



T
621.
PES

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

“ Análisis Experimental para Determinar las Curvas para el Diseño y Selección de Mezcladores para Refinación de Azúcar en Ingenios ”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Wilson Geovanny Pesántez Molina

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO

2002



AGRADECIMIENTO

A Dios por ayudarme a conseguir tan anhelada meta.

A mi familia y en especial a mi esposa por su apoyo incondicional.

Al Ingenio La Troncal, por el apoyo prestado para el desarrollo de esta tesis.

A la Facultad de Ingeniería Marítima y en especial al Di. José Marín por el apoyo sincero y total entregado.

Al Ing. Manuel Helguero, Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS ABUELOS

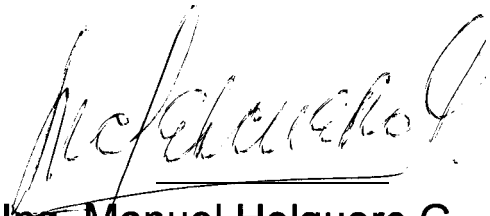
A MI ESPOSA

AMI HIJO

TRIBUNAL DE GRADO



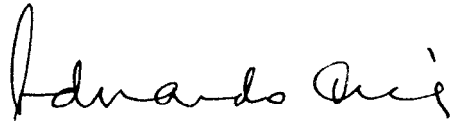
Ing. Mario Patiño A.
SUBDECANO FIMCP



Ing. Manuel Helguero G.
DIRECTOR DE-TESIS



Ing. Edmundo Villacís M.
VOCAL

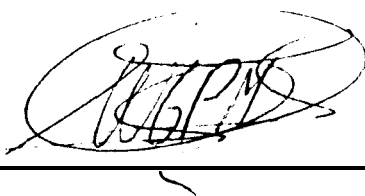


Ing. Eduardo Orcés P.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'WGP/M', enclosed within a large, loopy oval scribble.

WILSON GEOVANNY PESÁNTEZ MOLINA

RESUMEN

El presente trabajo consiste en obtener curvas para **diseñar** y seleccionar mezcladores a usarse en la refinación de azúcar. Estas curvas indican el consumo de energía de diversos agitadores expresado por el parámetro de potencia y del Número de Reynolds. Para obtener estas curvas realice un análisis experimental con un modelo, el mismo que tendrá diferentes parámetros.

El propósito de construir este modelo es el de obtener las condiciones más eficientes de funcionamiento, y poder proyectarlo a uno de uso industrial geoméricamente semejante al modelo.

3.2 Selección del modelo a Construirse para el Análisis Experimental.....	38
---	----

CAPITULO 4: ANALISIS EXPERIMENTAL.....40

4.1 Establecimiento de los parámetros Variables para determinar las Curvas.....	41
4.2 Diseño del Equipo Experimental.....	42
4.3 Construcción del Equipo.....	43
4.4 Determinar las curvas de los resultados Experimentales.....	46

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

HP	Caballos de Poder (Horse Power)
Kw	Mil watt
Kg / m ³	Kilogramo por metro cúbico
Nm . .	Newton metro
M	Masa
m	Metro
pH	Concentración de iones hidrógeno en solución
rpm	Revoluciones por minuto
rps	Revoluciones por segundo
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotores (Society of Automotive Engineers)
T	Tiempo
v	Voltio
w	Watt



SIMBOLOGIA

α	Constante de proporcionalidad
Da	Diámetro del rodete
Dt	Diámetro del depósito
E	Altura del agitador sobre el fondo
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura del nivel de líquido
J	Anchura de las placas deflectoras
K	Constante de Calibración
L	Longitud pala turbina
n	Número revoluciones motor
Nfr	Número de Froude
NP	Número de Potencia
Nre	Número de Reynold
P	Potencia
S1, s2,...sn	Factores de Forma
T	Torque
W	Ancho palas turbina
ρ	Densidad del Líquido
μ	Viscosidad del líquido
ψ	Función
Ω	Velocidad angular
ϕ	Medida del amplificador
°C	Grados centígrados

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1 Hélice marina de tres palas.....	17
Figura 2.2 Rodetes de mezcla.....	20
Figura 2.3 Formación de vórtice y tipo de flujo en un tanque agitado.....	22
Figura 2.4 Agitador no centrado.....	24
Figura 2.5 Rodete con entrada lateral.....	25
Figura 2.6 Modelo de flujo en un tanque con placas deflectoras.....	26
Figura 2.7 Turbinas múltiples en todo el tanque.....	28
Figura 2.8 Tubos de aspiración en un tanque con placas deflectoras.....	29
Figura 4.1 Equipo experimental.....	45
Figura 4.2 Amplificador RD3000.....	46
Figura 4.3 Curva de calibración.....	48
Figura 4.4 Variador de frecuencia.....	49
Figura 4.5 Vórtice en tanque sin placas deflectoras.....	51
Figura 4.6 N_p vs N_{re} , hélice paso cuadrado, tres palas.....	57
Figura 4.7 N_p vs N_{re} , Turbina de cuatro palas planas.....	58
Figura 4.8 N_p vs N_{re} , Hélice de paso cuadrado, 4 palas.....	59
Figura 4.9 N_p vs N_{re} , Hélice de paso 2, tres palas.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I	Proporciones del Equipo de agitación..	42
Tabla II	Valores de Torque en voltios y en Nm..	47
Tabla III	Resultado hélice paso cuadrado, tres palas con deflectores	52
Tabla IV	Resultado hélice paso cuadrado, tres palas sin deflectores	53
Tabla V	Resultado, turbina cuatro palas planas con deflectores	54
Tabla VI	Resultado turbina de cuatro palas planas sin deflectores	54
Tabla VII	Resultado hélice paso cuadrado, 4 palas con deflectores	55
Tabla VIII	Resultado hélice paso cuadrado, 4 palas sin deflectores	55
Tabla IX	Resultado hélice de paso 2, tres palas con deflectores	56
Tabla X	Resultado hélice de paso 2, tres palas sin deflectores	56

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Equipo de Agitación.

INTRODUCCION

El presente trabajo consiste en ayudar a solucionar un problema muy común en la industria azucarera, que es en el sistema de agitación, ya que no se han hecho pruebas experimentales para obtener el punto óptimo de máxima eficiencia como es el de obtener el número de revoluciones adecuado para cierto proceso de agitación y su correspondiente consumo de energía.

Es por eso que esta tesis tiene como finalidad encontrar el punto de máxima eficiencia, y a su vez poder obtener las curvas de consumo de energía del agitador en función del Número de Reynolds, y poder así diseñar y seleccionar un equipo de agitación.

La idea de realizar esta tesis empezó cuando realice mis prácticas vacacionales en el ingenio La Troncal y observe que existían problemas en la agitación, ya que los mezcladores actuales no agitan correctamente, y además el problema del daño de motores, o que los mismos **están** sobredimensionados ocasionando pérdidas económicas.

Para realizar la tesis tuve que construir un mezclador modelo, que consiste en un tanque donde se va a mezclar, con un motor conectado a una polea, y por medio de una banda transmite la velocidad a otra polea del mismo

diámetro, la misma que hace girar el árbol en cuyo extremo se encuentra el agitador experimentado.

El tanque esta provisto de unos **deflectores** removibles, los mismos que sirven para regular el flujo. El motor **está** conectado a un variador de frecuencia que hace posible variar el número de revoluciones del motor.

La prueba consiste en observar y analizar el número de revoluciones adecuado para la agitación, y su respectivo consumo de energía. Para construir las curvas necesito variar el Número de Reynolds y medir la energía consumida por el agitador.

CAPITULO 1

1. DISOLUCION DE AZUCAR.

La caña de azúcar ha sido sin lugar a dudas uno de los productos de mayor importancia para el desarrollo comercial en el continente americano y europeo. El azúcar se consume en todo el mundo, puesto que es una de las principales fuentes de calorías en las dietas de todos los países.

El azúcar puede obtenerse principalmente a partir de la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Para su obtención se requiere de un largo proceso, desde que la semilla de caña germina hasta que el azúcar se comercializa nacional e internacionalmente. A continuación se detalla el proceso en la fábrica.

LABORES DE CAMPO Y COSECHA

El proceso productivo se inicia con la preparación del terreno, etapa previa de siembra de la caña. Una vez la planta madura entre los 12 y 14 meses, las personas encargadas del área de cosecha se disponen a

cortarla y recogerla a través de alce mecánico y llevarla hacia los patios de caña de los ingenios.

PATIOS DE CAÑA

La **caña** que llega del campo se muestra para determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas. Luego se pesa en básculas y se conduce a los patios donde se almacena temporalmente o se dispone directamente en las mesas de lavado de caña para dirigirla a una banda conductora que alimenta las picadoras.

PICADO DE CAÑA

Las picadoras son unos ejes colocados sobre los conductores accionados por turbinas, provistos de cuchillas giratorias que cortan los tallos y los convierten en astillas, dándoles un tamaño uniforme para facilitar así la **extracción** del jugo en los molinos.

MOLIENDA

La **caña** preparada por las picadoras llega a un tándem de molinos, constituido cada uno de ellos por tres ~~o cuatro~~ **mazas** metálicas y mediante presión extrae el jugo de la caña. Cada molino está equipado con una turbina de alta presión. En el recorrido de la caña por el molino

se agrega agua, generalmente caliente, para extraer al máximo la sacarosa que contienen el material fibroso. Este proceso de extracción es llamado maceración. El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a una bagacera para que seque y luego se va a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos.

PESADO DE JUGOS.

El jugo diluido que se extrae de la molienda se pesa en básculas con celdas de carga para saber la cantidad de jugo sacarosa que entra en la fábrica.

CLARIFICACION

El jugo obtenido en la etapa de molienda es de carácter ácido, pH aproximado: 5,2, éste se trata con lechada de cal, la cual eleva el pH con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas de sacarosa. La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas o inorgánicas que vienen en el jugo y para aumentar o acelerar su poder coagulante, se eleva la temperatura del jugo encalado mediante un sistema de tubos calentadores. La clarificación del jugo por sedimentación; los sólidos no azúcares se precipitan en forma de lodo llamado cachaza y el jugo claro queda en la parte superior del tanque. Este jugo sobrante se envía antes

de ser desechada al campo para el mejoramiento de los suelos pobres en materia orgánica.

EVAPORACION

Aquí se comienza a evaporar el agua del jugo. El jugo claro que posee casi la mitad composición del jugo crudo extraído, con la excepción de las impurezas eliminadas en la cachaza, se recibe en los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 10 y 12 % y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración aproximada de sólidos solubles del 55 al 60 %.

Este proceso se da en evaporadores de múltiples efectos al vacío, que consisten en una solución de celdas de ebullición dispuestas en serie. El jugo entra primero en el pre evaporador y se calienta hasta el punto de ebullición. Al comenzar el proceso de ebullición, se generan vapores los cuales sirven para calentar el jugo en el siguiente efecto, logrando así al menor punto de ebullición en cada evaporador. En el proceso de evaporación se obtiene el jarabe o meladura. La meladura es purificada en un clarificador. La operación es similar a la anterior para clarificar el jugo filtrado.

