Agitador [m]
 N = Velocidad de rotación (revoluciones / segundo)
 ρ = Densidad del líquido [kg/m³]
 μ = Viscosidad [Pa·s]

TABLA PARA SELECCIONAR AGITADORES (RODILES)

Tipos de Agitadores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tipos de Agitadores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tipos de Agitadores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50



¡¡¡GRACIAS POR SU ATENCION!!!

Este tercer diaporama consta de 19 diapositivas, con una duración aproximada de 15 minutos de contenido. El tercer diaporama se presenta en un disco al final del apéndice de la tesis.



CAPITULO V. Resultados y Conclusiones

En este capítulo se realizará el análisis del material didáctico elaborado en el capítulo anterior, es decir, los tres diaporamas que se generaron (uno por cada capítulo).

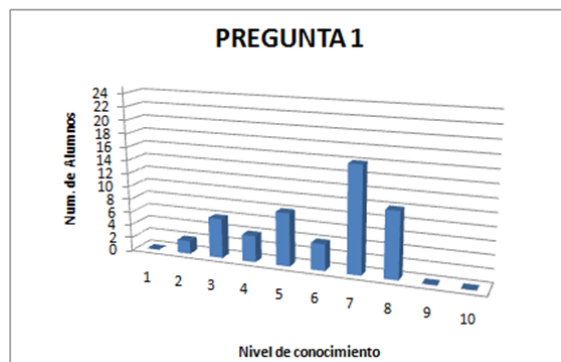
El material audiovisual se les presentó a una población de 50 alumnos de la carrera de Ingeniería Química que se encontraban cursando la asignatura de Ingeniería de Fluidos, en la Facultad de Química de la UNAM.

Para saber que conocimiento de la información presentada tenían los estudiantes, se les presentó un cuestionario. Las preguntas se hicieron con la finalidad de consultar el sentir del alumnado con respecto a la calidad de la información de los diaporamas elaborados, tanto en imágenes como en los videos que complementan los temas abordados en los diaporamas.

A continuación se presentan los resultados del cuestionario.

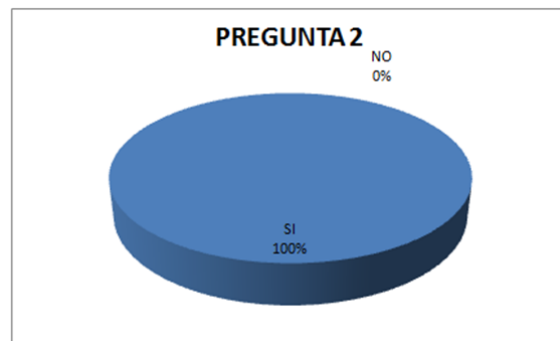
5.1 Resultados

1.- Del 1 al 10, ¿Qué conocimiento tienes de la agitación?



2.- ¿El concepto de agitación fue explicado con claridad?

SI NO



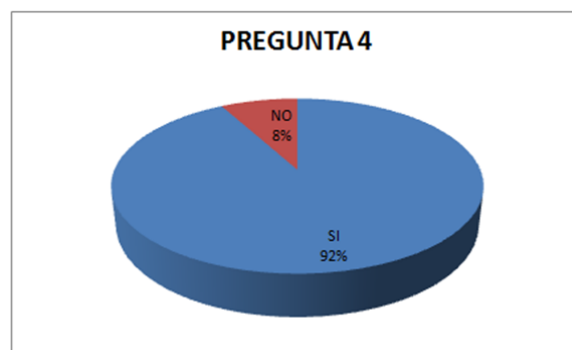
3.- ¿El material te aportó información que antes era desconocida para ti?

SI NO



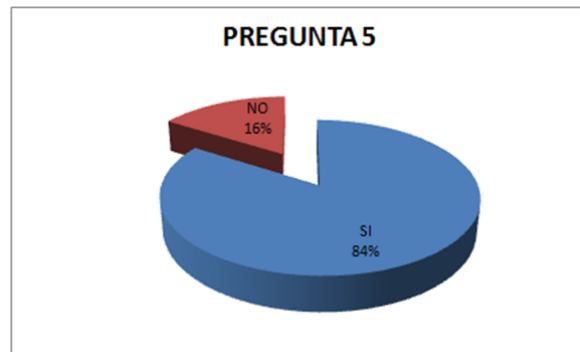
4.- ¿Las imágenes y videos fueron claros?

SI NO



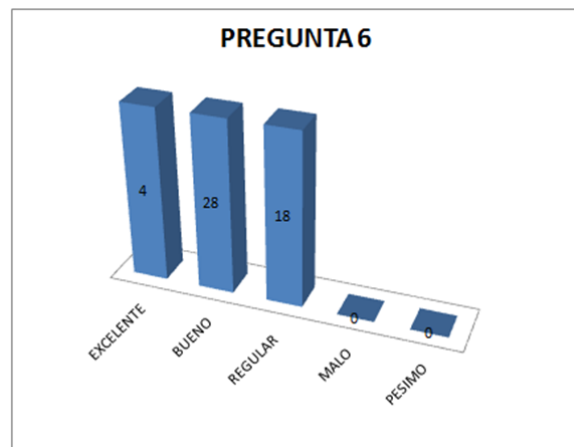
5.- ¿Los materiales presentados (texto, imágenes y principalmente los videos) utilizados para la exposición fueron los adecuados?

SI NO



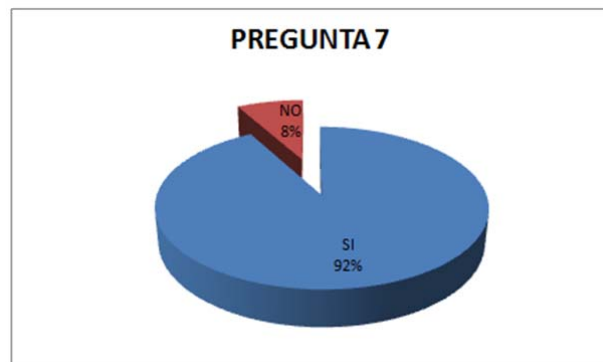
6.- ¿El manejo de los materiales presentados fue?

Excelente Bueno Regular Malo Pésimo



7.- ¿La exposición fue interesante?

SI NO



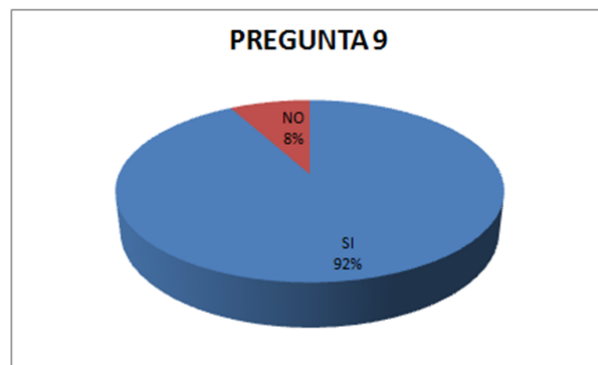
8.- ¿Los vídeos presentados pueden ser útiles/interesantes como herramienta de aprendizaje del tema de agitación?

SI NO

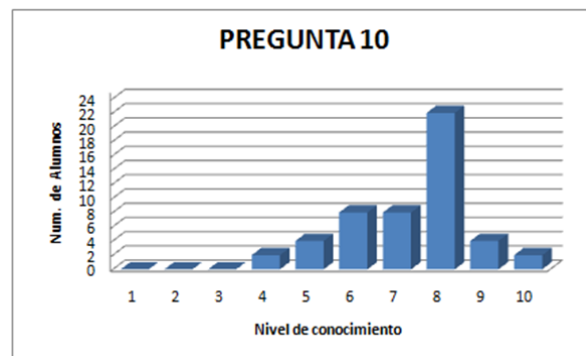


9.- Después de la exposición, ¿aprendió algo más del tema?

SI NO



10.- Después de la presentación vista anteriormente .Del 1 al 10, ¿Qué conocimiento tienes de la agitación?



