

1787
244



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**DESARROLLO DE UNA PRACTICA DE AGITACION
DE LIQUIDOS, PARA EL LABORATORIO DE
INGENIERIA QUIMICA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A :

I. RODOLFO LEDESMA VALTIERRA

1992



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.

**TESIS: DISEÑO DE UNA PRACTICA DE AGITACION.
INDICE**

	PAGINA.
I. INTRODUCCION	5
II. FUNDAMENTOS DE AGITACION.	8
2.1 CONCEPTOS BASICOS	8
2.1.1 VISCOSIDAD.	8
2.1.2 CARACTERISTICAS DEL FLUJO.	9
2.2 AGITADORES MECANICOS EN UN RECIPIENTE.	11
2.2.1 PATRONES DE FLUJO.	11
2.2.2 REMOLINO.	14
2.2.3 DISEÑO DE LOS CORTACORRIENTES.	16
2.3 COLUMNA HIDRODINAMICA Y CAPACIDAD DE BOMBEO.	17
2.4 DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES IMPULSORES.	21
2.4.1 IMPULSORES DE PALETA.	21
2.4.2 IMPULSORES DE HELICE.	24
2.4.3 IMPULSORES DE TURBINA.	28
2.5 SELECCION DE AGITADORES.	34
2.6 LA POTENCIA EN SISTEMAS AGITADOS.	38
2.6.1 ANALISIS DIMENSIONAL.	38
2.6.2 CURVAS DE POTENCIA.	41
2.6.3 ECUACIONES PARA LAS DIFERENTES SECCIONES DE LA CURVA.	44
2.7 EFECTO DE LAS VARIABLES CONTENIDAS EN LOS GRUPOS ADIMENSIONALES.	47
2.8 ECUACIONES EMPIRICAS PARA LA POTENCIA.	49
2.9 ASPECTOS MECANICOS.	51
2.10 ESCALAMIENTO.	58
III. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.	61
3.1 MOTOR.	63
3.2 SISTEMA DE VARIACION DE VELOCIDADES.	64
3.3 FLECHA.	66
3.4 TANQUE.	69
3.5 IMPULSORES.	69
3.6 SISTEMAS DE MEDICION DE POTENCIA.	76

	PAGINA.
IV. DISEÑO DE LA PRACTICA DE AGITACION.	81
4.1 OBJETIVOS.	81
4.2 INTRODUCCION.	82
4.3 PRINCIPIOS BASICOS.	83
4.4 IMPULSORES.	87
4.5 CORTACORRIENTES.	88
4.6 MEDIDA DE LA POTENCIA.	90
4.7 DESCRIPCION DEL EQUIPO.	93
4.8 TECNICA DE OPERACION.	97
4.9 TRABAJO POSTERIOR A LA PRACTICA.	99
4.10 CUESTIONARIO.	101
4.11 BIBLIOGRAFIA.	105
4.12 NOMENCLATURA.	106
V. RESULTADOS EXPERIMENTALES.	108
5.1 PROCEDIMIENTO.	108
5.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS CON CMC.	109
5.3 ALGORITMO DE CALCULO.	114
5.4 TRATAMIENTO DE LOS DATOS USANDO AGUA.	121
VI. CONCLUSIONES.	129
NOMENCLATURA.	131
BIBLIOGRAFIA.	133
	4

I. INTRODUCCION

A pesar de lo comun que es la operacion de agitacion en la gran mayoria de los procesos quimicos, el conocimiento que se tiene acerca de ella es muy limitado. Por esa razon, el presente trabajo se desarrollo para proponer una practica de Agitacion de liquidos en el laboratorio de Ingenieria Quimica.

La importancia de la agitacion se hace evidente en operaciones tales como mezclados de liquidos, suspension de solidos, disolucion, reacciones quimicas y otras mas, cuyos resultados dependen en gran medida de una buena agitacion.

Asi, presentamos en primer lugar los principios basicos que rigen la operacion, algunos conceptos ya conocidos tales como la viscosidad y el Numero de Reynolds, modificado para esta operacion en particular; y algunos otros nuevos como el Numero de Potencia y el Numero de Froude. Vemos ademas, los tipos principales de impulsores como son la helice y diferentes turbinas, sus patrones de flujo dentro del recipiente, asi como algunos criterios de diseno y seleccion.

A partir de un análisis dimensional se relacionan las principales variables dentro de la agitación: potencia, diámetro del impulsor, densidad y viscosidad del fluido y la aceleración de la gravedad.

También la representación gráfica de la operación, llamada curva de potencia de un agitador, en donde se analizan las ecuaciones que resultan para cada sección de la curva.

Se describen los aspectos mecánicos que tienen gran importancia en el diseño de un sistema agitado: Motor, reductor, sello, y la flecha del agitador.

En el capítulo dos se hace una recopilación del desarrollo de la construcción y el diseño del equipo; desde los impulsores y el freno para medir la potencia, hasta el sistema de variación de velocidades, así como los problemas encontrados en este proceso.

En el capítulo tres se establece la práctica propuesta cuyos objetivos principales son, usando el equipo construido, los siguientes:

- El conocer un equipo de agitación, que variables intervienen en la operación y sus relaciones entre ellas.
- Observar algunos tipos de impulsores físicamente y sus características principales, y
- Saber seleccionar un agitador.

Finalmente, en los capítulos cuatro y cinco se presentan los datos obtenidos en la experimentación y las conclusiones.

II. FUNDAMENTOS DE AGITACION

Antes de iniciar, es conveniente aclarar dos terminos que la mayoria de las veces se confunden: AGITACION Y MEZCLADO.

El mezclado es la integracion de dos o mas materiales, alcanzandose un cierto grado de uniformidad. La agitacion por su parte es un estado de movimiento que se manifiesta como flujo o turbulencia, independientemente de si se realiza un mezclado o no.¹³

El mezclado se puede efectuar por conveccion espontanea, aunque el tiempo que ocuparia seria grande y lo hace impractico en escala industrial. Por lo tanto se utiliza un tipo de agitacion para realizar la conveccion forzada y acelerar el mezclado. De ahí la interrelacion entre los dos terminos.

En este trabajo usaremos AGITACION para designar la operacion, entendiendole que el mezclado va implicito en esta.

2.1 Conceptos basicos.

2.1.1 Viscosidad.

La conveccion forzada se realiza por un movimiento eficiente del fluido, por lo que se requiere un sistema o mecanismo capaz de

mantener un fluido constante. Así como hay fuerzas que promueven el movimiento del fluido, las hay también que se oponen a este. La resistencia al movimiento del elemento se debe a la fricción interna en el fluido. A esta propiedad la conocemos como viscosidad. Esta, es uno de los factores más importantes a ser considerados en problemas de agitación.

La viscosidad dinámica está definida como la relación entre la tensión de corte T_c , definida por unidad de área, y la velocidad de corte entre capas adyacentes, apartadas una distancia dy ; matemáticamente

$$\mu = \frac{T_c}{dv/dy} \quad (1)$$

donde v es la velocidad normal a la dirección de y ; dv/dy , la velocidad de corte, μ el coeficiente de viscosidad dinámica, y T la tensión de corte por unidad de área.

En el sistema absoluto, el coeficiente de viscosidad dinámica está expresado en Poises, P, teniendo las unidades: $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Para propósitos prácticos una centésima parte de esta unidad, el centipoise, cP se emplea con más frecuencia.

2.1.2 Características del Flujo.

El tipo de flujo es de gran importancia en la agitación. Este

depende de la velocidad del flujo, la viscosidad y la densidad del fluido y el arreglo geometrico del espacio a traves del cual pasa este.

Hay dos tipos basicos de flujo:

Laminar. Es un proceso hidrodinamico en el cual las particulas de fluido se mueven a lo largo de corrientes paralelas a la direccion del flujo. La velocidad media del fluido en una corriente es igual a la velocidad instantanea. Los elementos que contienen muchas moleculas no penetran de una capa a otra, sino que se deslizan paralelos a la direccion del flujo.

Turbulento. Es un proceso hidrodinamico en el cual hay una produccion de remolinos. Los elementos no solo se mueven en capas paralelas, sino que tambien en trayectorias erraticas. No unicamente moleculas, sino que tambien elementos de fluido, pasan de capas individuales a otras, por lo cual se efectua un mezclado. Por esta razon la turbulencia es de gran importancia.

Para poder predecir si un proceso en cuestion sera laminar o turbulento, se determino un criterio llamado Numero de Reynolds:

$$Re = \frac{v L \delta}{\mu} \quad (2)$$

donde v es la velocidad del fluido; μ la viscosidad; δ la densidad y L una longitud caracteristica. En la agitacion el

Numero de Reynolds se expresa como:

$$Re = \frac{N d^2 \delta}{\mu} \quad (3)$$

Que posteriormente analizaremos.

2.2 Agitadores mecanicos en un recipiente.

2.2.1 Patrones de flujo.

El movimiento de un fluido en un tanque o recipiente se produce por un impulsor que gira alimentando y descargando corrientes.

La transmisión de momento por presión directa de las hojas sobre el líquido es la forma más importante, y la más frecuente, para el mezclado. Los impulsores de paletas, turbinas y hélices pertenecen a este grupo.

Los movimientos finales, principales y secundarios, dependen primeramente de la forma del impulsor, su velocidad y localización; de la densidad y viscosidad del fluido, y de la configuración del tanque y sus accesorios.

De acuerdo a las principales direcciones de las corrientes en el recipiente, existen tres tipos importantes de flujo:

Flujo tangencial, en el cual el líquido fluye paralelo a la

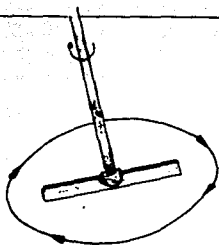
trayectoria descrita por el agitador (fig. 2.1.a). En esta situación, tanto la descarga como la entrada de líquido a los alrededores del impulsor son pequeñas y la transferencia en la dirección vertical es insignificante.

Flujo radial, en donde el líquido se descarga desde el impulsor formando ángulos rectos a la flecha y a lo largo de un radio. La viscosidad del líquido ofrece una resistencia al flujo en los alrededores, y para vencer esta resistencia se requiere una cierta fuerza. La fuerza centrífuga producida por el impulsor, depende de su diámetro y velocidad. Tan pronto como esta vence la resistencia del medio, el flujo radial se propaga al resto del fluido. La fig. 2.1.b muestra el patrón de flujo en un agitador con su eje coincidiendo con el del recipiente y produciendo flujo radial.

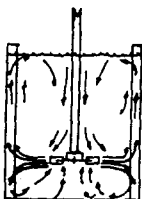
En este caso, el impulsor produce dos secciones de flujo: en el fondo del recipiente el líquido entra al agitador en forma ascendente y se desplaza en ángulos rectos al eje del impulsor; en la parte superior del recipiente, el líquido entra al agitador en forma descendente, desplazándose luego perpendicularmente a la flecha.

Flujo axial, en el cual el líquido entra al impulsor y se descarga de este paralelo a su eje, como se ve en la fig. 2.1.c. De acuerdo al arreglo del impulsor respecto al sentido de rotación, hay dos tipos de trayectorias posibles del flujo axial:

a) El impulsor bombea el líquido desde el fondo a la superficie.

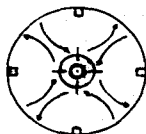


2.1.a FLUJO TANGENCIAL

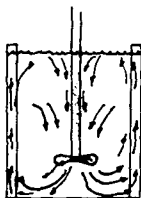


Vista lateral

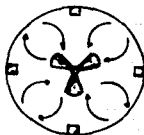
2.1.b Flujo radial



Vista del fondo



2.1.c Flujo axial



(Sterbacek and Tausk. Mixing in the chemical inds.. Ed. Pergamon)

b) El impulsor bombea el líquido desde la superficie al fondo.

Ahora, generalmente no tenemos cada tipo de flujo individualmente, lo usual es encontrarlos en combinación uno con otro en los recipientes de agitación.

2.2.2 Remolino.

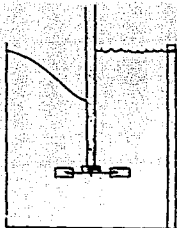
Como una consecuencia de la circulación del líquido, que se observa como una situación común para cualquier tipo de agitador, es la formación de un remolino en el fluido. En este caso, el líquido se mueve en trayectorias circulares sepias, existiendo un pequeño movimiento de arriba hacia el fondo resultando algunas veces en una separación o estratificación más que en un mezclador.

El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor de la flecha, creando el remolino, como se muestra en la fig. 2.2.a y tiende a formar, por la circulación del flujo laminar, la estratificación en varios niveles. Puesto que, en flujo circulatorio, el líquido fluye con la dirección del movimiento de las hojas del impulsor, la velocidad relativa entre estas y el fluido es reducida, y la potencia que puede ser absorbida es limitada.

El remolino y el flujo circulatorio se pueden evitar con algunos métodos:¹²

En tanques pequeños, el impulsor se puede montar fuera del centro, como se aprecia en la fig. 2.2.b.

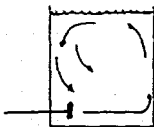
En tanques más grandes, el impulsor se puede colocar lateralmente al tanque con la flecha en un plano horizontal. fig. 2.2.c.



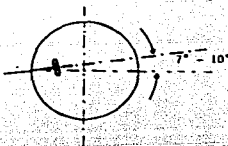
2.2.a Efecto con el uso y sin cortacorriente (formación de remolino)



2.2.b Colocación excéntrica del agitador para eliminar el remolino.



2.2.c Colocación de un impulsor en el fondo del tanque para evitar el remolino.



Debido a la complicación técnica que presenta el sistema anterior, el método preferido en tanques grandes con agitadores verticales, es instalar cortacorrientes (también llamados mamparas o deflectores), que son franjas verticales paralelas a la pared del tanque. Estos reducen el movimiento giratorio, impidiendo el flujo rotacional sin interferir con los flujos radial o axial.

2.2.3 Diseño de los cortacorrientes.

Cuando la viscosidad del líquido aumenta, disminuye la necesidad de cortacorrientes para reducir el remolino.

Los siguientes criterios pueden ser una guía para el diseño:⁴

<u>Viscosidad</u>	<u>Cortacorrientes</u>
Hasta 7000 cP	8-10% del D_t
7000-10000 cP	5% del D_t (separados de la pared 1% del ancho del cortacorriente)
Hasta 20000 cP	5-8% del D_t (colocados a cierto ángulo y alejados de la pared)
Mayor de 20000cP	No se requieren.

Generalmente se usan cuatro cortacorrientes. En la fig. 2.3 se muestran varios arreglos de ellos y su efecto.

2.3 Columna Hidrodinámica y capacidad de bombeo.

Toda la potencia P , que se aplica a un fluido agitado produce una cantidad de flujo y una columna del impulsor H , que es proporcional a la columna de velocidad del fluido. El flujo total, que es el volumen de líquido que se descarga desde el impulsor en la unidad de tiempo; se llama capacidad de bombeo Q , y se expresa normalmente como flujo másico. Tenemos pues, como en el caso de una bomba, que P es proporcional a Q y H :

$$P = \delta Q H \quad (4)$$

En la región de flujo turbulento, la potencia de cualquier serie de impulsores es proporcional a $\delta N^3 d^5$; además, la capacidad de bombeo es proporcional a Nd^3 y la columna proporcional a $N^2 d^2$.

Las relaciones de importancia para analizar las condiciones en la agitación se consiguen manteniendo algunas de las variables (P, N o d) a un valor constante. En la tabla I se muestran tales dependencias.



a. Cortacorrientes en la pared para líquidos de baja viscosidad.



b. Cortacorrientes alejados de la pared para líquidos de moderada viscosidad.



c. Cortacorrientes alejados de la pared en ángulo para líquidos de alta viscosidad.

FIG.2.3 ARREGLO DE LOS CORTACORRIENTES.

