

N-119
251



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**CRITERIOS DE SELECCION DE EQUIPOS
DE AGITACION DE LIQUIDOS**

(TRABAJO MONOGRAFICO DE ACTUALIZACION)

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
SALVADOR ERNESTO TREJO CALDERON

MEXICO, D. F.

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

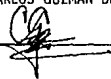
Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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.

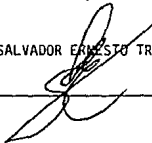
Presidente : CARLOS DOORMAN MONTERO
Vocal : JAIME NORIEGA BERNECHEA
Secretario : CARLOS GUZMAN DE LAS CASAS
1er. Suplente : JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ
2do. Suplente : FRANCISCO LOPEZ SERRANO RAMOS

Sitio donde se desarrolla el tema : BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE QUIMICA
BIBLIOTECA DEL I.M.P.
BIBLIOTECA DE PETROLEOS MEXICANOS

Nombre completo y firma del asesor del tema : M. EN C. CARLOS GUZMAN DE LAS CASAS



Nombre completo y firma del sustentante : SR. SALVADOR ERNESTO TREJO CALDERON





EXPOSICION EXCELSION
FAC. DE QUIMICA

C O N T E N I D O.

	RESUMEN	7
I.-	INTRODUCCION	9
1.1.-	Objetivo del Trabajo Monográfico	9
1.2.-	Importancia de la Agitación en la Industria	9
II.-	AGITACION,DEFINICION Y PRINCIPALES APLICACIONES	10
2.1.-	Aplicaciones de la Agitación	11
III.-	VARIABLES Y PARAMETROS EN LA AGITACION	15
3.1.-	Esfuerzo Cortante	15
3.2.-	Viscosidad	16
3.3.-	Densidad	18
3.4.-	Tipo de Líquido	20
3.5.-	Potencia	22
-	Medición de Potencia Consumida por el Impulsor	25
3.6.-	Bombeo o Gasto del Impulsor	25
-	Metodos de Medición del Flujo	27
IV.-	TIPOS DE IMPULSORES	28
4.1.-	Propelas	29
-	Geometría	30
-	Flujo	31
-	Consumo de Potencia	36
4.2.-	Turbina Axial (de Aspas inclinadas)	39
-	Geometría	40
-	Flujo	41
-	Consumo de Potencia	43
V.-	FACTORES GEOMETRICOS	45
5.1.-	Baffles	45
5.2.-	Posición del Impulsor en el Tanque y Número de Impulsores	47

5.3.-	Geometría del Impulsor	50
5.4.-	Geometría del Tanque	50
5.5.-	Conclusiones	55
VI.-	CRITERIOS DE DISEÑO Y SELECCION DE UN EQUIPO DE AGITACION	56
6.1.-	Agitación de Líquidos para Homogeneización y Movimiento...	56
-	Tiempo de Homogeneización	56
-	Agitación de Tanques de Proceso en Línea	62
*	Diseño de Agitadores de Entrada Superior	62
-	Agitación en Tanques de Almacenamiento o Fuera de Línea...	67
*	Diseño de Agitadores de Entrada Lateral	70
-	Transferencia de Calor	73
6.2.-	Agitación de Líquidos para Suspensión de Sólidos	78
-	Incorporación de Sólidos Secos	79
-	Resuspensión de Sólidos Asentados	80
-	Consideraciones para el diseño	81
-	Velocidad de asentamiento	82
-	Velocidad Mínima de suspensión (Velocidad crítica)	84
-	Diseño para suspensión de sólidos	85
-	Transferencia de masa, Sólido-Líquido	90
VII.-	SELECCION DE LAS PARTES MECANICAS	93
7.1.-	Selección del Equipo	93
7.2.-	Medio Ambiente del Agitador	95
7.3.-	Típos de Montaje	97
7.4.-	Motores	108
7.5.-	Aparatos para variar la velocidad	110
7.6.-	Coples	112
7.7.-	Transmisión del Agitador	112
7.8.-	Diseño de la Flecha del Agitador	124
7.9.-	Sello de la Flecha	129
7.10.-	Líquidos Corrosivos	132

VIII.-	METODO DE CALCULO Y EJEMPLOS PRACTICOS	133
8.1.-	Agitadores de Turbina Axial Entrada Superior	133
-	Homogeneización y Movimiento de Líquidos en Tanques de Proceso en Línea y Almacenamiento. Método de Cálculo	133
	Ejemplo Práctico	145
-	Suspensión de Sólidos en Tanques de Proceso en Línea y de Almacenamiento. Método de Cálculo	154
	Ejemplo Práctico	159
8.2.-	Agitadores Portátiles de Propela Entrada Superior	168
-	Método de Cálculo	168
-	Ejemplo Práctico	175
8.3.-	Agitadores de Entrada Lateral	181
-	Homogeneización y Movimiento de Líquidos en Tanques de Al- macenamiento de grandes Dimensiones. Método de Cálculo	181
	Ejemplo Práctico	186
	Tabla resumen de los ejemplos practicos.....	194
IX.-	CONCLUSIONES.....	196
-	NOMENCLATURA	197
-	BIBLIOGRAFIA	200

RESUMEN

Inicio el trabajo de investigación monográfica con una parte introductoria (cap. II al V) sobre la teoría de agitación y principales conceptos que se usan en el diseño o selección de un agitador.

El capítulo VI lo enfoco a definir la base del diseño de un equipo de agitación.

En la parte mecánica, más que en el diseño mecánico de un reductor, doy los elementos para elegir el reductor más adecuado en el mercado, para un proceso de agitación dado.

Termino la monografía con un capítulo de métodos de cálculo y ejemplos prácticos para los dos procesos de agitación manejados, separando agitadores de turbina y propela.

El alcance de este trabajo de investigación bibliográfica, lo describo con los siguientes puntos :

1.- Agitación de líquidos Newtonianos

2.- Miscibles

3.- Impulsores de flujo axial: Turbina y Propela

4.- Procesos de :

a) Homogeneización y movimiento de líquidos.

- Para tanques de proceso en línea y tanques por lotes, los rangos de trabajo son :

* Sg menor a 1.0

* Partículas sólidas menor a 2% de concentración

* Velocidad de asentamiento de las partículas menor a 6 pies/min.