CRISTALIZACION

La cristalización se realiza en los tachos, que son recipientes al vacío de un solo efecto. El material resultante que contiene líquido, miel, y cristales o azúcar, se denomina masa cocida. El trabajo de cristalización se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos para lograr la mayor concentración de sacarosa.

CENTRIFUGACION.

La masa pasa por las centrifugas, máquinas agrícolas en las cuales los cristales se separaran del licor madre por medio de una masa centrífuga aplicada a tambores rotatorios que contienen mallas interiores. La miel que sale de las centrifugas se bombea a tanques de almacenamiento para luego someterla a superiores evaporaciones y cristalizaciones en los tachos. Al cabo de tres cristalizaciones sucesivas se obtiene miel final que se retira del proceso y se comercializa como materia prima par la elaboración de alcoholes.

SECADO

El azúcar húmedo se transporta por elevadores y bandas para alimentar las secadoras que son elevadores rotatorios en los cuales el azúcar se colocan en contacto con el aire caliente que entra en contracorriente. El azúcar debe tener baja humedad, aproximadamente 0.05 %, para evitar los terrones.

ENFRIAMIENTO

El azúcar se seca con temperatura cercana a 60° C, se pasa por los enfriadores rotatorios inclinados que llevan el aire frío en contracorriente, en donde se disminuye su temperatura hasta aproximadamente 40-45°C para conducir al envase.

ENVASE

El azúcar seca y fría se empaca en sacos de diferentes pesos y presentaciones dependiendo del mercado y se despacha a la bodega de producto terminado para su posterior venta y comercio.

En el mercado local existen algunos tipos de azúcar de caña. Por ejemplo, azúcar crudo, rojo, rubio, sulfatado, blanco y refinado. El nombre que se le da a cada tipo de azúcar depende de la coloración que tenga; dicha coloración está en función, principalmente, del porcentaje de sacarosa que se haya logrado extraer de la caña.

Así se tiene que cuando el azúcar tiene entre 96 y 98 grados de sacarosa se lo denomina crudo. A medida que la proporción de sacarosa aumenta, el azúcar toma el nombre de rojo o rubio, acercándose cada vez hacia el color blanco.

Cuando el azúcar ha llegado a los 99.5 grados de sacarosa se denomina azúcar blanco o sulfatado, cuando el azúcar ha alcanzado la pureza mayor posible, es decir, entre 99.8 y 99.9 de polarización (sacarosa), se denomina azúcar refinado.

El azúcar puede purificarse de varias maneras: una de ellas es mediante sulfatación, o uso de dióxido de azufre cuando aún se encuentra en estado de jugo. Esta sustancia se hace pasar a través del jugo de caña aún sin clarificar que cae por una torre provista de rejillas de madera. El dióxido de azufre (SO_2) oxida el jugo decolorándolo, facilitando la separación de impurezas a través de los pasos convencionales posteriores y de esta manera se van destruyendo las bacterias. El producto de este proceso se llama azúcar sulfatado o blanco directo. Parte esencial de su fabricación está en el secado, que se efectúa en inmensos tambores giratorios. La pureza de su sacarosa se acerca al 99.8 % y la presencia de microorganismos o bacterias, que se mide constantemente es igual a cero.

El azúcar puede refinarse en vez de blanquearse, se llama entonces azúcar de alta pureza porque sobrepasa el 99.9 % de sacarosa. Refinar azúcar es como fabricar dos veces el azúcar.

En nuestro país, más del 85 % de la producción de azúcar consiste en azúcar sulfatado, el resto es producción de azúcar refino (10 %) y azúcar

cruda (5 %), que se elabora exclusivamente para aprovechar el sistema de cuotas de exportación que otorga Estados Unidos al país.

1.1 Conceptos generales

Area de disolución.- el azúcar blanco obtenida por centrifugación cae al vibrador desde donde es conducida hacia el predisolutor, en donde se agrega un volumen continuo de agua caliente a la cual se le inyecta vapor para un mejor calentamiento y por ende una completa disolución del azúcar, la solución azucarada (licor derretido) pasa al disolutor en donde se le da una agitación continua la cual asegura su total disolución. El licor derretido obtenido en el disolutor es bombeado hacia los tanques de tratamiento del licor derretido.

Area de tratamiento de licor derretido.- el licor derretido es enviado hacia el tanque pulmón en donde se agita y almacena por un corto periodo de tiempo. Del tanque pulmón pasa al tanque de primer tratamiento en donde se dosifica una solución de carbón activado para la decoloración del licor derretido. Del tanque de tratamiento 1 pasa al tanque de tratado 2 y luego al tanque de tratado 3 sucesivamente con agitación continua de cada tanque, luego pasa al tanque de retorno en donde se dosifica una solución de ayuda filtrante y luego se bombea hacia los filtros.

CAPITULO 2

2. AGITACION

La agitación en su aspecto tecnológico consiste en producir movimientos irregulares, turbulentos, en un fluido por medio de dispositivos mecánicos que actúan sobre el mismo. La agitación encuentra amplia aplicación industrial para acelerar ciertas operaciones como la extracción, el mezclado, la absorción, la transferencia calorífica y algunas reacciones químicas. Aunque la agitación puede estudiarse al tratar cada una de las operaciones a la que se aplica, por ser común a todas ellas puede considerarse, en si misma, como una operación básica.

2.1 Objetivos y Requisitos.

Muchas son las exigencias que deben satisfacer los sistemas de agitación, según sean los resultados deseados. Existen cuatro tipo de operaciones generales que pueden distinguirse por sus correspondientes objetivos, y cada uno de ellos necesita un tipo distinto de agitación.

Transferencia de materia en sistemas heteroáneas

Esta categoría de operaciones incluye las reacciones químicas, la disolución de sólidos, la extracción, la absorción y la adsorción. Las exigencias que debe satisfacer el agitador son dobles: debe dispersar o suspender la fase discontinua en la totalidad de la continua: y debe provocar intensa turbulencia entre las gotitas, burbujas o partículas suspendidas, para favorecer la transferencia de materia entre las fases. Para estas finalidades se necesita un agitador que produzca velocidades de flujo suficientemente elevadas que impidan la sedimentación de las partículas o la estratificación de las fases. No deben existir espacios muertos en el sistema de agitación, porque producirían la concentración local de una de las fases. La intensidad de la turbulencia debe ser uniforme en todo el recipiente, si se quiere que la transferencia de materia tenga lugar en todos los puntos. Las hélices pequeñas que operan a grandes velocidades producen grandes velocidades de corriente, pero concentran la zona de turbulencia en las proximidades del rodete: por otra parte los rodetes grandes que funcionan a pequeñas velocidades producen turbulencia uniforme en todo el tanque, si bien las velocidades que determinan son demasiado bajas para lograr una buena suspensión o dispersión de las fases. En consecuencia, para

esta operación se recomienda rodetes de tamaño mediano, que funcione a velocidades medias.

Mezcla de líquidos.

Los líquidos pueden mezclarse de modo continuo haciéndolos pasar por una bomba centrífuga. En el mezclado discontinuo, por lotes como el que puede tener lugar en un gran recipiente, el agitador debe mover grandes corrientes líquidas hacia todos los puntos del sistema.

En tal caso, una vez que las cantidades globales de los líquidos se han mezclado groseramente, el mezclado definitivo depende de la intensidad de la turbulencia en los distintos puntos del sistema, es decir, de la difusión molecular. La parte más importante de esta operación reside en que haya corrientes intensas que lleguen a todos los puntos, porque la turbulencia local no es eficaz.

Por lo tanto, para mezclar dos o más fluidos es preferible emplear grandes rodets que funcionen a escasas velocidades y no rodets pequeños muy revolucionados.

Formación de emulsiones

Algunas operaciones, como la emulsión de dos líquidos no miscibles, requiere una turbulencia de gran intensidad en algún punto del

sistema. En general, las cosas suelen disponerse de manera que los líquidos estén bastante bien mezclados antes de llegar al punto de gran turbulencia. Si la operación se conduce en forma discontinua, es preciso que, gradualmente, todo el contenido del depósito pase por la zona de gran turbulencia. Para esta operación son especialmente recomendables los rodetes pequeños, a grandes velocidades, bien ajustados y con pequeños espacios libres entre el rodete y las piezas fijas de sus alrededores.

Transferencia calorífica y uniformidad de temperatura.

La transmisión calorífica suele ir acompañada de transferencia de materia, especialmente en el caso de reacciones químicas. En consecuencia, los tanques de reacción suelen estar provistos de serpentines de calefacción (o de refrigeración) o de dobles paredes y es necesario que se produzcan velocidades adecuadas a lo largo de las superficies cambiadoras para favorecer la transmisión calorífica.

En estos casos, el dispositivo de agitación debe estar situado cerca de los serpentines o de las camisas de calefacción. Además, el rodete debe producir corrientes de gran volumen, de manera que la totalidad de lo contenido del recipiente se ponga fácilmente en contacto, o llegue a la proximidad de las superficies transmisoras de calor, única manera de obtener temperaturas uniformes en todo el

sistema. Para estas operaciones son apropiadas los agitadores grandes a pequeñas velocidades. En algunos pocos casos, en los que conviene evitar sobrecalentamientos de determinadas áreas de la superficie de transmisión, el agitador debe rozar la superficie, o, si se emplean rodets pequeños de gran velocidad, éstos deben crear gran turbulencia en la vecindad inmediata de dicha superficie.

Al considerar los requisitos reseñados, hay que tener presente que con los líquidos viscosos la zona de gran turbulencia que rodea al agitador es de pequeño volumen. Por lo tanto, cuando se trabaja con líquidos de gran viscosidad se deben emplear grandes rodets para que el flujo alcance a todos los puntos del sistema.

2.2 Tipos de Aparatos Agitadores

Los dispositivos mecánicos empleados para provocar agitación son extremadamente variados; desde el batidor de huevos **hogareño** hasta el velocísimo molino helicoidal. A **continuación** se pasa revista a los tipos de agitadores más importantes, actualmente en uso.

Agitadores rotativos

Consisten en general, en un órgano giratorio, al que llamaremos rodete, que entra en movimiento impulsado por un eje. Los agitadores de rodets se dividen en dos clases: los que generan

corrientes paralelas al eje del rodete, y aquellos que generan corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros reciben el nombre de rodetes de flujo axial, y los segundos rodetes de flujo radial.

Los tres principales tipos de rodetes son: **hélices**, palas y turbinas. Cada uno de ellos comprende muchas variantes. Otros rodetes especiales resultan también útiles en situaciones especiales, pero los tres tipos principales mencionados resuelven tal vez el 95 por 1000 de todos los problemas de agitación de líquidos.

Hélice.- Una hélice es un rodete con flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor; entre 1150 y 1750 r.p.m.; las grandes giran entre 400 y 800 r.p.m. Las corrientes de flujo que salen del rodete continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan en el fondo o las paredes del tanque.