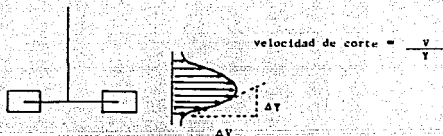
(Holland and Chapman. Liquid mixing and processing in stirred tanks. Ed. Reinhold)

TABLA I

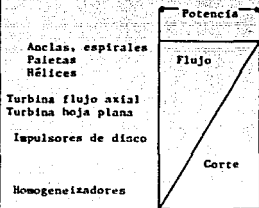
A constante	P	d	N	Q	H	Q/H
P	-	$N^{-3/2}$	-	$N^{-1/2}$	$N^{1/2}$	$N^{-1/2}$
	-	-	$d^{-5/2}$	$d^{-1/2}$	$d^{-1/2}$	$d^{-1/2}$
d	N^2	-	$P^{1/2}$	N	N^2	N^{-1}
N	d^3	$P^{1/2}$	-	d^3	d^2	d

Observando la tabla anterior, incrementando la velocidad a potencia constante, a costa del diametro del impulsor, resulta una columna H mas alta y que la capacidad de bombeo disminuye. Por otra parte un aumento en el diametro del impulsor a expensas de la velocidad, conduce a una caída de la columna hidrodinamica H, mientras que la capacidad de bombeo Q, se incrementa.

La columna del impulsor esta relacionada a la velocidad de corte del fluido, y por lo tanto es una medida de esta alrededor del impulsor. En la fig. 2.4.a se muestra un perfil de velocidades para una turbina de flujo radial.¹² Si medimos la pendiente del gradiente de velocidad, nos da la velocidad de corte, en s^{-1} , en cualquier punto del perfil. Multiplicando la velocidad de corte por la viscosidad en cualquier punto nos da la tension de



a. Perfil de velocidades para un impulsor mostrando la definición de velocidad de corte.



b. Diferentes combinaciones de flujo y corte para diferentes impulsores, a un nivel dado de potencia.

FIG. 2.4 RELACIONES DE FLUJO Y CORTE.

(Oldshue, Fluid mixing technology and practice. Chem. Eng. June 13, 1983)

corte del fluido, la cual es responsable de fenómenos tales como la dispersión de burbujas y gotas o la reducción del tamaño de las partículas.

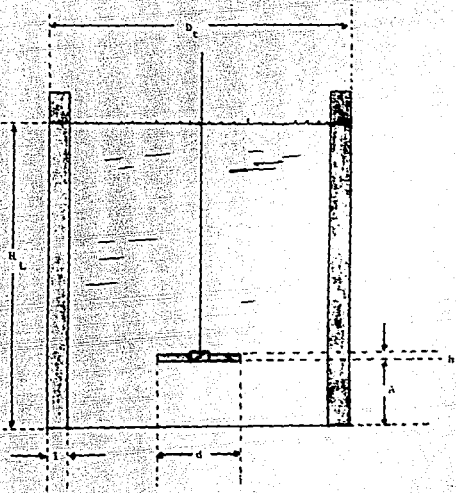
Todos los procesos de agitación tienen un requerimiento óptimo de flujo y corte.¹² En la fig. 2.4.b se muestra la relación de flujo y corte para varios impulsores. En la parte superior, son impulsores con alto flujo y bajas velocidades de corte, lo contrario ocurre al ir descendiendo en la gráfica.

2.4 Descripción de los diferentes tipos de impulsores.

Antes de empezar a describir y seleccionar cada uno de los agitadores, es importante especificar cada una de las cantidades geométricas implicadas en un sistema de agitación. La fig. 2.5 nos ayudará a este propósito.

2.4.1 Impulsores de paleta.

Los brazos del impulsor son de sección rectangular, perpendiculares al eje de la flecha. En la fig 2.1.a se puede observar un agitador de este tipo. Su principal ventaja es la simplicidad y su bajo costo. Una desventaja es su pequeña capacidad de bombeo, la cual, sin embargo, ocasiona bajos requerimientos de potencia.



D_c : Diámetro del tanque

H_L : Altura del líquido

h : Altura del impulsor

A : Altura desde el fondo al impulsor.

d : Diámetro del impulsor

l : Ancho del cortacorriente.

FIG. 2.3 PRINCIPALES DIMENSIONES EN UN SISTEMA AGITADO.

La principal desventaja de estos impulsores es que solo se pueden usar para líquidos con una viscosidad de hasta 1000 cP y que el flujo axial del líquido es pequeño. El mezclado perfecto solo se alcanza en un estrato relativamente delgado de líquido en la vecindad inmediata de las hojas, donde se forman remolinos locales en los bordes superior e inferior del impulsor, es decir, que la turbulencia se extiende lenta e imperfectamente en el fluido contenido en el recipiente, la circulación es insignificante.

Cuando se usan agitadores de paleta, el resultado a menudo es un gradiente de concentración en el líquido. Esto, a menudo, no es apropiado, particularmente cuando uno de los componentes se adiciona durante la agitación. Por lo tanto estos impulsores son inadecuados para operaciones continuas. El problema anterior se puede remediar inclinando las hojas de la paleta a 30° o 45° al eje de la flecha. El resultado es un incremento en el flujo axial, y así, disminuir los gradientes de concentración en el líquido. Sin embargo, la estratificación no se puede suprimir del todo. No obstante las desventajas, los agitadores de paleta todavía están en uso en algunos sistemas.

Condiciones de operación.

Por lo general estos agitadores se colocan centralmente. Esto es debido a su gran diámetro ($d/D_c = 0.66 - 0.9$) y su pequeña velocidad. Bajo tales condiciones, la acción de bombeo es pequeña y no hay peligro de formación de remolino. Los agitadores de paleta se usan, la mayoría de las veces, sin cortacorrientes.

2.3.2 Impulsores de Hélice.

La forma básica de estos agitadores es similar a la que se usa en la navegación marina y en los aeroplanos fig. 2.6.a. La hélice se fija a una flecha rotatoria vertical, horizontal o inclinada.

La principal ventaja de estos impulsores es su alta velocidad. Otra es el flujo axial y el gran efecto de bombeo que producen, el cual permite tiempos de mezclado cortos. Una posible desventaja sería la necesidad de un diseño especial además de la dificultad que implica la construcción de estos, por lo que los costos de inversión son comparativamente altos.

Paso de la hélice.

El paso de la hélice es una nueva cantidad dimensional la cual es muy importante para este impulsor. Se define como la distancia entre dos puntos de crestas adyacentes de la trayectoria helicoidal que forma la hélice. Esta cantidad no es directamente medible y se calcula de la fórmula:

$$s = 2 \pi r \tan \phi \quad (5)$$

donde r es el radio de la hoja de la hélice y por lo tanto también el radio del cilindro creado en el líquido por el movimiento del impulsor y ϕ el ángulo de inclinación de la hoja.

Las eficiencias del bombeo y el mezclado se incrementan con un aumento en el paso, pero el consumo de potencia, a su vez, se incrementa simultáneamente.

Condiciones de operación.

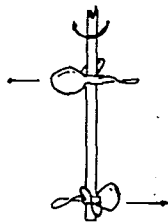
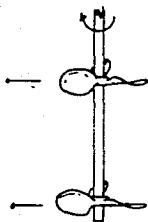
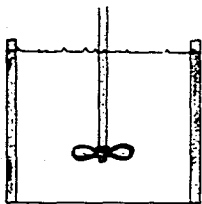
La agitación con impulsores de hélice se lleva a cabo por la combinación de dos movimientos:

1. Por el flujo axial del líquido desde el impulsor; flujo formado por la columna caída de la hélice.
2. Por el flujo turbulento helicoidal en el contenido del recipiente causado por el gradiente de velocidad en diversos estratos de líquido a diferentes distancias del impulsor.

Estos agitadores son adecuados para mezclado rápido o formación de emulsiones de baja viscosidad, para disolución y en reacciones químicas en fase líquida. Para homogeneizar líquidos, especialmente en la industria de aceites, se usan varios impulsores de hélice, situados en el perímetro del recipiente y trabajando en el mismo sentido. Son inadecuados para la suspensión de sustancias rápidamente sedimentables, para la disolución de sustancias pesadas casi insolubles y para la absorción de gases.

Principios de diseño.

Las hélices se diseñan tomando como base datos obtenidos en



c.

FIG. 2.6 IMPULSOR DE HELICE Y SUS ARREGLOS.

modelos experimentales. Las principales dimensiones que se usan con más frecuencia son:⁷

$$d = 0.5 - 0.2D_t$$

$$A = 0.1 - 0.5D_t$$

$$s = 1.0 - 3.0d$$

$$H_t = 0.8 - 1.2D_t$$

(para una hélice)

$$A = 0.5 - 1.0d$$

$$H_t = 1.0 - 5.0D_t$$

(más de una hélice)

profundidad de suersión del agitador: $2 - 4d$

distancia entre dos hélices sobre la flecha: $d - 5d$

velocidad rotacional: 440 - 2400 rpm.

velocidad periférica: 300-900 m/min.

Diferentes arreglos de las hélices.

Un impulsor simple consiste de una hélice de dos o tres hojas montado sobre una flecha vertical, tal como se ve en la fig. 2.6.b.

Si la posición del impulsor es central, siempre se usaran cortacorrientes para evitar el remolino. Otra posibilidad es colocarlo excéntricamente.

Agitador de hélice múltiple. Este tipo se usa con más frecuencia en la industria. Se montan dos o tres hélices en la flecha; el número será limitado solo por la fuerza de esta. Para el caso cuando se tienen dos de los impulsores, existen dos trayectorias posibles del flujo:

(a) Los agitadores se montan sobre la flecha de tal forma que los dos empujen en la misma dirección (los impulsores trabajan en paralelo). Imaginemos este sistema como si colocáramos dos recipientes, uno encima del otro, con hélices simples cada uno de ellos. El mezclado se realiza rápidamente por lo que este montaje es adecuado para procesos con tiempos de retención cortos.

(b) Con ambas hélices girando en la misma dirección, pero colocados de tal forma que los impulsores empujen en direcciones opuestas (trabajan en serie). En el espacio entre los agitadores se obtiene una agitación muy intensa. Esta combinación se usa predominantemente en los casos donde se va agregando un componente y se requiere un mezclado instantáneo con el contenido del recipiente.

El consumo de potencia en este caso es cerca de 7% más grande que en el anterior. En la fig. 2.6.c. se puede ver la disposición en ambos casos.

2.4.3 Impulsores de turbina.

El impulsor de turbina actúa en forma similar a una bomba

centrifuga; la agitación se efectúa con la entrada y descarga de líquido por las hojas de la turbina. En seguida de la descarga del impulsor, el líquido choca sobre la pared donde se separa en dos corrientes, las cuales por su energía, producen el mezclado.

La succión, tal como en las bombas centrifugas, se produce en el centro y se distribuye en la circunferencia de las hojas. Los agitadores de turbina se usan con mayor frecuencia que cualquier otro tipo, debido esencialmente a su amplio intervalo de aplicación.

Intervalo de aplicación.

La principal ventaja de los agitadores de turbina es el amplio intervalo de viscosidades y densidades que pueden manejar.

Para viscosidades de hasta 50000 cP las turbinas colocadas centralmente siempre se usan en conjunto con cortacorrientes; solo para altas viscosidades estos agitadores se pueden usar sin aquellos a velocidades normales. Para estos impulsores el límite superior de viscosidad no está definido en forma precisa. Después de que el flujo turbulento se ha alcanzado, el consumo de potencia no cambia para un gran rango de viscosidades. Por lo tanto, son apropiados para materiales cuya viscosidad cambia durante el mezclado.

Diseño y datos dimensionales básicos.

También para estos impulsores, como en los anteriores, lo mejor

es trabajar con datos obtenidos en modelos experimentales; aunque se encuentren numerosos datos en la literatura para el diseño de agitadores de turbina.

En la tabla II tenemos datos aproximados sobre algunas dimensiones básicas que se usan para ciertas operaciones.⁷

Dependiendo de la operación y del líquido mezclado se determina la forma de la hoja. Para mezclas ligeras de concentración variable lo más apropiado son las hojas planas. Se puede aumentar el efecto de bombeo usando hojas inclinadas. Inclinando las hojas en la dirección opuesta a la rotación representa una gran ventaja cuando se mezclan sustancias viscosas. El uso de hojas curvas representa también ciertas ventajas ya que el momento de arranque es pequeño, y en la operación se facilita la transmisión de energía del impulsor al líquido.

Los agitadores de turbina se utilizan para una gran variedad de operaciones, por ejemplo, para formación de suspensiones, disolución, reacciones químicas, absorción de gases y transferencia de calor. Aun se pueden usar para mezclar pastas y masas, pero son menos apropiados.

Tipos de impulsores de turbinas.

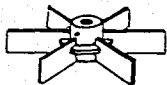
Turbina de hojas planas. Es la de mayor uso por su simplicidad y bajo costo. El flujo desde el impulsor es una combinación de flujo radial-tangencial. Con una selección correcta de la velocidad, la entrada se efectúa en el centro del agitador y la descarga de líquido

TABLA II			
CRITERIO DE DISEÑO PARA TURBINAS			
APLICACION	D ₁ /d	H ₁ /d	CARACTERISTICAS.
MEZCLADO LIQUIDO-LIQUID	3-6	ILIMITADO	IMPULSOR SIMPLE O MULTIPLE, SOBRE O DEBAJO DE LA LINEA CENTRAL DE LA CARGA DE LIQUIDO.
DISPERSION	3-3.5	1-2	
REACCION EN SOLUCION.	2.5-3.5	1-3	
DISOLUCION	1.6-3.2	1-2	
SUSPENSION	2-3.5	1-2	
ABSORCION DE GASES.	2.5-4	4-1	MULTIPLE, EL IMPULSOR INFERIOR CERCA DEL FONDO.
MEZCLADO DE SUSTANCIAS PLASTICAS.	1.5-2.5	1-2	IMPULSOR MULTIPLE
CRISTALIZACION O PRECIPITACION.	2-3.2	1-2	IMPULSOR SIMPLE, SOBRE O DEBAJO DE LA LINEA CENTRAL DE CARGA DEL LIQUIDO.

en la circunferencia formada por el impulsor. La dirección de la descarga es, en principio, puramente radial; pero a una cierta distancia del impulsor, dependiendo de la velocidad de rotación, la trayectoria empieza a curvar sobre el movimiento rotatorio (espiral) en el contenido del recipiente. El flujo predominante en los bordes verticales de las hojas es fundamentalmente radial, la turbulencia causada por los bordes horizontales es despreciable. El número de hojas está usualmente entre 4-12. La flecha del agitador es vertical; y como regla general se usan cortacorrientes.

Turbina de hojas curvas. Este tipo de impulsor tiene hojas rectangulares dobladas en un semicírculo o espiral. El propósito de este diseño es disminuir el flujo desde el impulsor y facilitar el arranque, especialmente en el caso de líquidos viscosos. La dirección de rotación se selecciona siempre tal que las hojas actúen con su parte convexa. Son apropiados para líquidos viscosos, emulsiones, pastas y para sustancias abrasivas y suspendidas.

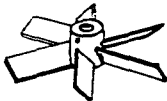
Agitadores de turbina múltiple. En la mayoría de las operaciones la profundidad efectiva del mezclador para un impulsor es aproximadamente igual al diámetro del recipiente. En recipientes más profundos, se necesitan varios impulsores sobre una misma flecha. La distancia entre dos impulsores adyacentes está en un intervalo de $d/2$ a $2d$, de acuerdo a la densidad y viscosidad de la mezcla.



a. Hoja recta



b. Hoja curva



c. Hoja inclinada.

FIG. 2.7 TURBINAS.

En recipientes muy profundos, se agitan uniformemente con agitadores múltiples. Las turbinas con hojas rectas y hojas curvas siempre trabajan en el mismo sentido; los turbinas con hojas inclinadas pueden trabajar en el mismo sentido o colocados de tal forma que el empuje sea en sentidos contrarios.

En la fig. 2.7, se muestran estos tipos de agitadores.