* Entrada del agitador por arriba del tanque

* Turbina de flujo axial : - Diferencia de viscosidad menor a 100,000 CPS
- Volumen del tanque mayor a 1300 galones
- Reductor de engranes corona y sinfín o combinación corona-sinfín y engranes helicoidales, montaje de placa o brida, 25 a 350 RPM

* Propela de flujo axial : - Viscosidad menor a 5,000 CPS
- Volumen del tanque menor a 3,000 galones
- Agitador portátil directo o con reductor de engranes helicoidales.

- 350 y 1750 RPM
- Montaje de pinza, placa o brida

- Para tanques de almacenamiento, los rangos de trabajo son :

- * Volumen mayor a 12,500 galones
- * Volumen mayor a 300 barriles de petróleo
- * Grandes tanques de almacenamiento
- * Viscosidad menor a 1,000 CPS
- * °API menor a 90
- * Sg menor a 1.0
- * Propela
- * Reductor de engranes helicoidales, montaje lateral de brida

b) Suspensión de sólidos.

- Tanques de proceso en línea o por lotes
- Turbina de aspas inclinadas a 45°, flujo axial
- Volumen del tanque mayor a 1300 galones
- Entrada del agitador por arriba del tanque
- Velocidad de asentamiento de las partículas sólidas de 0.5 a 20 pies/min.
- Concentración de las partículas sólidas mayor a 2% y menor a 50%
- Viscosidad menor a 100 CPS
- Relación Z/T menor a 1.8
- Reductor corona y sinfín o combinación engranes helicoidales y corona sinfín, montaje de placas y brida.

1.1 Objetivo del Trabajo monográfico.

El objetivo de este trabajo monográfico de actualización, es de presentar los métodos de cálculo de Equipos de Agitación que se encuentran en la bibliografía, de una manera tal, que nos lleve paso a paso a la obtención de un Agitador totalmente adecuado para el proceso requerido.

Dado que el método de cálculo involucra diversos factores (variables, impulsos, geometría, etc). se presentan varios capítulos introductorios a la teoría de agitación y principales elementos que se usan en la selección de un agitador.

Esta monografía la enfoca a dos procesos de Agitación, los cuales representan el 98% de las aplicaciones en la Industria en general:

- a) Homogeneización y Movimientos de Líquidos newtonianos.
- b) Suspensión de sólidos en líquidos newtonianos.

1.2 Importancia de la Agitación en la Industria.

Historicamente se ha considerado a la agitación como una operación donde con un aspa, flecha y un motor eléctrico con la suficiente potencia para hacer girar el líquido, los resultados de homogeneización o suspensión de sólidos serán los adecuados, siendo que el dimensionamiento de un agitador requiere de un cálculo detallado, ya que un mal diseño del mismo muchas veces puede influir en el éxito de un proceso dado; en ocasiones con la agitación podemos aumentar la eficiencia de un proceso.

El Ingeniero Químico que trabaje en la Industria de Procesos, tendrá generalmente contacto con operaciones de agitación, por lo que le será de utilidad conocer las características y diseño de estos equipos.

II.- AGITACION, DEFINICION Y PRINCIPALES APLICACIONES.

El objeto de este capítulo es presentar de una manera resumida la diferencia entre agitación y mezclado, comentando además su campo de aplicación.

Es importante aclarar que rigurosamente agitación y mezclado no son sinónimos; agitación se refiere al movimiento inducido de un material en forma de terminada, generalmente circulatorio y dentro de algún tipo de recipientes y mezclado es la distribución al azar de dos fases o más, iguales o diferentes, inicialmente separadas. Puede agitarse una sola sustancia homogénea, como un tanque de agua fría, pero no puede mezclarse a menos que se añada a la misma otra sustancia.

Para fines prácticos y de esta tesis, vamos a manejar agitación y mezclado como sinónimo ya que en la mayoría de las operaciones que necesitan agitación se trabaja con dos o más sustancias.

El término mezclado es aplicado a operaciones que tienden a reducir gradientes en composición, propiedades o temperaturas del material o materiales en un volumen, y envuelve la producción de uniformidad entre los mismos, sean o no miscibles.

El mezclado es acompañado por un movimiento de material entre varias partes de la masa total. Para fluidos el movimiento ocurre por una combinación de los siguientes mecanismos: Flujo volumétrico en régimen laminar y turbulento al mismo tiempo, difusión molecular y eddy (movimiento volumétrico de grandes grupos de moléculas) al mismo tiempo.

Las bases para todo tipo de mezclado, es mecánica de fluidos y partículas.

La mezcla producida por el uso extensivo de los movimientos físicos descritos anteriormente, no es verdaderamente homogénea; sino que es una distribución completamente al azar, la cual se puede notar en suspensiones de sólidos en fluidos debido a las relativamente pocas partículas en la muestra.

Sin embargo, en mezclado de fluidos el carácter al azar de la mezcla no puede ser discernida debido a que las partículas en este caso, son moléculas, y por consiguiente el número de partículas en cualquier muestra perceptible, es de varios órdenes de magnitud mayor que en las mezclas que incluyen partículas sólidas.

Para fluidos, la calidad de la mezcla puede ser descrita por dos características: Escala e Intensidad.

Escala puede ser definida como la distancia promedio entre centros de máxima diferencia en propiedades. En mezclado turbulento, escala corresponde al tamaño de los eddies y es reducida por el rompimiento de estos; en mezclado laminar la escala es disminuida por el adelgazamiento de las capas, aplanamiento de las protuberancias y por el estrechamiento de los anillos de las componentes discontinuas.

Intensidad puede ser definida en terminos de la variación o rango de las propiedades que existe en una mezcla. Cuando dos fluidos de diferente composición son al principio intermezclados, la diferencia en propiedades o distribución esta en un máximo.

La intensidad no decrece hasta que la escala de uniformidad se hace más - pequeña que el tamaño de muestra o hasta que la difusión molecular reduce la distribución de propiedades.

O sea que al comenzar la agitación de dos fluidos, por ejemplo, la escala y la intensidad están en un máximo por lo que la calidad de la mezcla es baja, a medida que transcurre el tiempo de agitación la escala y la intensidad van disminuyendo, por lo que la mezcla va aumentando su calidad.

2.1 Aplicaciones de la Agitación.

La agitación de fluidos puede ser caracterizada por cinco categorías basicas de parejas de proceso. Por ejemplo, la tabla 2.1, en la columna central, muestra las cinco clases primarias de aplicación de los procesos de agitación de fluidos, los cuales son: líquido-sólido, líquido-gas, líquidos inmiscibles, líquidos miscibles, movimiento de fluidos. Una distinción adicional esta en las columnas que se encuentran en los extremos, en la parte izquierda, esta el proceso físico y en la derecha, el químico; los cuales juntos, serfan la pareja de proceso para cada clase primaria.

