

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ

Facultad De Ciencias Aplicadas
EAP de Ingeniería Agroindustrial

OPERACIONES UNITARIAS II



AGITACION Y MEZCLADO

FACILITADOR :MSc. Miguel Angel QUISPE SOLANO

AGITACION Y MEZCLADO

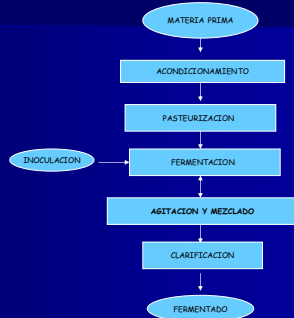
La Mezcla, es aquella operación unitaria en la que a partir de dos o mas componentes, dispersados inicialmente se obtiene una mezcla uniforme, se utiliza como ayuda para el proceso de modificar la comestibilidad o calidad de los alimento.

La Agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de un contenedor.

El mezclado se obtiene mediante un proceso de AGITACION, que se lleva a cabo bien sea en un tanque o una cuba, o en forma continua.

El éxito depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos.

FLUJOGRAMA DE OBTENCION DE FERMENTADO



Las operaciones de agitación y mezclado se encuentran presente en prácticamente todas las áreas de la ingeniería de procesos. Por ejemplo:

Agitación y Mezclado

- Polímeros
- Productos farmacéuticos
- Cosmética (cremas, pastas, etc.)
- Alimentos
- Pinturas
- Petroquímica
- Productos químicos en general
- Procesamiento de minerales
- Tratamiento de residuos
- Tratamiento y producción de agua potable

Sin embargo, no es una operación a la cual se le dedique mucha atención, aunque muchas veces la calidad del producto dependa de la agitación.

AGITACION EN LA AGROINDUSTRIA

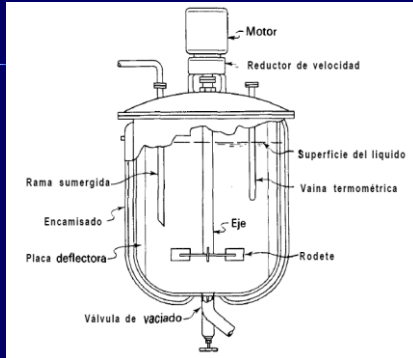
La **agitación** se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente.

Los objetivos de la agitación pueden ser:

- Mezcla de dos líquidos miscibles (ej: alcohol y agua)
- Disolución de sólidos en líquido (ej.: azúcar y agua)
- Mejorar la transferencia de calor (en calentamiento o enfriamiento)
- Dispersión de un gas en un líquido (oxígeno en caldo de fermentación)

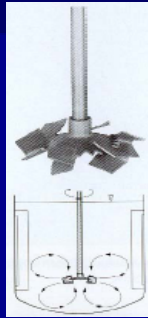
- Dispersión de partículas finas en un líquido
- Dispersión de dos fases no miscibles (grasa en la leche)
- Mejorar la transferencia de calor (en calentamiento o enfriamiento)
- Dispersión de partículas finas en un líquido
- Dispersión de dos fases no miscibles (grasa en la leche)

Figura 1. Esquema de un tanque agitador típico



- Generalmente los tanques de agitación son cilíndricos.
- La parte superior puede estar cerrada o abierta
- El fondo del tanque no es plano con la finalidad de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido.
- la altura del líquido en un tanque de agitación debe ser aproximadamente igual al diámetro del tanque

- El agitador es un sistema que produce ciertos movimientos de flujo, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva de vez en cuando hacia el agitador.

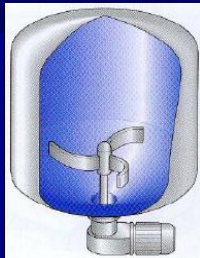


AGITADORES PARA TANQUES CERRADOS Y TANQUES ABIERTOS DE MONTAJE FIJO

Estos tipos de agitadores son recomendados para su aplicación, y todo depende de los requisitos de su proceso.