2.5 Selección de agitadores.

Una primera selección del equipo se hace usualmente tomando como base la viscosidad del líquido mezclado; por lo tanto, usando este criterio se selecciona el agitador por su capacidad de producir condiciones de flujo turbulento. En la fig. 2.8 se muestran los intervalos de aplicación dependiendo tanto de la viscosidad como del volumen del recipiente.¹⁸

Otros criterios de selección se basan en términos descriptivos tales como agitación ligera, media, o violenta.¹⁹

Agitación ligera	122 m/min
media	198-244 m/min
violenta	305-366 m/min

El más común es en donde el servicio determina el equipo; por lo tanto si se establecen definiciones de servicio que se relacionen al resultado del proceso, y se combinan ambas a las capacidades de operación de varios impulsores, tendremos un

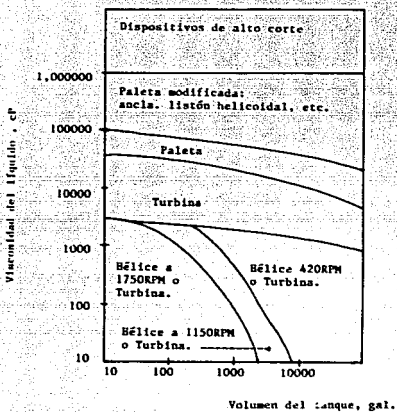


FIG. 2.8 INTERVALO DE APLICACION PARA AGITADORES

(Penney. Guide to trouble-free mixers. Chem. Eng. June 1 1970)

SERVICIO	IMPULSOR	INTERVALO	CRITERIO
Mezclado de líquidos.	Turbina	████████████████████	1. Volumen circulación
	Hélice	████████████████████	
Dispersión (Sistemas inmiscibles)	Paleta	████████████████████	1. Control de tamaño de gota 2. Recirculación.
	Flujo.	0 1,000 gal/min	
Reacciones en solución.	Turbina	████████████████████	1. Intensidad 2. Volumen circulación
	Hélice	████████████████████	
Disolución	Paleta	████████████████████	1. Corte 2. Volumen circulación
	Vol.	0 10,000 gal	
Suspensión de sólidos.	Turbina	████████████████████	1. Circulación 2. Velocidad
	Hélice	████████████████████	
Aplicaciones para gases.	Paleta	████████████████████	1. Control de corte. 2. Circulación 3. alta veloc.
	Vol. gas	0 5,000 ft ³ /min	
Aplicaciones de alta viscosidad.	Turbina	████████████████████	1. Volumen circulación 2. Baja veloc.
	Hélice	████████████████████	
Transf. de calor.	Paleta	████████████████████	1. Volumen circulación 2. Alta veloc.
	Vol.	0 20,000 gal	
Cristalización o Precipitación.	Turbina	████████████████████	1. Circulación 2. Baja veloc. 3. Control de corte.
	Hélice	████████████████████	
	Paleta	████████████████████	
	Vol.	0 20,000 gal	

TABLA III. GUIA DE SELECCION PARA AGITADORES.

(Parker. Mixing. Chem. Eng. June 8, 1964)

criterio de selección bastante apropiado. En la tabla III se muestra lo anterior.¹³

También se ha establecido una escala de agitación del 1 al 10 dependiendo del proceso. Con esta escala se selecciona tipo y características del sistema de agitación. Los siguientes son algunos ejemplos:

APLICACION	DESCRIPCION PROCESO	CLASIFICACION DISEÑO	VARIABLE PRIMARIA	ESCALA AGITACION
Mezclador en tratamiento de aguas.	mezclado rápido de sustancias químicas y el agua.	mezclado y movimiento.	viscosidad	3 a 10
Mezcla de aditivos.	mezclado de aditivos miscibles.	mezclado y movimiento.	viscosidad	1
solución de polimerización.	monómero y polímero solubles en el solvente.	mezclado y movimiento.	máxima viscosidad.	8 a 10
productos de almacenamiento.	suspensión de polímeros. emulsiones.	suspensión de sólidos. mezclado y movimiento.	velocidad de sedimentación. viscosidad.	2 a 3 2 a 3
hidrogenación	recirculación de hidrógeno.	dispersión del gas.	velocidad superficial del gas.	4 a 6

2.5 La potencia en sistemas agitados.

2.5.1 Análisis dimensional.⁴

La potencia en un sistema de aerlado no tiene una forma tan simple de describir en función de las variables del sistema en términos de la dinámica de fluidos. Sin embargo, utilizando como herramienta el análisis dimensional, podemos relacionar la potencia requerida con los diferentes parámetros implicados.

El análisis dimensional es una técnica para expresar la conducta de un sistema físico con el mínimo número de variables independientes. Las que influyen en la potencia del agitador son: velocidad rotacional N , diámetro del agitador d , densidad δ , y viscosidad μ del líquido, y la aceleración gravitacional, g . Como una primera consideración, las dimensiones lineales tales como la altura del líquido en el tanque, el diámetro del tanque, tamaño y posición de los cortacorrientes, están todas relacionadas al diámetro del agitador.

Por lo tanto, la potencia requerida para agitar el líquido se puede expresar como una función de estas variables:

$$P = f(N, d, \delta, \mu, g) \quad (6)$$

En otra forma:

$$P = C N^a d^b \delta^c \mu^d g^e \quad (7)$$

donde C es una constante.

Cada factor se puede expresar con las dimensiones de masa M , longitud L , y tiempo T :

$$P = \frac{M L^2}{T^3}$$

$$d = L$$

$$u = \frac{M}{L T}$$

$$N = \frac{1}{T}$$

$$\delta = \frac{M}{L^3}$$

$$c = \frac{L}{T^2}$$

Entonces:

$$\frac{M L^2}{T^3} = (1/T)^a (L)^b (M/L^3)^c (M/LT)^d (L/T^2)^e$$

igualando los exponentes de masa, longitud y tiempo:

$$M: 1 = c + d$$

$$L: 2 = b - 3c - d + e$$

$$T: -3 = -a - d - 2e$$

escribiendo a , b , y c en función de d y e :

$$c = 1 - d$$

$$b = 5 - 2d - e$$

$$a = 3 - d - 2e$$

expresando la potencia P en términos de los exponentes obtenidos:

$$P = C N^{3-d-2e} d^{3-2d-e} \delta^{1-d} \mu^d g^e \quad (14)$$

Rearreglando:

$$P = C N^3 d^3 \delta \left(\frac{\mu^d}{N^d d^{2d} \delta^d} \right) \left(\frac{g^e}{N^{2e} d^e} \right) \quad (15)$$

$$\frac{P}{\delta N^3 d^3} = \left(\frac{\mu}{N d^2 \delta} \right)^d \left(\frac{g}{N^2 d} \right)^e \quad (16)$$

En esta parte observamos la formación de grupos dimensionales:

$$\text{El Número de Potencia, } N_p = \frac{P}{\delta N^3 d^3} \quad (17)$$

$$\text{El Número de Reynolds, } Re = \frac{N d^2 \delta}{\mu} \quad (18)$$

$$\text{El Número de Froude, } Fr = \frac{N^2 d}{g} \quad (19)$$

Con esto, la ecuación (5) nos queda de la siguiente forma:

$$N_p = C (Re)^{-d} (Fr)^{-e} \quad (20)$$

haciendo $x = -d$ y $y = -e$

$$N_p = C (Re)^x (Fr)^y \quad (21)$$

donde C es un factor de forma total que representa la geometría del sistema.

Podemos arreglar la ecuación en la siguiente forma:

$$\Phi = N_p / (Fr)^y = C (Re)^x \quad (22)$$

en donde Φ se define como función Potencia.

Si el sistema no presenta remolino, las fuerzas gravitacionales tienen un efecto insignificante, por lo tanto el exponente del Número de Froude es cero, $(Fr)^0 = 1$, en este caso:

$$\Phi = N_p = C (Re)^x$$

2.6.2 Curvas de potencia.

Grificando los valores medidos de N_p y Re en coordenadas

logarítmicas se obtiene lo que se llama una curva de potencia.

Esta solo es valida para un tipo y configuración del sistema, aunque es independiente del tamaño del recipiente.

Analizando una gráfica típica, la relación $N_p \propto f(Re)$ se puede dividir en cuatro secciones según la figura 2.9.

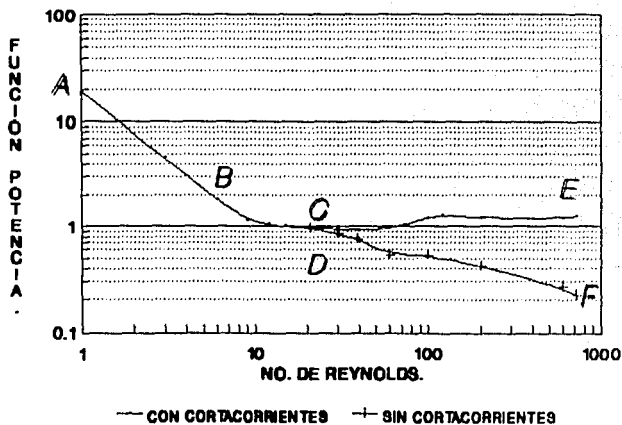
1.- Re 1 - 10 (línea AB). Para estos números de Reynolds bajos, la gráfica es lineal. En este intervalo, las fuerzas de viscosidad ejercidas por el líquido controlan el flujo dentro del sistema. Las fuerzas gravitacionales son insignificantes y por lo tanto el número de Froude no se requiere para describir la operación.

2.- Re 10 - 10^3 (línea BC). En esta sección existen varias formas de la curva para diferentes tipos y tamaños de impulsores. Las pendientes no son constantes y el flujo en el sistema agitado es transicional, entre laminar y turbulento.

3.- Re 10^4 - 10^6 (línea CD). En esta parte se considera al sistema sin formación de remolino. Aquí, el flujo llega a ser totalmente turbulento y la curva de potencia es horizontal y por lo tanto la potencia es independiente del Re y el Fr .

4.- Re 10^4 - 10^6 (línea EF). Para esta sección se describe el sistema cuando se crea un remolino en él. Entonces se obtiene una curva decreciente en donde la pendiente es diferente de punto a punto y el número de Reynolds no es suficiente para definir el flujo y es necesario tomar en consideración al número de Froude.

SECCIONES DE UNA CURVA DE POTENCIA



PAG. 43

FIG. 2.0

(Sternbeck and Taub, Mixing in the chemical industry, Ed. Pergamon, 1965)

2.6.3. Ecuaciones para las diferentes secciones de la curva.

La pendiente de la curva esta dada en cualquier punto por el exponente del numero de Reynolds. Como se vera, solo se obtienen expresiones claras para flujo laminar y turbulento. En el intervalo de transicion el numero de Froude tambien puede ser efectivo junto con el Re (aunque este sea un caso muy raro, ya que la formacion del remolino ocurre solo bajo turbulencia desarrollada) y con formacion de remolino en flujo turbulento se debera determinar el exponente y del numero de Froude.

Ecuacion para el flujo laminar.

En esta region el flujo se define por la relacion entre el numero de potencia y el numero de Reynolds. Podemos reescribir la ecuacion $P = N_p = C (Re)^x$, asi:

$$\log N_p = \log C + x \log Re \quad (23)$$

Dado que el valor del exponente x esta determinado por la pendiente de la linea, esto es $\tan 135^\circ$ (calculada para un gran numero de casos)⁶ y es igual a -1 , nos queda:

$$P = (\delta N^2 d^3) C (\delta N d^2 / \mu)^{-1} \quad (24)$$

simplificando

$$P = \mu C (N^2 d^3) \quad (25)$$

ecuación que nos muestra que la potencia es directamente proporcional a la viscosidad, a una velocidad v tamaño del agitador.

El valor de la constante se determina para todos los Reynolds por multiplicación del Re por el número de Potencia. En el flujo laminar se toma el valor de $Re = 5$ como el valor promedio para esta región (recordemos que tiene un rango de $Re = 1 - 10$); por lo tanto la constante C se determina de la relación $C = 5 N_p$.

Ecuación para flujo turbulento.

Cuando el flujo llega a ser totalmente turbulento, la curva de potencia se hace horizontal, es decir, $\tan 180^\circ = 0 = x$. Esto ocurre con la condición de que se usen cortacorrientes para evitar la formación de remolino.⁴ Para este caso el flujo es independiente del Re y el Fr. La ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$\phi = N_p = \frac{P}{\delta \cdot N^3 \cdot d^5} = \text{constante } K.$$

$$P = K \delta N^3 d^5. \quad (26)$$

Ecuación cuando se tiene un remolino en el sistema.

En esta situación la potencia tiene una caída y la curva de

potencia asume un cambio de pendiente negativo. En un flujo turbulento totalmente desarrollado ($Re >$ de 10000) la pendiente de la curva tiene un valor negativo constante, así que el número de Froude llega a ser importante y la ecuación (21) definirá el sistema.

Si se grafica $\log N_p$ vs. $\log Re$, se obtiene una familia de curvas, cada una de ellas con un Fr constante, el cual es una función de la velocidad del agitador. Dado que $\Phi = N_p / (Fr)^Y$:

$$N_p = \Phi (Fr)^Y = C (Re)^X (Fr)^Y \quad (27)$$

$$\log N_p = Y \log Fr + \log \Phi = Y \log Fr + \log C (Re)^X \quad (28)$$

Una gráfica de $\log N_p$ vs. $\log Fr$ es una línea recta de pendiente Y a un número de Reynolds constante. Un cierto número de líneas se pueden graficar, cada una correspondiendo a diferentes números de Reynolds.

Si la pendiente de la línea Y se grafica contra $\log Re$, resulta una línea recta con pendiente $-1/B$ y una intersección A/B a $Re = 1$.

Entonces,

$$Y = \frac{A - \log Re}{B} \quad (29)$$

y se puede escribir la función de potencia:

$$\Phi = N_p / (Fr)^{\frac{A - \log Re}{B}} \quad (30)$$

Algunos valores de A y B se presentan en la tabla IV.⁷

TABLA IV

Dt/d	A	B
Helice		
2.1	2.6	18
2.7	2.3	18
3.0	2.1	18
3.3	1.7	18
4.5	0.0	18
Turbinas		
3.3	1.0	40
3.0	1.0	40

Cálculo en el intervalo de transición.

Antes que nada, se deberán usar los cortacorrientes con el fin de poder eliminar el efecto del número de Froude. El exponente x se determina para su valor respectivo del Re de la pendiente de la relación $N_p = f(Re)$.

La ecuación de diseño obtenida es válida solo para el número de Reynolds respectivo para el cual la pendiente ha sido determinada.

2.7 Efecto de las variables contenidas en los grupos

adimensionales.

Diametro del impulsor. Seleccionado como la longitud basica de dimension, esta presente en todos los grupos adimensionales. Debido a esto, su variacion causa un cambio en el valor de estos y en el numero de Potencia. En flujo totalmente turbulento el efecto del diametro sobre la potencia esta determinado por una quinta potencia. Se podria graficar la relacion del logaritmo de la potencia medida al diametro del impulsor y asi verificar la validez del enunciado anterior. Lo mismo se puede probar para condiciones laminares obteniendo una linea recta con pendiente de $1/3$, o sea a la 3^a potencia.

Densidad. Forma parte tambien del Re y N_p . En el flujo laminar donde $x = -1$, la densidad se elimina de la ecuacion de diseno. En el regimen transicional donde x varia de -1 a 0 , el efecto de la densidad no es despreciable y es siempre importante en mayor o menor grado. En la region turbulenta la potencia es directamente proporcional a la densidad.

Viscosidad. Es la medida de la resistencia al flujo causada por friccion interna. En el flujo laminar, la potencia es directamente proporcional a la viscosidad. La situacion en el flujo turbulento es completamente diferente. Aqui el consumo de potencia es independiente de la viscosidad. Esto quiere decir que dentro de un intervalo considerable de Re ($10^4 - 10^7$) un cambio de hasta miles en la viscosidad ocupa la misma potencia. Esto es interesante para cuando se tengan mezclas en donde la viscosidad

caable durante la agitación, con lo cual se puede dimensionar un motor que trabaje a cualquier condición en el intervalo de Reynolds propuesto sin riesgo de sobrecargarlo. La situación opuesta ocurre en el intervalo de transición ($Re = 200$). Un impulsor operando bajo estas condiciones con un motor dimensionado precisamente para la salida requerida, sobrecargara el motor con los incrementos y decrementos en la viscosidad. Por lo tanto lo más recomendable es evitar esta situación.

Velocidad del impulsor. La velocidad rotacional N se selecciona como una medida de la velocidad. En flujo laminar la potencia es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad y al cubo en flujo turbulento.

2.8 Esquemas empíricos para la potencia.

En la literatura se presentan diversas ecuaciones que describen el comportamiento para sistemas agitados.⁷

Ecuaciones empíricas generales para el cálculo de potencia.

Reuniendo numerosos datos experimentales se han propuesto ecuaciones generales para el cálculo de potencia.