La pareja de proceso físico y la de proceso químico, nos darfan la diferencia entre un grado físico de uniformidad como un criterio de agitación y algún tipo de reacción química o transferencia de masa como otro criterio, para una clase de agitación dada; por ejemplo, si de la tabla 2.1 elegimos la clase de aplicación, líquido-sólido y el proceso químico, disolución, esta serfa una pareja de proceso químico.

TABLA 2.1
 PROCESO DE MEZCLADO ⁷⁶

PROCESO FISICO	TIPOS DE APLICACION	PROCESO QUIMICO
Suspensión	Líquido - Sólido	Disolución
Dispersión	Líquido - Gas	Absorción
Emulsión	Líquidos - Inmiscibles	Extracción
Agitación	Líquidos miscibles	Reacción
Bombeo	Movimiento de fluido	Transf.de calor

Aplicación Líquido - Sólido:

- a) Suspensión.- es probablemente la más común aplicación de la agitación, y consiste en evitar el asentamiento de partículas sólidas no solubles en un líquido.
- b) Disolución.- es un proceso de transferencia de masa del sólido al líquido.

Aplicación Líquido - Gas:

- a) Dispersión.- distribución física de un gas en un líquido, este tipo de proceso no es generalmente el requerimiento buscado en los procesos líquido - gas; muchas veces las especificaciones pedirán la dispersión de un cierto volumen de gas, pero esto es raramente el requerimiento crítico del sistema. Solamente si una espuma fuera el material de proceso deseable sería ésta una completa descripción; es normalmente inapropiado especificar agitadores en términos de una dispersión física de gas si el resultado final es un requerimiento químico o transferencia de masa. Por ser este tipo de proceso generalmente el complemento del proceso de transferencia de masa del gas al líquido, los ejemplos de éste, están dentro de los procesos de absorción.
- b) Absorción.- proceso de transferencia de masa de la burbuja de gas a el líquido.

Aplicaciones en Líquidos Inmiscibles:

- a) Emulsiones.- Formación de una fase dispersa en otra fase.
- b) Extracción.- proceso que depende de la distribución desigual de los componentes entre dos líquidos inmiscibles, donde es necesario un contacto íntimo entre los líquidos, con el fin de que se produzca la transferencia de masa de constituyentes de un líquido (o una fase) a otro, seguida por una separación física de los dos líquidos inmiscibles.

Aplicaciones en Líquidos Miscibles:

- a) Agitación.- la agitación de líquidos miscibles es un proceso muy común y puede ser descrito por medio de una especificación física sobre la mezcla final.
- b) Reacciones.- mezclado de varias especies diferentes para obtener una reacción química.

Aplicaciones de Movimientos de Fluidos:

Esta última clasificación es una categoría general en la cual la descripción de una necesidad de mezclado es dada en función del movimiento del fluido o/y otros parámetros de fluido.

Esta clasificación envuelve:

- a) Bombeo.- movimiento del fluido a través del tanque, debido a la rotación de un impulsor.
- b) Transferencia de calor.- promoción de la transferencia de calor por medio de la turbulencia creada por el agitador.

Hay muchos procesos que involucran una combinación de las cinco aplicaciones básicas mostradas en la tabla 2.1, por lo que debemos normalmente determinar el rol que cada uno juega en alcanzar los resultados de proceso deseados.

Podemos manejar una segunda clasificación; considerando que la agitación se efectúa en base a dos mecanismos; flujo y corte (más adelante estos dos mecanismos se explican a detalle), donde generalmente uno de ellos es el que controla, es - decir, la predominancia de un mecanismo sobre otro, es lo que define al proceso de agitación, esta clasificación se indica en la tabla 2.2.

TABLA 2.2
TIPO DE AGITACIÓN ³⁸

MECANISMO CONTROLANTE

Flujo (bombeo)

Flujo y Corte

Corte

CLASE DE AGITACIÓN

Agitación de fluidos
Suspensión de sólidos
Transferencia de Calor

Dispersión de Gas
Transferencia de Masa

Dispersión de Fluido
Dispersión de sólido
Reacción Química

III.- VARIABLES Y PARAMETROS EN LA AGITACION.

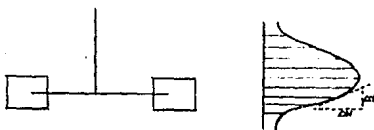
En los procesos de agitación las variables y parámetros que se manejan en la selección del agitador son muchas, pero algunas son predominantes en el diseño del mismo, por lo que el objetivo de este capítulo es dar a conocer de una manera entendible, el significado físico de las mismas para así poder atacar, fácil y adecuadamente los problemas de agitación.

3.1- Esfuerzo Cortante.

Se desarrollan esfuerzos cortantes en un fluido, cuando una capa del mismo, se desplaza con mayor o menor rapidez que otra adyacente o una superficie sólida. En el flujo laminar, el esfuerzo cortante es igual que el producto de la viscosidad del fluido y el gradiente de velocidad o la velocidad de corte.

La ecuación sería; $\tau = \mu dv / dy$.

Donde definiendo un conjunto de velocidades transversales a la descarga del impulsor y enfrente de los bordes de sus hojas (velocidades que se generan al estar girando el impulsor), podemos obtener el gradiente de velocidad, a partir de la pendiente del perfil de velocidades que se forma ; el cual se ilustra en la figura 3.1.



$$\text{Tasa de corte} = \frac{dv}{dy}$$

Perfil de Velocidad Típico mostrando la tasa de corte.

Figura 3.1

La velocidad de corte se obtiene con el impulsor y la viscosidad del líquido, pero es el producto de éstos (esfuerzo cortante) el responsable de la disminución de las partículas líquidas o producción de intermezclado del flujo en pequeña escala el cual es el proceso de agitación. La única manera en que las partículas pueden entre-mezclarse en un tanque agitado es por medio de la velocidad de corte. Las capas de fluido se intermezclan debido a diferencias de velocidad, por lo tanto los procesos de agitación envuelven inherentemente velocidades de corte. Sin embargo, para toda velocidad de corte hay un correspondiente esfuerzo cortante, el cual tiende a romper partículas, conglomerados, burbujas o terrones.