Al final del cuestionario, se les formuló una pregunta abierta que recoge información sobre algún tema en específico que no se vió, hablar sobre algún fenómeno de la agitación que les hubiera gustado ver con más profundidad. Algunas de las inquietudes en que coincidieron muchos estudiantes, era sobre la formación de remolinos en los tanques de agitación y sobre las placas deflectoras o baffles.

Los vórtices causan un desbalance de fuerzas y limitan severamente el uso de las potencias suministradas.

Cuando un remolino aparece en un tanque de agitación provoca que el grado de mezclado disminuya, eso significa que puede ser que una parte del material a mezclar se quede atrapado en el fondo del tanque de agitación, existen varias formas de evitar los remolinos, pero la más sencilla y eficaz es la colocación de placas deflectoras en la pared del tanque, éstos impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal eliminando la presencia de remolinos.

Sobre la formación de remolinos, se habla con más detalle en el Anexo E "Análisis de un remolino".

En el capítulo II en el apartado 2.4.1 Baffles se profundiza en el tema sobre las placas deflectoras.

Sobre estos temas se habla en el tercer diaporama.

5.2 Conclusiones

Si tomamos los resultados arrojados en las primeras 9 preguntas de nuestro cuestionario, se logra ver que cada persona aprende de una forma diferente, por lo tanto , que aun teniendo un pequeño conocimiento sobre el tema de agitación, éste material es una gran herramienta para ayudarlos a reforzar el conocimiento sobre el tema, les brinda algún tipo de información que ellos desconocían, les despierta la inquietud sobre temas relacionados que van de la mano con la agitación, por ejemplo transferencia de calor o transferencia de masa.



Cabe mencionar que las sugerencias que hacen los alumnos para que este tipo de trabajo o material didáctico se pueden tomar en cuenta para también elaborar un material de apoyo para diversas asignaturas, tales como, Ingeniería de Calor o Transferencia de Masa.

Podemos concluir que éste trabajo logra su objetivo principal; es que el estudiante de Ingeniería Química que esté cursando la materia de Ingeniería de Fluidos pueda reforzar sus conocimientos con respecto al tema de agitación, a través de medios audiovisuales, ya sean vídeos o imágenes que les amplíe su panorama.

Este trabajo logra ser de gran beneficio para el alumno, ya que llega aclarar algunas de sus dudas sobre el tema, ofreciéndole información clara y concisa.

Al presentárseles éste tema mediante una exposición, les brinda una amplia perspectiva sobre el tema de agitación, ya que es un tema un poco complejo y poco común; el 96% de los alumnos coincidieron en que es un trabajo de gran utilidad para la materia que están cursando.

En base a las opiniones recibidas por los alumnos se cumple satisfactoriamente con el objetivo del trabajo planteado al principio .

Cabe recalcar que este tipo de trabajo no pretende reemplazar la enseñanza del profesor, al contrario, es un gran material de apoyo para él en el curso que esté impartiendo, siendo de gran ayuda para complementar algún tema que no se pudo ver por causas desconocidas o por motivos de tiempo.



Anexo A. Precipitación y sedimentación en la separación partícula-fluido

Introducción

En la filtración, las partículas sólidas se separan de la suspensión forzando el paso del fluido a través de un medio filtrante, que retiene a las partículas sólidas y permite que el fluido pase. En la precipitación y la sedimentación, las partículas se separan del fluido por la acción de las fuerzas gravitatorias.

Entre las aplicaciones de la precipitación y la sedimentación se incluye en la eliminación de sólidos de aguas negras, la sedimentación de cristales del licor madre, la separación de mezclas líquido-líquido provenientes de la etapa de extracción con disolvente de un sedimentador, la sedimentación de partículas alimenticias sólidas de un líquido preparado y la sedimentación de una suspensión en el proceso de lixiviación de la soya.

Las partículas pueden ser de tipo sólido o gotas de líquido, el fluido puede ser un líquido o un gas y estar en reposo o en movimiento.

En algunos procesos de precipitación y sedimentación, el objetivo es eliminar las partículas de la corriente del fluido para que este quede libre de contaminantes. En otros casos, se desea recuperar las partículas como productos, por ejemplo el aislar la fase dispersa de una extracción líquido-líquido. En algunos casos, las partículas se suspenden en fluidos para separarlas, de acuerdo con su tamaño o densidad.

Como una partícula está a suficiente distancia de las paredes del recipiente y de otras partículas, de manera que no afecten su caída, el proceso se llama sedimentación libre. La interferencia es inferior al 1% cuando la relación de diámetro del recipiente no sobrepasa 1:200 o cuando la concentración de las partículas en solución no llega al 0.2% en volumen. Cuando las partículas están muy juntas, se sedimentan a velocidad menor y el proceso se llama sedimentación frenada. La separación de una suspensión diluida por la acción de la gravedad con la obtención de un fluido transparente y otra suspensión con mayor proporción de sólidos, se llama sedimentación.



Teoría del movimiento de las partículas a través de un fluido

1. Deducción de las ecuaciones básicas para esferas rígidas.

Cuando una partícula se mueve a través de un fluido, varias fuerzas actúan sobre ella. Primero, se requiere una diferencia de densidades entre la partícula y el fluido. Debe haber una fuerza gravitatoria externa que imparta un movimiento a la partícula. Si las densidades del fluido y de la partícula son iguales, la fuerza de flotación sobre la partícula contrarrestará a la fuerza externa y la partícula no se moverá respecto al fluido.

Para el movimiento de una partícula rígida en un fluido existen tres fuerzas que actúan sobre los cuerpos: la gravedad que actúa hacia abajo, la fuerza de flotación que actúa hacia arriba y la resistencia o fuerza de retardo que actúa en dirección opuesta al movimiento de la partícula.

Consideraremos una partícula de masa m kg cayendo a una velocidad de v m/s en relación con el fluido. La densidad de la partícula sólida es ρ_p kg/m³ y la del líquido es ρ kg/m³ de líquido. La fuerza de flotación F_b en N sobre la partícula es

$$F_b = \frac{m\rho g}{\rho_p} = V_p\rho g \dots (1)$$

Donde m/ρ_p es el volumen V_p en m³ de la partícula, y g es la aceleración de la gravedad en m/s². La fuerza de gravitación o externa F_g en N que actúa sobre la partícula es

$$F_g = mg \dots (2)$$

La fuerza de arrastre F_D sobre un cuerpo, en N, se puede deducir del hecho de que, como en el caso de flujo de fluidos, la resistencia al flujo o arrastre es proporcional a la carga de velocidad $v^2/2$ del fluido desplazado por el cuerpo en movimiento. Esto se debe de multiplicar por la densidad del fluido y por un área significativa A , tal como el área proyectada de la partícula.

$$F_D = C_D \frac{v^2}{2} \rho A \dots (3)$$

donde el coeficiente de arrastre C_D es la constante de proporcionalidad, esto es, un número adimensional.

Entonces la fuerza resultante sobre el cuerpo es $F_g - F_b - F_D$. Esta fuerza resultante debe ser igual a la debida a la aceleración



$$m \frac{dv}{dt} = F_g - F_b - F_D \dots (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) a (3) en la (4),

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{m\rho g}{\rho_p} - \frac{C_D v^2 \rho A}{2} \dots (5)$$

Si empezamos desde el momento en que el cuerpo deja de estar en reposo, su caída pasa por dos periodos: el de caída acelerada y el de caída a velocidad constante. El periodo inicial de aceleración suele ser bastante corto, del orden de una décima de segundo más o menos. Por consiguiente, el periodo de caída a velocidad constante es el más importante. A esta velocidad se le llama velocidad de precipitación libre o velocidad terminal v_t .

Para despejar el valor de la velocidad terminal en la ecuación (5), dv/dt y la expresión toma la

$$v_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A\rho_p C_D \rho}} \dots (6)$$

Para partículas esféricas, $m = \pi D_p^3 \rho_p / 6$ y $A = \pi D_p^2 / 4$. Sustituyendo estos valores en la ecuación (6), se obtiene para partículas esféricas:

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)gD_p}{3C_D \rho}} \dots (7)$$

Donde v_t se da en m/s (pies/s), ρ en kg/m^3 (lb_m/pie^3), g tiene el valor 9.80665 m/s^2 (32.174 pies/s^2) y D_p se da en m (pie).