- Los hay de acoplados directo, estos están diseñados para aplicaciones de baja viscosidad, o volúmenes pequeños, o aplicaciones en que se requiere trituramientos del producto.

- Los agitadores de acoplado de engranaje (caja reductora), son eficientemente usados en productos con mas alta viscosidad o aplicaciones con un volumen mas elevado.



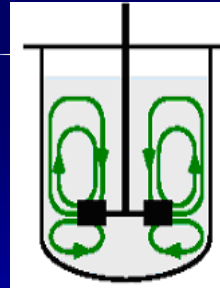
Estos agitadores varían desde 1/4 a 5 caballos de fuerza (HP), y son disponibles con siete diferentes velocidades, y con una variedad de hélices.

Estos agitadores son disponibles ya sea con motor eléctrico, o motores de aire, así como también pueden ser equipados con variador de velocidades.

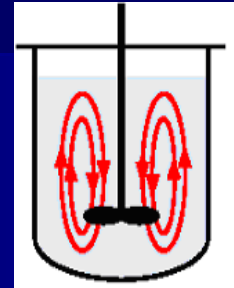
TEORIA DE LA AGITACION Y MEZCLADO DE LIQUIDOS

La teoría de la agitación o mezclado de fluidos se fundamenta en los componentes de velocidad inducida en un fluido por el agitador y estas son:

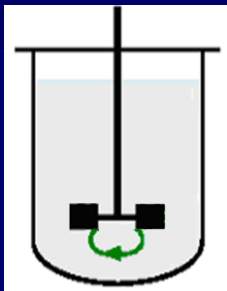
1. **FLUJO RADIAL:** (perpendicular al Eje de la Mezcladora)
2. **FLUJO AXIAL O LONGITUDINAL:** (paralela al eje)
3. **FLUJO ROTACIONAL:** (alrededor del Eje)



1) radial



2) axial



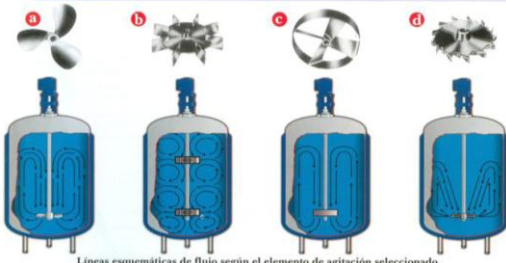
3) rotacional

TIPOS DE AGITADOR



TIPOS DE AGITADOR

Elementos de agitación convencionales en procesos sencillos:



Líneas esquemáticas de flujo según el elemento de agitación seleccionado.

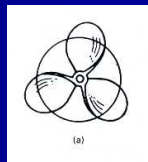
- a) Hélice marina.
- b) Turbina de paletas de flujo radial.
- c) Turbina de paletas de flujo axial.
- d) Discos Cowles.

Clasificación de agitadores o impulsores

Estanques con impulsor

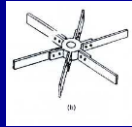
(a) Propulsor de tres hojas o propulsor marino

- Flujo axial. Obtener máxima turbulencia
- Se emplea a altas velocidades (hasta 1800 rpm)
- Varias versiones diferentes, para diversas aplicaciones: intercambio de calor, mezclado, dispersión, suspensión y reacción
- Aplicable a fluidos viscosos, hasta 4000 cP (agua ≈ 1)
- Raramente superan las 18 pulgadas de diámetro



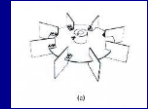
(b) Turbinas de hojas planas

- Flujo radial. Flujo choca con la pared
- Versátil. Diseño simple
- Para fluidos hasta 105 cP
- Existen buenas correlaciones para lograr un diseño racional
- Su comportamiento es el más predecible de los impulsores