Ecuación general sin uso de cortacorrientes.

$$P = \frac{T}{Re} + U \left(\frac{10^3 + 1.2 Re^{0.66}}{10^3 + 3.6 Re^{0.66}} \right) \cdot \frac{\delta}{9} N^3 \alpha^5 \quad (31)$$

$$T = 14 + \frac{h}{D_t} \left[670 \left(\frac{d}{D_t} - 0.5 \right)^2 + 195 \right] \quad (32)$$

$$U = 10 \left[1.3 - 4 \left(\frac{h}{D_t} - 0.5 \right)^2 - 1.14 \frac{d}{D_t} \right] \quad (33)$$

$$S = 1.1 + 4 \left(\frac{h}{D_t} \right) - 2.5 \left(\frac{d}{D_t} - 0.5 \right)^2 - 7 \left(\frac{h}{D_t} \right)^4 \quad (34)$$

El efecto del ángulo en las hojas se determina por $(\sin \alpha)^{4.2}$ en la ecuación (31). La potencia está en Kg m/s, δ en Kg/m³, N en 1/s y el diámetro del impulsor en m y α es el ángulo.

Ecuación general con cortacorrientes.

Se debe sustituir en la ecuación (31) el Re por el valor del número de Reynolds válido para el cambio de la región transicional a la región turbulenta desarrollada. Este valor se obtuvo para dos casos:

Hojas rectas ($\alpha = 90^\circ$)

$$(Re_{crit})_2 = \frac{25}{h / D_t} \left(\frac{d}{D_t} - 0.4 \right)^2 + \frac{h / D_t}{0.11 \frac{h}{D_t} - 0.0048} \quad (35)$$

Para hojas con α diferentes :

$$(Re_{crit})_\alpha = 10^4 (1 - \sin \alpha) \cdot (Re_{crit})_2$$

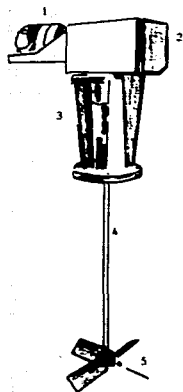
(36)

2.9 Aspecto mecánico.

La selección de un equipo requiere entender la operación, la configuración y montaje del agitador y un análisis mecánico cuidadoso de las partes del sistema.

Los principales componentes de un equipo de agitación son el motor el reductor, el sello de la flecha, la flecha del agitador y el impulsor. fig. 2.10.

El motor. Proporciona la potencia para mover el impulsor en el fluido. La mayoría de las veces se usan motores de jaula de ardilla, tipo de inducción de corriente alterna, a velocidad fija. Se deberán seleccionar para que den la potencia y el torque requerido para la



1. MOTOR
2. REDUCTOR
3. SELLO
4. FLECHA
5. IMPULSOR

FIG. 2.10 PARTES DE UN EQUIPO DE AGITACION.

aplicación específica. Los motores se seleccionan de acuerdo a las fases, frecuencia y voltaje disponibles en el sitio de la instalación. Otros tipos que se han utilizado para mover agitadores son: De corriente directa, turbinas de vapor, maquinas de diesel y gas e hidráulicas.

El reductor transmite la potencia, reduce la velocidad e incrementa el torque. Se compone de una serie de engranes y baleros en cuyo diseño se emplean las normas de AGMA (American Gear Manufacturers Association). Constan de una flecha central que se acopla a la flecha del agitador.

Los sellos se colocan para evitar fugas o contaminación al fluido de proceso por la parte de la flecha. Existen diversos tipos, cada uno con sus propias características:

Sello de borde: Consiste en un elastomero presionado alrededor de la flecha. Se usa para presiones debajo de 2 psig, para sellar vapores y líquidos lubricantes. Tiene larga vida, poco mantenimiento, son relativamente baratos, ocupan poco espacio y se instalan fácilmente.

Caja de estroperos (o empaques de compresión): El elemento sellante son unos empaques entrelazados que se comprimen contra la flecha. Se usan ampliamente para presiones de 2 psig a 150 psig y algunas veces para presiones de 2000 psig; con tal que el proceso pueda tolerar el goteo del lubricante del sello.

Sellos mecánicos: Se usan siempre donde se requiere cero goteo. A

pesar de su alto costo tienen una frecuencia de mantenimiento de un medio a un cuarto menor que los paquetes de compresión.

El cuerpo es una unidad giratoria que contiene un resorte que empuja a un anillo que tiene un sello primario en contra de un anillo estacionario.

Flecha del agitador. El diseño de la flecha es también un aspecto muy importante del diseño mecánico. Las fuerzas y momentos producidos por el impulsor girando en el fluido son los que se muestran en la fig. 2.11.

El torque resultante se calcula de:

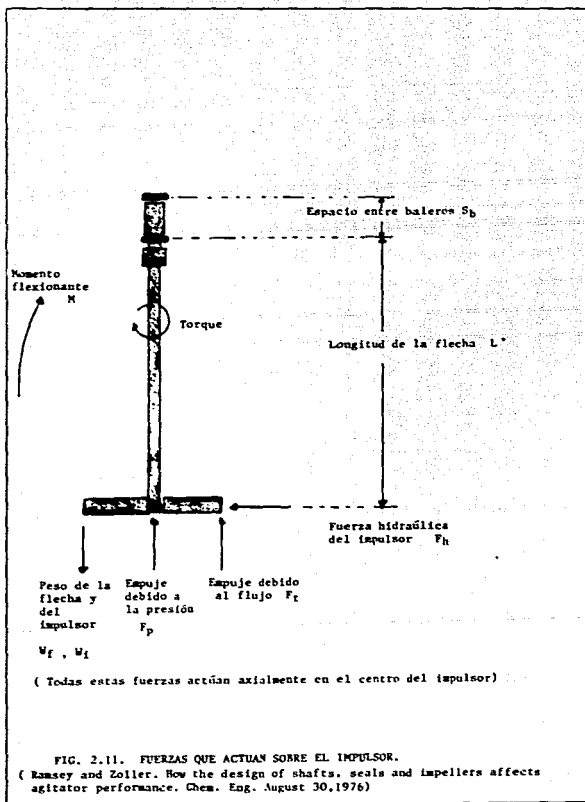
$$T_Q \text{ (máx)} = \sum (.63025 P_i / N) \quad (37)$$

Las fuerzas hidráulicas actuando sobre el impulsor generan momentos, los cuales actúan sobre la flecha y se transmiten al reductor. El máximo componente horizontal de estas fuerzas hidráulicas F_h se estima de:

$$F_h = \sum (19000 P_i f_s / N d) \quad (38)$$

Bajo condiciones normales (flecha centrada y no operada por largos periodos sobre la superficie del líquido) $f_s = 1$.

El momento fleccionante M , es el producto de F_h y la distancia L , desde el impulsor hasta el primer balero.



$$M = F_{H_1} L \quad (39)$$

La flecha del agitador esta sujeta tambien a fuerzas verticales. La principal de ellas son el peso de la flecha y el del impulsor, W_1 y W_2 respectivamente.

El minimo diametro de la flecha sera el valor mas grande de los dos calculados de las siguientes relaciones:¹⁵

$$d_{fs} = \left[\frac{16}{\pi \cdot t_s} \sqrt{T_q^2 + M^2} \right]^{1/3} \quad (40)$$

$$d_{ft} = \left[\frac{16 (M \sqrt{T_q^2 + M^2})}{\pi \cdot t_t} \right]^{1/3} \quad (41)$$

en donde t_s y t_t son el corte permisible y la resistencia a la tension respectivamente. Para acero al carbon y acero inoxidable comon (tipo 304, tipo 316) se recomiendan los siguientes valores para condiciones normales de operacion:

$$t_s = 6000 \text{ psi} \quad \text{y} \quad t_t = 10\,000 \text{ psi}$$

Vibración de la flecha. Esta es una condición crítica para el diseño de la flecha. La vibración ocurre cuando la velocidad del agitador se aproxima a la llamada primera velocidad crítica de la flecha. La velocidad de operación de esta deberá estar lo suficientemente alejada de ese valor crítico del sistema para evitar la deflexión. Se recomienda que la velocidad en operación no exceda al 65% de la primera velocidad crítica.

La primera velocidad crítica de la flecha de un agitador que tiene un impulsor simple localizado en el fondo¹⁵, es:

$$N_c = \frac{0.388 \times 10^6 (d_f^2 F_m)}{L' W_o (L' + S_o)} \quad (42)$$

En donde

$$W_o = W_i + \frac{W_f L'}{4} \quad (43)$$

W_i es el peso del impulsor y W_f es el peso de la flecha. F_m es un factor de corrección para cuando el material es diferente del acero al carbono:

$$F_m = \left(\frac{D_s E_m}{D_m E_s} \right)^{1/2} \quad (44)$$

D_s es la densidad del acero al carbon , lb/in³

D_m es la densidad del otro material. lb/in³

E_m es el modulo de elasticidad del otro material, psi

E_s es el modulo de elasticidad del acero al carbon. psi

finalmente S_b es el espaciamiento entre baleros. in

y L' es la longitud de la flecha desde el fondo hasta el primer balero.

Si la velocidad critica esta demasiado cercana a la velocidad de operacion, se pueden elegir las siguientes opciones:

1. Uso de estabilizadores en el impulsor.
2. Incrementar el diametro de la flecha.
3. Remover peso innecesario de la flecha.
4. Remover peso innecesario de los impulsores.
5. Acortar la flecha.
6. Seleccionar una combinacion mas baja de Potencia/velocidad.
7. Usar un balero guia en el fondo del tanque.

2.10 Escalamiento.

Los metodos de escalamiento de la agitacion usan los resultados

de pruebas a pequeña escala y duplican la conducta del fluido para un proceso equivalente en equipo de mayor escala.

Se usa el concepto de similitud para comparar relaciones físicas y matemáticas de la agitación en diferentes sistemas.

La similitud geométrica significa que todas las dimensiones son similares y tienen una relación común constante. La similitud cinemática indica que todas las velocidades tienen una relación común constante. La similitud dinámica significa que todas las relaciones de fuerza son constantes.

La similitud geométrica es la aplicación más importante del concepto de similitud a los problemas de agitación. Esta fija la razón de varias longitudes dentro del sistema agitado. Tales longitudes incluyen diámetro del impulsor, diámetro del tanque, ancho de la hoja y nivel del líquido, tal que las razones en diferentes escalas sean iguales:

$$\frac{d_1}{D_{t_1}} = \frac{d_2}{D_{t_2}} \quad \frac{h_1}{d_1} = \frac{h_2}{d_2} \quad \frac{H_{t_1}}{D_{t_1}} = \frac{H_{t_2}}{D_{t_2}}$$

El resultado de la similitud geométrica es que una escala simple, R, define las magnitudes relativas de todas las dimensiones lineales entre la pequeña y la gran escala.

$$R = \frac{d_2}{d_1} = \frac{D_{t_2}}{D_{t_1}} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{H_{t_2}}{H_{t_1}}$$

El tamaño del equipo a gran escala afectará la magnitud de la velocidad. El factor usado para ajustar la velocidad de la pequeña escala a la operación mayor, se define con la ecuación anterior elevada a un exponente, n :

$$N_2 = N_1 \left(\frac{1}{R} \right)^n = N_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^n$$

El valor del exponente n se basa en consideraciones teóricas y empíricas y dependen del tipo de problema de agitación. Algunos valores son :¹⁰

- a) Igual movimiento del líquido (las velocidades son aproximadamente iguales en las dos escalas) n = 1.
- b) Igual suspensión de sólidos. n = 3/4.
- c) Igual velocidad de transferencia de masa. n = 2/3.
- d) Igual movimiento en la superficie (relacionado a la formación de remolino) . n = 1/2.
- e) Igual tiempo de mezclado. n = 0.

Se han desarrollado reglas para el escalamiento, pero debido a la diversidad de procesos, no existe método simple que maneje todas.

III. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.

Se empezó a trabajar con material existente en el laboratorio de Ingeniería, y a partir de ahí hacer adaptaciones para la práctica.

Teniamos un equipo formado por las siguientes partes:

- Motor de C.A. ,
- sistema fijo de poleas,
- flecha de acero inoxidable,
- tanque de acero inoxidable,
- un agitador de paleta y ,
- la estructura metálica.

Recordemos que las curvas de potencia relacionan $\Phi = N_p / Fr^Y$ y el Re.

Una de las primeras consideraciones será el uso de cortacorrientes para hacer $Fr = 1$. De esta manera nos quedan solo dos grupos dimensionales , N_p y Re :

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

$$Re = \frac{\delta N d^2}{\mu}$$

Agrupemos las cantidades involucradas como sigue:

Propiedades físicas : δ y μ .

Propiedades geométricas : d .

Propiedades del sistema : P y N .

Analizando lo anterior, para un tipo especial de impulsor se tendrían las siguientes cantidades constantes:

Densidad y viscosidad del fluido, δ y μ , y el diámetro del impulsor, d . Por lo que podríamos expresar:

$$N_p = f(P, N)$$

$$Re = f(N)$$

Por lo tanto nuestro equipo de agitación debe de contar con sistemas que varíen la velocidad de rotación N y que midan la correspondiente potencia P , del agitador.

El equipo contará ahora con lo siguiente:

- Motor,
- sistema de variación de velocidades ,
- flecha,
- tanque,
- impulsores,
- sistema de medición de potencia,
- estructura metálica.

Enseguida describiremos, parte por parte, el diseño ,selección y construcción del equipo.

3.1 Motor.

Como mencionamos anteriormente, debimos hacer uso del equipo y material disponible en el laboratorio, y el motor que se describe a continuación forma parte de nuestro equipo de agitación:

Datos de placa.

Motor de C.A. 1/3 H.P. amp 5.7/ 2.9

RPM 1425 V 115 / 230

Monofasico Trabajo continuo

3.2 Sistema de variación de velocidades.

Este sistema fue el más crítico en cuanto a seleccionar y adquirir el más adecuado.

Para contar con un intervalo aceptable de velocidades muy bajas, del orden de 20 RPM hasta velocidades altas, 1000 RPM., por lo que requeríamos un motor de C.D. (corriente directa), puesto que estos motores son especiales para variar su velocidad, lo que no se puede hacer con un motor de C.A., pero debido al costo no se pudo contar con él.

Por otra parte, el sistema de poleas fijas escalonadas implica mucha dificultad en la operación y por lo tanto no es aceptable.

Tuvimos una opción intermedia, que aunque tiene ciertas limitaciones, nos sirve parcialmente para el desarrollo de la práctica.

El sistema al que hacemos mención es una polea de velocidad variable (diámetro variable) que funciona tensando la banda colocando el motor en una base deslizable. Una idea más clara nos la da la fig. 3.1.

Las características de la polea son:

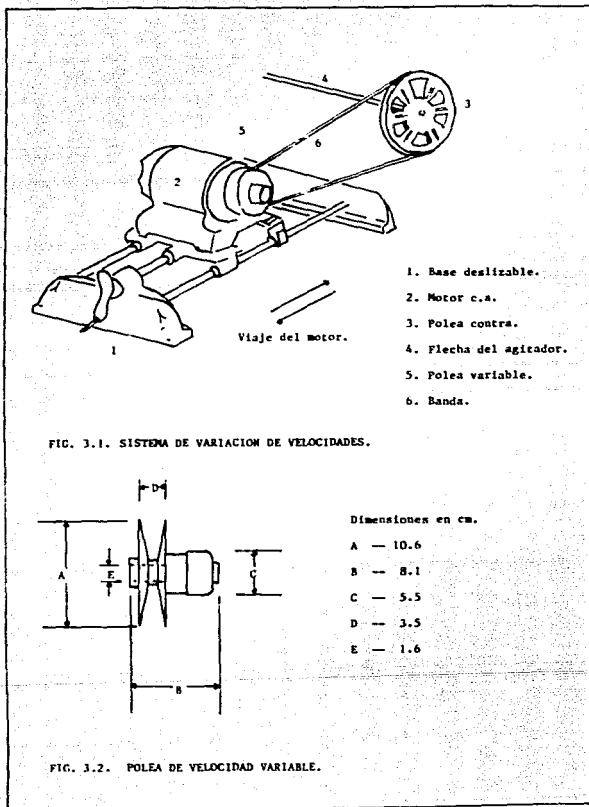
TAMARO 340

VARIACION 2.3 A 1

DIAMETRO DE PASO : MAXIMO 9.1 CM MINIMO 3.9 CM

BANDA SECCION A

VIAJE DEL MOTOR 3.95 CM.