Para tener una descripción cualitativa de un tanque agitado, por lo menos debemos conocer cuatro diferentes valores de velocidades de corte:

La velocidad de corte máxima y promedio en la zona del impulsor, la velocidad de corte alrededor del tanque agitado y la mínima velocidad de corte en la más remota región de baja velocidad de el patrón de flujo del fluido.

3.2 Viscosidad

Un fluido es una sustancia que sufre una deformación continua cuando se somete a un esfuerzo cortante. La resistencia que ofrece un fluido real a una deformación de esta índole se conoce como su consistencia. Para gases y líquidos simples (o newtonianos), la consistencia es constante si la presión estática y la temperatura son fijas, y para este tipo de materiales, la consistencia se denomina viscosidad.

Considere dos capas de fluido que tienen una separación "y" pies como se ve en la figura 3.2 en donde la capa superior se desplaza en forma paralela a la inferior a una velocidad de V (pie/seg) en relación a esta última. En el caso de un gas o un líquido newtoniano, se requiere una fuerza F para mantener este movimiento, cuya magnitud esta dada por:

$$F = \frac{V A \mu}{gc y} \quad \dots\dots 3.1$$

Esto se expresa en forma diferencial de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{\mu}{gc} \frac{dV}{dy} \quad \dots\dots 3.2$$

Por tanto, la viscosidad puede considerarse como una conductividad de momento o cantidad de movimiento.

Definiendola de una manera sencilla para agitación, viscosidad es la resistencia que va a oponer un líquido a ser agitado o al movimiento del impulsor dentro de el; por lo que a mayor viscosidad mayor resistencia a la agitación y viceversa.

Ahora, si la consistencia de un líquido es una función del esfuerzo cortante tanto como de la temperatura y la presión, el fluido se clasifica como no newtoniano.

La unidad de viscosidad (es decir la viscosidad absoluta) en el sistema cgs es el poise (p) que es igual a 1g/cm seg; pero las viscosidades se tabulan por lo común en centipoise (cp) que es igual a 0.01 poise.

La viscosidad cinemática de un fluido de densidad ρ (lb/pie³) y viscosidad μ (lb/pie seg) es $\nu = \mu/\rho$ (pie²/seg), esta unidad se conoce como stoke.

Existe una gran variedad de viscosímetros para medir esta propiedad - por ejemplo, los de tipo capilar, rotatorio, de orificio, de bola descendente y oscilatorios. En varios de los viscosímetros comerciales comunes, la viscosidad cinemática se determina basandose en el tiempo de emisión de un volumen fijo de líquido que pasa por un tubo capilar estandar o por un orificio. En este género de instrumentos, los efectos de entrada y de índole cinética constituyen una parte importante de la resistencia al flujo por lo tanto, la relación entre el tiempo de emisión y la viscosidad cinemática se determina de manera empírica.

3.3 Densidad

A la masa de un cuerpo dividida entre su volumen se llama densidad sus unidades usuales son, lb/pie³.

Para determinar la densidad de una sustancia se debe encontrar su volumen y su masa. La densidad de un líquido generalmente se mide mediante un hidrómetro (se introduce en el líquido un determinado volumen de peso conocido y se mide la profundidad a la cual se sumerge) o por medio de la balanza Westphal (se determina el peso de una posta en el líquido desconocido y se compara con el peso en el agua).

En casi todos los trabajos relacionados con líquidos, se puede considerar que la densidad no varia con la presión, pero si varia con la temperatura y composición.

Generalmente la densidad de un líquido se reporta como una relación - entre dos densidades a la que llamamos peso específico o gravedad específica (Sg), la cual expresada algebraicamente serfa:

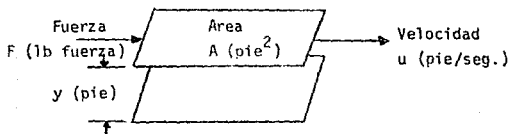
$$Sg = \frac{(lb/pie^3) A}{(lb/pie^3)_{ref}} = \frac{(g/cm^3) A}{(g/cm^3)_{ref}} = \frac{(kg/m^3) A}{(kg/m^3)_{ref}} \dots\dots 3.3$$

Donde A, significa la densidad de la sustancia de interes y Ref, significa la densidad correspondiente a la sustancia de referencia; normalmente la sustancia de referencia para los líquidos y sólidos es el agua.

La densidad de los líquidos varia ligeramente con la temperatura, en consecuencia, cuando se desea ser muy preciso al referirse al peso específico, se tendra que inicar la temperatura a la cual se a escogido la densidad.

Puesto que la densidad del agua a 4° C tiene un valor muy cercano a 1.0 en el sistema cgs, los valores numéricos de la gravedad específica y de la densidad en este sistema son esencialmente iguales. Ya que las densidades en el sistema americano se expresan en lb/pie³, y siendo la densidad del agua aproximadamente 62.4 lb/pie³, se podrá observar que los valores de la gravedad específica y de la densidad no son numéricamente iguales en dicho sistema americano.

En la industria petrolera el peso específico de los productos derivados del petróleo se reportan generalmente en términos de la escala del hidrómetro graduado en ° API (American Petroleum Institute).



Definición de Viscosidad

Figura 3.2

La ecuación para la escala ° API es la siguiente:

$$^{\circ} \text{API} = \frac{141.5}{\text{Sg} \frac{60}{60}} - 131.5 \quad \dots\dots 3.4$$

El volumen, y en consecuencia, la densidad de los productos derivados del petróleo varían con la temperatura por lo que la industria petrolera ha establecido 60° F como la temperatura estándar para el volumen y los grados API. Existe otra gran diversidad de sistemas para determinar la densidad y el peso específico los cuales son, hasta cierto punto, especializados, tal como el sistema Baumé (°Be) y el Twaddell (°Tw).

Las ecuaciones para estas escalas serían:

$$^{\circ} \text{Be} = 145 - \frac{145}{\text{Sg}} \quad (\text{más ligero que el agua}) \quad \dots\dots 3.5$$

$$^{\circ} \text{Be} = \frac{140}{\text{Sg}} - 130 \quad (\text{más pesado que el agua}) \quad \dots\dots 3.6$$

$$^{\circ} \text{Tw} = \frac{\text{Sg} \frac{60}{60} - 1}{0.005} \quad \dots\dots 3.7$$

La densidad es una fuerza de oposición al movimiento del fluido, por lo que en agitación, a mayor densidad la fuerza que el impulsor tiene que desarrollar para mover el fluido aumenta y viceversa.