La columna, altamente turbulenta, de remolinos de líquido que abandona el rodete, arrastra al moverse líquido estancado, probablemente en mayor proporción que lo haría una columna equivalente procedente de una boquilla estacionaria. Las placas de un rodete cortan o cizallan vigorosamente el líquido.

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

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

La relación entre esta distancia y el diámetro de la hélice se conoce como paso de hélice. Una hélice de paso de 1.0 se dice que tiene paso cuadrado.

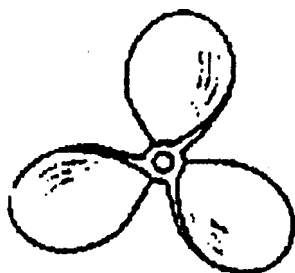


Figura. 2.1. Hélice marina de tres palas

En la figura 2.1 se representa una hélice típica. Las más frecuentes son las hélices marinas de tres palas con paso cuadrado; para fines especiales se utilizan hélices de cuatro palas, ruedas dentadas y otros diseños.

Las hélices raramente superan las 18 pulgadas de diámetro, con independencia del tamaño del tanque. En tanques profundos pueden instalarse dos o más hélices sobre el mismo eje, generalmente dirigiendo el líquido en la misma dirección. A veces, dos hélices operan en direcciones opuestas, o en **push-pull**, con el fin de crear una zona de turbulencia especialmente elevada entre ellas.

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

En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras, en un mismo eje. En algunos diseños las placas se adaptan a la forma de la pared del tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura. Una pala de este tipo recibe el nombre de agitador de Ancora.



Las áncoras resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, tal como un tanque encamisado, pero en cambio son malos mezcladores. Casi siempre operan conjuntamente con un agitador de alta velocidad que generalmente gira en sentido contrario.

Los agitadores industriales de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 r.p.m. La longitud total de un rodete de palas está típicamente comprendido entre el 50 y el 80 por 100 del diámetro interior del tanque. La anchura de las palas es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en tanque sin placas **deflectoras**, las cuales son necesarias para velocidades más elevadas, pues de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con velocidad alta, pero con poca mezcla.

Turbinas. - En la figura 2.2 a, b y c se representa algunos de los numerosos diseños de turbina. La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con numerosas palas cortas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el tanque.

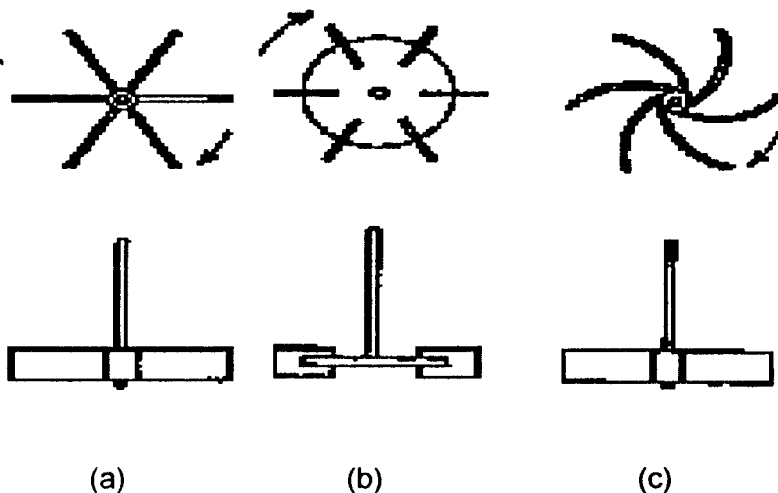


Figura 2.2. Rodetes de mezcla: (a) turbina abierta de palas rectas; (b) turbina de disco con palas; (c) turbina abierta de palas curvas.

Las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que el de las palas, variando entre el 30 y el 50 por 100 del diámetro del tanque.

Las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del rodete hay una zona de corrientes rápidas, elevada turbulencia e intensa cizalladura.

Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y

remolinos, que deben ser destruidos por placas deflectoras o por un anillo difusor para que la agitación sea más eficaz.

Modelos de flujo en tanques agitados. - El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado depende del tipo de rodete, de las características del fluido y del tamaño y proporciones del tanque, placas deflectoras y agitador. La velocidad de fluido en un punto del tanque tiene tres componentes, y el tipo de flujo global de un punto a otro.

La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del rodete. La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje. La tercera es tangencial o rotacional y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el rodete.

Para el caso corriente de un eje vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal y la componente longitudinal es vertical. Las componentes radial y longitudinal son útiles por cuánto dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla.

Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de velocidad es generalmente perjudicial para la mezcla.

El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y, según se representa en la figura 2.3, crea un vórtice en la superficie del líquido que, debido a la circulación en flujo laminar, da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles de sustancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro.

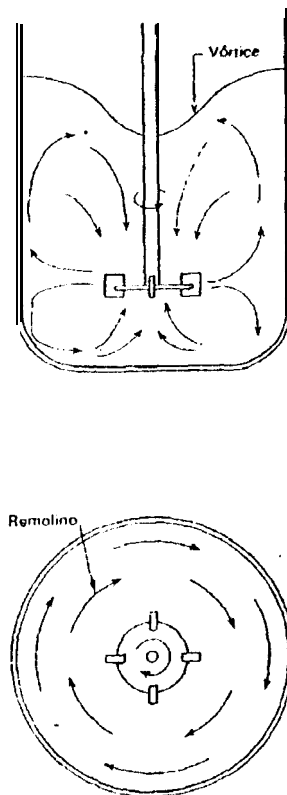


Figura 2.3 Formación de vórtice y tipo de flujo en un tanque agitado.

Si están presentes partículas sólidas, las corrientes circulatorias tienden a lanzar las partículas contra la pared del tanque, debida a la fuerza centrífuga desde donde caen acumulándose en la parte central del fondo del tanque. Por consiguiente en vez de mezcla se produce la acción contraria, o sea, concentración.

En el flujo circulatorio el líquido fluye según la dirección del movimiento de las palas del rodete y, por consiguiente, disminuye la velocidad relativa que existe entre las palas y el líquido, con lo cuál se limita la potencia que puede ser absorbida por el líquido.

En un tanque sin placas deflectoras, el flujo circulatorio es inducido por todos los tipos de rodetes, tanto si el flujo es axial como radial. En efecto, si los remolinos son intensos, el tipo de flujo dentro del tanque es esencialmente el mismo independientemente del diseño del rodete.

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

Prevención de flujo circulatorio. - El flujo circulatorio y los remolinos pueden evitarse por uno de los tres métodos siguientes. En tanques

de pequeño tamaño se dispone el rodete separado del centro del tanque, según indica la figura 2.4, el eje se mueve así alejado de la línea que pasa por el centro del tanque, inclinándose después según un plano perpendicular a la dirección del movimiento.

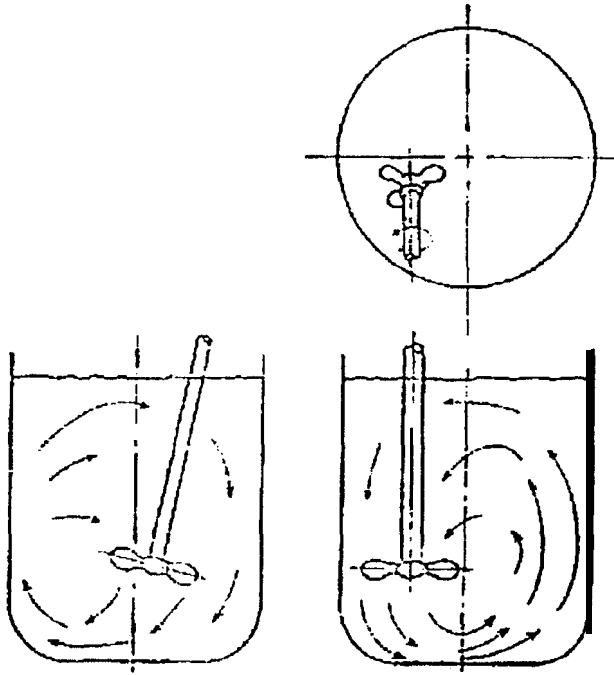


Figura 2.4. Agitador no centrado.

En los tanques de mayor tamaño, el agitador puede montarse en la parte lateral del tanque, con el eje en un plano horizontal, pero formando un cierto ángulo con el radio, según se indica en la figura 2.5.

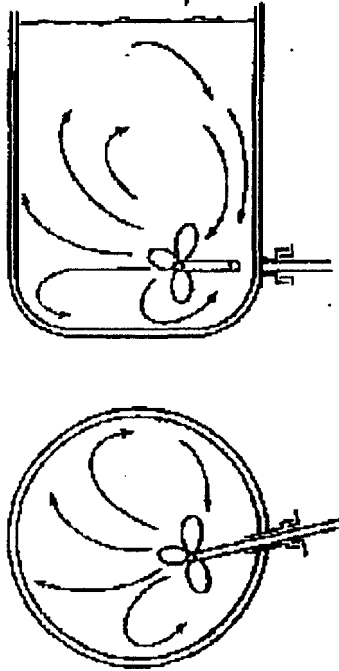


Figura 2.5. Rodete con entrada lateral.

En los tanques de gran tamaño, con agitadores verticales, el método más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectoras, que impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal. Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En la figura 2.6 se representa placas deflectoras de este tipo, y el tipo de flujo a que dan lugar.

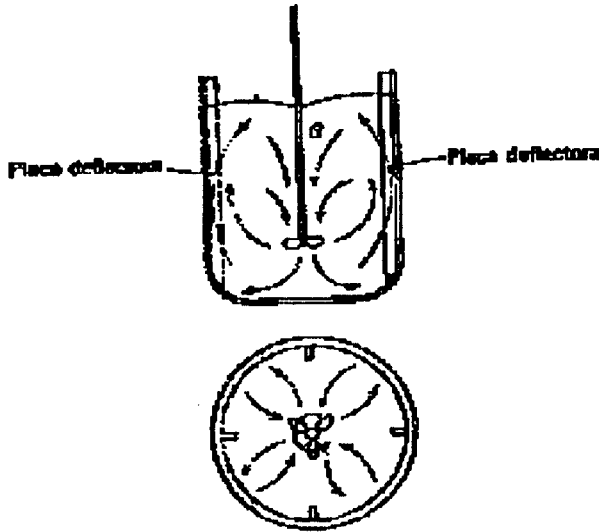


Figura 2.6. Modelo de flujo en un tanque con placas deflectoras.

Excepto en tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la **formación de vórtice**. Para agitadores de turbina, la anchura de la placa **deflectora** no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque; para agitadores de hélice, basta con un octavo. Cuando el rodete entra al tanque lateralmente, está inclinado, o desplazado del centro, no son necesarias placas deflectoras.