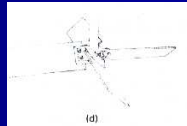
(c) Turbina de disco y hojas

- Corrientes radiales y axiales
- El disco posee un efecto estabilizante
- Se encuentran también con hojas curvas
- Cubren entre el 30-50 % del diámetro del estanque



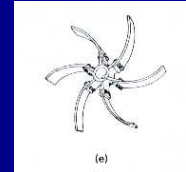
(d) Turbina de hojas inclinadas

- Combina flujo radial con flujo axial
- Especialmente útil para mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines



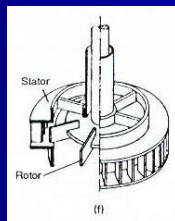
(e) Turbina de hojas curvas

- Especialmente útil para dispersar materiales fibrosos.
- Poseen un torque inicial menor que las hojas rectas.



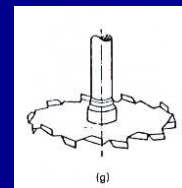
(f) Turbina cubierta

- Flujo radial intenso
- Especial para emulsiones y dispersiones



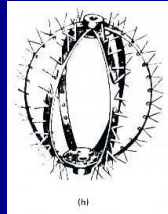
(g) Impulsor de disco con dientes de sierra

- Tipo propulsor
- Aplicaciones en emulsiones y dispersiones
- Produce un efecto local \Rightarrow no necesita baffles



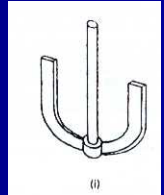
(h) Batidora de jaula

- Normalmente van junto con un propulsor
- Para cortar y batir (mermeladas?)



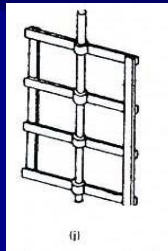
(i) Paletas de ancla

- Se ajustan a los contornos del estanque. Cubren entre 50-80% del estanque
- Malos mezcladores
- Previenen la adhesión de materiales pegajosos
- Promueven la buena transferencia de calor con las paredes
- ($1 \cdot 10^5 \text{ cP} \leq \mu \leq 1 \cdot 10^6 \text{ cP}$)



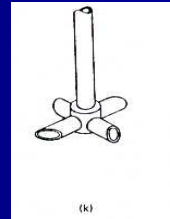
(j) Paleta de compuerta

- Tipo paleta
- Velocidades bajas
- En estanques amplios y bajos
- Para fluidos viscosos y que requieren poco esfuerzo de corte



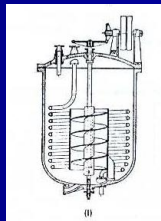
(k) De eje e impulsor huecos

- Se utilizan a altas velocidades para disipar gases



(l) Impulsor de hélice con calefacción

- Mueven directamente todo el fluido
- Barren la superficie de las paredes del estanque
- Se pueden usar efectivamente con Reynolds bajos
- Para líquidos muy viscosos ($1 \cdot 10^5 \text{ cP} \leq \mu \leq 1 \cdot 10^6 \text{ cP}$)



TIPOS DE AGITADORES:

Los agitadores se dividen en dos clases:

- a) los que generan corrientes paralelas al eje del agitador conocidos como agitadores de flujo axial
- b) los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial conocidos como agitadores de flujo radial.

Los tres tipos principales de agitadores son:

- De hélice.
- De paletas
- De turbina.

Cada uno de estos tipos comprende muchas variaciones y subtipos.

En algunos casos también son útiles agitadores especiales, pero con los tres tipos antes citados se resuelven, quizás, el 95% de los problemas de agitación de líquidos.

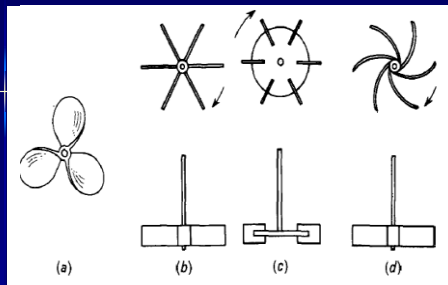


Figura 2: Rodets de mezcla. (a) hélice marina de 3 palas; (b) turbina abierta de palas rectas; (c) turbina de disco con palas; (d) turbina abierta de palas curvas.