3.4 Tipo de Líquido

Una parte muy importante de los parámetros que se manejan en la agitación es el tipo de líquidos que se va a manejar, ya que este dato nos va a dar el comportamiento del mismo al ser agitado.

La mayoría de los líquidos³⁶ (homogéneos y no poliméricos) son newtonianos, es decir, siguen la ley de Newton de la viscosidad que dice que la fuerza de corte por unidad de área (esfuerzo cortante) es proporcional al negativo del gradiente de velocidad local (velocidad de corte).

$$\tau_{gc} = -\mu \frac{dv}{dx} \quad \dots\dots 3.8$$

Este tipo de líquidos son los que encontramos en la mayoría de las aplicaciones de agitación.

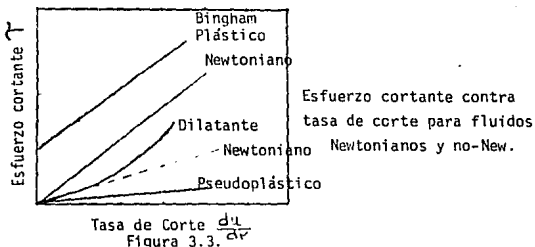
Algunos de los líquidos encontrados en aplicaciones de agitación son no-newtonianos; la viscosidad de tales líquidos no es constante, en lugar de ello depende de los gradientes de velocidad local y de otros factores. La mayoría del comportamiento no-newtoniano puede ser descrito definiendo una viscosidad aparente. Una gráfica de esfuerzo cortante contra gradiente de velocidad muestra la viscosidad aparente como la pendiente de la curva resultante, o simplemente la relación de:

$$\mu^a = \frac{\tau_{gc}}{-\left(\frac{dv}{dx}\right)} \quad \dots\dots 3.9$$

El comportamiento de viscosidad aparente para categorías típicas de fluido es mostrado en la figura 3.3. Por definición, un fluido newtoniano tiene una viscosidad constante que se grafica como una línea recta.-

Un fluido pseudoplástico, también conocido como un fluido de corte ligero, muestra una viscosidad decreciente para la mayoría de los gradientes de velocidad. Un fluido dilatante exhibe propiedades opuestas a los pseudoplásticos. Cuando el gradiente de velocidad aumenta, la viscosidad aparente de el fluido dilatante también aumenta.

Otro tipo de comportamiento se muestra en la figura 3.3, es el llamado fluido plástico de Bingham. Un esfuerzo cortante debe ser aplicado a este tipo de fluido antes de que el movimiento comience y se le conoce como el valor de cedencia. Arriba de este valor, un fluido plástico de Bingham tendrá una viscosidad constante. La mayoría de los fluidos reales exhiben un ligero comportamiento pseudoplástico por arriba del esfuerzo de cedencia.



Algunos fluidos (maneamos fluido, como sinónimo de líquido) tienen una dependencia del tiempo o comportamiento elástico y algunos fluidos dependientes del tiempo fallan como resultado de un esfuerzo aplicado y son llamados Thixotropicos, Otros fluidos muestran un incremento en la viscosidad con el tiempo, y son llamados reopéticos.

Fluidos viscoelásticos tienden a retornar parcialmente a su estado original después de que el esfuerzo cortante es removido.

Un método conveniente para describir la relación entre esfuerzo cortante y gradiente de velocidad para la mayoría de los fluidos no-newtonianos es conocida como la ley de relación de potencia:

$$\tau_{gc} = - m \left(\frac{dv}{dx} \right)^n \quad \text{.....3.10}$$

La ecuación 3.10 se reduce a la ecuación 3.8 para fluidos newtonianos donde el exponente, n, es igual a 1; el coeficiente, m, es una constante de proporcionalidad. Valores fraccionarios para el exponente n son típicos de fluidos pseudoplásticos; valores de n mayores que 1 pueden ser usados para caracterizar fluidos dilatantes. Combinando las ecuaciones 3.9 y 3.10, una definición de viscosidad aparente puede ser determinada:

$$\mu_a = m \left| \frac{dv}{dx} \right|^{n-1} \quad \text{.....3.11}$$

La ecuación 3.11 es una expresión relativamente simple, que describe adecuadamente el comportamiento de la mayoría de los fluidos no-newtonianos encontrados en aplicaciones de agitación.

3.5 Potencia

La potencia consumida por un impulsor es una función de la velocidad - del mismo, diámetro, diseño y un número de factores ambientales de mezclado incluyendo:

- 1.- Propiedades físicas del fluido.
- 2.- Tamaño, geometría o forma del tanque.
- 3.- Localización del impulsor relativo al tanque y fronteras del fluido y relativo a otros impulsores o obstrucciones en el tanque agitado.
- 4.- Presencia o ausencia de baffles, su diseño y localización.

Estas son las variables de mayor significancia práctica, sin embargo - otros investigadores han reportado otros factores en casos especiales, no - nosotros consideraremos solamente los que mencionamos anteriormente debido a que son los que se presentan en la mayoría de los procesos de agitación.

Esta potencia consumida por el impulsor va a ser aplicada al líquido - para producir un efecto de bombeo y una carga de velocidad la cual se expres - sa como:

$$P \propto Q H \rho \quad \dots\dots 3.12$$

En la ecuación 3.12 la componente de flujo Q o la componente de carga H pueden ser manejados tal que a grandes flujos-carga pequeña o flujo pequeño-gran carga, para producir la misma potencia consumida. Todos los procesos de agitación producen flujo y carga (corte).

El efecto de la velocidad y diámetro del impulsor sobre la potencia consu - mida por el agitador en fluidos de la misma viscosidad esta dada por:

$$P \propto N^3 D^5 \rho \quad \dots\dots 3.13$$

Para el cálculo de los requerimientos de potencia del impulsor en agita - ción de líquido o suspensiones en la región turbulenta se usa un parámetro - muy importante llamado número de potencia del impulsor (N_p).

Se a reportado una relación del número de potencia usando el diámetro - del impulsor como la longitud de referencia (Bates, Robert L., Fondy, P. L., - Corptsein, R.R., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 1963, 2, 310.):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = k \left(\frac{N D^2}{\sqrt{}} \right)^{x_1} \left(\frac{N^2 D}{g} \right)^{x_2} \left(\frac{T}{D} \right)^{x_3} \left(\frac{C}{D} \right)^{x_4} \left(\frac{P}{D} \right)^{x_5} \left(\frac{W}{D} \right)^{x_6} \left(\frac{l}{D} \right)^{x_7} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{x_8} \left(\frac{H}{D} \right)^{x_9} \quad \dots\dots 3.14$$

Donde el primer término es conocido como el número de Reynolds del tanque y el segundo término es conocido como el número de Froude.