2. Coeficiente de arrastre para esferas rígidas.

El coeficiente de arrastre para esferas rígidas está en función del número de Reynolds $D_p v \rho / \mu$ de la esfera, como se muestra en la **Figura A.1**. En la región de flujo laminar, llamada región de la ley de Stokes para $N_{Re} < 1$, el coeficiente de arrastre, es



$$C_D = \frac{24}{D_p v_t \rho / \mu} = \frac{24}{N_{Re}} \dots (8)$$

donde μ es la viscosidad del líquido en Pa*s o kg/m*s (lb_m/pies*s).
Sustituyendo en la ecuación (7) para flujo laminar.

$$v_{tt} = \frac{g D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18 \mu} \dots (9)$$

Para partículas con otras formas, los coeficientes de arrastre difieren de los de la **Figura A.1** y están dados en la **Figura A.2**, y en la bibliografía (B2, L2, P1). En la región turbulenta de la ley de Newton, con un número de Reynolds superior a aproximadamente 1000 hasta 2.0×10^5 , el coeficiente de arrastre es casi constante con valor de $C_D = 0.44$.

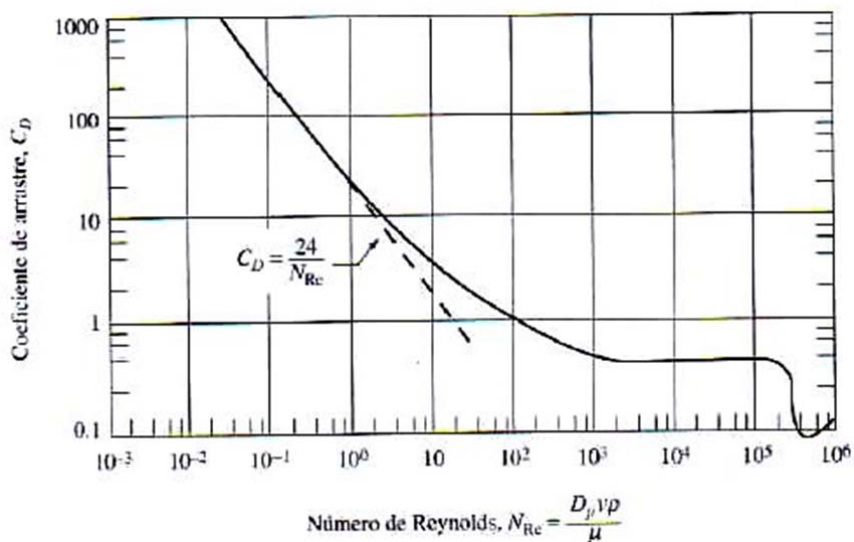


Figura A.1. Coeficiente de resistencia al flujo de una esfera rígida.

La resolución de la ecuación (7) se lleva a cabo por aproximaciones sucesivas cuando se conoce el diámetro de la partícula y se desea obtener la velocidad terminal. Esto se debe a que C_D también depende de la velocidad v_t .

Si las partículas son muy pequeñas, tienen movimiento browniano. El movimiento browniano es el movimiento aleatorio de las partículas causado por las colisiones con las moléculas del fluido que las rodea. Este



movimiento, en direcciones impredecibles, tiende a contrarrestar el efecto de la gravedad, por lo que la precipitación puede ser más lenta y, a veces, no se verifica. Para partículas de unos cuantos micrómetros, el efecto browniano es considerable, y a menos de $0.1 \mu\text{m}$, es predominante. Cuando las de partículas son muy pequeñas, la aplicación de una fuerza centrífuga ayuda a reducir el efecto del movimiento browniano.

En partículas rígidas no esféricas, la resistencia al flujo depende de la forma de la partícula y de su orientación respecto al movimiento. Diversas referencias (P1, B2, C1) proporcionan correlaciones de coeficientes de resistencia de flujo para partículas de diferentes formas.

3. *Coefficientes de resistencia al flujo (arrastre) para esferas no rígidas.*

Cuando las partículas no son rígidas, pueden presentarse una circulación interna dentro de ellas, así como deformaciones de las mismas. Ambos efectos producen variaciones en el coeficiente de arrastre y en la velocidad terminal. Perry y Green (P1) incluyen coeficientes de arrastre para burbujas de aire que se elevan en agua, y para un número de Reynolds inferior a 50, la curva es igual a la de esferas rígidas en agua.

Para gotas líquidas en gases, se obtiene la misma relación de resistencia al flujo que para las partículas esféricas sólidas, cuando el número de Reynolds no pasa de 100. Al aumentar la resistencia al flujo, las gotas grandes se deforman. Las gotas líquidas pequeñas en líquidos inmiscibles se comportan como esferas rígidas y la curva del coeficiente de arrastre es igual a la de esferas rígidas, hasta un número de Reynolds, de más o menos 10. Por encima de este valor y hasta un número de Reynolds de 500, la velocidad terminal es mayor que la de los sólidos, debido a la circulación interna en la gota.

Si desea ver un ejemplo sobre el cálculo de la velocidad de precipitación, debe revisar detalladamente el Ejemplo 14.3-1 de la bibliografía [19].



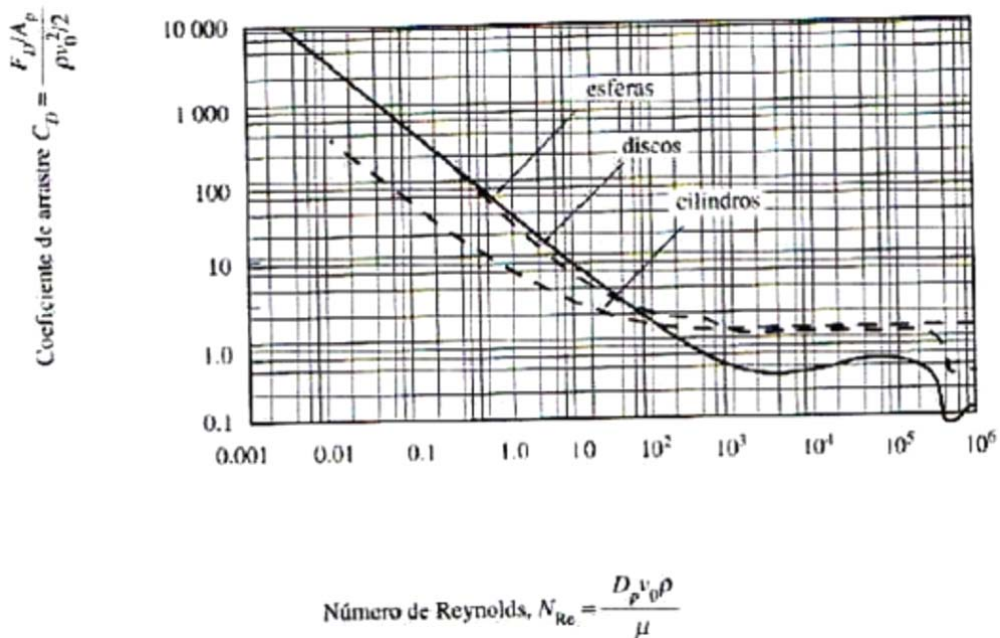


Figura A.2. Coeficientes de arrastre para el flujo alrededor de esferas, cilindros largos y discos inmensos. (Reproducido con autorización de C.E. Lapple y C.B. Shepherd, *Ind. Eng. Chem.*, 32, 606 (1940). Derechos reservados por la American Chemical Society).

Anexo B. Agitación

Un factor importante en el diseño de recipientes con agitador es la potencia. Puesto que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, se tienen correlación empíricas para estimar los requerimientos de potencia

$$N_{Re} = \left(\frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \right) \dots (10)$$

D_a = Diámetro del agitador

N = Velocidad de giro del agitador

Viscosidad (μ) y densidad (ρ) del fluido



$$N_p = \frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} \dots (11)$$

N_p = Número de potencia, en el que

P = Potencia en $\text{kg}_f \cdot \text{m/s}$. (SI)

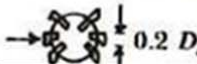



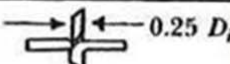
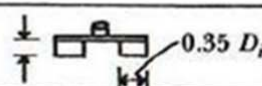
Existen relaciones funcionales entre N_{Re} y N_p , graficadas para diferentes diseños de agitadores (**Gráfica B.1 y Tabla 4.10**).