Una vez que el flujo circulatorio ha cesado, el modelo específico de flujo en el tanque depende del tipo de rodete. Los agitadores de hélice generalmente dirigen el líquido hacia el fondo del tanque, donde la corriente se esparce radialmente en todas las direcciones hacia la pared, asciende a lo largo de la pared y retorna desde la

parte superior hasta el punto de succión del rodete. Este modelo de flujo se representa en la figura 2.6. Se utilizan agitadores de hélice cuando se desean fuertes corrientes verticales, por ejemplo, cuando han de mantenerse partículas sólidas en suspensión. No se utilizan ordinariamente cuando la viscosidad del líquido es superior a aproximadamente 50p . Con el fin de obtener un fuerte flujo axial para la suspensión de sólidos también se utilizan turbinas con una inclinación de las placas de 45°

Los agitadores de palas y las turbinas de placas planas producen un buen flujo radial en el plano del rodete, dividiendo el flujo hacia la pared para formar dos modelos distintos de circulación, tal como se muestra en la figura 2.3. una parte fluye hacia abajo a lo largo de la pared y retorna hacia el centro del rodete desde el fondo, mientras que otra asciende hacia la superficie y retorna al rodete desde la parte superior. En un tanque sin placas deflectoras hay un fuerte flujo tangencial así como de formación de vórtices para moderadas velocidades de giro del agitador. Cuando se instalan placas deflectoras, aumenta el flujo vertical y se produce una mezcla más rápida del líquido.

En un tanque cilíndrico vertical la profundidad del líquido deberá ser igual, o algo mayor, que el diámetro del tanque.

Si se desea una mayor profundidad de líquido se pueden instalar dos o más rodetes sobre el mismo eje, actuando cada rodete como un mezclador separado.

Para cada rodete se genera dos corrientes de circulación, tal como se muestra en la figura 2.7. el rodete inferior, bien de tipo turbina o de hélice, se instala a aproximadamente un diámetro del rodete por encima del fondo del tanque.

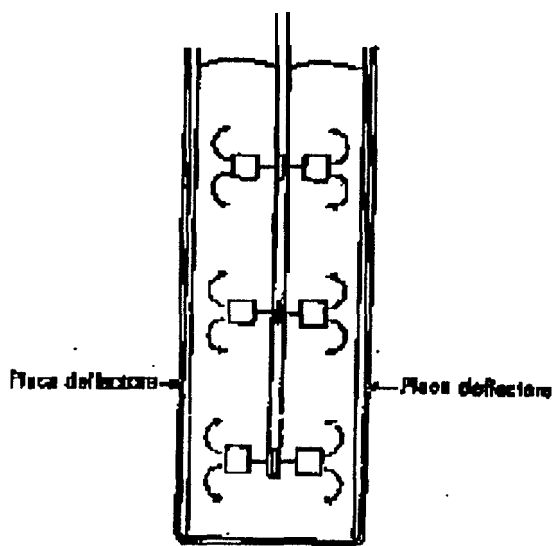


Figura 2.7. Turbinas múltiples en todo el tanque.

Tubos de aspiración.- El flujo de retorno a un rodete de cualquier tipo llega al rodete desde todas las direcciones, ya que no está bajo el control de superficies sólidas. Por ejemplo, el flujo hacia y desde un

rodete es esencialmente similar al flujo de aire hacia y desde un ventilador que opera en una habitación.

En la mayor parte de las aplicaciones de los mezcladores de rodete esto no constituye una limitación, pero cuando es preciso controlar la dirección y velocidad de flujo en la succión del rodete, se utilizan tubos de aspiración como los que se muestran en la figura 2.8.

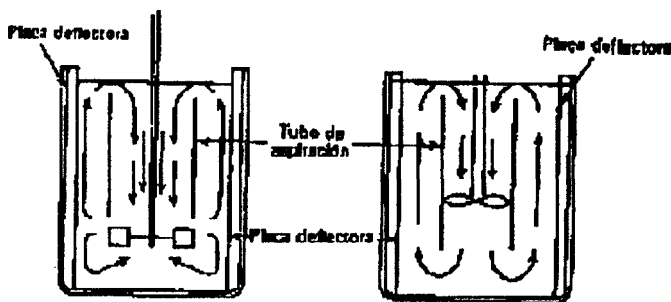


Figura 2.8. Tubos de aspiración en un tanque con placas deflectoras.

Estos dispositivos pueden resultar útiles cuando se desea un elevado esfuerzo constante en el rodete, tal como ocurre en la preparación de ciertas emulsiones, o cuando es preciso dispersar en el líquido partículas sólidas que tienden a flotar sobre la superficie del líquido en el tanque.

Los tubos de aspiración para rodetes se montan alrededor de los mismos, mientras que en el caso de turbinas se montan

inmediatamente encima, tal como se muestra en la figura 2.8. los tubos de aspiración aumentan la fricción del fluido en el sistema y, para una potencia de entrada dada, reducen la velocidad de flujo, de forma que no se usan si no son absolutamente necesarios.

Sistemas de circulación mediante bombas

Los tanques pueden llevar anexas bombas que aspiren el fluido en un punto determinado y lo devuelvan al recipiente en otro punto, provocando así una circulación forzada.

Las bombas centrífugas constituyen, por sí mismas, excelentes aparatos agitadores continuos: si la bomba se alimenta con dos líquidos distintos, saldrán de la misma perfectamente mezclados, puesto que la gran velocidad a que giran los rodets centrífugos provocan una gran turbulencia en la caja en que se mueven.

Paletas pendulares

Pueden conseguirse la agitación en tanques rectangulares mediante el movimiento de vaivén de paletas adecuadas.

Tanques o pailas rotatorios

Consisten en pailas o tanques abiertos que giran con la materia que contiene, mientras que unas paletas o pantallas permanecen

estacionarias. El empleo de estos aparatos está indicado en el caso de tener que mezclar productos muy pastosos.

Elevadores v agitadores por aire

Si se hace pasar aire hacia arriba en un tubo de gran diámetro, que abierto por sus dos extremos está sumergido en el líquido, se provoca una circulación a causa de la menor densidad de la mezcla aire-líquido del tubo. También se puede proceder a inyectar aire por el fondo perforado (pequeños agujeros) de un tanque, o por el extremo de un tubo, con lo que se provocan disturbios irregulares a causa de las burbujas de aire que ascienden a la superficie del líquido.

Molino coloidal, homogenizador-mezclador de chorro

En el molino coloidal la alimentación llega a una separación minúscula que hay entre el rotor de gran velocidad y la caja que lo alberga: se provocan así potentes esfuerzos de cizalla y se consiguen mezclados muy perfectos. Las holguras son del orden de 0.025 milímetros. El homogenizador comprime los fluidos a elevada presión dejándoles escapar radialmente por un disco plano que va sujeto con un muelle al extremo del tubo de descarga, produciéndose

así grandes esfuerzos cortantes que emulsionan fácilmente a los líquidos.

Los chorros mezcladores son útiles para mezclar dos corrientes líquidas: la acción mezcladora se debe a que dos boquillas que forman ángulo agudo descargan sus chorros en el centro de una tubería encargada de conducir después el producto mezclado: en el punto en que inciden ambos chorros se produce una gran turbulencia que determina la mezcla efectiva.

CAPITULO 3

3. INTRODUCCION AL CALCULO DE AGITADORES.

Para el cálculo de agitadores es corriente ver en la bibliografía y especialmente en los manuales y formularios, fórmulas que dan la potencia necesaria para accionar un agitador, dadas las dimensiones de este, su tipo y las características del sistema que se trata de agitar.

Evidentemente, estas fórmulas no tocan sino una parte del problema (el consumo de potencia) que se plantea a quien tiene que elegir y proyectar un agitador para un fin determinado. En general el problema es más complicado, como vamos a ver.

En líneas generales, los factores que condicionan las características de un agitador son:

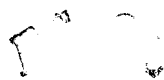
1. Sistema agitador (rodete-recipiente)
2. Sistema agitado.
3. Efecto que se pretende obtener con el agitador
4. Potencia puesta en juego para accionar el agitador

Todos estos factores están relacionados entre sí; por ejemplo, si a un rodete se le modifica el número, la longitud, la anchura o la inclinación de sus paletas, tendremos que variar la potencia instalada para el accionamiento si queremos mantener el mismo efecto del agitador sobre el mismo sistema y que ese efecto se produzca en el mismo tiempo. Los ejemplos podrían multiplicarse.

La existencia de tanta variable se comprende que haya dificultado la resolución del problema e incluso que condicione esta solución, al tiempo que explica la divergencia que se observa entre los resultados que se obtienen al aplicar fórmulas encontradas empíricamente por autores diversos, adecuadas para el caso particular estudiado, pero no pueden ser generalizadas. Tales fórmulas pueden servir para comparar dos agitadores, pero no, en general, para prever el trabajo de cualquier otro tipo no sometido a comparación.

Se puede atacar el problema acudiendo a la teoría de la semejanza, que basada en el análisis dimensional, y por comparación de cocientes adimensionales que agrupan a varias variables, permiten reducir el número de estas.

3.1 Aplicación de la teoría de semejanza al Cálculo de Agitadores



Establecer un criterio de semejanza implica la existencia de dos cosas por lo menos que comparar. En nuestro caso, la conocida se llama modelo; la otra, aquella cuyo funcionamiento queremos prever en la operación fabril, se llama prototipo. Además, necesitamos establecer un criterio comparativo de los resultados obtenidos (parámetros de comparación) que, es distinto según se trate de una agitación simple, una agitación con transporte de calor, una reacción, etc.

Comparación respecto a la potencia necesaria (agitación simple). -

en este caso, la semejanza de agitación entre el modelo y el prototipo queda reducida a la existencia de semejanza geométrica, semejanza dinámica, e identidad de naturaleza entre uno y otro.

La primera es bien conocida; la segunda existirá cuando en dos sistemas geoméricamente semejantes la relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas de viscosidad (o sea, el Número de Reynolds) que actúan sobre todos y cada uno de los puntos correspondientes de ambos sistemas, sean iguales.

Reunidas las variables que pueden afectar al sistema, resultan ser las siguientes:

Potencia para accionar el agitador, P

Velocidad de rotación del rodete, n

Diámetro del rodete, D_a .

Anchura de las paletas, J .

Altura del agitador sobre el fondo, E

Densidad del líquido, ρ

Viscosidad del líquido, μ .

Altura del nivel del líquido, H

Diámetro del depósito, D_t

Aceleración de la gravedad, g

Las distintas medidas lineales pueden convertirse todas en relaciones adimensionales, llamadas factores de forma, dividiendo cada uno de los términos por uno de ellos que se toma como base.

El diámetro del rodete D_a es una elección adecuada para esta medida de base, y los factores de forma se calculan dividiendo cada una de las restantes medida por el valor de D_a o D_t . Supongamos que los factores de forma, así definidos se representan por $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$.

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

$$P = \psi (n, D_a, \mu, g, \rho)$$

Aplicando el método de análisis dimensional que se presenta en el Apéndice A, se obtiene

$$\frac{P}{n^3 D_a^5 \rho} = \psi \left(\frac{n D_a^2 \rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g} \right)$$

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

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

El primer grupo adimensional $P / n^3 D_a^5 \rho$, es el número de potencia N_p

El segundo, $n D_a^2 \rho / \mu$, es el número de Reynolds N_{Re} ; El tercero, $n^2 D_a / g$, es el número de Froude N_{Fr} .