AGITADORES DE HELICES

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

Los agitadores de hélice más pequeños, giran a toda la velocidad del motor, unas 1.150 ó 1.750 rpm; los mayores giran de 400 a 800 rpm.

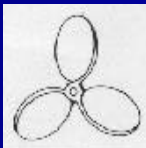
Las corrientes de flujo, que parten del agitador, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque.

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 1500m³ se han utilizado agitadores múltiples, con entradas laterales al tanque.

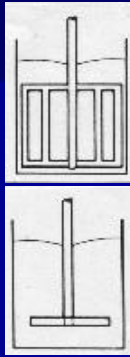


AGITADORES DE PALETAS

Para problemas sencillos, un agitador eficaz está formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Son corrientes los agitadores formados por dos y 3 paletas.

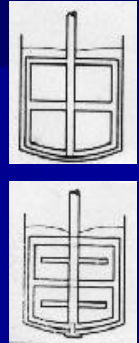
Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo.

Las paletas también pueden adaptarse a la forma del fondo del tanque, de tal manera que en su movimiento rascan la superficie o pasan sobre ella con una holgura muy pequeña. Un agitador de este tipo se conoce como agitador de ancla.



Estos agitadores son útiles cuando se desea evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, como ocurre en un tanque enchaquetado, pero no son buenos mezcladores.

Generalmente trabajan conjuntamente con un agitador de paletas de otro tipo, que se mueve con velocidad elevada y que gira normalmente en sentido opuesto.



Los agitadores industriales de paletas giran a una velocidad comprendida entre 20 y 150 rpm.

La longitud del rodete de un agitador de paletas es del orden de 50 al 80% del diámetro interior del tanque.

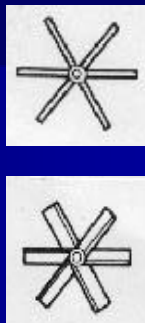
La anchura de la paleta es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave, en un tanque sin placas deflectoras o cortacorrientes, las cuales son necesarias para velocidades elevadas.

De lo contrario el líquido se mueve como un remolino que gira alrededor del tanque, con velocidad elevada pero con poco efecto de mezcla.

AGITADORES DE TURBINA

Los agitadores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. En las proximidades del rodete existe una zona de corrientes rápidas, de alta turbulencia e intensos esfuerzos cortantes. Las corrientes principales son radiales y tangenciales.

Las componentes tangenciales dan lugar a vórtices y torbellinos, que se deben evitar por medio de placas deflectoras o un anillo difusor, con el fin de que el rodete sea más eficaz.



El agitador de turbina semiabierto, conocido como agitador de disco con aletas, se emplea para dispersar o disolver un gas en un líquido. El gas entra por la parte inferior del eje del rodete; 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.



FORMAS DE EVITAR REMOLINOS:

- **Colocando el agitador fuera del eje central del tanque.**
- En tanques pequeños se debe colocar el rodete separado del centro del tanque, de tal manera que el eje del agitador no coincida con el eje central del tanque.
- En tanques mayores el agitador puede montarse en forma lateral, con el eje en un plano horizontal, pero no en la dirección del radio.

Instalando placas deflectoras. Estas son placas verticales perpendiculares a la pared del tanque.

En tanques pequeños son suficientes 4 placas deflectoras, para evitar remolinos y formación de vórtice.

El ancho de las placas no debe ser mayor que un doceavo del diámetro del tanque. Cuando se usan agitadores de hélice, el ancho de la placa puede ser de un octavo del diámetro del tanque. Si el eje del agitador está desplazado del centro o inclinado, no se necesitan placas deflectoras.