Si no se encuentra el diseño requerido en la gráfica, se puede corregir la potencia leída por:

$$\sqrt{\left(\frac{DT}{DI}\right)_{\text{deseado}} / \left(\frac{DT}{DI}\right)_{\text{gráfico}}} \dots (12)$$

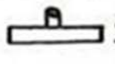



Anexo B. Agitación (Continuación)

Tipo de Agitador	$\frac{D_1}{D_i}$	$\frac{Z_1}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	Hojas cort.		N.º
				N.º	w/D_i	
Turbina de 6 palas planas $0.25 D_i$ 	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.17	1
Igual que en el n.º 1	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	2
Igual que en el n.º 1	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.40	4
Igual que en el n.º 1; $a = 1, b = 40$	3	2.7-3.9	0.75-1.3	0		14º
Turbina de 6 palas curvadas Tam. de palas como en n.º 1 	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	3
Turbina 6 palas forma flecha Tam. de pala como en n.º 1 	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	5
Turbina radial con anillo deflector 				0		7
Turbina cerrada, de 6 palas. Anillo deflector de 20 hojas.	2.4	0.74	0.9	0		11
Semejante, más no idéntica a la n.º 11	3	2.7-3.9	0.75-1.3	0		12
Igual que la 12, pero sin anillo deflector.	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	13
Turbina axil de 8 palas con ángulo de 45º. Ver n.º 17	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	9
Turbina axil 4 palas  con ángulo de 60º	3	3	0.50	0		17
Turbina axil de 4 palas con ángulo de 45º. Ver n.º 17.	5.2	5.2	0.87	0		19
Igual que la n.º 19	2.4-3.0	2.4-3.0	0.4-0.5	0		22
Disco con 16 paletas  $0.1 D_i$ $0.35 D_i$	2.5	2.5	0.75	4	0.25	6



Anexo B. Agitación (Continuación)

Tipo de Agitador	$\frac{D_t}{D_o}$	$\frac{Z_l}{D_o}$	$\frac{Z_a}{D_o}$	Hojas cort.		N.°
				N.°	w/D _t	
Dos paletas  $\frac{1}{4} 0.25 D_t$	4.35	4.3	0.29	3	0.11	8
Cuatro paletas. Ver n.º 8	3	3	0.5	0		16
Dos paletas. Ver n.º 8	3	3.2	0.33	0		20
Dos paletas, Ver n.º 8	3	2.7- 3.9	0.75- 1.3	4	0.10	10
Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = $0.13 D_t$	1.1	0.5	0.19	0		29
Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = $0.17 D_t$	1.1	0.4	0.10	0		29
Hélice de 3 palas  Paso de la hélice = $2 D_t$	3	2.7- 3.9	0.75- 1.3	4	0.10	15
Igual que el n.º 15; $a = 1.7$, $b = 18$	3.3	2.7- 3.9	0.75- 1.3	0		21º
Igual que el n.º 15, pero con paso = $1.33 D_t$	16			3	0.06	18
Igual que el n.º 15, pero con paso = $1.09 D_t$	9.6			3	0.06	23
Igual que el n.º 15, pero con paso = $1.05 D_t$, $a = 2.3$, $b = 18$	2.7	2.7- 3.9	0.75- 1.3	0		27º
Igual que el n.º 15, pero con paso = $1.04 D_t$, $a = 0$, $b = 18$	4.5	2.7- 3.9	0.75- 1.3	0		25º
Igual que el n.º 15, pero con paso = D_t	3	2.7- 3.9	0.75- 1.3	4	0.10	24
Igual que el n.º 15, pero con paso = D_t ; $a = 2.1$, $b = 18$	3	2.7- 3.9	0.75- 1.3	0		26º
Igual que el n.º 15, pero con paso = D_t	3.8	3.5	1.0	0		28

D_t = Diámetro del agitador; D_o = Diámetro del depósito; N = N° de revoluciones por segundo; W = ancho de las hojas del deflector; Z_a = altura que esta el agitador sobre el fondo del depósito; Z_l = altura del nivel del líquido en el depósito.



Tabla 4.10 Tabla para seleccionar Agitadores

Relaciones					
<i>Servicio</i>	<i>Agitador</i>	<i>Rango</i>	<i>Diámetro de tanque a diámetro del Agitador</i>	<i>Altura del tanque a relación de diámetros</i>	<i>Agitadores y posición de estos</i>
Mezclado	Turbina Propela Paleta Volumen del tanque	50 % 100 % 15 % Hasta 5000 m ³	3:1 a 6:1	Ilimitada	Sencillos o múltiples
Dispersión (Sistemas inmiscibles)	Turbina Propela Paleta Flujo	100 % 25 % 5 % Hasta 5 m ³ /min	3:1 a 3:5:1	1:1 1:2 en mezcladores de cascada	En o por abajo del centro o de la carga del líquido
Reacciones en solución (sistemas miscibles)	Turbina Propela Paleta Volumen por carga	100 % 50 % 5 % Hasta 50 m ³	2:5:1 hasta 3:5:1	1:1 a 3:1	Sencillos o múltiples
Disolución	Turbina Propela Paletas Volumen por carga	100 % 25 % 100 % Hasta 25 m ³	1:6:1 hasta 3:2:1	1:2 hasta 2:1	En el centro o por debajo de la línea de carga del líquido

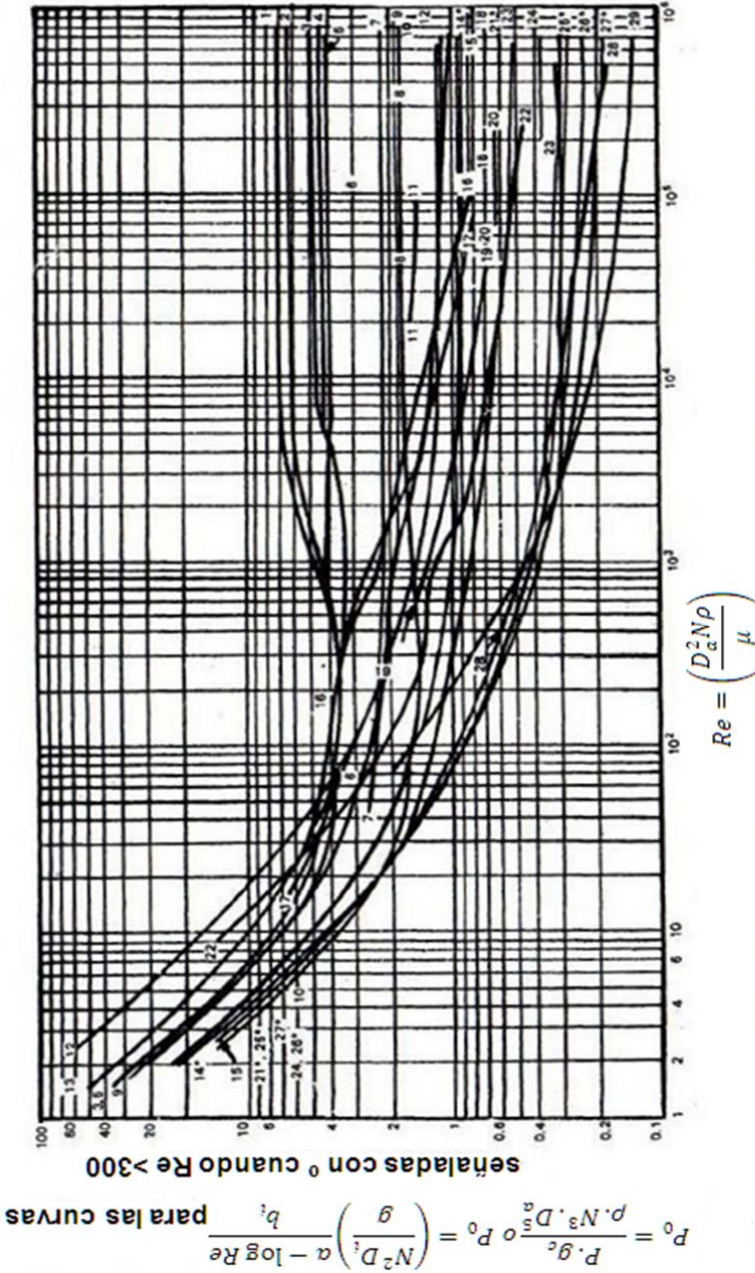
Relaciones					
<i>Servicio</i>	<i>Agitador</i>	<i>Rango</i>	<i>Diámetro de tanque a diámetro del Agitador</i>	<i>Altura del tanque a relación de diámetros</i>	<i>Agitadores y posición de estos</i>
Sólidos en suspensión	Turbina Propela Paletas % de sólidos	80 % 50 % <u>De 65 % a 90%</u> Hasta 100 %	2:1 hasta 3:5:1	1:1 a 3:1	Dependiente del tamaño de la partícula. Para lograr velocidad en el fondo del tanque. Para lograr recirculación fuera del fondo
Aplicaciones con gases	Turbina Propela Paletas Volumen de gas	100 % 10 % 5 % Hasta 150 m ³ /min	2:5:1 hasta 4:9:1	4:1 hasta 1:1	Un diámetro de agitador por arriba del fondo del tanque
Aplicaciones con alta viscosidad	Turbina Propela Paletas viscosidad	100 % 5 % <u>De 75 % a 100%</u> Hasta 1,000,000 cps	1:5:1 hasta 2:5:1	1:2 hasta 2:1	Sencillos o múltiples
Transferencia de calor	Turbina Propela Paletas Volumen por carga	100 % 5 % 25 % Hasta 50 m ³	Relacionada con otros servicios	Depende de los otros servicios que se lleve a cabo	Simple o múltiple. Agitador opuesto. A la superficie de transferencia cuando se usan serpentines