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

$$N_{Re} = \frac{nD_a^2 \rho}{\mu} = \frac{(nD_a) D_a \rho}{\mu} = \frac{u_2 D_a \rho}{\mu}$$

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

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

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

3.2 Selección del modelo a construirse para el Análisis Experimental

En la refinación de azúcar en los ingenios, se utiliza los agitadores de tipo rotativos, ya que son los adecuados para el tratamiento del licor derretido, el mismo que consiste en un tanque cilíndrico en donde se

colocará el eje en cuyo extremo estará el rodete, el tanque estará provisto de placas deflectoras, el eje será accionado por un motor eléctrico acoplado a un sistema de banda polea, la parte superior del recipiente estará abierta al aire.

Los rodetes a utilizar son: hélice de 3 - 4 palas y turbina de 4 paletas.

La densidad del líquido es de $981,95 \text{ Kg / m}^3$ y su viscosidad es de $1,4$ poise a $37,8^\circ\text{C}$.

CAPITULO 4

4. ANALISIS EXPERIMENTAL

El experimento se realiza en un tanque abierto al aire, equipado con 4 placas deflectoras móviles y espaciadas 90° .

La agitación es provista por un motor eléctrico, conectado a una transmisión polea-banda. La velocidad angular es medida por un tacómetro.

Para realizar el experimento es necesario usar un medidor de torque; el mismo que consta de un transmisor y de un amplificador.

El eje del rodete es equipado con dos strain gages. Los strain gages son conectados por medio de alambres al transmisor, el cual envía la señal al amplificador en donde se visualiza el esfuerzo medido por los strain gages. El torque es proporcional a esta medición.

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

4.1 Establecimiento de los parámetros variables para determinar las curvas.

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

Rodetes:

Hélice, paso cuadrado, tres palas

Hélice paso de 2, tres palas

Hélice, paso cuadrado, 4 palas

Turbina, 4 palas planas

Placas deflectoras:

Con cuatro placas deflectoras

Sin placas deflectoras

Número de revoluciones:

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

4.2 Diseño del Equipo Experimental.

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

..

Para realizar este experimento, escojo las siguientes proporciones:

TABLA I.
PROPORCIONES DEL EQUIPO DE AGITACIÓN

Tipo de rodete	D_t / D_a	H / D_t	E / D_a	J / D	t	L / D_a	W / D_a
Hélice, paso cuadrado, 3 palas	2.4	1	1	0.083			
Hélice, paso cuadrado, 4 palas	2.4	1	1	0.083			
Hélice Paso 2, tres palas	3	1	1.25	0.083			
Turbina, cuatro palas planas	2.4	1	1	0.083	0.25	0.2	

El Diámetro del tanque es de 0.3048 m.

El Diámetro de la hélice de paso 2, tres palas es de 0.1016 y de los demás rodetes es de 0.127 m.

La altura del nivel del líquido es 0.3048 m.

El número de placas deflectoras es de cuatro y su ancho de 0.0254 m.

Para la turbina el ancho de las palas es 0.032m y la longitud es 0.0254 m.

El sistema de transmisión banda polea se diseña de acuerdo al espacio existente entre el motor y el árbol, el diámetro de las poleas es el mismo ya que se necesita una transmisión con una relación 1 a 1.

El sistema de transmisión banda polea es un conjunto que puede desmontarse fácilmente del tanque de agitación, el árbol esta sostenido por dos chumaceras sujetas a una carcasa, la polea del árbol está conectada a la polea del motor por una banda tipo A26, y el motor esta asentado en una base que a su vez se sujeta a la carcasa a través de un sistema de bisagra que sirve de templador de la banda.

El motor es de 1700 r.p.m. de 0.37 Kw, y el árbol es de 19 mm de diámetro, es de acero de transmisión SAE 1018.

El tanque de agitación tiene una altura de 1.25 Dt, en la parte inferior de la pared tiene una válvula para evacuar el líquido, y está sostenido por cuatro pilares.

4.3 Construcción del equipo.

La construcción del equipo la realicé en el taller mecánico del Ingenio La Troncal, lo primero que hice fue conseguir las hélices, para lo cual tuve que realizar un modelo en madera y luego proceder a su

fundición, estas hélices son muy difíciles de encontrar en el mercado debido a su pequeño diámetro, se las puede importar pero su costo es muy elevado.

Luego procedo a construir la turbina de 4 palas planas, una vez contruidos los rodetes procedo a manufacturar el conjunto de transmisión de la siguiente manera:

- Construcción del árbol
 - Construcción de las poleas
 - Construcción de la carcasa
 - Construcción de las bisagras
 - Construcción de la base del motor

Una vez realizada la construcción de estas partes se procede a armar el conjunto con las respectivas chumaceras, el motor y la banda.

Luego se realiza el rolado del tanque, las placas deflectoras, los pilares y la colocación de la válvula. En la parte superior del tanque existe una base donde se asienta el conjunto anteriormente construido.

Obteniéndose de esta manera el equipo listo para proceder a la experimentación tal como muestra la figura 4.1

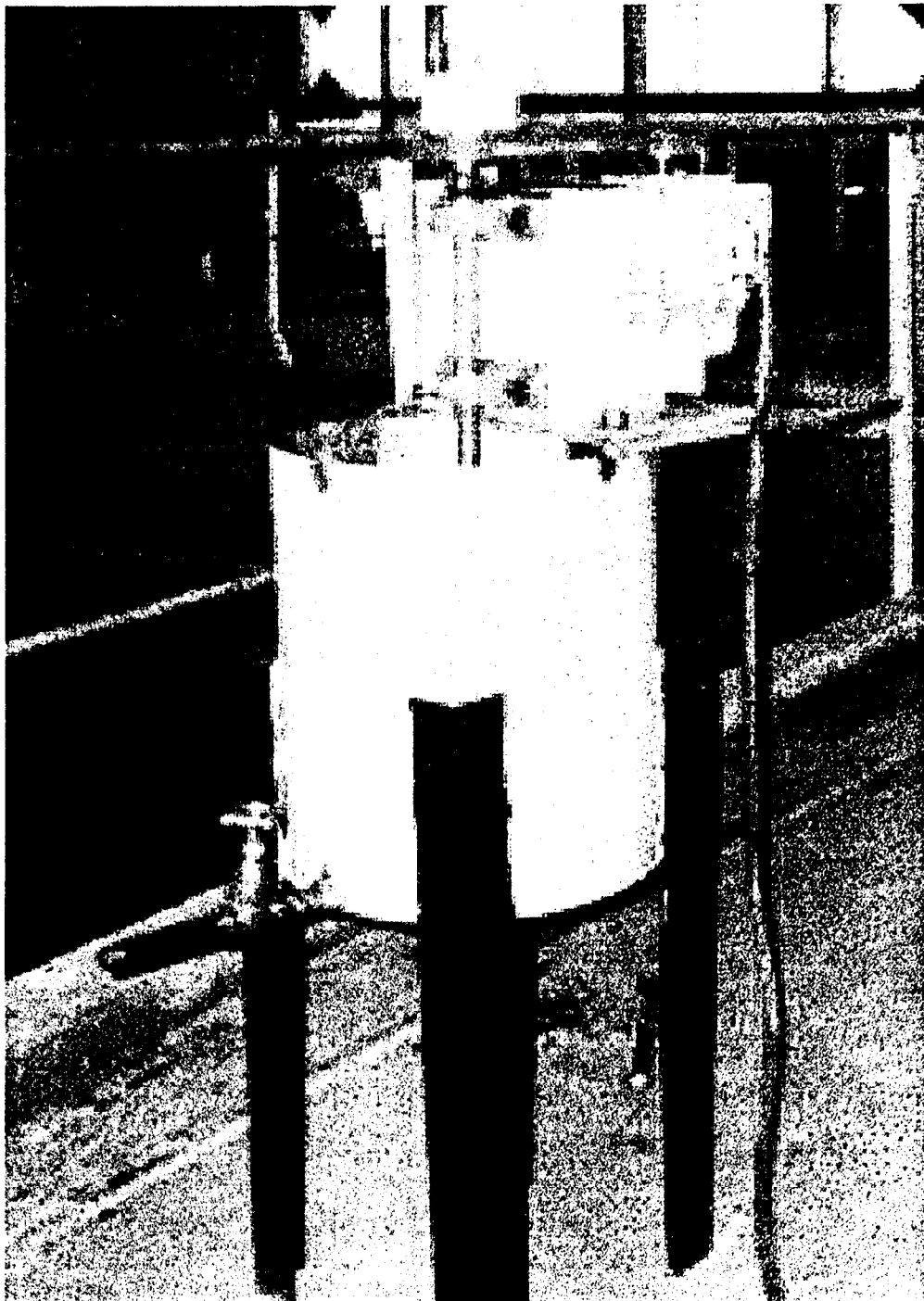


Figura 4. 1. Equipo Experimental

4.4 Determinar las curvas de los resultados experimentales

Para determinar las curvas experimentales procedí de la siguiente manera:

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

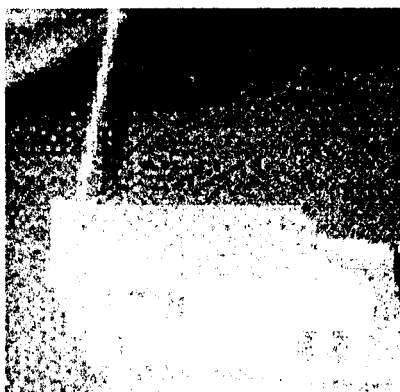


Figura 4.2. Amplificador RD3000

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

Para la calibración del equipo es necesario llevar el eje a una prensa y someterlo a torsión por medio de una palanca cuyo extremo se colocan pesos, de esta manera aplico una fuerza que multiplicada por la longitud de la palanca me da el torque y veo la señal de salida de los strain gages en el amplificador. obteniendo para un determinado torque su respectiva medición en voltios, estos valores están en la tabla II y están graficados en la figura 4.3, y aplicando estimación lineal obtengo la respectiva constante de calibración cuyo valor es de $K = 41$, esta calibración la realizo con la máxima ganancia del amplificador. Una vez realizado esto se coloca el eje en su respectivo lugar de trabajo.

TABLA II.

Valores de torque en voltios y Nm.