El número de Reynolds describe el efecto hidrodinámico en el sistema y - representa la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas viscosas.

Esta relación determina si el flujo es laminar o turbulento: cuando el número de Reynolds es mayor o igual que 10^5 el flujo es turbulento ; la ecuación se describe como:

$$N_{Re} = \frac{10.754 N D^2 \rho}{\mu} \quad \dots 3.15$$

El segundo término es el número de Froude, representa la relación - entre fuerzas inerciales y gravitacionales lo cual explica el efecto de Vórtice del sistema.

Los términos restantes explican los efectos de la geometría del Tanque y del impulsor, la ecuación 3.14 puede ser expandida para incluir el número y ancho de baffles, espaciamiento entre impulsores y posición fuera del centro del impulsor.

En algunos de los problemas de agitación, el efecto gravitacional - o de Vórtice es poco importante y el número de Froude se puede despreciar.

La mayoría de las operaciones de agitación son llevadas en Tanques - con la superficie de líquido libre. La configuración de la superficie - y por consiguiente el patrón de flujo en el Tanque son afectados por el campo gravitacional. Esto es particularmente notable en tanques sin baffles donde el vórtice ocurre, la forma de el vórtice representa un ba - lance entre las fuerzas gravitacional e inercial.

Aunque la ecuación 3.14 es de fundamental importancia, rara vez se requiere en su forma total; para el caso de un tanque con baffles en un régimen turbulento de un líquido homogéneo, Rushton¹⁴ reporto un N_p casi constante* para una propela de tres hojas en Re mayores o iguales a 10^4 y N_p constante para una turbina de 8 aspas inclinadas a 45° para - Re mayores iguales a 2000. Para una geometría dada la ecuación 3.14 se reduce a :

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = k \quad \dots 3.16$$

*(Rushton, J.H., Costich, E.W.; Evert, H.J, Chem. Eng. Prog. 1950, 46, 395-467.)

De acuerdo con las unidades manejadas en este trabajo el N_p puede ser escrito de la siguiente manera:

$$N_p = \frac{1.523 \times 10^{13} P}{N^3 D^5 \rho} \quad \dots\dots 3.17$$

Generalmente se usan gráficas elaboradas experimentalmente de N_p contra Re para cada diferente impulsor y geometría del tanque agitado.

- Medición de Potencia Consumida por el Impulsor

La potencia consumida por el impulsor de un agitador es fácilmente medida; pero el método empleado es dictado por el tamaño o escala del equipo. A escala laboratorio se puede usar un dinamómetro; para torques muy grandes se usan transductores de torque. También la potencia puede ser obtenida de mediciones eléctricas, por medio de medir la carga del motor con un wattímetro.

3.6 Bombeo o Gasto del Impulsor

Todos los procesos de mezclado comienzan con la generación de un movimiento relativo en el fluido. En la mayoría de las aplicaciones, el movimiento se origina con el impulsor montado en una flecha rotatoria.

La dirección de los vector de velocidad a través de un tanque agitado son por definición, el patron de flujo.

- Número de Flujo (N_q)

El número de flujo es el principal grupo adimensional usado para cuantificar el gasto, su fórmula se describe como sigue:

$$N_q = \frac{Q}{N D^3} \quad \dots\dots 3.18$$

De acuerdo con las unidades manejadas en este trabajo el N_p puede ser escrito de la siguiente manera:

$$N_p = \frac{1.523 \times 10^{13} P}{N^3 D^5 \rho} \quad \dots\dots 3.17$$

Generalmente se usan gráficas elaboradas experimentalmente de N_p contra Re para cada diferente impulsor y geometría del tanque agitado.

- Medición de Potencia Consumida por el Impulsor

La potencia consumida por el impulsor de un agitador es fácilmente medida; pero el método empleado es dictado por el tamaño o escala del equipo. A escala laboratorio se puede usar un dinamómetro; para torques muy grandes se usan transductores de torque. También la potencia puede ser obtenida de mediciones eléctricas, por medio de medir la carga del motor con un wattímetro.

3.6 Bombeo o Gasto del Impulsor

Todos los procesos de mezclado comienzan con la generación de un movimiento relativo en el fluido. En la mayoría de las aplicaciones, el movimiento se origina con el impulsor montado en una flecha rotatoria.

La dirección del vector de velocidad a través de un tanque agitado son por definición, el patron de flujo.

- Número de Flujo (N_q)

El número de flujo es el principal grupo adimensional usado para cuantificar el gasto, su fórmula se describe como sigue:

$$N_q = \frac{Q}{N D^3} \quad \dots\dots 3.18$$

Esta relación muestra la dependencia del flujo primario, a través del impulsor, sobre la velocidad y diámetro del mismo.

Físicamente esta expresión es proporcional a la velocidad multiplicada por el área.

En esta ecuación no es evidente la gran dependencia que tiene el N_q del régimen de flujo (número de Reynolds) y la geometría de instalación del impulsor; como sabemos el Re es la relación de fuerzas inerciales y viscosas. Las fuerzas actúan sobre el fluido en rangos que van desde un régimen donde dominan las fuerzas viscosas (bajos números de Reynolds) a otro en el cual las fuerzas inerciales dominan (altos números de Reynolds).

Nagata ⁸¹ identificó estos rangos de aplicación de las fuerzas, en función del número de Reynolds:

Para Re menores a 50 el N_p es inversamente proporcional al número de Re y el flujo generado por el impulsor es laminar en la región del mismo; al mismo tiempo porciones de fluido en el Tanque permanecen estancadas el número de flujo aumenta junto con el número de Re , entonces podemos decir que en esta zona el N_q es proporcional al Re .

Para Re mayores de 50 y menores de 1000, el sistema sufre cambios radicales en la transición de flujo laminar a turbulento. El flujo en la región del impulsor es totalmente turbulento, pero en las regiones lejanas del tanque el movimiento es laminar.

Para Re mayores a 1000, en un tanque sin baffles, una zona de vórtice domina el flujo del tanque; el N_q y N_p decrecen con incrementos del número de Re .