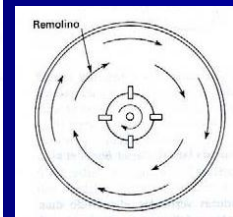
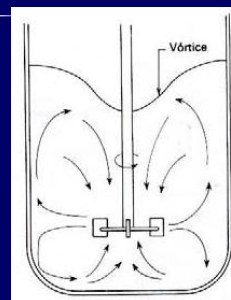
Cuando no se presentan remolinos, el tipo de flujo específico depende del tipo de rodete:

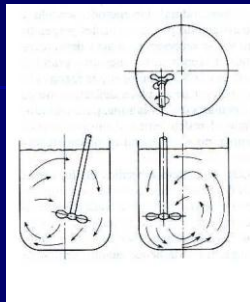
- Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia el fondo del tanque, desde donde la corriente se extiende subiendo por las paredes y retornando hacia la hélice. Se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales, por ejemplo para mantener en suspensión partículas sólidas pesadas. No se emplean cuando la viscosidad del líquido es superior a los 5.000 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. Estos agitadores no son eficaces para mantener sólidos en suspensión.

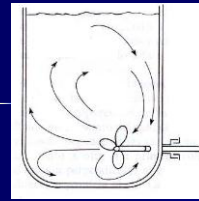
- Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque, desde donde la corriente se divide, una parte fluye hacia arriba y otra parte hacia el fondo, retornando ambas al rodete. Por lo que producen dos corrientes de circulación separadas. Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa

Problemas típicos: prevención de flujo circulatorio

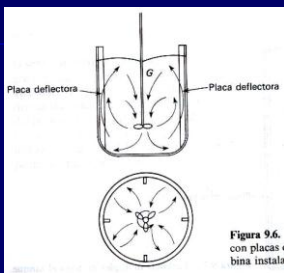
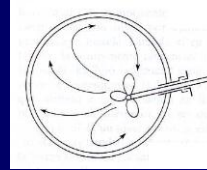




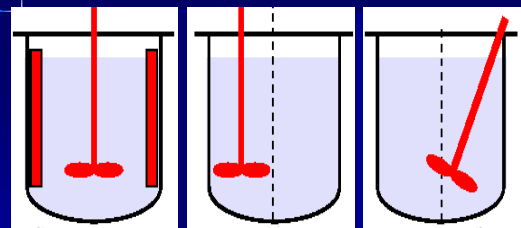
(1) Agitadores no centrados



(2) Rodete con entrada lateral



(3) Sistema de placas deflectoras



Gráfica 1

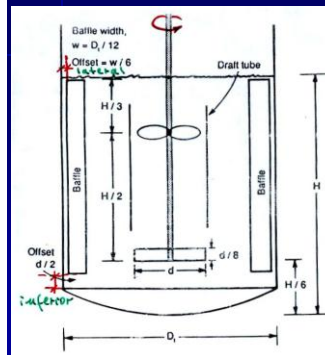
Gráfica 2

Gráfica 3

Propiedades y parámetros de diseño relevantes

- viscosidad (μ)
- densidad (ρ)
- tensión superficial (σ)
- conductividad térmica (k)
- capacidad calorífica (c_p)

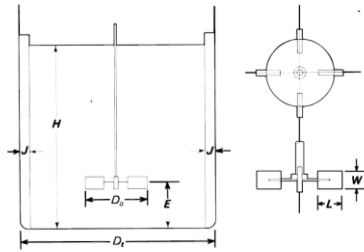
Parámetros físicos importantes



- Diámetro del impulsor (d)
- Nº de revoluciones (N)
- Altura del líquido (H)
- Nº de baffles (4 es lo estándar)
- Diámetro del estanque (D_i)
- Espesor de los baffles (w)
- Offset lateral e inferior del baffle
- Posición del impulsor
- Ancho de la hoja del impulsor

Figura 3: Estanque de agitación con dimensiones típicas.