T(voltios)	T(Nm)
0.018	0.54
0.028	1.07
0.04	1.61
0.052	2.15
0.065	2.69
0.077	3.23

CURVA DE CALIBRACIÓN

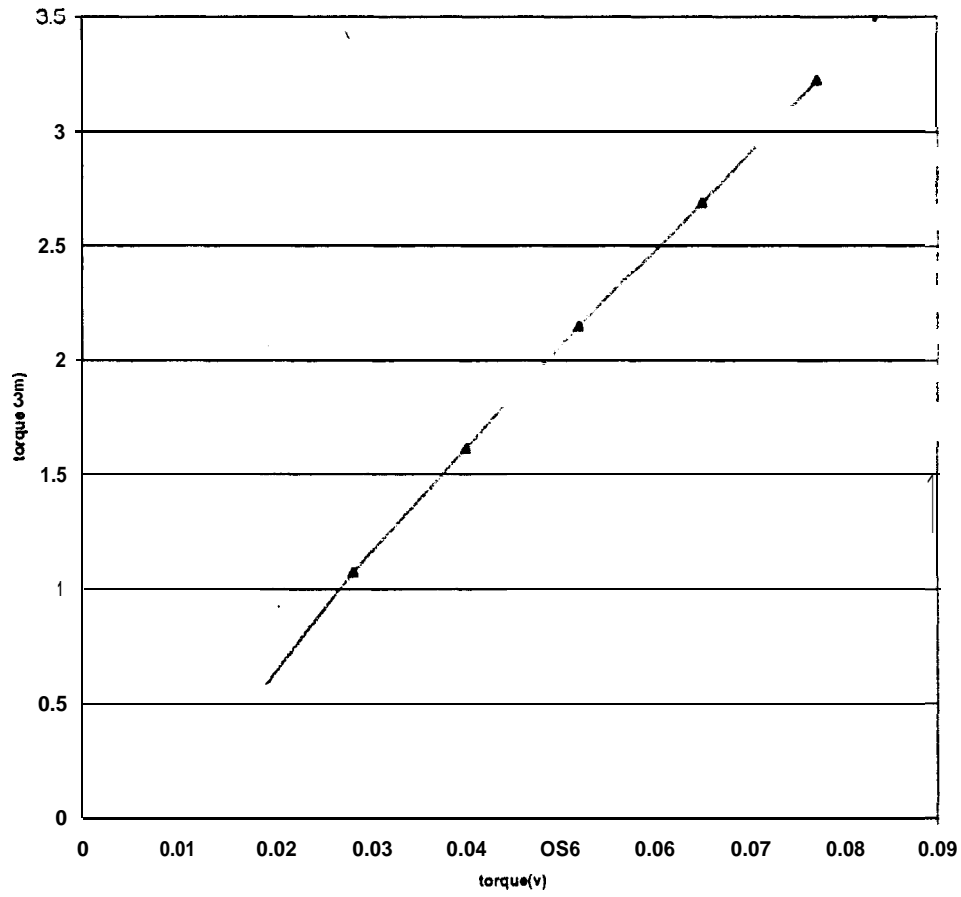


Figura 4.3 Curva de calibración

Conexión del variador de frecuencia al motor.- El variador de frecuencia como su nombre lo indica es un equipo que se conecta al motor para variar su frecuencia y a su vez obtener diferentes números de revoluciones y así poder variar el Número de Reynolds. El variador utilizado se muestra en la figura 4.4.

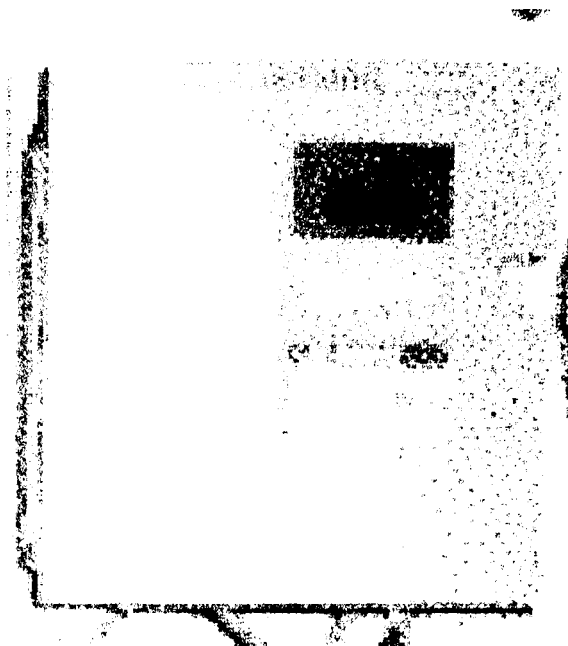


Figura 4.4.Variador de frecuencia

Pruebas experimentales.- Estas pruebas las realice en un tanque con y si placas deflectoras, variando las revoluciones por minuto de cien en cien, y para los rodets de la tabla I.

La prueba consiste en poder determinar el torque y con las r.p.m. determinar la potencia consumida por el agitador y así poder realizar la gráfica de N_p vs N_{re} .

Las pruebas primero las realice en el tanque con placas deflectoras, con todo los rodets y luego sin placas deflectoras.

Con el tacómetro en el eje se lee el número de r.p.m., se ajusta a las revoluciones que deseo variando la frecuencia del motor; luego anoto algunas mediciones que se leen en el amplificador, puesto que el rango de la medición es variable.

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

En la figura 4.5 se ve el vórtice que se forma cuando el tanque trabaja sin placas deflectoras, este remolino es el 'que se evita al colocar los deflectores en el tanque, que para este caso son cuatro de $1 / 12$ del diámetro del tanque.

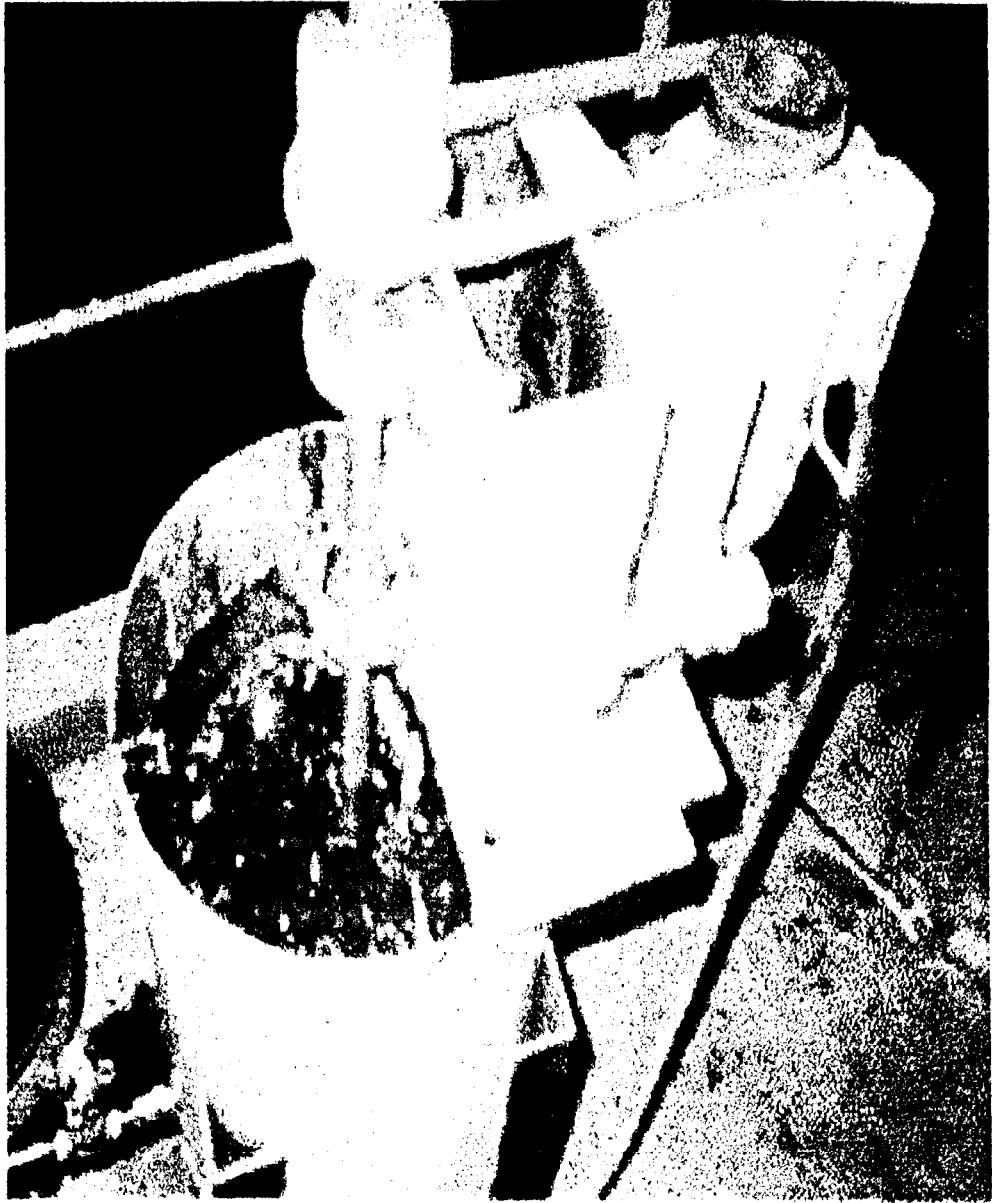


Figura 4.5. Vórtice en tanque sin placas deflectoras.

Resultados experimentales.- Estos resultados se muestran en las tablas III,IV, V, VI, VII, VIII, IX y X. Las gráficas de N_p vs N_{re} se muestran en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9.

TABLA III.

Resultado hélice de paso cuadrado de tres palas con placas deflectoras.

$n(\text{rpm})$	$n(\text{rps})$	$T(\text{v})$	$T(\text{Nm})$	$P(\text{w})$	N_{re}	N_p
100	1.67	0.003	0.12	1.3	188.6	8.6
200	3.33	0.009	0.37	7.7	377.1	6.4
300	5.00	0.016	0.66	20.6	565.7	5.1
400	6.67	0.025	1.03	42.9	754.2	4.5
500	8.33	0.032	1.31	68.7	942.8	3.7
600	10.00	0.040	1.64	103.0	1131.3	3.2
700	11.67	0.051	2.09	153.3	1319.9	3.0
800	13.33	0.060	2.46	206.1	1508.4	2.7
900	15.00	0.067	2.75	258.9	1697.0	2.4
1000	16.67	0.071	2.91	304.8	1885.5	2.0

TABLA IV.