<i>Relaciones</i>					
<i>Servicio</i>	<i>Agitador</i>	<i>Rango</i>	<i>Diámetro de tanque a diámetro del Agitador</i>	<i>Altura del tanque a relación de diámetros</i>	<i>Agitadores y posición de estos</i>
Cristalización y precipitación	Turbina Propela Paletas Volumen por carga	100 % 50 % 100 % Hasta 50 m ³	2:1 hasta 3:2:1	2:1 hasta 1:1	Sencillo. En el centro o debajo de la línea de alimentación del líquido



Gráfica B1.



Gráfica C.1. Consumo de energía de diversos agitadores, expresado por el parámetro de potencia, P_0 , y del número de Reynolds, Re . Para las curvas señaladas con 0, la influencia de la superficie libre es considerable, por lo que se ha tenido en cuenta el número de Froude, $Fr = g/W^2 D$, para Re superiores a 300. P_0 , potencia; p , densidad; N , revoluciones por minuto.

Fuente: G. Brown, Operaciones básicas de la ingeniería química, Ed. Marín, 1965, Barcelona.



Anexo C. Agitadores de alta viscosidad

C.1 Agitadores tipo hélice de tornillo

Con el fin de mejorar la eficiencia para líquidos más densos y viscosos, se pueden utilizar distintos tipos de turbinas tipo hélices de tornillo. En la **Figura C.1** se muestra un esquema básico de un agitador tipo hélice de tornillo, el cual es un eficiente dispositivo usado especialmente para líquidos de alta viscosidad ya que no necesariamente el fluido debe tener una velocidad alta para alcanzar la mezcla deseada. Este tipo de agitadores puede ser obtenido en numerosos tamaños y geometrías por lo que permite una amplia gama de requerimientos.

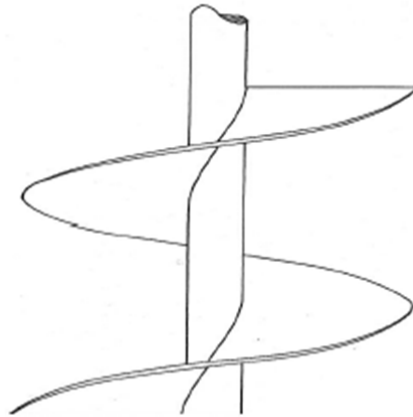


Figura C.1. Esquema básico de un agitador de hélice de tornillo

Los tornillos normalmente funcionan llevando líquidos desde el fondo del estanque hasta la superficie del líquido. El líquido entonces es descargado y retornado hacia el fondo del estanque nuevamente, llenando así el vacío creado cuando el fluido fresco es llevado a la superficie. Alternativamente, los tornillos pueden ser operados en dirección invertida para empujar líquido hacia el fondo. Se requiere menos potencia en este caso, pero una mezcla o agitación más pobre. El patrón del fluido en hélices de tornillo es, por supuesto, función de la geometría. En sistemas de tornillo sin deflectores, la hélice se ubica al centro del estanque y el líquido exhibe un movimiento turbulento suave.



La velocidad del líquido decrece hacia las paredes debido al roce producido y por esta razón no es recomendado este tipo de estanques. El patrón de flujo de los estanques sin baffle se muestra en la **Figura C.2a**.

Al colocar baffles dentro de los estanques se crea turbulencia. Los deflectores pueden ser ubicados pegados a la pared o separados de esta como se muestra en la **Figura C.2a**. De todas formas, cual sea la configuración del sistema deflectado, la eficiencia de mezcla mejora considerablemente en comparación con aquellos sistemas sin baffles.

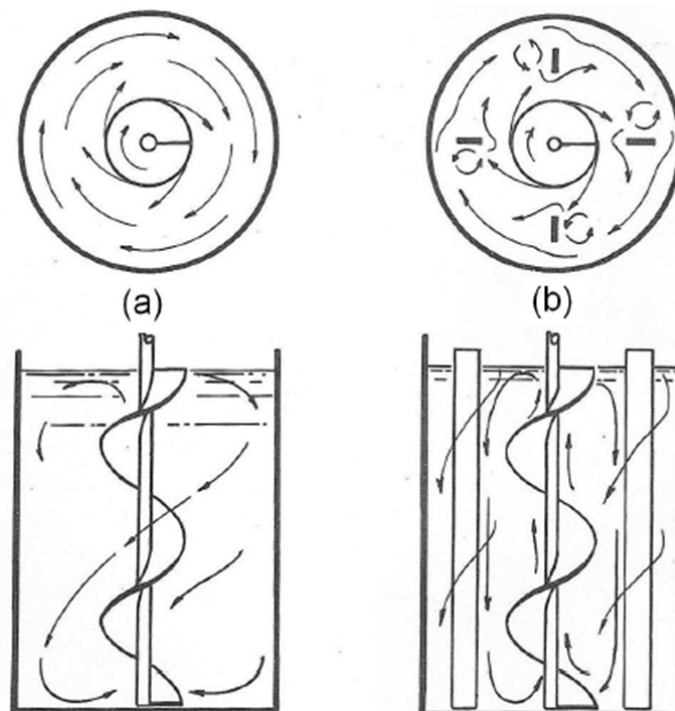


Figura C.2. Patrón de flujo en agitadores de hélices de tornillo centrada

(a) sin baffles y (b) con baffles.

C.2 Agitadores tipo paddle (paletas o palas)

Estos agitadores se caracterizan por ser de baja velocidad y poseer aspas de gran área que funcionan empujando líquido en una trayectoria circular alrededor del estanque. No se produce una gran turbulencia en comparación con las turbinas y tampoco se produce mucho movimiento de partículas desde la superficie hasta el fondo excepto cuando se colocan baffles y se usan



múltiples paddles. En la **Figura C.3** se muestra un ejemplo de este tipo de agitadores.