CÁLCULO DE LA POTENCIA DE AGITACIÓN: Dimensiones estándar



$$S_1 = \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad S_0 = \frac{H}{D_t} = 1 \quad S_5 = \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$S_2 = \frac{E}{D_a} = 1 \quad S_4 = \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad S_3 = \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Fundamentos del diseño de estanques agitados

El diseño de un estanque 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 impulsores, dada una configuración geométrica estándar del estanque. Primero discutiremos estos aspectos geométricos y luego presentaremos en las clases siguientes, los procedimientos de diseño para el dimensionamiento de los impulsores.

Baffles

- Salvo en el caso de utilizar Re 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 $\Rightarrow w = Dt/12$ (4 baffles equiespaciados es lo estándar).
- Largo \Rightarrow desde $d/2$ desde la sección recta del fondo del estanque hasta cerca del nivel del líquido.
- Para el caso de líquidos con sólidos suspendidos o bien cuando se requiere transferencia de calor con las paredes, los baffles se ubican a una distancia equivalente a $1/6$ de su espesor, de la pared del estanque.

Tubos de tiraje o aspiración

- Éstos son tubos cilíndricos de diámetro poco mayor que el impulsor.
- El largo va desde un poco más del diámetro del impulsor, hasta la altura del líquido, dependiendo de la aplicación.
- Normalmente se utilizan con impulsores axiales (propulsores) para dirigir los flujos de succión y descarga.
- Son especialmente útiles para mantener sólidos suspendidos y dispersar gases en estanques profundos.

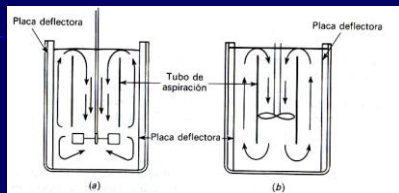


Figura 4. Tubos de aspiración en un tanque con placas deflectoras: (a) turbina; (b) hélice.

El estanque

- Normalmente el fondo tiene forma de plato, pues el consumo de energía en la agitación es menor, además de evitar "espacios muertos".
- La relación óptima H/Dt para el caso de un impulsor es 1, en que el impulsor se ubica en el centro del estanque. Si $H/Dt > 1 \Rightarrow$ zonas muertas.

Impulsores

- Tamaño: éste depende del tipo de impulsor, propiedades del fluido, objetivos de la agitación y geometría del estanque. Por ejemplo, para el impulsor de turbina:
 - $0.3 \leq d/Dt \leq 0.6$
 - o bien: $0.2 \leq d/Dt \leq 0.5$ (turbulento) y $0.7 \leq d/Dt \leq 1$ (laminar)
 - Velocidad: la velocidad de los motores y moto/reductores se encuentran sólo en ciertos valores: 37, 45, 56, 68, 84, 100, 125, 155, 190 y 320 RPM.
- Normalmente no se justifica sistemas de velocidad variable. Cuando el torque es muy grande, se requieren sistemas con 2 velocidades.

Ubicación de los impulsores

- Aquí se puede encontrar gran variedad de opiniones. En principio se puede ubicar a H/6 del fondo del estanque.
- Para el caso de suspensión de sólidos, se recomienda d/3 del fondo.

La siguiente tabla da recomendaciones más generales:

Tabla 1. Recomendaciones generales para la ubicación de impulsores.

Viscosidad [cP]	Nivel Max. H/D _t	Nº de impulsores	Ubicación desde el fondo	Ubicación desde nivel superior
< 25·10 ³	1.4	1	H/3	--
< 25·10 ²	2.1	2	D/3	(2/3)·H
> 25·10 ³	0.8	1	H/3	--
> 25·10 ³	1.6	2	D/3	(2/3)·H