Las dimensiones principales se muestran en la fig 3.2. Se usaron dos poleas contras, una de 17.8 cm y la otra de 30.5. El intervalo de velocidades que se obtiene es de 1000 RPM la más alta, hasta 250RPM.

3.3 Flecha

La flecha con que se cuenta es de acero inoxidable con un diámetro de 1.25 cm. (1/2 ") con una longitud total de 54.4 cm. El acoplamiento con la flecha de la polea contra se realiza mediante un cople bipartido.

Calculemos la primera velocidad crítica de la flecha para ver si es adecuada para la operación. Para esto usaremos la siguiente relación:¹⁹

$$N_c = \frac{0.388 \times 10^6 (d_f^2 \cdot F_m)}{L' \sqrt{W_e} \sqrt{L' + S_b}}$$

Esta ecuación está expresada en unidades inglesas, haciendo algunas operaciones, podemos arreglarla para poder usar el S.I.:

$$N_c = \frac{1.04 \times 10^5 (d_f^2 \cdot F_m)}{L' \sqrt{W_e} \sqrt{L' + S_b}}$$

d_f es el diámetro de la flecha = 0.125 m

L' es la longitud de la flecha desde el fondo al primer balero
= 0.4 m

S_b es la distancia entre baleros de soporte = 0.85 m

F_m es un factor de corrección adimensional definido como sigue:

$$F_m = \left(\frac{D_s \cdot E_m}{D_m \cdot E_s} \right)^{1/2}$$

D_s densidad del acero al carbón = 0.284 lb/in³

D_m densidad del acero inoxidable = 0.29 lb/in³

E_s Módulo de elasticidad del acero al carbón $\times 10^6 = 30$ psi

E_m Módulo de elasticidad del acero inoxidable $\times 10^6 = 28$ psi

Por lo tanto

$$F_m = \left(\frac{0.284 \times 28}{0.29 \times 30} \right)^{1/2} = 0.956$$

W_e es la contribución de los pesos del impulsor y de la flecha:

$$W_e = W_i + \frac{W_f \cdot L'}{4}$$

W_f peso de la flecha = 0.4265 kg

W_i peso de cada uno de los impulsores:

Paleta 0.0778 kg

Turbina hojas rectas 0.1274 kg

Turbina hojas curvas 0.1396 kg

Helice 0.0958 kg

Sustituyendo todos los datos, finalmente nos queda la velocidad crítica para cada impulsor:

PALETA $N_c = 2533$ RPM

TURBINA HOJAS RECTAS $N_c = 2132$ RPM

TURBINA HOJAS CURVAS $N_c = 2059$ RPM

HELICE $N_c = 2363$ RPM

Puesto que la recomendación es de que la velocidad no exceda al 65% de la primera velocidad crítica; en nuestro caso, en promedio está en aproximadamente 2300 RPM, el 65% es 1495 RPM, la cual en la práctica no la excedimos.

3.4 Tanque

Tenemos un recipiente de forma cilíndrica de acero inoxidable de 30.0 cm de diámetro y una altura de 45 cm. Originalmente, tenía una tapa del mismo material que además servía como soporte para el juego de baleros que guían a la flecha. Esta tenía la desventaja de que no se podía observar la operación, así que se construyó una tapa de acrílico con las mismas dimensiones. Cuenta además con dos cortacorrientes de 2cm de ancho y 41 cm. de largo.

3.5 Impulsores.

3.5.1 Impulsor de paleta

Era el único con el que contábamos y no tuvimos que construirlo, por lo que damos únicamente sus características en la fig. 3.3

3.5.2 Impulsor de turbina hojas rectas.

Según los criterios de diseño, para un impulsor de este tipo el diámetro se calcula como sigue:

$$+ \frac{D_t}{d} = 3 - 6$$

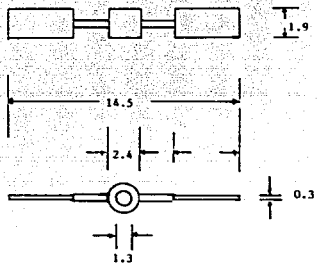


FIG. 3.3. DIMENSIONES DEL IMPULSOR DE PALETA.

• Seleccionamos $\frac{D_t}{d} = 3$

• Puesto que el diámetro del tanque es de 30 cm. , $D_t = 30\text{cm.}$

$$d = \frac{30}{3} = 10$$

• Por lo tanto el diámetro de la turbina será aproximadamente de 10 ca.

La turbina consta de un disco en donde se colocan 6 hojas rectas, en el centro lleva el mamelón, que es donde se introduce la flecha, y se ajusta mediante un prisionero. Las dimensiones principales se muestran en la fig. 3.4.

La construcción de este impulsor no presenta demasiadas complicaciones. El disco es de 1.5 mm de espesor al igual que las hojas, en éstas se hizo un corte para ajustarlos en él y después se soldaron con acero inoxidable. El mamelón central es de 2.54 cm. (1 in) de diámetro y de 1.27 cm. (1/2 in) al centro para introducir la flecha. Este se torneó para ajustar a presión al disco. Todo el material es de acero inoxidable.

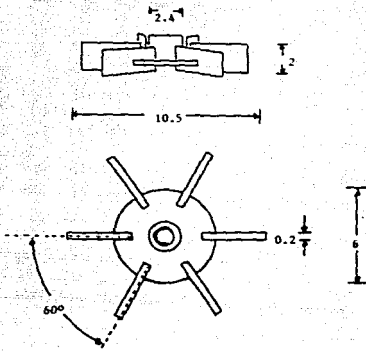


FIG.3.4. DIMENSIONES DEL AGITADOR DE TURBINA HOJAS RECTAS

3.5.3 Impulsor de turbina hojas curvas.

Se siguen los mismos criterios de diseño y por lo tanto el diámetro del impulsor será de aproximadamente de 10 cm.

Para este impulsor también se tiene un disco central con un mamelón ajustado como el anterior y las 6 hojas curvas soldadas con acero inoxidable. No fue difícil hacer la curvatura de las hojas, para ello se requirió de un tubo de 5.1 cm. de diámetro (2 in) por lo que el arco de la hoja corresponde a esa cantidad. Después se ajustan en el disco para que tengan el ángulo de separación apropiado entre ellas (30°). La colocación es con la parte convexa hacia el sentido de giro de la flecha. En la fig. 3.5. se muestran los detalles de este impulsor.

3.5.4 Impulsor de hélice.

El impulsor de hélice se diseña con la siguiente relación:

$$d = 0.5 - 0.2 D_t$$

Seleccionamos el valor de $0.35 D_t$, es decir, que va a presentar un diámetro de $0.35 \times 30 = 10.5$ cm. aprox.

Este agitador fue el que presentó más dificultad en su construcción. Se cortó un disco de acero inoxidable de 10.5 cm. aproximadamente y se ajustó a presión el mamelón igual que en los anteriores.

Se trazaron sobre este disco tres radios de 2 cm., correspondientes a cada una de las hojas de la hélice, a un ángulo

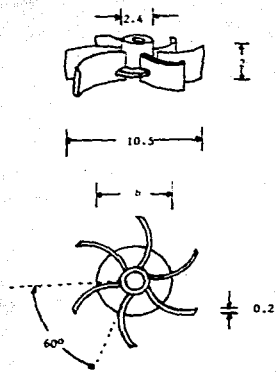


FIG. 3.5. DIMENSIONES DE LA TURBINA DE BOJAS CURVAS.

de 120° entre ellos. Después se cortó cada hoja circular para luego darle la inclinación requerida.

Referente a la inclinación de las hojas, es decir el ángulo que se les tiene que dar, consideraremos el criterio más común que es el de dar la relación del diámetro de la hélice al paso de la misma igual a uno :

$$\frac{d}{s} = 1$$

Por lo tanto $s = d$

De aquí debemos calcular el ángulo de la relación :

$$s = 2 \pi r \tan \phi$$

en donde s es el paso, r es el radio de la hoja = 2 cm. y ϕ el ángulo de inclinación de la hoja.

Despejando ϕ ,

$$\phi = \tan^{-1} \frac{s}{2 \pi r}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{10.5}{12.57}$$

$$\phi = \tan^{-1} 0.833$$

$$\phi = 39^{\circ} 55' \text{ aproximadamente } 40^{\circ}$$

Como referencia mencionamos que se recomienda el intervalo siguiente para el paso $s = 1.0 - 3.0$ d

En la fig. 3.6. se muestra el impulsor.

3.6 Platano de medici3n de potencia.

La determinaci3n de la potencia mec3nica se asocia con frecuencia a la medida del torque. Los dispositivos para medir tal par3metro se llaman comunmente Dinam3metros. En la determinaci3n de potencia tanto el torque como la velocidad angular se deber3n determinar.

Hay tres tipos b3sicos de aparato de medida de torque: Dinam3metros de absorci3n , de motor y de transmisi3n.

Dinam3metros de absorci3n. Disipan la energ3a mec3nica cuando se mide el torque, por lo tanto son 3tiles para medir la potencia desarrollada o torque desarrollado por motores o m3quinas el3ctricas.

Dinam3metros de motor. Miden el torque o potencia y adem3s suministran energ3a para operar el dispositivo a probar. Por lo tanto son 3tiles en la determinaci3n de las caracter3sticas de operaci3n de tales par3metros, como en bombas y compresores.

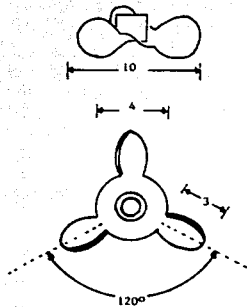


FIG. 3.6. DIMENSIONES DEL IMPULSOR DE HELICE.

Dinamómetros de transmisión : Se pueden probar en ellos como un dispositivo pasivo colocado en un lugar apropiado dentro de una máquina o entre máquinas, simplemente con el propósito de sentir el torque en ese punto. Ellos no añaden ni restan energía o potencia transmitida y se refieren algunas veces como medidores de torque simplemente.

En nuestro caso usamos el más simple dinamómetro de absorción llamado Freno Prony, el cual es estrictamente un dispositivo mecánico que depende de la fricción seca para convertir la energía mecánica en calor. Las partes que componen el Freno Prony se muestran en la fig. 3.7.

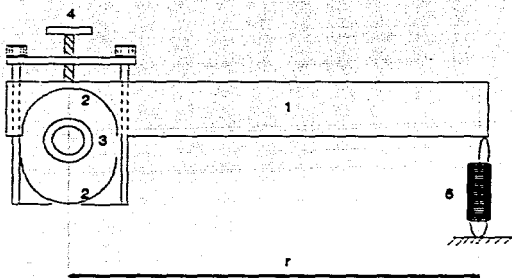
El brazo de reacción es de madera, con una longitud de 29 cm., las balatas se hicieron de la pasta que utilizan los frenos de automóvil. Todo el dispositivo se ensambla sobre un disco de 4 cm. de diámetro, colocado en la flecha del agitador, mediante un maneral se mueve la parte móvil del freno, presionando el disco antes mencionado y frenando la flecha.

Dado que el Freno Prony tiende a rotar con la flecha de la máquina, se coloca un dispositivo de medida de fuerza, colocado en el final del brazo de reacción de longitud r . En nuestro caso utilizamos un dinamómetro con capacidad de 2000 g con divisiones de 20 g.

Midiendo la fuerza en el radio conocido del brazo, el torque se puede calcular como:

$$\tau = F r$$

Si la velocidad angular del motor se conoce, la potencia se



- 1.- BRAZO DE PALANCA DEL FRENO (r)
- 2.- BALATAS
- 3.- DISCO
- 4.- TORNILLO.
- 6.- RESORTE.

FIG. 3.7 ELEMENTOS DEL FRENO PRONY.

Puede determinar de la relación :

$$P = 2\pi r N$$

donde N está en revoluciones por segundo (1/s) .

Es conveniente aclarar que si nuestro dispositivo de medida de fuerza está en kg_f (Kilogramos fuerza) , que es lo más común, podemos usar el siguiente factor para cambiar a Newtons (Nw) :

$$1 \text{ kg}_f = 9.8 \text{ Nw}$$

Así, las unidades nos quedan:

$$F : \text{ Nw}$$

$$r : \text{ m}$$

$$N : 1/s$$

$$P : \frac{\text{Nw} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{Joule}}{\text{s}}$$

IV. DISEÑO DE LA PRACTICA DE AGITACION.

4.1 OBJETIVOS

Que el alumno:

- a) Aplique los conceptos básicos de agitación e identifique las variables de que depende.
- b) Conozca las partes que forman un sistema de agitación.
- c) Genere e interprete las curvas de potencia del equipo de agitación.
- d) Mediante el análisis de resultados, emita una conclusión del experimento.
- e) Pueda seleccionar y especificar un agitador.

4.2 INTRODUCCION.

Aunque la agitación y el mezclado están relacionados y muchas veces se les confunde, existe una gran diferencia en cuanto a su significado. La Agitación es un estado de movimiento que se manifiesta como flujo o turbulencia, independientemente de si se realiza un mezclado o no. El Mezclado por su parte, es una integración de dos o más materiales, alcanzandose un cierto grado de uniformidad. Ahora, para que se efectúe un mezclado, se requiere un cierto nivel de agitación, y es por esto que los dos términos se usan indistintamente con frecuencia.

La rotación de un agitador en un líquido genera corrientes, las cuales se mueven a través del recipiente provocando que factores como POTENCIA, FORMA DEL AGITADOR, VELOCIDAD DE ROTACION y algunos ASPECTOS GEOMETRICOS, dependan del nivel deseado de agitación.

En toda la industria química, tal vez la operación básica es algún tipo de agitación o mezclado, con el consecuente uso de sistemas de agitación.

La aplicación que tienen éstos es muy variada y determinante en algunas operaciones, tales como suspensión de líquidos, cristalización, extracciones, emulsificaciones, absorción, reacciones químicas, transferencia de calor, por mencionar algunas cuantas.

4.3. PRINCIPIOS BASICOS.

Uno de los factores principales que distinguen a un impulsor de otro es la potencia que consumen en la operación. Esta , junto con otras variables, determinan el sistema de agitación. Todos los términos involucrados están agrupados en las siguientes relaciones adimensionales;

Numero de Potencia (N_p)

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \quad (1)$$

Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{N d^2 \rho}{\mu} \quad (2)$$

Numero de Froude (Fr)

$$Fr = \frac{N^2 d}{g} \quad (3)$$

La ecuación que relaciona estos grupos es :

$$N_p = C (Re)^x (Fr)^y \quad (4)$$

en donde C es un factor de forma dependiendo de la geometría del sistema.

Estos grupos y la relación entre ellos se presentan en forma gráfica llamada curva de potencia, que es característica para cada tipo de impulsor y arreglo geométrico del equipo. Se tiene como abscisa al logaritmo del Número de Reynolds, $\log Re$ y la ordenada será el Número de Potencia dividido por el Número de Froude:

$N_p / Fr^y = f$, también como logaritmo, $\log f$.

Generalmente se usan cortacorrientes (también llamados mamparas o baffles) para evitar la formación de remolino, en cuyo caso el $Fr = 1$ y $f = N_p$. En la fig. 4.1a. se muestra la curva de potencia para esta situación.

A bajos Números de Reynolds ($Re < 10$), la gráfica es lineal (AB), así que podemos escribir la ecuación :

$$1 = N_p / (Fr)^y = C (Re)^x \quad (5)$$

o para un sistema con cortacorrientes:

$$N_p = C (Re)^x \quad (6)$$

de donde obtenemos:

$$\log N_p = \log C + x \log Re \quad (7)$$

donde se deberá evaluar C y x.

En el régimen transicional el flujo permanece dependiente sólo del Reynolds hasta $Re = 10\,000$. La ecuación (4) sigue siendo válida, aunque es muy difícil establecer un comportamiento exacto. Cuando el flujo es totalmente turbulento la curva se hace horizontal (DE). Aquí el flujo es independiente del Reynolds:

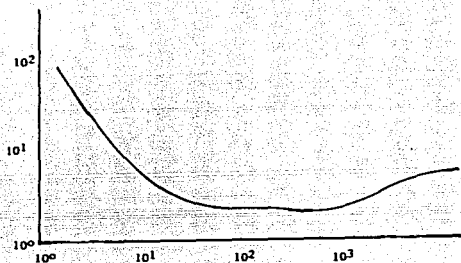
$$f = N_p = \text{una constante} : K_{N_p} \quad (8)$$

En un sistema sin cortacorrientes se formará un remolino y el Número de Froude en este caso es importante, por lo que se tendrá que aplicar:

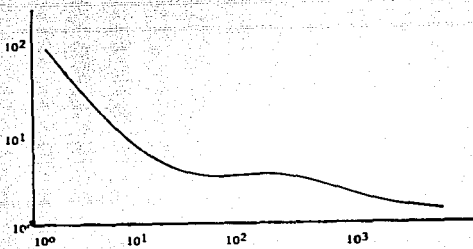
$$f = N_p / (Fr)^y \quad (9)$$

En general, estas gráficas pueden ser útiles para el cálculo de los requerimientos de potencia en un sistema o para el escalamiento de una planta piloto a una industrial (siempre y cuando existan las llamadas similitudes geométricas, dinámicas y cinemáticas.