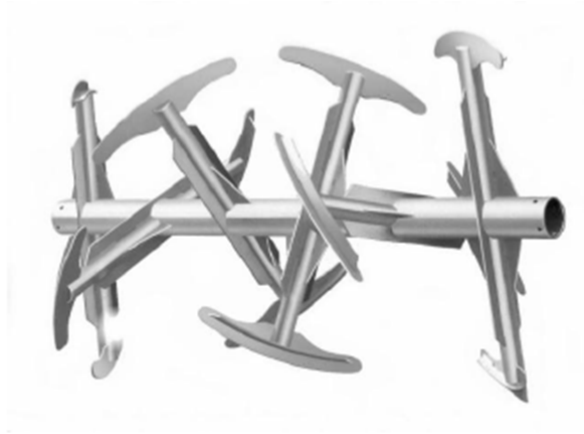


Figura C.3. Agitador tipo paddle típico.

C.3 Agitadores tipo anchor (ancla o áncora)

Los agitadores tipo anchor han sido satisfactoriamente usados en la mezcla de líquidos con viscosidades de aproximadamente 100.000 cp. Se ha comparado la eficiencia relativa de un anchor en relación a paddles y turbinas operando en líquidos viscosos. A 40 rpm, el anchor mezcla más eficazmente líquidos de 40.000 cp que los otros.

El anchor trabaja típicamente con bajas velocidades y una gran área de agitador y presentan una gran cantidad de geometrías distintas para las aplicaciones distintas. Una de las aplicaciones donde más se utilizan agitadores tipo anchor es en la transferencia de calor, siendo muy efectivo en comparación con los otros tipos de agitadores. En la **Figura C.4** se muestra un ejemplo típico de anchors. En las **Figuras C.5, C.6 y C.7** se muestran imágenes obtenidas en el Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



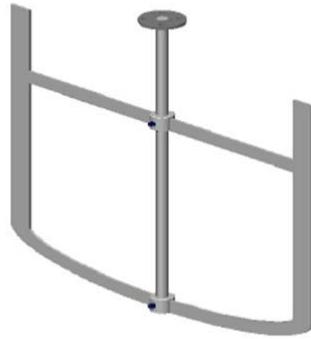


Figura C.4. Fotografía obtenida en el Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile de un tipo de agitador tipo ancla.



Figura C.5. Fotografía obtenida en el Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile de un tipo de agitador tipo ancla.





Figura C.6. Fotografía obtenida en el Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile de un tipo de agitador tipo ancla.



Figura C.7. Agitador tipo ancla típico.

C.4. Agitadores de doble hélice tipo banda

Para aplicaciones de extremadamente alta viscosidad (1.000.000 cp), se deben usar agitadores especializados para obtener una mezcla de pie a cabeza del estanque.

Los agitadores de doble hélice tipo banda (**Figura C.8**) son muy adecuados para mezcla de líquidos de altísima viscosidad. La mezcla ocurre por medio de la acción de fuerzas descendientes de la hélice central y consecuentemente el movimiento desde el fondo hasta la superficie se produce por medio de este tipo de agitadores. Las dobles hélices de tipo banda entregan una completa mezcla sin zonas de estancamiento.



Dado que la hélice exterior está cercana a la pared, se aumenta la tasa de transferencia de calor. Holland [1] compara las dobles hélices de tipo banda con otras hélices de tornillo, turbinas y paddles. Para la misma potencia y viscosidad, las dobles hélices de tipo banda, producen una mezcla más homogénea para pinturas y jarabe de maíz en 1/60 del tiempo requerido por una turbina o una hélice de tornillo.



Figura C.8. Agitador doble hélice de banda típico.

[1] Holland, F.A. and Chapman, F.S., 1966. Liquid Mixing and Processing in stirred tanks. Reinhold Publishing Corporation, 1a. Edición, pp. 1-49.



Anexo D. Análisis de un remolino

En tanques sin desviadores (deflectores), la formación de vórtices introduce un mecanismo adicional: las fuerzas del fluido asociadas con la gravedad. En el remolino, una parte del contenido del tanque está sostenida contra la aceleración gravitacional de la Tierra y, en consecuencia, las fuerzas del fluido en el sistema deben suministrar la fuerza para mantener la carga fluido que constituye el remolino. Se puede analizar la naturaleza de las fuerzas examinando un elemento de fluido en el vórtice, como se muestra en la **Figura D.1**.

Se toma el elemento de fluido en z_0 , el punto más bajo del vórtice, por tanto, en cualquier posición radial existirá una “carga” de fluido por encima del elemento. Con estado estable, la presión en cualquier elemento del fluido debe ser tal que las fuerzas sobre todas las caras del área unitaria del elemento son iguales. A medida que se examinan los elementos en z_0 , la presión debe aumentar desde $r=0$ hasta $r=r_1$, debido a que está presente una carga de fluido creciente. La fuerza asociada con la carga se representa por F_b , la fuerza del cuerpo y la fuerza radial se representa por F_c y de seguro,

$$F_b = F_c \dots (13)$$

Por consiguiente, la fuerza F_c es obviamente una fuerza centrífuga resultante del movimiento del fluido a través del elemento de volumen. En consecuencia, es posible relacionar cada una de las fuerzas con las variables del sistema. La fuerza del cuerpo sobre el elemento $\Delta x \Delta y \Delta z$ es

$$F_b = \Delta x \Delta y (z - z_0) \rho \frac{g}{g_c} \dots (14)$$

Y la fuerza centrífuga sobre el elemento es

$$F_c = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z \rho r \omega^2}{g_c} \dots (15)$$

donde

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = dimensiones del elemento, pies



$z - z_0$ = altura del fluido por encima del elemento, pies

r = posición radial, pies

ω = velocidad angular s^{-1}

Estas fuerzas pueden igualarse

$$\Delta x \Delta y (z - z_0) \rho \frac{g}{g_c} = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z \rho r \omega^2}{g_c} \dots (16)$$

ρ , Δx , Δy y g_c se cancelan de la ecuación, de manera que

$$(z - z_0)g = \Delta z r \omega^2 \dots (17)$$

el término del lado derecho de la ecuación está relacionado con la energía cinética del fluido y el lado izquierdo con las fuerzas asociadas con la gravedad. Esta ecuación puede expresarse como

$$\frac{\Delta z r \omega^2}{(z - z_0)g} = 1 \dots (18)$$

No se conoce el valor numérico exacto de cada término, pero en un sistema geoméricamente similar, todas las dimensiones de longitud pueden tomarse como proporcionales, de manera que

$$\Delta z \propto (z - z_0) \sim r \sim D' \dots (19)$$

y en un sistema dinámicamente similar,

$$\omega \propto N$$

Por lo tanto es posible expresar la ecuación (18) como

$$\frac{N^2 D'}{g} = \text{constante} \dots (20)$$

Para un sistema dinámicamente similar. El grupo $D' N^2/g$ se conoce como el número de Froude (N_{Fr}) y representa la relación



$$\left(\frac{\text{Fuerzas asociadas con la energía cinética}}{\text{Fuerzas asociadas con la gravedad}} \right)$$

y el grupo es adimensional.

Se pueden incluir los efectos gravitacionales adicionales

$$N_{P0} = f(N_{Re})(N_{Fr}) \dots (21)$$

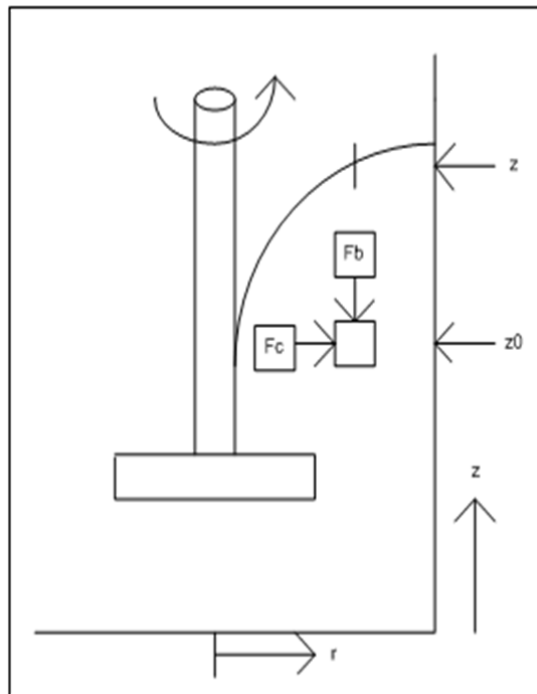


Figura D.1. Fuerzas asociadas con un elemento de fluido en un vórtice.