Potencia consumida por los agitadores

Para calcular la potencia consumida por los agitadores se tiene en cuenta:

a) Fuerza de rozamiento o arrastre (F_R): esta gobernada por la "Ley general de resistencia"

$$F_R = \frac{1}{2} (C_D)(\rho)(v)^2(A)$$

Donde:

$$C_D/2 = f' =$$

$$A =$$

$$v =$$

$$F_R = f'(\rho)(wr)^2(A)$$

$$A = (\pi)(r)^2 = K(r)^2$$

$$\pi = K =$$

Condiciones:

$$F_R = f'(\rho)(wr)^2(Kr^2)$$

$$F_R = f'(\rho)(w^2)(r^4) K$$

b) Momento de torsión sobre el agitador t :

$$t = F_R (r)$$

$$t = f' K (r^4) (\rho)(w^2)r$$

$$t = f' K (r^5) (\rho)(w^2)$$

$$\text{Se tiene que : } f' K = Np =$$

$$t = Np(\rho) (r^5) (w^2)$$

c) Potencia consumida:

$$P = (t) (w)$$

$$P = N\rho (r) (r^5) (w^2) (w)$$

$$P = N\rho (r) (r^5) (w^3)$$

Números adimensionales importantes

d) Numero de Reynolds (Re): El N° de Reynolds representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. En agitación se presentan tres regímenes de flujo: laminar, transición (10-10.000) y turbulento.

$$Re = v \cdot \rho \cdot D / \mu = (w)(r)(\rho)(r) / (\mu)$$

$$Re = (w)(r^2)(\rho) / (\mu)$$

En la practica la nomenclatura de (w) y (r) son reemplazadas por (N) y (D_a)

$$P = N\rho (D_a^5) (N^3)$$

$$Re = (N)(D_a^2)(\rho) / (\mu)$$

e) Número de Potencia (Np):

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

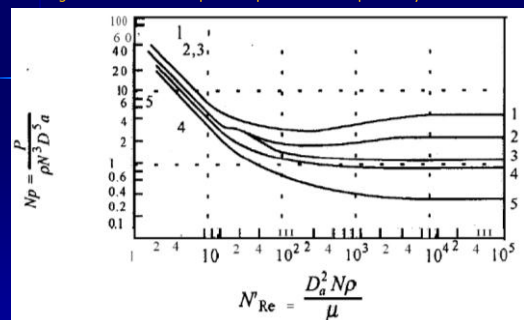
$$Np = P / (\rho \cdot N^3 \cdot D_a^5)$$

Número de mezclado (B)

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

$$B = N \cdot t$$

Fig. 5: Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores



Donde:

- Curva 1. Turbina de seis aspas planas $D_s/W = 5$; cuatro deflectores cada uno con $D_t/J = 12$.
- Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas ; $D_s/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.
- Curva 3. Turbina abierta de seis aspas a 45° ; $D_s/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.
- Curva 4. Propulsor; inclinación 20, 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 desplazada del centro sin deflectores.

Cálculo de Potencia

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

Se requiere conocer las medidas importantes del estanque y agitador: distancia del rodete al fondo del estanque, profundidad del líquido, dimensiones de placas deflectoras, número y disposición de éstas, número de palas de rodete, propiedades del fluido.

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

Dos mezcladores que tienen las mismas proporciones geométricas, pero diferentes tamaños tendrán iguales factores de forma. En este caso podremos decir que son geoméricamente semejantes o que poseen semejanza geométrica.

La potencia consumida define el costo de la operación.

Cálculo de potencia: casos límite

Para bajos números de Re ($Re < 10$) las líneas de N_p vs Re coinciden para un estanque con y sin placas deflectoras (ver gráfico de próxima página), y la pendiente de la línea en coordenadas logarítmicas es (-1) . En este intervalo el flujo es laminar; la densidad no influye y la ecuación de potencia se transforma en:

$$P = K_L \cdot N^2 \cdot D_a^3 \cdot \mu$$

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

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho$$

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

Tabla 2. Valores de las constantes K_L y K_T para estanques con cuatro palas deflectoras en la pared, cuyo ancho es igual a la décima parte del diámetro del estanque.