Un método de escalamiento es mantener la potencia de entrada por



a) Con cortacorrientes.



b) Sin cortacorrientes.

FIG. 4.1 CURVAS DE POTENCIA.

unidad de volumen constante. Esto se hace con el uso de las curvas de potencia de i vs. Re . La velocidad óptima de la unidad del laboratorio se establece primero (tomando en consideración el resultado requerido de mezclado). A ese número de Reynolds del agitador se lee el factor i de la gráfica. La velocidad requerida a escala mayor, para dar la misma potencia de entrada por unidad de volumen se calcula de la gráfica y las dimensiones del equipo grande se determinan puesto que la geometría del sistema también es un factor de escalamiento. La relación del diámetro del impulsor al diámetro del tanque es importante.

4.4 IMPULSORES.

Los impulsores más utilizados para el mezclado de líquidos son las turbinas y las hélices (propelas) fig. 4.2. Estos dos tipos se emplean extensamente para líquidos de viscosidad baja a media y en algunas ocasiones pueden adaptarse para alta viscosidad. Cada uno de estos agitadores producen ciertos tipos de flujos en el líquido dentro del tanque, estos se conocen como flujo axial y flujo radial, fig. 4.3. (Existe otro tipo de flujo, el tangencial que para este tipo de impulsores es insignificante.).

Debido al amplio intervalo de aplicaciones de los agitadores, se ha dificultado el establecer un criterio general de diseño y selección. Por esto se han planteado algunas consideraciones un tanto imprecisas para definir el grado de agitación, como:

- Proporcionar suficiente agitación para promover la reacción.
- promover el contacto de sólido y líquido. mezclado de líquidos hasta

uniformidad, dispersión de gas para promover la reacción, proporcionar agitación ligera, media, violenta o vigorosa,

ligera----->	122m/min
media----->	198-244m/min
violenta----->	305-365m/min

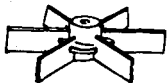
también puede considerarse la viscosidad como factor de selección. fig.4.4.

La mejor manera es la de considerar todos los factores siguiendo una secuencia lógica. fig.4.5.

Para servicios generales se recomienda que estos agitadores se monten a una distancia del fondo igual al diámetro del impulsor, y teniendo un diámetro de $1/3$ del diámetro del tanque. En la bibliografía se tienen más bases para el diseño de los impulsores.

4.5 CORTACORRIENTES.

En los sistemas de agitación existe la formación de un remolino central que en la mayoría de los casos es indeseable. Este remolino se puede evitar usando cortacorrientes (también llamados mamparas o deflectores) que impiden la formación de aquél como se ve en la fig.4.6.. Se recomienda para viscosidades bajas que los cortacorrientes sean de 8-10% del diámetro del tanque, para altas viscosidades, del 5-8%.



a) Turbina de hojas rectas.



b) Turbina de hojas curvas.



c) Hélice.

FIG. 4.2. DIFERENTES TIPOS DE IMPULSORES.

4.6. MEDIDA DE LA POTENCIA.

La medida de la potencia se relaciona con la medida del torque producido en la flecha. El torque expresa la fuerza de actuación del motor y depende de la potencia que sea capaz de desarrollar éste, así como de la velocidad de rotación del mismo.

El dispositivo para medir tal parámetro será el Freno Prony que pertenece al grupo de los llamados dinamómetros de absorción, ya que disipa la energía mecánica en calor cuando se efectúa la medición. La forma más común de Freno Prony se muestra en la fig.4.7.

Ya que el dispositivo tiende a rotar debido al torque, se coloca en el extremo del brazo un dinamómetro que nos mida la fuerza. El torque resultante será :

$$T = F r$$

donde F es la fuerza en Newtons (Nw) ; r es el brazo de reacción en metros (m) ; y T el torque en Nw m.

Dado que conocemos la velocidad angular podemos calcular la potencia:

$$P = 2 \pi T N$$

donde N está en RPS (revoluciones por segundo, s^{-1}).

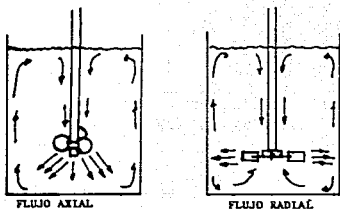
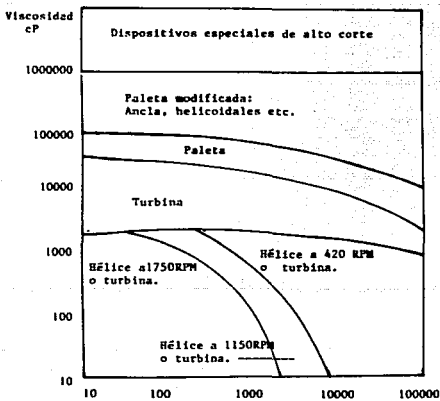


FIG. 4.3. Tipos de flujo.



(Fenney. Guide to trouble-free mixers. Chem. Eng. June 1970)

Fig. 4.4. Selección de agitadores.

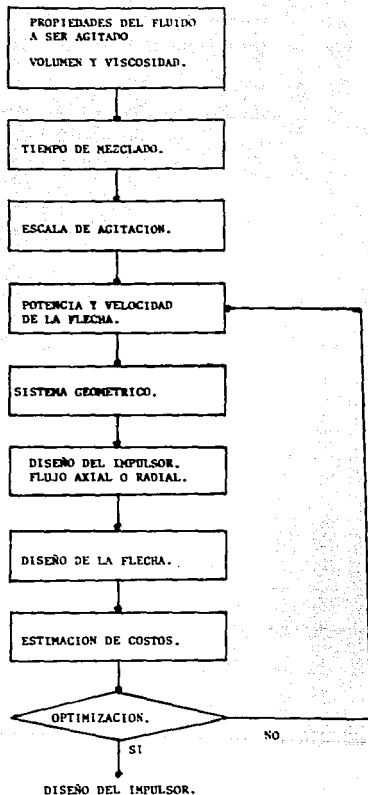


FIG. 4.5. SECUENCIA LÓGICA PARA EL DISEÑO Y SELECCION DE AGITADORES.
 (Gates, Henley and Fenic. How to select the optimum turbine. Chem. Eng. Dec 8, 1976)

Haciendo un análisis de unidades, nos queda:

$$P = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{Joule}{s}$$

Si necesitamos la potencia en HP podemos usar la siguiente relación:

$$1 \text{ HP} = 745.7 \frac{Joule}{s}$$

Si el dinamómetro está graduado en Kg, podemos transformar a Nw:

$$1 \text{ Kg} = 9.8 \text{ Nw}$$

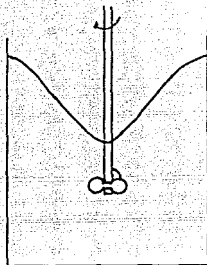
4.7 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo que se utiliza consta de las siguientes partes:

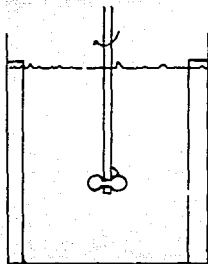
- Motor de corriente alterna.
- sistema de variación de velocidades.
- tanque de acero inoxidable con tapa de acrílico.
- flecha de acero inoxidable.
- sistema de medición de potencia.

En la fig.4.6. se pueden ver todas las partes integradas.

El motor es de 1/3 de HP al que se acopla en su flecha una polea de velocidad variable, con una banda que transmite la potencia hacia una polea contra donde va la flecha del impulsor. El motor va

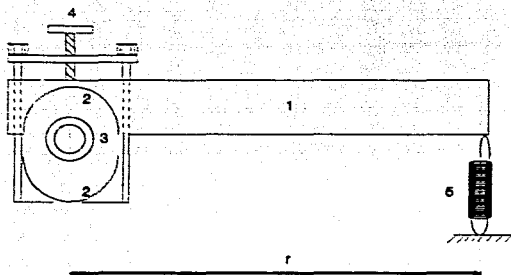


REMOLINO.



CORTACORRIENTES.

FIG. 4.6. FLUJO CON Y SIN CORTACORRIENTES.



- 1.- BRAZO DE PALANCA DEL FRENO (r)
- 2.- BALATAS
- 3.- DISCO
- 4.- TORNILLO.
- 5.- RESORTE.

FIG. 4.7 ELEMENTOS DEL FRENO PRONY.

montado sobre una base deslizante que al moverse tensa la banda cambiando el diámetro de la polea variable y por consiguiente la velocidad en la polea contra.

La flecha del impulsor es de acero inoxidable y se guía mediante un juego de dos baleros en la tapa de tanque, con el fin de que no vibre.

La potencia se mide con un Freno Prony, efectuando el frenado sobre un disco colocado en la flecha. El freno está construido de madera y la parte que presiona el disco son unas balatas como las de automóvil. La fuerza se mide con un resorte graduado colocado en el extremo del brazo del freno.

Las características de cada una de las partes son:

Motor: C.A. 1/3 HP. 1450 RPM.

Polea variable: Diámetro máximo 9.1 cm

Diámetro mínimo 3.9 cm.

Polea contra: Diámetro 17.8 cm

Flecha: Diámetro 1.25 cm.

Longitud al primer balero 40 cm.

Tanque: Diámetro 30 cm

Altura 45 cm

2 cortacorrientes de 2 x 41 cm.

altura de líquido : 35 cms.
volumen 25 lts.

Freno Prony: Longitud del brazo 20 cm
diámetro del disco 4 cm.
dinamómetro 2000 grs graduacion 20 grs.

4.8 TECNICA DE OPERACION

1.-La velocidad se variará con el control de velocidad del motor. desde una velocidad alta hasta una baja (tomando valores intermedios). Estas velocidades se medirán con un tacómetro.

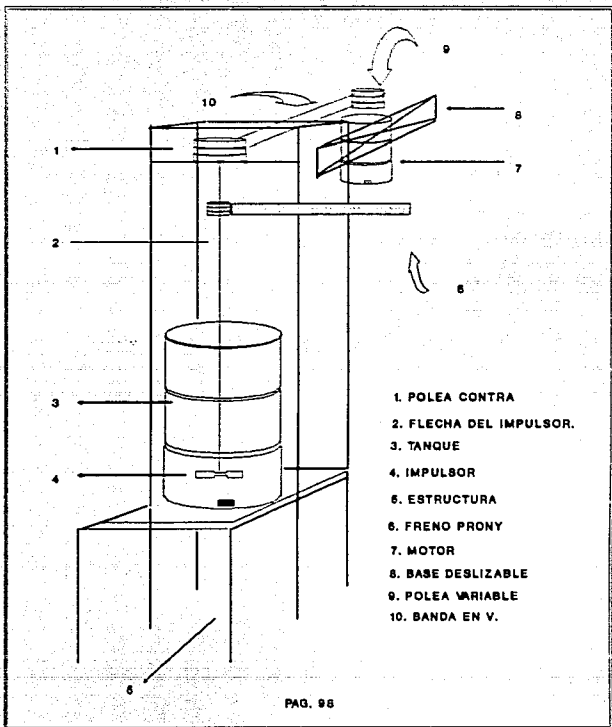
2.-Para cada velocidad seleccionada, se operará el agitador en el líquido y se hará la lectura correspondiente en el amperímetro, (N₁,I₁), (N₂,I₂), etc.

3.-Para obtener la potencia se usa el sistema Prony, en cuyo caso no se introduce el agitador al líquido ya que la carga la simulará el freno que se aplique, en la siguiente forma:

La primera medición será con N₁ . se empieza a aplicar el freno hasta obtener I₁. En ese momento se leerá en el dinamómetro la fuerza obtenida y se evaluará la potencia en la siguiente forma :

$$T = F r$$

$$P = F r \omega$$



en donde

$$\omega = 2 \pi N$$

por lo tanto

$$P = 2 \pi F r N$$

4.-Medir la temperatura y determinar densidad y viscosidad del fluido.

Material necesario:

1 tacómetro

1 amperímetro digital de pinza.

1 dinamómetro escala 0 - 2000 grf divisiones de 20 grf.

1 hidrómetro

4.9 TRABAJO POSTERIOR A LA PRACTICA.

1. Con los datos obtenidos. calcule el Número de Reynolds y el Número de Potencia para cada impulsor.
2. Obtenga las constantes geométricas del equipo.

$$\frac{D_L}{d}, \frac{H_L}{D_L}, \frac{A}{S}, \frac{I}{D_L}$$

3. Grafique los datos obtenidos

4. Emita una conclusión respecto de los datos y resultados. Comparelos con la gráfica de la fig 4.1.
5. Indique los posibles errores al efectuar las mediciones.
6. Llene la hoja de selección de agitadores anexa.

4.10 CUESTIONARIO.

A. Mencione 5 de las aplicaciones de la agitación en la Industria Química.

B. Indique las unidades en el S.I. para que los siguientes grupos sean adimensionales:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \quad , \quad Re = \frac{N d^2 \rho}{\mu} \quad , \quad Fr = \frac{N^2 d}{g}$$

C. Efectúe el análisis dimensional para obtener los grupos anteriores a partir de la potencia como función de las revoluciones, el diámetro del impulsor, la densidad, la viscosidad y la aceleración de la gravedad.

$$P = (N \cdot d \cdot \rho \cdot \mu \cdot g)$$

D. Indique como afectaría cada una de las variables en el consumo de potencia.

E. Mencione los tipos de impulsores que se pueden encontrar en la industria.

F. Qué sucede cuando la viscosidad del fluido cambia durante la operación, (tal como ocurre con un fluido pseudo-plástico)?

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA

PRACTICA DE AGITACION

I M P U L S O R

CORRIDA (TIPO:	TIPO:				TIPO:				TIPO:							
	N	I	F	P	N	I	F	P	N	I	F	P	N	I	F	P

DATOS ADICIONALES.

FLUIDO: _____

TEMPERATURA: _____

DENSIDAD: _____

VISCOSIDAD: _____

N: REVOLUCIONES POR SEGUNDO

I: INTENSIDAD DE CORRIENTE (AMP)

F: LECTURA DEL DINAMOMETRO.(GRS)

P: POTENCIA (Nw)

ESPECIFICACIONES PARA UN EQUIPO DE AGITACION.

HOJA DE DATOS

OPERACION

Densidad _____ kg/m³ Viscosidad _____ cP

Solidos _____ solubles _____ insolubles _____ abrasivo _____ adhesivo _____ cristalino

Clase: _____ mezclado _____ disolucion _____ suspension _____ fraguado _____ emulsificacion
 liquido _____ solidos _____

_____ transferencia de _____ dispersion de
 calor _____ gases _____

tiempo requerido _____

Tipo de agitacion _____ violenta _____ meda _____ ligera

Agitador _____ Sera operado _____ No sera operado
 durante el
 llenado

DISEÑO

Impulsor: diametro _____ m tipo _____ velocidad _____ RPM

Tipo de rodamiento _____

Sello de la flecha _____ empaque _____ mecanico _____

Acoplamiento de la flecha: tipo _____

Motor: tipo _____ velocidad _____ RPM Potencia _____ HP

Volts _____ Amperes _____ Fases _____ Factor de
 de _____
 servicio _____

MATERIALES DE CONSTRUCCION Y SELECCION.