Resultado hélice de paso cuadrado de tres palas sin placas deflectoras

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

TABLA V

Resultado experimental turbina de cuatro palas planas con deflectores

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

TABLA VI

Resultado experimental turbina de cuatro palas planas sin deflectores

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	Nre	Np
100	1.67	0.005	0.21	2.1	188.6	14
200	3.33	0.014	0.57	12.0	377.1	10
300	5	0.023	0.94	29.6	565.7	7.3
400	6.67	0.035	1.44	60.1	754.2	6.3
500	8.33	0.048	1.97	103.0	942.8	5.5
600	10	0.060	2.46	154.5	1131.3	4.8
700	11.7	0.074	3.03	222.3	1319.9	4.3

TABLA VII

Resultado experimental hélice de paso cuadrado, cuatro palas, con deflectores

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

TABLA VIII

Resultado experimental, hélice de paso cuadrado, cuatro palas sin deflectores

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

TABLA IX

Resultado experimental hélice de paso 2, tres palas con placas deflectoras

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	Nre	Np
200	3.33	0.004	0.16	3.4	241.3	8.7
300	5	0.007	0.29	9.0	362.0	6.8
400	6.67	0.011	0.45	18.9	482.7	6
500	8.33	0.016	0.66	34.3	603.3	5.6
600	10	0.020	0.82	51.5	724.0	4.8
700	11.7	0.026	1.07	78.1	844.7	4.6
800	13.3	0.032	1.31	109.9	965.3	4.4
900	15	0.039	1.6	150.6	1086.0	4.2
1000	16.7	0.044	1.8	188.8	1206.7	3.8
1500	25	0.080	3.28	515.0	1810.0	3.1

TABLA X

Resultado experimenta, hélice de paso 2, tres palas sin deflectores

n(rpm)	n(rps)	T(v)	T(Nm)	P(w)	Nre	Np
200	3.33	0.004	0.16	3.4	241.3	8.7
300	5	0.007	0.29	9.0	362.0	6.8
400	6.67	0.011	0.45	18.9	482.7	6
500	8.33	0.015	0.62	32.2	603.3	5.2
600	10	0.019	0.78	48.9	724.0	4.6
700	11.7	0.024	0.98	72.1	844.7	4.3
800	13.3	0.028	1.15	96.2	965.3	3.8
900	15	0.033	1.35	127.5	1086.0	3.6
1000	16.7	0.038	1.56	163.2	1206.7	3.3
1500	25	0.07	2.87	450.8	1810.0	2.7

hélice de paso cuadrado, 3 palas

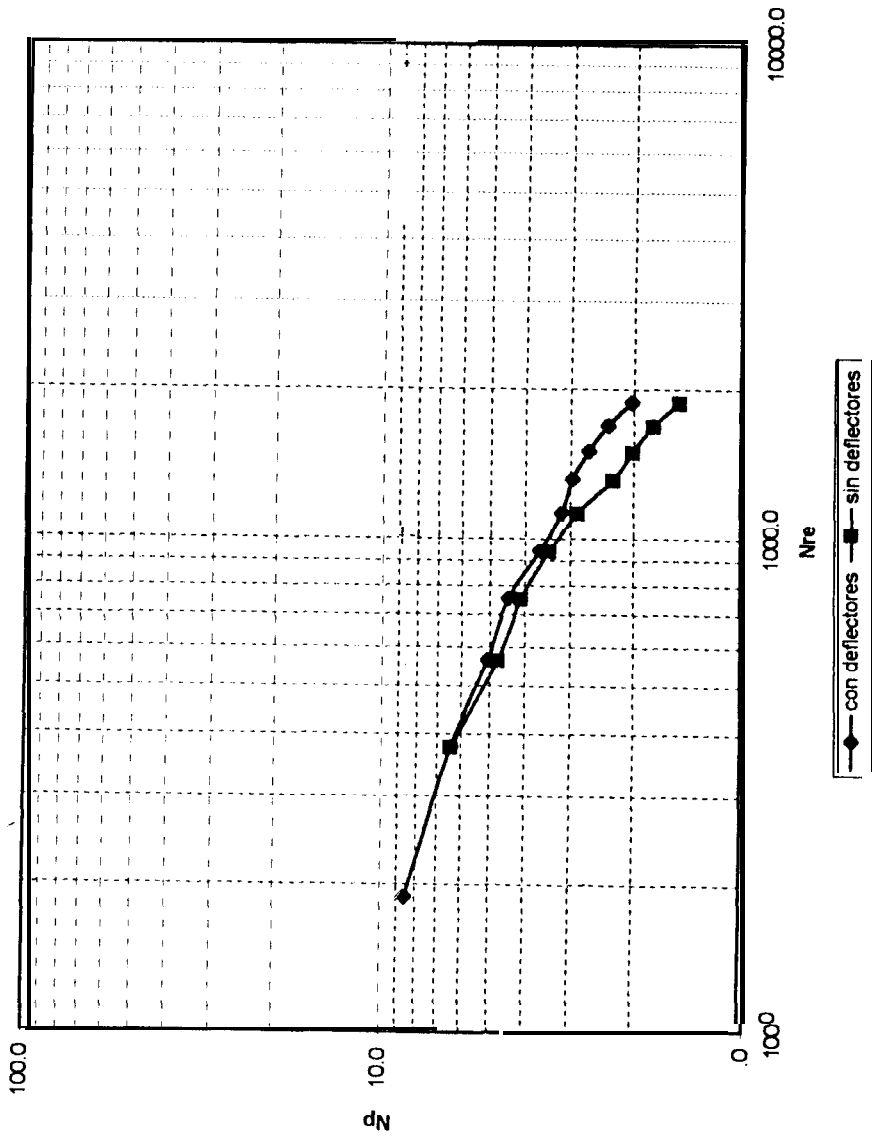


Figura 4.6 N_p vs. N_{re} , hélice paso cuadrado, tres palas.