La forma de las curvas ² de N_q y N_p contra Re se ven en la figura 3.4

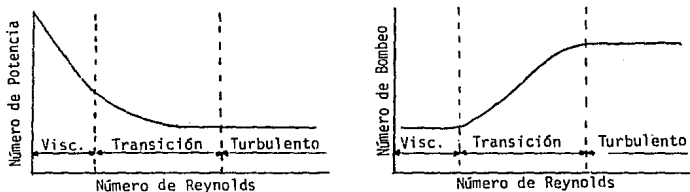


Figura 3.4

En general la mayoría de las aplicaciones de agitación son en Tanques con baffles a altos Re; esto reduce la complejidad de predecir el N_p y N_q . Sin embargo, estos números son todavía fuertemente dependientes de la geometría de instalación.

Para criterios de diseño, se utiliza una relación entre N_p y N_q que nos mide la eficiencia de descarga de un impulsor y se describe como N_p/N_q .

- Métodos de Medición del Flujo.³⁶

La cuantificación de la capacidad de bombeo de los impulsores, debe ser obtenida experimentalmente. Numerosos métodos están disponibles para esta determinación; algunos métodos son primariamente indicados para usos en laboratorios en pequeña escala y otros pueden ser usados en escalas pequeñas y grandes. Estos instrumentos los cuales caen dentro del segundo grupo pueden (dentro de sus limitaciones) ser adaptables para mediciones en campo.

La medición precisa de la velocidad del fluido o flujo en un tanque agitado puede ser una complicada empresa. Esto es debido al flujo en tres dimensiones, grandemente variable y turbulento. La componente variable del flujo resulta del paso de la hoja del impulsor. Esta componente variable en la frecuencia del paso de la hoja, en general, excede las velocidades medias que son usadas para calcular la capacidad de bombeo del impulsor.

En adición, la turbulencia en un tanque agitado tendrá típicamente rangos de $\pm 100\%$ de la media a alrededor de $\pm 1000\%$ de variación. Las variaciones producidas por las oscilaciones del paso de la hoja y la turbulencia al azar, hacen el flujo muy difícil de medir.

Algunas de las técnicas utilizadas son:

- a) Fotografía de línea
- b) Tubo Pitot estático
- c) Medidores de corriente
- d) Medidor de corriente electromagnético
- e) Velocímetro laser Doppler (LDV)

La buena selección del tipo de impulsor a usar, va ha ser un factor básico en el buen funcionamiento del proceso de agitación por lo que antes de seleccionar un impulsor es indispensable conocer muy bien sus características, como son N_p, N_q , patrón de flujo, formas, usos, etc.

Es objetivo de este capítulo es presentar una descripción detallada de los impulsores más usados, para los procesos de homogeneización y suspensión de sólidos.

Para su estudio se han dividido en dos categorías basadas en el patrón de flujo del líquido a ser agitado por el impulsor, estas categorías son:

- a) Impulsores de flujo axial:propelas, turbinas axiales, impulsores helicoidales tipo cinta.
- b) Impulsores de flujo radial:turbina radial,turbina Rushton, impulsores tipo ancla.

En los impulsores de flujo axial el movimiento del fluido es a través del impulsor hacia el fondo del tanque, al llegar el flujo al fondo del tanque se mueve a lo largo de éste y retorna elevándose por las paredes del tanque; el flujo que se va a producir va a ser paralelo a la flecha del impulsor y a lo largo del eje del mismo.

Este tipo de impulsor normalmente produce más flujo por HP que los radiales. Son excelentes en aplicaciones de flujo controlado.

Los impulsores de flujo radial generan una pluma de fluido proyectado radialmente de la hoja. Esta corriente se divide en la pared del tanque, Escasamente, más del 50% del flujo circula hacia la superficie, el flujo restante baja por la pared hacia el fondo del tanque, esto produce dos regiones de baja velocidad media.

El flujo circula alrededor de estos centroides, moviéndose radialmente hacia el interior del fondo del tanque y cerca de la superficie del líquido, hasta alcanzar el centro del tanque, en este punto el flujo retorna y se mueve axialmente a lo largo del impulsor para repetir el proceso. El flujo saliendo del impulsor exhibe un agudo gradiente de velocidad con un gran pico en la línea central del mismo.

Estos impulsores producen una gran velocidad de corte en las zonas cercanas al mismo por lo que son excelentes para dispersión de gases o transferencia de masa.

En los dos tipos de impulsores, si el tanque no tiene baffles, puede haber formación de remolinos y vórtice.

En este trabajo enfocare el estudio a los impulsores de flujo axial que son los que se usan en los procesos analizados (homogeneización y suspensión de sólidos).

4.1 Propelas

Este tipo de impulsores son usados a altas revoluciones o velocidades; generalmente 350,420,1750 RPM; debido a su bajo consumo de potencia con respecto a los otros impulsores. Al trabajar a altas velocidades, el torque es bajo a una potencia dada, por lo que los equipos con estos impulsores son de un diseño sencillo y bajo costo. Generalmente estos impulsores trabajan con líquidos de baja viscosidad y tanques de volúmenes pequeños.

En agitadores de montaje lateral se trabaja con volúmenes muy grandes pero ésta es una aplicación muy específica de las propelas, que equivaldría a aproximadamente 3% de todas las aplicaciones de éste tipo de impulsores. La tabla 4.1 muestra una lista de los rangos de aplicación de las propelas.

TABLA 4.1

RANGOS DE TRABAJO GENERALMENTE USADOS EN LAS PROPELAS⁴⁰

CONCEPTO	RANGOS
Volumen	26 gal - 26,000 gal
Viscosidad	1 cps - 5,000 cps
Potencias	0.25 HP - 2 HP
Diámetros Propelas	2 in - 12 in
Dimensiones de Tanque	Máxima - Mínimo
Diámetro de Tanque	100 in - 20 in
Altura del Tanque	92 in - 16 in
RPM	1750 420 350

No es muy recomendable trabajar con propelas a viscosidades muy altas (5,000 cps en adelante) debido a que habrá zonas de líquido estancadas - en las proximidades de las paredes del tanque, por lo que la agitación técnicamente es mala, entonces se recomienda trabajar con velocidades altas - en tanques de diámetro reducido (volúmenes pequeños).

La propela es normalmente diseñada y operada para producir una acción de bombeo hacia abajo o hacia el fondo del tanque. Se diseña para ser operada tal que la dirección de rotación hace que el borde de salida concuerde con el menor radio de curvatura. Esto es importante, ya que el impulsor girando en la dirección contraria de rotación reduce su eficiencia en 15%.

- Geometría

El tipo de propela que se usa más, es la tipo marina de 3 aspas, se puede manejar de 2 aspas o 4 aspas, pero sus aplicaciones son reducidas .