Recipiente _____ Flecha _____ Impulsor _____

Sellos _____ Engranajes _____ Rodamientos _____

Fabricante _____ Modelo _____

Diametro del recipiente _____ Presion _____

Localizacion del agitador _____ Angulo _____

4.11 BIBLIOGRAFIA

- **BECKWITH - BUCK**
MECHANICAL MEASUREMENTS
ADDISON - WESLEY PUBLISHING COMPANY U.S.A.
PAGS. 322 - 325

- **HOLLAND AND CHAPMAN**
LIQUID MIXING AND PROCESSING IN STIRRED TANKS
ED. REINHOLD PUBLISHING N.Y. 1966
PAGS. 1-27, 29-65

- **MC. CABE AND SMITH**
UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING
MC. GRAW HILL, INTERNATIONAL STUDEN EDITION
CAP. CAP. MIXING PAGS. 280-312

- **STEBACEK AND TAUSK**
MIXING IN THE CHEMICAL INDUSTRY
ED. PERGAMON PRESS, OXFORD 1965
PAGS. 21-23, 75-108, 241 - 267.

- **HICKS AND MORTON**
HOW TO DESIGN AGITATORS FOR DESIRED PROCESS RESPONSE
CHEM. ENG. APRIL 26, 1976 ED. MC. GRAW HILL
PAG. 102

4.12 NOMENCLATURA.

- A Constante para la determinación del exponente y en el Fr.
- A₁ Altura desde el fondo del recipiente al primer impulsor.
- B Constante para la determinación del exponente y del Fr.
- C Factor de forma en la ecuación del Número de Potencia.
- d Diámetro del impulsor.
- δ Densidad.
- D_t Diámetro del tanque.
- F Fuerza desarrollada por la flecha del impulsor.
- Fr Número de Froude.
- g Aceleración de la gravedad.
- H₁ Altura del líquido en el tanque.
- I Intensidad de corriente.
- I_c Ancho de los cortacorrientes.
- K_{NP} Constante del Número de Potencia a flujo turbulento.
- N Velocidad de la flecha del agitador.
- μ Viscosidad.
- N_p Número de Potencia.

P	Potencia.
π	3.1416
r	Braço de palanca del freno Frony.
Re	Número de Reynolds.
τ	Torque.
ω	Velocidad angular.
x	Exponente del Re.
y	Exponente del Fr.
z	Función Potencia.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Las pruebas con el equipo se hicieron con dos fluidos disponibles: Carboximetil-Celulosa (CMC) al 1 % y el otro agua simple. La CMC presenta la desventaja, para nuestro caso, de ser un fluido no-Newtoniano y tiene ciertos inconvenientes que veremos.

Se uso cuatro tipos de impulsores : de paleta, turbina de hojas rectas, turbina de hojas curvas y hélice.

5.1 Procedimiento.

- Con un impulsor dentro del liquido se cambia la velocidad con el sistema de variación. A unas ciertas revoluciones seleccionadas, medidas con el tacómetro, se ve la corriente consumida por el motor con un amperímetro digital.

- Se van cambiando las velocidades, dentro del intervalo disponible, y se ve el consumo de amperes para cada una.

- Al terminar el paso anterior se saca el impulsor del liquido.

- Se van repitiendo las velocidades obtenidas anteriormente. En cada una se aplica el freno hasta obtener la misma corriente consumida.

- Se lee en el dinamómetro la fuerza ejercida.

En las tablas 5.a , 5.b , 5.c y 5.d se presentan los resultados obtenidos con los instrumentos, al usar la CMC.

5.2 Tratamiento de los datos con Excel.

Este líquido es un fluido No-Newtoniano (pseudo-plástico) y por lo tanto su viscosidad cambia durante la operación. Esta condición influye en la determinación del Número de Reynolds.

Es por esto que debemos usar una viscosidad aparente μ_a ,

$$Re = \frac{d^2 N \rho}{\mu_a}$$

definida como:

$$\mu_a = \frac{\tau_c}{dv/dy}$$

Para un líquido Newtoniano este valor es constante.

Para muchos líquidos no-Newtonianos la tensión de corte se relaciona a la velocidad de corte por una ecuación de la forma :

$$\tau_c = K (dv/dy)^n$$

**TABLAS DE RESULTADOS CON INSTRUMENTOS
CMC AL 1%**

TABLA 5A IMPULSOR DE PALETA

N(1/MIN)	I(AMP)	F(GRF)
1000	6	1120
900	5.3	920
800	4.8	660
700	4.5-4.6	580
600	4.4	520
500	4.3-4.4	440
450	4.2-4.3	80
400	4.2-4.3	140
350	4.2-4.3	100
300	4.2-4.3	100
250	4.2	-

DIAMETRO: 0.145

TABLA 5B IMPULSOR DE TURBINA DE HOJAS RECTAS

N(1/MIN)	I(AMP)	F(GRF)
1000	5.4-5.6	840
900	5	680
800	4.7	460
700	4.5-4.6	360
600	4.4-4.6	300
500	4.4	120
450	4.3-4.4	100
400	4.3-4.4	40
350	4.3-4.4	280
300	4.3-4.4	180
250	4.3-4.4	-

DIAMETRO: 0.105 M

**TABLAS DE RESULTADOS CON INSTRUMENTOS
CMC AL 1%**

TABLA 5C IMPULSOR DE TURBINA DE HOJAS CURVAS

N(1/MIN)	I(AMP)	F(GR)
1000	4.9	560
900	4.6-4.7	560
800	4.5-4.6	420
700	4.4	360
600	4.3-4.4	240
500	4.3-4.4	180
480	4.3-4.3	200
400	-	-
380	-	-
300	-	-
250	-	-

DIAMETRO:0.11

TABLA 5D IMPULSOR DE HELICE

N(1/MIN)	I(AMP)	F(GR)
1000	4.4-4.6	180
900	4.4-4.6	180
800	4.3-4.4	60
700	4.3-4.4	20
600	4.3	-
500	4.3	-
480	4.3	-
400	4.3	-
380	4.3	-
300	4.3	-
250	4.3	-
	4.3	-

DIAMETRO:0.10 M

llamada ley de potencia.

Si relacionamos las dos ecuaciones anteriores :

$$\mu_a = \frac{T_c}{dv/dy} = K (dv/dy)^{n-1}$$

Se consideró⁴ que la velocidad de corte promedio del líquido en un recipiente agitado estaba relacionado a la velocidad del impulsor N, por la ecuación :

$$\frac{dv}{dy} = K N$$

donde K es un factor de proporcionalidad y N está en revoluciones por segundo.

La ecuación anterior se puede usar para calcular la viscosidad aparente de un líquido no-Newtoniano en un tanque agitado a cualquier velocidad si el valor de K para el sistema se conoce junto con la relación entre la viscosidad aparente y la velocidad de corte para el líquido agitado. La relación entre μ_a y dv/dy se puede determinar experimentalmente con un viscosímetro. Aquí, presentamos en la fig S.e. la gráfica para la CMC al 1% en coordenadas logarítmicas.⁴

Los valores de K para Cada impulsor son:

	K
Paleta	10

VISCOSIDAD APARENTE VS. dV/dY CMC AL 1%

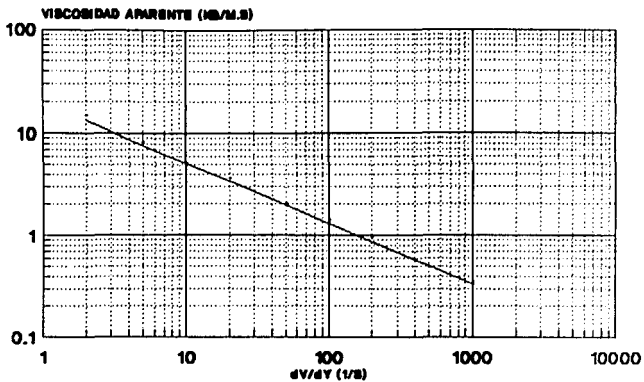


FIG. 5.9

PAG. 113

(Holland and Chapman. Liquid mixing and processing in stirred tanks. Ed Reinhold.)

turbina hojas rectas	11.e
turbina hojas curvas	13
helice	10

En las tablas 5.f. , 5.g. , 5.h. ,5.i. presentamos los resultados finales. La gráfica se ve en la fig. 5.j.

N está en revoluciones por segundo, F en Nw (usando $1 \text{ Kg}_f = 9.81 \text{ Nw}$)
 μ_a en Kg/m s y P en joules/s.

5.3 Algoritmo de calculo.

1) Datos

N (1/s)

F (Nw)

X (para cada impulsor)

2) Cálculo de la velocidad de corte

$$\frac{dv}{dy} = X N$$

3) Usando la gráfica μ_a vs. dv/dy , obtener μ_a .

4) Calcular la potencia

TABLA S.F.

turbina hojas rectas diámetro= 0.105 m densidad de la CMC= 995 kg/m³

N	F	d₁/d₂	v	P	Re	N_p	logRe	logN_p
16.67	8.24	166.70	1.10	250.29	165.73	4.25	5.11	1.45
15.00	6.67	150.00	1.24	182.30	133.02	4.25	4.89	1.45
13.33	5.89	133.30	1.37	143.06	106.69	4.78	4.67	1.56
11.67	3.53	116.70	1.50	75.06	85.15	3.72	4.44	1.31
10.00	2.94	100.00	1.64	53.57	67.01	4.22	4.20	1.44
8.33	1.18	83.30	1.77	17.91	51.61	2.44	3.94	0.89
7.50	0.98	75.00	1.84	13.39	44.79	2.50	3.80	0.92
6.67	0.39	66.70	1.90	4.74	38.44	1.26	3.65	0.23
5.83	2.75	58.30	1.97	29.21	32.45	11.61	3.48	2.45
5.00	1.78	50.00	2.04	16.03	26.93	10.10	3.29	2.31
4.17		41.70	2.10	0.00	21.75	0.00	3.08	-

TABLA 5G

agitador de paleta diámetro= 0.145 m densidad de la CMC=995 kg/m³

N	F	d₁/d₂	v	P	Re	N_p	logRe	logN_p
16.67	10.99	166.70	1.10	333.82	316.06	1.13	5.76	0.12
15.00	9.03	150.00	1.24	248.81	253.68	1.15	5.54	0.14
13.33	6.47	133.30	1.37	157.15	203.46	1.04	5.32	0.04
11.67	5.69	116.70	1.50	120.99	162.39	1.19	5.09	0.18
10.00	5.10	100.00	1.64	82.93	127.80	1.46	4.85	0.38
8.33	4.32	83.30	1.77	65.57	98.42	1.78	4.59	0.58
7.50	0.78	75.00	1.84	10.66	85.41	0.40	4.45	-0.93
6.67	1.37	66.70	1.90	18.65	73.31	0.88	4.29	-0.13
5.83	0.98	58.30	1.97	10.41	61.89	0.82	4.13	-0.19
5.00	0.98	50.00	2.04	8.93	51.35	1.12	3.94	0.11
4.17		41.70	2.10	0.00	41.47	0.00	3.73	-

0.15
995.00

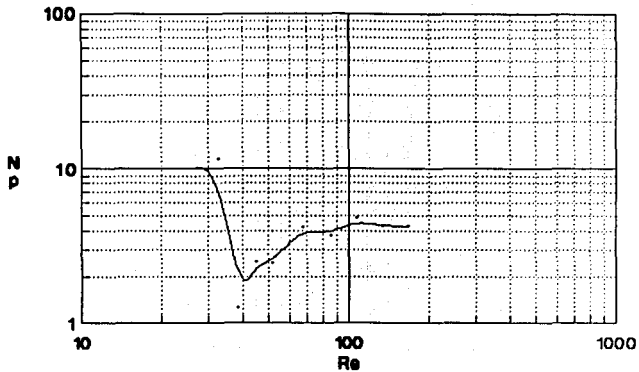
TABLA 5.H
turbina hojas curvas *díametro= 0.11 m* *densidad de la CMC=995kg/m3*

N	F	dv/dy	v	P	Re	Np	logRe	logNp
16.67	5.49	166.70	1.10	166.76	181.89	2.25	5.20	0.81
15.00	4.12	150.00	1.24	112.61	146.00	2.08	4.98	0.73
13.33	3.53	133.30	1.37	85.74	117.09	2.26	4.76	0.81
11.67	2.35	116.70	1.50	49.97	93.46	1.96	4.54	0.67
10.00	1.76	100.00	1.64	32.07	73.55	2.00	4.90	0.69
8.33	1.96	83.30	1.77	29.75	56.64	3.21	4.04	1.17
7.50								
6.67								
5.83								
5.00								
4.17								

TABLA 5.I
agitador de helice *díametro= 0.10 m* *densidad de la CMC=995kg/m3*

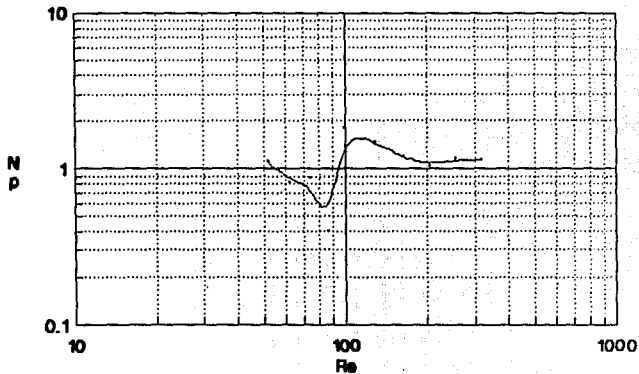
N	F	dv/dy	v	P	Re	Np	logRe	logNp
16.67	1.57	166.70	1.10	47.69	150.33	1.03	5.01	0.03
15.00	1.47	150.00	1.24	40.18	120.66	1.20	4.79	0.18
13.33	0.20	133.30	1.37	4.86	96.77	0.21	4.57	-1.58
11.67	0.59	116.70	1.50	12.55	77.24	0.79	4.35	-0.23
10.00								
8.33								
7.50								
6.67								
5.83								
5.00								
4.17								

**GRAFICA DE TURBINA DE HOJAS RECTAS
CMC AL 1%**



— GRAFICA 5.J.1

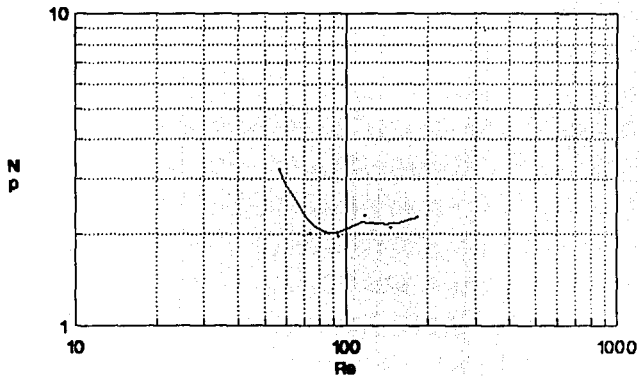
**GRAFICA DE AGITADOR DE PALETA
CMC AL 1%**



— GRAFICA 5.J.2

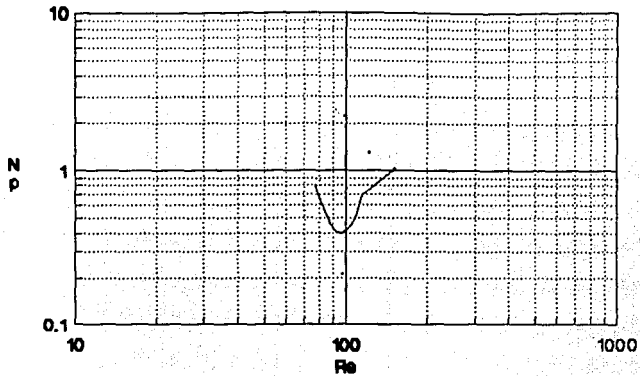
511

GRAFICA DE TURBINA DE HOJAS CURVAS. CMC AL 1%



— FIG. 5.J.3

GRAFICA DE IMPULSOR DE HELICE
CNC AL 1%



— FIG. 5.J.4

0.5

$$P = 2 \pi \cdot F \cdot r \cdot N$$

donde r es la longitud del brazo del freno Prony ($r = 0.29$ m)

5) Obtener la densidad del fluido δ en Kg/m

6) Calcular Re y N_p .

$$Re = \frac{d^2 \cdot N \cdot \delta}{\mu_a}$$

$$N_p = \frac{P}{N^3 \cdot d^5 \cdot \delta}$$

7) Graficar los resultados obtenidos.

5.4 Tratamiento de los datos usando agua.

El otro fluido utilizado fue el agua: en las tablas 5.k, 5.l, 5.m. y 5.n. se presentan los datos obtenidos con los instrumentos.