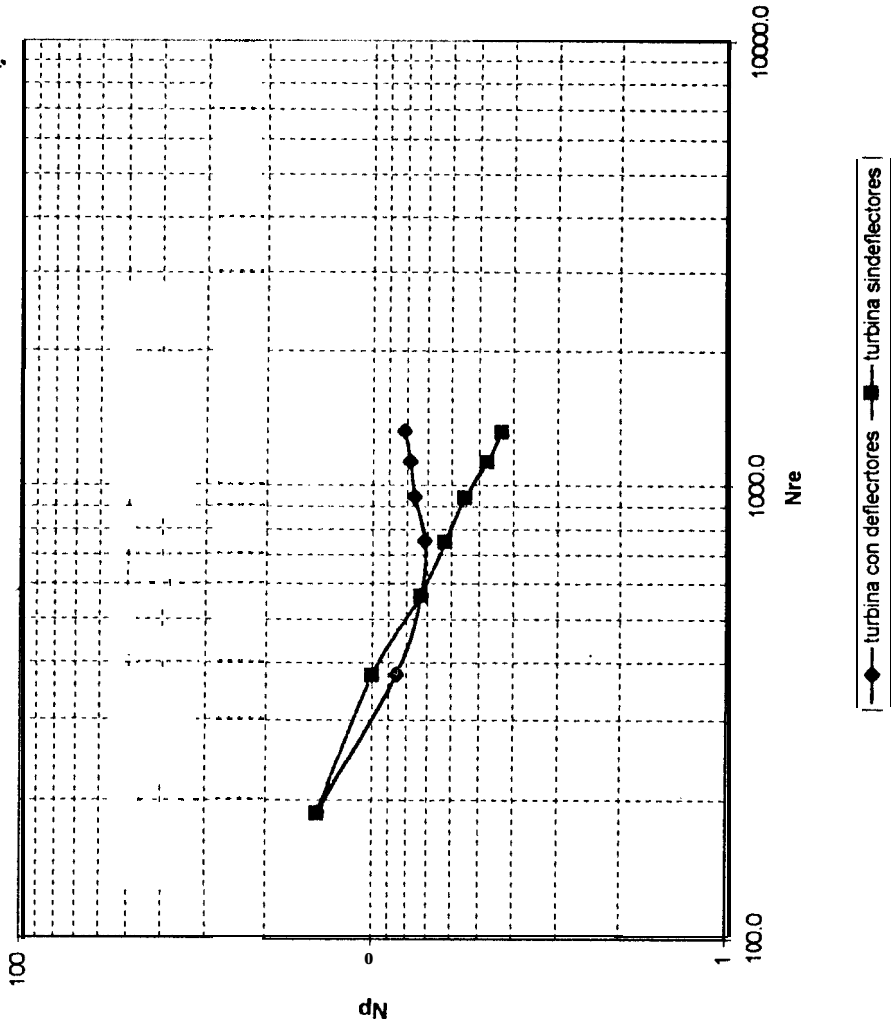


Figura 4.7 N_p vs N_{re} , Turbina de cuatro palas planas

hélice de 4 palas

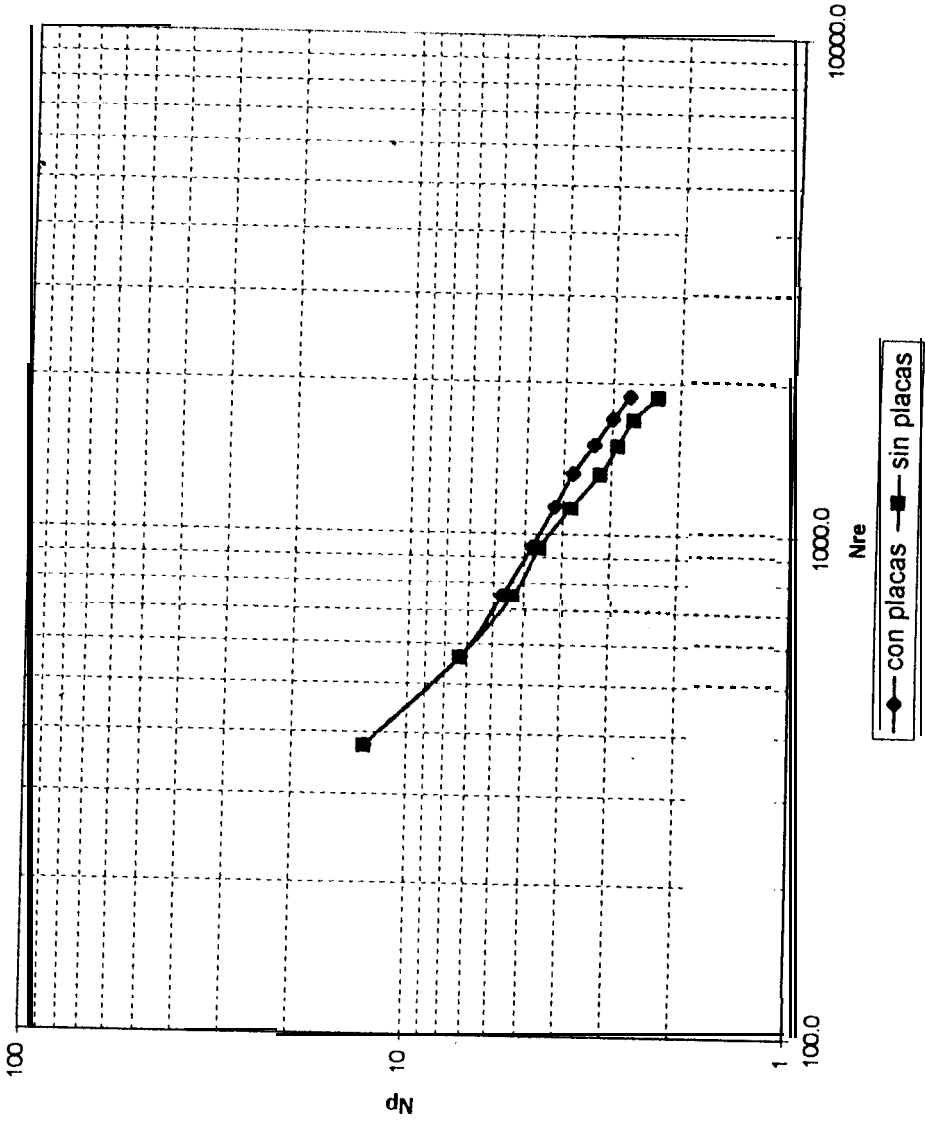


Figura 4.8. N_p vs N_{re} , Hélice de paso cuadrado, 4 palas

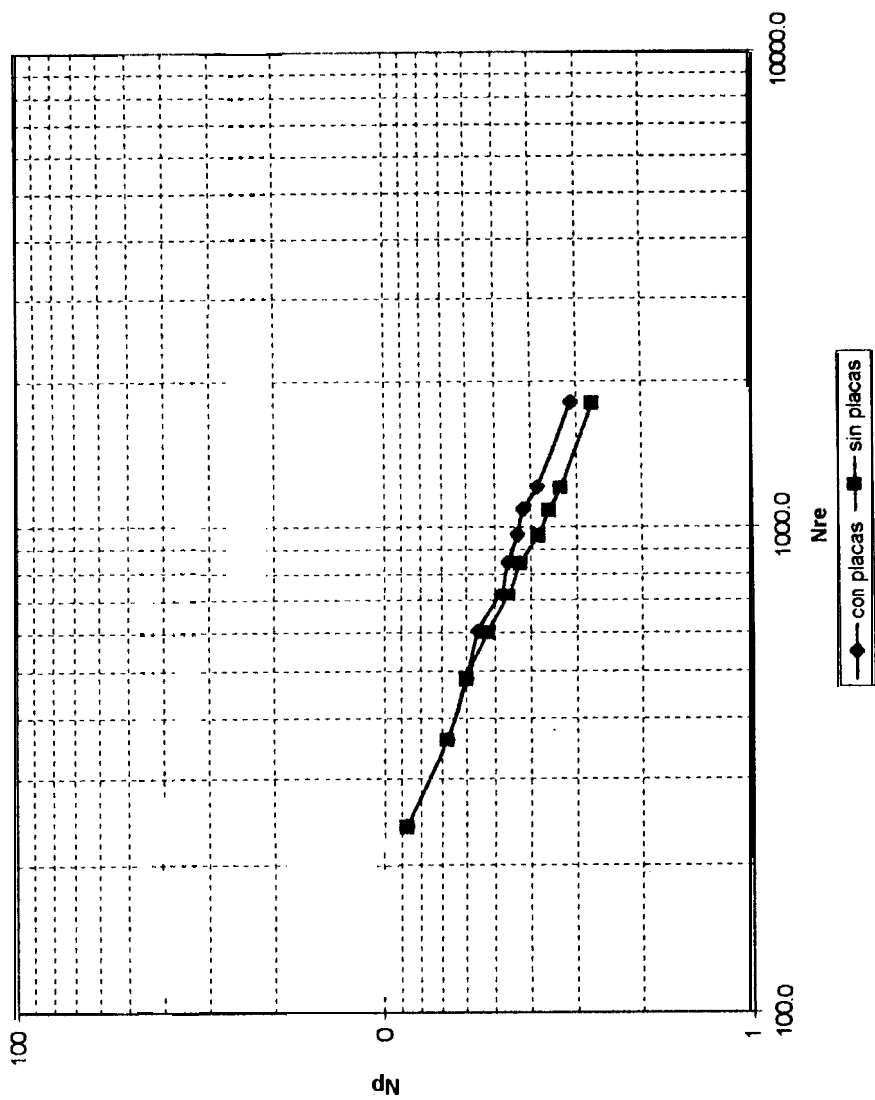


Figura 4.9 N_p vs N_{re} , Hélice de paso 2, tres palas

A continuación con un ejemplo voy a determinar como será la instalación fabril de un agitador.

Ejemplo: experimentando en una instalación piloto hemos encontrado que el trabajo es óptimo cuando el pequeño agitador experimental trabaja a 300 r.p.m., con placas deflectoras, consumiendo una potencia de 20.6 watt, siendo su $Da = 0.127$ m.

¿Cómo será la instalación fabril que suponemos 50 veces mayor (para tratar un volumen 50 veces mayor que en la piloto ?

Solución.-

$$P_1 / P_2 = (n_1 / n_2)^3 (D_1 / D_2)^5$$

Sustituyendo los valores

$$20.6 / P_2 = (300 / n_2)^3 (0.127 / D_2)^5$$

Llamando 1 al volumen con que hemos trabajado, el que ha de corresponder al prototipo será 50, y como los volúmenes son proporcionales al cubo de las longitudes, tendremos que

De manera similar,

$$\pi_2 = \rho^d n^e Da^f \mu = (ML^{-3})^d (T^{-1})^e (L)^f ML^{-1} T^{-1} = M^0 L^0 T^0$$

$$M : d + 1 = 0 \quad d = -1$$

$$L : -3d + f - 1 = 0 \quad f = -2 \quad \pi_2 = \mu / n Da^2 \rho$$

$$T : -e - 1 = 0 \quad e = -1$$

..

De manera similar,

$$\pi_3 = \rho^g n^h Da^i g = (ML^{-3})^g (T^{-1})^h (L)^i LT^{-2} = M^0 L^0 T^0$$

$$M : g = 0$$

$$L : -3g + i + 1 = 0 \quad i = -1 \quad \pi_3 = g / n^2 Da$$

$$T : -h - 2 = 0 \quad h = -2$$

$$P / n^3 Da^5 \rho = \psi (\mu / n Da^2 \rho, g / n^2 Da)$$

BIBLIOGRAFIA

- 1 BADGER L. / T. BANCHERO, Introducción a la Ingeniería Química, Editorial McGraw-Hill, México , Octubre 1981.
- 2 FOX W. / T. McDONALD, Introducción a la Mecánica de Fluidos, Cuarta Edición, Editorial McGraw-Hill, México, Febrero 1995
- 3 GRANGER BROWN, Operaciones Básicas de la Ingeniería Química, Editorial Marín S.A, España 1963.
- 4 MEADE / CHEN, Manual del Azúcar de Caña, Editorial Limusa, México 1991.
- 5 OCON J. / A. VIAN, Elementos de Ingeniería Química, Editorial Tolle-
Lege, Madrid 1950.
- 6 SMITH C. IL. McCABE / P. HARRIOTT, Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Cuarta Edición, Editorial McGraw-Hill.

RECOMENDACIONES

- 1.- Recomiendo tener mucho cuidado con la colocación de los strain gages en el eje , la superficie debe estar bien limpia, libre de grasa y se debe usar un pegamento fuerte, además los strain gages deben estar bien alineados.
- 2.- Al momento de soldar los alambres a los strain gages tener mucho cuidado, ya que una pequeña fuerza en los alambres soldados puede romper las placas del strain gage donde están soldados estos alambres.
- 3.- El amplificador tiene que tener la máxima ganancia, para que pueda tener mayor sensibilidad.
- 4.- El voltaje de la batería del transmisor tiene que ser medido con frecuencia y asegurarse que no baje de 7.5 V.
- 5.- La distancia del amplificador al transmisor no debe ser mayor de cinco pies si se usa la antena.

- 6.- Las pruebas deben realizarse con el mismo líquido y asegurarse que la temperatura sea constante
- 7.- Tener cuidado con el amperaje del motor, que no sea mayor al especificado en la placa del mismo, ya que al aumentar la frecuencia del motor aumenta las r.p.m. y a su vez aumenta la potencia consumida por el agitador.
- 8.- Al momento de calibrar el equipo medidor de torque, tomar varias lecturas para el torque aplicado y sacar una media de los valores y luego encontrar la constante de calibración.
- 9.- Al realizar las pruebas tomar varias lecturas del amplificador para cada r.p.m., para luego escoger el valor menor que es el que más se aproxima a la curva teórica.
- 10.-Recomiendo hacer las pruebas para líquidos de diferente viscosidad, para obtener una curva con mayor rango de **Nre**.

APENDICE A

ANALISIS DIMENSIONAL

$P = \psi (n, D_a, \mu, g, \rho)$ para un agitador.

1.- P, n, D_a, μ, ρ, g $n = 6$ parámetros

2.- Dimensiones primarias seleccionadas M, L y T $r = 3$

3.-	P	n	D_a	μ	ρ	g
	ML^2T^{-3}	T^{-1}	L	$ML^{-1}T^{-1}$	ML^{-3}	LT^{-2}

4.- Selecciono ρ, n, D_a

5.- $n - m = 3$ grupos adimensionales. Estableciendo las ecuaciones dimensionales obtenemos

$$\pi_1 = \rho^a n^b D_a^c P = (ML^{-3})^a (T^{-1})^b (L)^c ML^2T^{-3} = M^0 L^0 T^0$$

Igualando los exponentes de M, L y T se obtiene

$$M : a + 1 = 0 \quad a = -1$$

$$L : -3a + c + 2 = 0 \quad c = -5 \quad \pi_1 = P / n^3 D_a^5 \rho$$

$$T : -b - 3 = 0 \quad b = -3$$

$$D_2 / D_1 = (50 / 1)^{1/3}$$

$$D_2 = 3.68 D_1 = 0.47 \text{ m.}$$

Para que el proceso quede terminado al mismo tiempo en ambos casos será preciso que la intensidad de agitación sea la misma en uno y otro, o sea que se iguale la potencia aplicada por unidad de volumen. Por tanto,

.

$$P_2 = 50 P_1 = 50 * 20.6 = 1030 \text{ watt} = 1.38 \text{ HP.}$$

Y sustituyendo los valores calculado en la ecuación

$$20.6 / 1030 = (300 / n_2)^3 (0.127 / 0.47)^5$$

$$n_2 = 126 \text{ r.p.m..}$$

CONCLUSIONES

- 1.- Trazada la gráfica encuentro que para N_{re} mayores a 300, si no hay placas deflectoras, el líquido comienza a ser arrastrado por el agitador, girando con él; la agitación es menos eficaz, pues el líquido gira como un todo. Si hay placas deflectoras, el líquido resulta más intensamente batido, la agitación es más eficaz, y el consumo de potencia a igualdad de número de Reynolds es mayor que cuando no tiene placas deflectoras.
- 2.- Para N_{re} menores a 300 da igual que el tanque tenga o no placas deflectoras, ya que las curvas se comportan igual, pero para N_{re} mayores a 300 cuando no se usan placas deflectoras interviene el número de Froude.
- 3.- En la figura 4.2 muestra que, a medida que el N_{re} crece, el número de potencia puede efectivamente elevarse desde un punto mínimo cuando tiene placas deflectoras y luego llegar a ser constante en la pendiente cero.

- 4.- Se observa que el rodete que más potencia consume es la turbina de palas planas, y el que menos potencia consume es la hélice de tres palas de paso cuadrado
- 5.- Los números de revoluciones donde observé una buena intensidad de agitación cuando se tiene placas **deflectoras** fueron: 900 r.p.m. para hélice de tres palas paso cuadrado; 500rpm para turbina de palas planas; 900 r.p.m. hélice de 4 palas; 1000 r.p.m. hélice de tres palas paso cuadrado.



CIQ - ESPOL

7 TREYBAL ROBERT. E. Operaciones con Transferencia de Masa,
Editorial Hispano Americana S.A, Argentina.