Tipo de rodete†	K_L	K_T
Hélice, paso cuadrado, tres palas	41,0	0,32
Paso de 2, tres palas	43,5	1,00
Turbina, seis palas planas	71,0	6,30
Seis palas curvas	70,0	4,80
Turbina de ventilador, seis palas	70,0	1,65
Palas planas, dos palas‡	36,5	1,70
Turbina cerrada, seis palas curvas	97,2	1,08
Con estator, sin deflectores	172,5	1,12

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

‡ Para turbinas $L/D_s = 1/4$, $W/D_s = 1/5$.

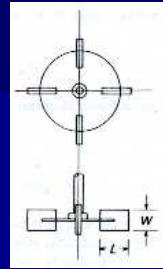
§ $W/D_s = 1/5$.

Cálculo de potencia: uso de gráficos

Potencia para estanques con placas deflectoras

En la figura 6 se representan curvas típicas para N_p v/s Re en el caso de estanques con placas deflectoras, equipados con turbinas de 6 placas planas localizadas centralmente. Las letras S_i corresponden a los factores de forma. En términos de las dimensiones del reactor y agitador:

$S_1 = d/D$ $S_2 = E/d$ $S_3 = L/d$
 $S_4 = h/d$ $S_5 = w/D$ $S_6 = H/D$
 (E: altura del rodete sobre el fondo del estanque)



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

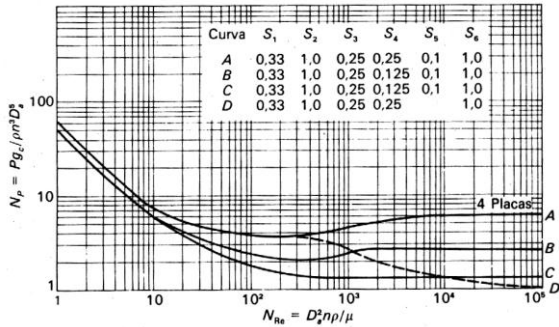


Figura 6. Número de potencia N_p versus Re para turbinas de seis palas. Para la porción de trazos de la curva D, el valor de N_p que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por NFr^m .

La curva A de la figura 7: corresponde a un rodete de tres palas instalado centralmente en un estanque con placas deflectoras. Las hélices y las turbinas con placas deflectoras presentan un consumo de potencia considerablemente menor que una turbina con placas verticales.

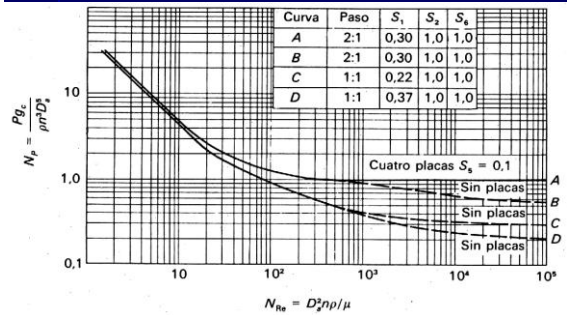


Figura 7. Número de potencia N_p versus Re para turbinas de tres palas. Para las porciones de trazos de las curvas B, C y D, el valor de N_p que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por NFr^m .

Potencia para estanques sin placas deflectoras

Para bajos números de Re (< 300), las curvas para estanques con y sin placas deflectoras son idénticas. Sin embargo, las curvas divergen para Re más elevados (ver Fig. 6 y las curvas B, C y D de Fig. 7). 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:

$$N_p' = N_p \cdot (N_{Fr})^m$$

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

$$M = (a - \log_{10}(Re))/b$$

donde a y b son constantes. La siguiente tabla da valores de las constantes a y b para las curvas de la figuras 6 y 7. Para utilizar las curvas de línea punteada de las figuras 6 y 7 hay que corregir el número de potencia (N_p), leído de la escala de ordenadas, multiplicándolo por $(NFr)^m$.

Tabla 3. Constantes a y b de la ecuación [4.13].

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