Las revoluciones las expresamos en revoluciones por segundo y la fuerza en Nw. La viscosidad es constante en este caso.

En las tablas 5.o, 5.p, 5.q. y 5.r. se presentan los resultados. En la fig. 5.s. se presentan las gráficas correspondientes.

TABLAS DE RESULTADOS CON INSTRUMENTOS

USANDO AGUA COMO FLUIDO

TABLA 5K		
IMPULSOR DE PALETA		
N(1/MIN)	(AMP)	F(GR)
1000	5.1-5.2	800
800	4.9-5.0	780
600	4.6-4.9	720
700	4.6-4.7	680
600	4.4-4.5	580
800	4.4	440
450	4.4	380
400	4.4	380
380	4.3-4.4	380
300	4.3-4.4	280
250	4.3-4.4	240

DIAMETRO:0.145

TABLA 5L		
TURBINA DE HOJAS RECTAS		
N(1/MIN)	(AMP)	F(GR)
1000	5.2-5.3	840
800	4.9-5.0	720
600	4.6-4.7	480
780	4.5	500
600	4.3-4.4	300
500	4.3	300
480	4.3-4.4	300
400	4.3	300
380	4.3-4.3	-
300	4.3-4.3	-
280	4.3-4.3	-

DIAMETRO:0.105 M

TABLA 5M		
TURBINA DE HOJAS CURVAS		
N(1/MIN)	I(AMP)	F(GR)
1000	4.9	530
800	4.7	480
600	4.6	380
700	4.4-4.5	280
600	4.4	280
680	4.3-4.3	140
480	4.3-4.3	-
480	4.3-4.3	-
380	4.3-4.3	-
300	4.3-4.3	-
280	4.3-4.3	-

DIAMETRO:0.11

TABLA 5N		
IMPULSOR DE HELICE		
N(1/MIN)	(AMP)	F(GR)
1000	4.4-4.5	180
800	4.4	180
600	4.3-4.4	80
700	4.3	80
680	4.2	-
600	4.2	-
480	4.1-4.2	-
400	4.1-4.2	-
380	4.2	-
300	4.2	-
280	4.2-4.3	-

DIAMETRO:0.10 M

TABLA 5.O.

IMPULSOR DE PALETA diametro=0.145 m						
N(1/S)	F(Nw)	P	RE	NP	LOG RE	LOG NP
16.67	7.85	14.30	348664.58	0.05	5.54	-1.31
15.00	7.06	12.87	313798.12	0.06	5.50	-1.22
13.33	7.06	12.87	278931.67	0.09	5.45	-1.07
11.67	6.47	11.80	244065.21	0.12	5.39	-0.93
10.00	5.10	9.30	209198.75	0.15	5.32	-0.84
8.33	4.32	7.87	174332.29	0.21	5.24	-0.67
7.50	2.75	5.01	156899.06	0.19	5.20	-0.73
6.67	3.73	6.79	139465.83	0.36	5.14	-0.44
5.83	3.53	6.44	122032.60	0.51	5.09	-0.29
5.00	2.55	4.65	104599.38	0.58	5.02	-0.23
4.17	2.35	4.29	87166.15	0.93	4.94	-0.03

TABLA 5.P.

IMPULSOR DE TURBINA DE HOJAS RECTAS diametro=0.105 m						
N(1/S)	F(Nw)	P	RE	NP	LOG RE	LOG NP
16.67	15.02	27.36	182830.52	0.47	5.26	-0.33
15.00	13.05	23.78	164548.12	0.55	5.22	-0.26
13.33	8.22	14.98	146264.96	0.50	5.17	-0.30
11.67	5.36	9.77	127981.80	0.48	5.11	-0.31
10.00	5.36	9.77	109698.75	0.77	5.04	-0.11
8.33	3.58	6.51	91415.59	0.89	4.96	-0.05
7.50	5.36	9.77	82274.06	1.82	4.92	0.26
6.67	3.58	6.51	73132.43	1.73	4.86	0.24
5.83	-	-	63990.83	-	4.81	-
5.00	-	-	54849.38	-	4.74	-
4.17	-	-	45707.74	-	4.66	-

TABLA 5.Q.

IMPULSOR DE TURBINA DE HOJAS CURVAS diametro=0.11 m

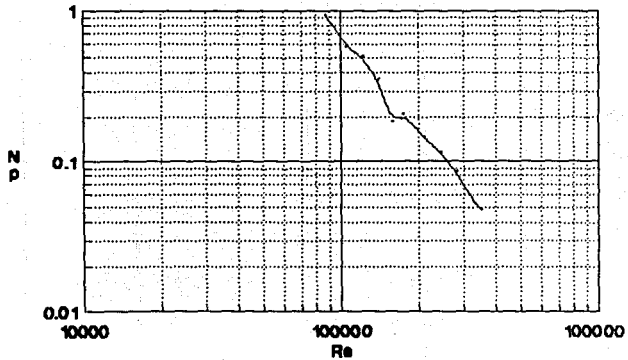
N(1/S)	F(Nw)	P	RE	NP	LOGRE	LOGNP
16.67	5.20	9.47	200657.53	0.13	5.30	-0.89
15.00	4.51	8.22	180592.50	0.15	5.26	-0.82
13.33	3.73	6.79	160526.63	0.18	5.21	-0.75
11.67	2.26	4.11	140480.75	0.16	5.15	-0.79
10.00	2.16	3.93	120395.00	0.25	5.08	-0.61
8.33	1.37	2.60	100329.13	0.27	5.00	-0.57
7.50	-	-	90296.25	-	4.96	-
6.67	-	-	80263.25	-	4.90	-
5.83	-	-	70230.41	-	4.85	-
5.00	-	-	60197.50	-	4.78	-
4.17	-	-	50164.50	-	4.70	-

TABLA 5.R

IMPULSOR DE HELICE diametro=0.10 m

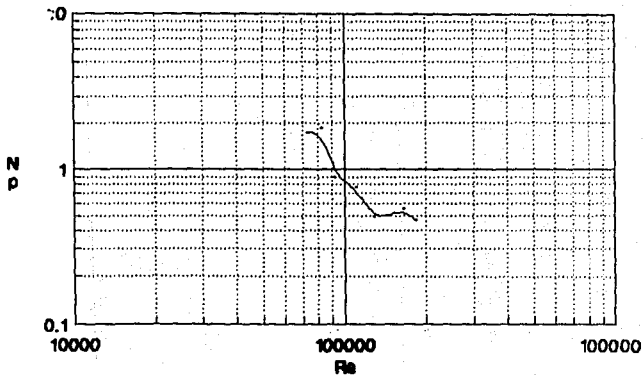
N(1/S)	F(Nw)	P	RE	NP	LOGRE	LOGNP
16.67	1.57	2.66	165832.67	0.06	5.22	-1.21
15.00	1.47	2.68	180682.60	0.08	5.28	-1.10
13.33	0.59	1.07	160526.63	0.05	5.21	-1.34
11.67	0.20	0.36	140480.75	0.02	5.15	-1.65
10.00	-	-	120395.00	-	5.08	-
8.33	-	-	100329.13	-	5.00	-
7.50	-	-	90296.25	-	4.96	-
6.67	-	-	80263.25	-	4.90	-
5.83	-	-	70230.41	-	4.85	-
5.00	-	-	60197.50	-	4.78	-
4.17	-	-	50164.50	-	4.70	-

GRAFICA DE AGITADOR DE PALETA AGUA



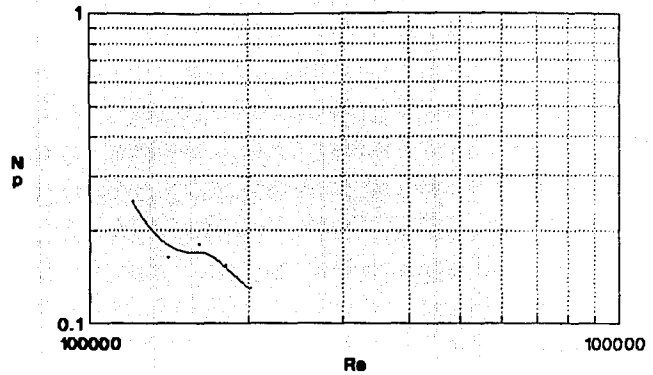
— FIG. 5.S.1

GRAFICA DE TURBINA DE HOJAS RECTAS
AGUA



— FIG. 5.8.2

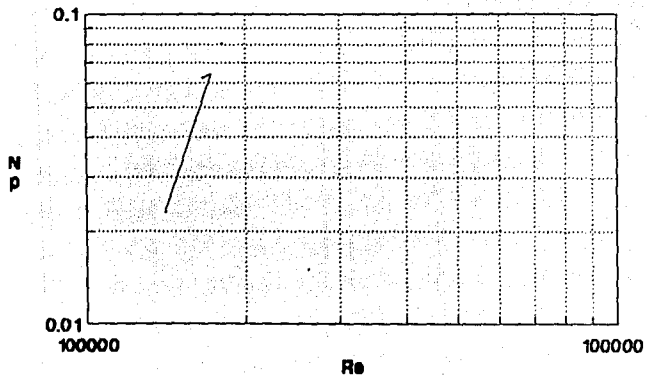
GRAFICA DE TURBINA DE HOJAS CURVAS AGUA



— FIG. 5.9.3

127

GRAFICA DE IMPULSOR DE HELICE AGUA



— FIG. 5.3.4

VI. CONCLUSIONES.

Si analizamos los resultados, tanto en las tablas como las gráficas obtenidas, podremos darnos cuenta que se cumplen los objetivos planteados en un principio.

La relación de las variables en la experimentación con nuestro equipo, siguen un comportamiento similar al reportado en la bibliografía^{4,7,11,12}, como podemos ver en las curvas obtenidas. Debemos mencionar que estas gráficas son representativas para las características geométricas del equipo.

En las gráficas de la CMC al 1% es más clara la tendencia a la forma general de las curvas de potencia. En el agua sólo se alcanza a ver una parte de la línea, esto puede ser al intervalo de velocidades no muy amplio que usamos debido a limitaciones propias del equipo usado.

También apreciamos el funcionamiento del freno Prony y la medida de potencia con éste; en conjunto con el sistema de variación de velocidades con la polea variable, que aunque con ciertas limitaciones, se pueden obtener varias velocidades y seguir el comportamiento para cada impulsor usado en la práctica.

Se recomienda para la optimización de la práctica, el usar un fluido newtoniano de viscosidad relativamente alta y un motor de corriente directa con control de velocidades.

Esto es porque tuvimos ciertos problemas con la CMC al 1% por ser un fluido pseudo-plástico y tener la propiedad de variar su viscosidad con la velocidad del impulsor. Además de que con la polea variable no se tiene un intervalo muy amplio de velocidades y su control no es muy preciso. Sin embargo, sí se logran obtener datos suficientes que nos indican el comportamiento del equipo.

Respecto a la construcción del equipo cabe mencionar que el aprendizaje obtenido fue muy provechoso ya que se diseñaron y construyeron personalmente los impulsores.

NOMENCLATURA.

- A Altura desde el fondo del impulsor.
- A,B Constantes en la función de potencia cuando hay remolino.
- C Constante geométrica del sistema agitado.
- d Diámetro del impulsor.
- Dt Diámetro del tanque.
- F Fuerza medida en el freno Prony.
- Fh Fuerzas hidráulicas sobre la flecha.
- Fm Factor de corrección en el cálculo de N_c .
- Fp Empuje debido a la presión, en la flecha.
- Fr Número de Froude.
- Ft empuje debido al flujo, en la flecha.
- g Constante de la aceleración de la gravedad.
- H Columna hidrodinámica del impulsor.
- h Altura de la hoja del impulsor.
- HL Altura del líquido en el tanque.
- l Ancho del cortacorriente.
- K Constante para el flujo turbulento.
- L Longitud (análisis dimensional)
- L Longitud característica en el Re.
- L Longitud de la flecha.
- M Masa (análisis dimensional)
- M Momento fleccionante.
- N Velocidad rotacional del agitador.

N_c Velocidad crítica de la flecha.
 N_p Número de potencia.
 P Potencia aplicada al fluido.
 U Capacidad de bombeo del impulsor.
 r Longitud del brazo del freno Frenv.
 r Radio de la hoja de la hélice.
 Re Número de Reynolds.
 c Paso de la hélice.
 E_b Espacio entre baleros.
 T Tiempo (análisis dimensional).
 T_c Tensión de corte.
 T_q Torque en la flecha.
 t_s, t_r Corte permisible y resistencia a la tensión de la flecha.
 v Velocidad del fluido.
 w_r, w_c Pesos de la flecha y del impulsor.
 x Exponente del Re .
 y Exponente del Fr .
 dv/dy Velocidad de corte.
 α Ángulo de las hojas en un impulsor de turbina.
 δ Densidad.
 ϕ Ángulo de inclinación de la hoja en la hélice.
 \ddagger Función Potencia.
 μ Viscosidad dinámica.
 π Constante 3.1416.
 τ Torque.

BIBLIOGRAFIA

- 1) BECKWITH - BUCK
MECHANICAL MEASUREMENTS
ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY U.S.A.
PAGS. 322-325
- 2) BROWN
UNIT OPERATIONS
JOHN WILEY & SONS. INC. N.Y.
PAGS. 503-509
- 3) FOUST AND WENZEL
PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS
CECSA MEXICO 1983
PAGS. 523-529
- 4) HOLLAND AND CHAPMAN
LIQUID MIXING AND PROCESSING IN STIRRED TANKS
ED. REINHOLD PUBLISHING N.Y. 1966
PAGS. 1-27 , 29-65
- 5) LUDWIG
APPLIED PROCESS DESIGN FOR CHEMICAL AND PETROCHEMICAL PLANTS
VOL. 1 MIXING
- 6) MC. CABE AND SMITH
UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING
MC. GRAW HILL. INTERNATIONAL STUDENT EDITION
CAP. MIXING PAGES. 280-312
- 7) STERBACEK AND TAUSK
MIXING IN THE CHEMICAL INDUSTRY
ED. PERGAMON PRESS. OXFORD 1965
PAGS. 21-23 , 75-108 , 241-267

ARTICULOS

- 8) GATES, HENLEY AND FENIC
HOW TO SELECT THE OPTIMUM TURBINE
CHEM. ENG. DECEMBER 8 , 1975
- 9) GATES, HICKS AND DICKEY
APPLICATION GUIDELINES FOR TURBINE AGITATORS
CHEM. ENG. DECEMBER 6, 1976
- 10) HILL AND KINIE
HOW TO SPECIFY DRIVE TRAINS FOR TURBINE AGITATORS
CHEM. ENG. AUGUST, 1976

- 11) METZNER AND OTTO
AICHE JOURNAL
VOL. 3 NO. 1
MARZO 1957
- 12) OLDSHUE
FLUID MIXING TECHNOLOGY AND PRACTICE
CHEM. ENG. JUNE 13, 1983
- 13) PARKER
MIXING
CHEM. ENG. JUNE 8, 1964
- 14) PENNEY
GUIDE TO TROUBLE - FREE MIXERS
CHEM. ENG. JUNE 1, 1970
- 15) RAMSEY AND ZOLLER
HOW THE DESIGN OF SHAFTS, SEALS AND IMPELLERS AFFECTS AGITATOR
PERFORMANCE.
CHEM. ENG. AUGUST 30, 1976
- 16) RAUTZEN, CORPSTEIN AND DICKEY
HOW TO USE SCALE-UP METHODS FOR TURBINE AGITATORS
CHEM ENG. OCTOBER 25, 1976
- 17) RUSHTON, COSTICH AND EVERETT
CHEM. NG. PROGRESS VOL. 46 NO. 48 AUGUST 1950
- 18) WEBER
SELECTING PROPELLER MIXERS
CHEM. ENG. SEPTEMBER 2, 1963
- 19) WEBER
SELECTING TURBINE AGITATORS
CHEM. ENG. DECEMBER 7, 1964

ENCICLOPEDIAS

- 20) BLUCHER
ENCICLOPEDIA DE QUIMICA INDUSTRIAL
PARTE 1 AGITACION
- 21) GONSIDINE
CHEMICAL AND PROCESS TECHNOLOGY ENCYCLOPEDIA
MC. GRAW HILL 1975 N.Y.
PARTE 2, PAGES 738-750
- 22) PERRY
CHEMICAL ENGINEERING HANDBOOK