Anexo E. Bombas

1. *Potencia y trabajo requeridos.* Mediante la expresión del balance total de energía mecánica, ecuación (22) para una bomba y un sistema de tuberías, puede calcularse la energía mecánica real o teórica W_{SJ} / kg adicionada al fluido por la bomba.



$$\frac{1}{2} \alpha (v_{2prom}^2 - v_{1prom}^2) + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \sum F + W_S = 0 \dots (22)$$

El término en la ecuación (22) se convierte en $-W_S$ = energía mecánica que la bomba suministra al fluido, esto es, trabajo mecánico neto, η = eficiencia fraccionaria, y W_P = energía o trabajo axial suministrado a la bomba.

$$W_S = -\eta W_P \dots (23)$$

Si la eficiencia fraccionaria es η y W_P es el trabajo axial suministrado por la bomba, la ecuación (23) da

$$W_P = \frac{W_S}{\eta} \dots (24)$$

La potencia real (o potencia al freno de una bomba) es la siguiente:

$$\text{kW al freno} = \frac{W_P m}{1000} = -\frac{W_S m}{\eta \times 1000} \dots (\text{unidades SI}) \dots (25)$$

$$\text{hp al freno} = \frac{W_P m}{550} = -\frac{W_S m}{\eta \times 550} \dots (\text{unidades del sistema inglés}) \dots (26)$$

donde W_P está en J/kg, m es la velocidad de flujo en kg/s, y 1000 es el factor de conversión W/kW. En unidades del sistema inglés, W_S está en pie.lbf/lb_m y m en lb_m/s. La potencia teórica del fluido es

$$\text{potencia teórica} = (\text{kW al freno})(\eta) \dots (27)$$

La energía mecánica W_S en J/kg adicionada al fluido se suele expresar como la carga H desarrollada por la bomba en metros de fluido bombeado, donde

$$-W_S = Hg \dots (\text{SI}) \dots (28)$$

$$-W_S = H \frac{g}{g_c} \dots (\text{unidades del sistema inglés}) \dots (29)$$



Para calcular la potencia de un ventilador donde la diferencia de presión es del orden de unos cuantos cientos de milímetros de agua, se usa una densidad promedio lineal del gas entre la entrada y la salida del ventilador para calcular W_s y los kW caballos de potencia al freno.

2. *Eficiencia del motor eléctrico.* En vista de que casi todas las bombas funcionan con motores eléctricos, debe tomarse en cuenta la eficiencia para determinar la potencia eléctrica total que reciben. Las eficiencias típicas η_e de los motores eléctricos son los siguientes.

- 77% para motores de ½ kW
- 82% para los de 2 kW
- 85% para los de 5 kW
- 88% para los de 20 kW
- 90% para los de 50 kW
- 91% para los de 100 kW
- 93% para los de 500 kW y más grandes.

Por tanto, el suministro total de energía eléctrica es igual a la potencia de freno dividida entre la eficiencia del motor eléctrico η_e :

$$\text{Suministro de energía eléctrica(kW)} = \frac{\text{kW al freno}}{\eta_e} = \frac{-W_{sm}}{\eta \cdot \eta_e \cdot 1000} \dots (30)$$



Bibliografía

- [1] Valiente Barderas Antonio, Problemas de Flujo de Fluidos, 2da.edición, Editorial Limusa, México, 2004, pág. 564
- [2] McCabe, W.L., Smith., Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen I, Reverte, España, 1973, pág. 251-263
- [3] Valiente Barderas Antonio, Problemas de Flujo de Fluidos, 2da.edición, Editorial Limusa, México, 2004, pág. 50
- [4] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Viscosidad-Dinamica/1231204.html>
- [5] <http://taninos.tripod.com/viscosidad.htm>
- [6] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 171
- [7] <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S464A.pdf>
- [8] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 929-932
- [A1] McCabe, W.L., Smith., Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen I, Reverte, España, 1985.
- [A2] Weisman, J. y Eferding, L. E.A.I.Ch.E.J. 6, 419 (1960)
- [A3] Corpstein, R.R., Fasano, J.B. y Myers, K.J. Chem. Eng. 101(octubre) 138 (1994)
- [8] McCabe, W.L., Smith., Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen I, Reverte, España, 1973, pág. 252-261
- [9] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 159-161
- [10] Weston, Claudio Gelmi, Fundamentos de Operaciones Unitarias: Series de clases en Ingeniería Química, Depto. De Ing. Química y Bioprocesos, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2006.



-
- [11] http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2010/cf-martinez_fn/pdfAmont/cf-martinez_fn.pdf
- [12] <http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm>
- [13] Valiente Barderas Antonio, Manual del Ingeniero Químico, 1ra.edición, Editorial Noriega, México, 1993, pág. 218-221.
- [14] McCabe, W.L., Smith., Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen I, Reverte, España, 1973, pág. 256-261
- [15] Piris da Motta, Apuntes de agitación y mezcla, Cátedra de operaciones, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones.
- [16] McCabe, W.L., Smith., Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen I, Reverte, España, 1973, pág. 256-262
- [17] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 163-171
- [18] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 187-188
- [18] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 931-932
- [B3] Bates, R.L. Fondy, P.L. y Corpstein, R.R.I.E.C Proc. Des. Dev., 2, 310 (1963)
- [B6] Bakker, A. y Gates, L.E. Chem. Eng. Progr., 91, (diciembre), 25, (1995)
- [F2] Corpstein, R.R., Fasano, J.B. y Myers, K.J. Chem. Eng. 101(octubre) 138 (1994)
- [G1] Godleski, E.S. y Smith, J.C., A. I. Ch. E.J., 8, 617 (1962)
- [M1] Metzner, A.B., Feehs, R.H. Ramos, H. L., Ootto, R. E. y Tuthill, J.D. A. I. Ch. E.J., 7, 3 (1961)



-
- [H2] Ho, F.C., y Kwong, A. Chem. Eng., Julio 23, 94 (1973)
- [P3] Patterson, W. I., Carreau, P. J. y Yap, C. Y. A. I. Ch. E.J., 25, 208 (1979)
- [R1] Rushton, J.H., Costich, D.W., y Everett, H.J. Chem. Eng. Progr., 46, 395,467 (1950).
- [R2] Rautzen, R.R., Costich, D.W., y Everett, H.J. Chem. Eng., octubre 25, 119 (1976)
- [Anexo A] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 126-127 y 928-931.
- [Anexo B] Valiente Barderas Antonio, Manual del Ingeniero Químico, 1ra.edición, Editorial Noriega, México, 1993, pág. 218-224.
- [Anexo B] Valiente Barderas Antonio, Problemas de Flujo de Fluidos, 2da.edición, Editorial Limusa, México, 2004, pág. 565-566 y 726-728.
- [Anexo C] http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2010/cf-martinez_fn/pdfAmont/cf-martinez_fn.pdf
- [Anexo D] Foust Alan S. y Wenzel Leonard A. Principios de Operaciones Unitarias. 6ta. edición, Editor Continental, 1997 pág. 573-575.
- [Anexo E] Geankopolis, John., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ta. Edición, Editorial Patria, 2003, pág. 70-71 y 149-150.

Índice de figuras

FIGURA A. HOMOGENEIZACIÓN DE LÍQUIDOS MISCIBLES.....	8
FIGURA B. DISPERSIÓN DE UN GAS EN EL SENO DE UN LÍQUIDO.....	10
FIGURA C. DISPERSIÓN DE DOS LÍQUIDOS INMISCIBLES PARA FORMAR UNA EMULSIÓN.....	11
FIGURA D. SUSPENSIÓN DE UN SÓLIDO EN UN MEDIO LÍQUIDO.....	13
FIGURA E. TRANSMISIÓN DE CALOR EN UN RECIPIENTE AGITADO.....	14
FIGURA 1.A. IZQUIERDA: PATRÓN DE FLUJO GENERADO POR UNA TURBINA AXIAL, DERECHA: PATRÓN DE FLUJO GENERADO POR UNA TURBINA RADIAL.....	15
FIGURA 1.B. FORMACIÓN DE VÓRTICE Y TIPO DE FLUJO EN UN TANQUE AGITADO.	16



(SEGÚN LYONS)	16
FIGURA 2. AGITADOR NO CENTRADO (CORTESÍA ALCHE)	17
FIGURA 3. AGITADOR CON ENTRADA LATERAL (SEGÚN BISSEL, HESSE, EVERETT Y RUSHTON)	17
FIGURA 4. TIPO DE FLUJO EN UN TANQUE CON PLACAS DEFLECTORAS Y UN AGITADOR DE HÉLICE MONTADO EN EL CENTRO (CORTESÍA ALCHE)	18
FIGURA 5. TURBINAS MÚLTIPLES EN UN TANQUE DE GRAN ALTURA. EN LA FIGURA SE MUESTRAN 5 AGITADORES DE FLUJO RADIAL DISTRIBUIDOS EQUIESPACIADAMENTE.	20
FIGURA 6. PERFILES DE VELOCIDAD EN UN AGITADOR DE TURBINA	22
FIGURA 7-1. TANQUE TÍPICO DE AGITACIÓN.....	25
FIGURA 7-2. ESQUEMA ESTÁNDAR DE UN EQUIPO DE AGITACIÓN (EN ESTE CASO SE PRESENTA UNA TURBINA DE SEIS ASPAS CON DISCO).	25
FIGURA 8. HÉLICES DE MEZCLA A) NORMAL DE TRES PALAS B) DE CUCHILLA C) PROTEGIDA	28
FIGURA 9. AGITADORES DE PALETAS (A) PALETAS PLANAS (B) PALETAS INCLINADAS (C) AGITADOR DE ANCLA. [8]	29
FIGURA 10. VARIOS TIPOS DE AGITADORES: (A) PALETA DE CUATRO ASPAS, (B) PALETA DE COMPUERTA O ANCLA, (C) TURBINA ABIERTA DE SEIS ASPAS, (D) TURBINA DE ASPAS INCLINADAS (45º). [9]	30
FIGURA 11. DIVERSOS AGITADORES DE TURBINA (A) ABIERTO DE PALAS VERTICALES (B) DE DISCO CON ALETAS (C) DE PALETAS VERTICALES CURVAS (D) CERRADO DE PALETAS CURVAS CON ANILLO DIFUSOR. [8]	31
FIGURA 12. TANQUE CON DEFLECTORES CON UN AGITADOR DE TURBINA DE SEIS ASPAS CON DISCO, QUE MUESTRA PATRONES DE FLUJO: (A) VISTA LATERAL, (B) VISTA SUPERIOR, (C) DIMENSIONES DE LA TURBINA Y EL TANQUE. [9].....	32
FIGURA 13. OTROS TIPOS DE AGITADORES: (A) AGITADOR DE TRES HOJAS DE ALTA EFICIENCIA, (B) CINTA DE DOBLE HÉLICE, (C) TORNILLO HELICOIDAL. [COPYRIGHT BY THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS].	33
FIGURA 14. RECOMENDACIONES DE DISEÑADORES DE AGITADORES DE ACUERDO A LOS DISTINTOS REQUERIMIENTOS DE VISCOSIDAD DEL FLUIDO DE TRABAJO. DE IZQUIERDA A DERECHA, LOS TIPOS DE AGITADORES SON: AGITADOR TIPO ANCLA, HÉLICES, TURBINAS DE PALETA PLANA, AGITADORES DE PALETAS O PALAS, ANCLAJES DE PUERTA, HÉLICE DE TORNILLO Y HÉLICES DE BANDA. [11]	34
FIGURA 15. DISTINTOS TIPOS DE BAFFLES PARA DISTINTAS APLICACIONES. LA PRIMERA CONFIGURACIÓN ES LA MÁS CONOCIDA Y ESTA APEGADA A LA PARED DEL TANQUE, LA SEGUNDA CONFIGURACIÓN TIENE BAFFLES SEPARADOS Y LA TERCERA BAFFLES SEPARADOS E INCLINADOS. [11]	37
FIGURA 16. TUBOS DE ASPIRACIÓN EN UN TANQUE AGITADO: A) AGITADOR DE TURBINA	39
B) AGITADOR DE HÉLICE (SEGÚN BISSEL, HESSE, EVERETT Y RUSHTON). [8]	39
FIGURA 17. ESQUEMATIZACIÓN DE UNA CURVA DE POTENCIA.	42
FIGURA 18. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE UN TANQUE DE AGITACIÓN (C: ALTURA DEL AGITADOR SOBRE EL FONDO DEL TANQUE)	44



FIGURA 19. NÚMERO DE POTENCIA N_p VERSUS N_{RE} PARA TURBINA DE SEIS PALAS. 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	49
FIGURA 20. NÚMERO DE POTENCIA N_p VERSUS N_{RE} PARA TURBINA DE TRES PALAS. 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	50
FIGURA 7-2. ESQUEMA ESTÁNDAR DE UN EQUIPO DE AGITACIÓN (EN ESTE CASO SE PRESENTA UNA TURBINA DE SEIS ASPAS CON DISCO)	53
FIGURA 21. CORRELACIONES DE POTENCIA PARA DIVERSOS AGITADORES Y DEFLECTORES (VÉASE LA FIGURA 7-2 LAS DIMENSIONES D_A , D_T , J Y W).	55
FIGURA 22. DIAGRAMA DE ESFUERZO CORTANTE PARA FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.....	61
FIGURA 23. CORRELACIÓN DE POTENCIA EN LA AGITACIÓN PARA UNA TURBINA PLANA DE SEIS ASPAS CON DISCO EN FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS NO NEWTONIANO Y NEWTONIANO.	64
FIGURA 24. CORRELACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLA PARA LÍQUIDOS MISCIBLES USANDO UNA TURBINA EN UN TANQUE CON DEFLECTORES (PARA TURBINA SIMPLE, UNA TURBINA CON DISCO Y UNA TURBINA CON ASPAS INCLINADAS).....	74
FIGURA A.1. COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL FLUJO DE UNA ESFERA RÍGIDA.	93
FIGURA A.2. COEFICIENTES DE ARRASTRE PARA EL FLUJO ALREDEDOR DE ESFERAS, CILINDROS LARGOS Y DISCOS INMENSOS. (REPRODUCIDO CON AUTORIZACIÓN DE C.E. LAPPLE Y C.B. SHEPHERD, IND. ENG. CHEM., 32, 606 (1940). DERECHOS RESERVADOS POR LA AMERICAN CHEMICAL SOCIETY).	95
GRÁFICA B1.....	101
FIGURA C.1. ESQUEMA BÁSICO DE UN AGITADOR DE HÉLICE DE TORNILLO	102
FIGURA C.2. PATRÓN DE FLUJO EN AGITADORES DE HÉLICES DE TORNILLO CENTRADA	103
(A) SIN BAFFLES Y (B) CON BAFFLES.	103
FIGURA C.3. AGITADOR TIPO PADDLE TÍPICO.....	104
FIGURA C.4. FOTOGRAFÍA OBTENIDA EN EL LABORATORIO DE FLUIDOS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE DE UN TIPO DE AGITADOR TIPO ANCHOR. .	105
FIGURA C.5. FOTOGRAFÍA OBTENIDA EN EL LABORATORIO DE FLUIDOS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE DE UN TIPO DE AGITADOR TIPO ANCHOR. .	105
FIGURA C.6. FOTOGRAFÍA OBTENIDA EN EL LABORATORIO DE FLUIDOS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE DE UN TIPO DE AGITADOR TIPO ANCHOR..	106
FIGURA C.7. AGITADOR TIPO ANCHOR TÍPICO.....	106
FIGURA C.8. AGITADOR DOBLE HÉLICE DE BANDA TÍPICO.....	107
FIGURA D.1. FUERZAS ASOCIADAS CON UN ELEMENTO DE FLUIDO EN UN VÓRTICE.	110