Un factor geométrico muy usado en propelas es la relación de paso que es igual a la distancia, en diámetros de impulsor, que el mismo puede avanzar o debería avanzar por cada revolución cuando gira en un fluido; por ejemplo si la relación de paso de una propela es de 1.0 (comúnmente llamada "paso cuadrado"), esto significa que se generara una trayectoria igual en longitud a su diámetro por cada revolución de la propela. La relación de paso generalmente se encuentra entre 0.5 y 1.5 veces el diámetro, la que más se usa es 1.0.

En las propelas hay un continuo incremento en el ángulo de la hoja de la punta al mamelón o a la masa a las que están unidas las 3 hojas de la propela, entonces se dice que la propela tiene un paso constante.

Otros factores geométricos importantes en el diseño de las propelas son: espesor de la hoja, longitud de la hoja, ancho de la hoja, área proyectada de la hoja, concavidad de la hoja, altura de la hoja.

La Figura 4.1 muestra una propela marina de tres aspas.

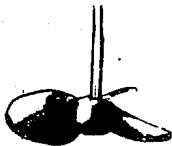


Figura 4.1

- Flujo.

a) Patrón de flujo.-

El patrón de flujo de la propela es axial, como se puede ver en la figura 4.2, en un tanque con baffles.

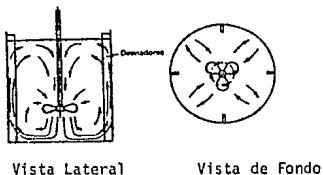


Figura 4.2

Y en un tanque sin baffles el comportamiento del fluido tiende a formar vórtice, como puede verse en la figura 4.3

Las propelas son impulsores que producen el mejor flujo entre los impulsores de "ambiente abierto" básicos. Esto es debido a que las mismas proveen un empuje uniforme al fluido a lo largo de la longitud de la hoja y la des - carga del impulsor es en la misma dirección de succión del mismo.

b) Factor de gasto.-

Se han desarrollado muchos métodos teóricos para calcular el factor de gasto por medio de ecuaciones que implican factores geométricos y de rotación de la propela; presentare algunas ecuaciones desarrolladas teóricamente comentando que el mejor factor de gasto que se puede obtener, es el encontrado experimentalmente ya que éste incluye factores ambientales, que generalmente en los N_q teóricos no se toman en cuenta, esto sucede para todo pido de impulsores.

Teórico:

- Oldshue (fluid mixing technology) trata a la propela como una superficie aerodinámica rotando, figura 4.4 y basandose en las curvas desarrolladas por el comite regulador nacional de aeronáutica de los Estados Unidos, desarrolla la siguiente fórmula, asumiendo un perfil de velocidad uniforme en la punta de la hoja.

$$N_q = \frac{\pi^2}{4} \text{Tg}(\beta - \alpha) \quad \dots 4.1$$

Relaciones típicas de ángulo de ataque contra ángulo del cordón de la punta estan dadas en la figura 4.5.

- Van de Vusse [Chem. Eng. Sci., 4,178,209 (1955, Uhl,Gray)] derivó una ecuación de flujo para una propela marina, conforme a un análisis de los diferentes Vectores de velocidad de la hoja de la propela y del fluido; con lo que obtuvo:

$$\frac{Q_{axial}}{N D^3} = 1/8 (w - W_L) (P/D) D^3 [1 - (p^2/\pi D^2) \ln(1 + \pi D^2/p^2)] \quad \dots 4.2$$

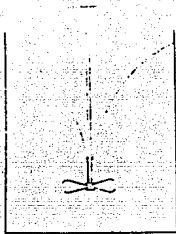


Figura 4.3

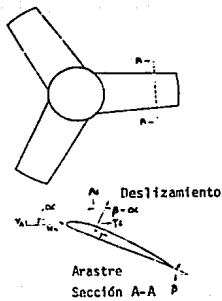


Figura 4.4

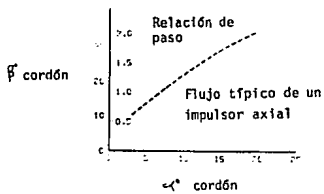


Figura 4.5

Donde w es la velocidad angular del impulsor en radianes/minuto, w_L es la velocidad angular del fluido en la periferia del impulsor en rad/min y P es el paso de la propela en pies.

El valor de w_L con respecto a w para cálculos practicos se puede despreciar (w_L igual 0).

Si una propela desplaza fluido por una distancia igual a su paso por revolución, sin deslizamiento, la velocidad de descarga volumétrica, Q , será:

$$Q = (\pi/4) D^2 P N \quad \dots\dots 4.3$$

Y

$$Nq = (\pi/4) (P/D) \quad \dots\dots 4.4$$

Experimental:

Muchos investigadores han obtenido experimentalmente el Nq para diversos tipos de propelas, en la tabla 4.2 se enumeran o mencionan solamente los estudios que dan la relación de paso que es el factor geométrico que identifica mejor el tipo de propela con la que generalmente se trabaja.

TABLA 4.2

Nq OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE ⁷⁶

Investigador	C/T	#Baffles	B/T	D/T	Paso	#de Hojas	N_p	N_q
Missenaro-Quint	1	3	0.1	0.33	1.0	3	0.37	0.55
Mortiz	1	4	0.1	0.33	1.0	3	0.35	0.50
Rushton and Oldshue	-	-	-	-	1.0	-	-	0.40

Para la propela a usar en este trabajo, con una relación de 1.5, se han obtenido experimentalmente los gastos primarios para diferentes tamaños de propela (los más usados generalmente) y velocidades de 350 RPM y 1750 RPM que son las que se trabajan comercialmente la tabla 4.3 muestra estos valores.

Para fines prácticos podemos manejar un N_q para esta propela de 0.70279.

TABLA 4.3
CAPACIDAD DE FLUJO DE PROPELAS TIPO MARINA DE TRES
ASPAS CON PASO DE 1.5⁴⁰

DIÁMETRO PULGADAS	350 RPM		1750 RPM	
	SENCILLA PIES ³ /MIN	DOBLE PIES ³ /MIN	SENCILLA PIES ³ /MIN	DOBLE PIES ³ /MIN
3			23.39	46.78
3½			35.02	70.05
4			46.79	93.59
4½			58.42	106.85
5			81.82	163.64
5½	23.39	39.76	116.98	233.96
6	30.34	51.57	152.01	304.02
6½	39.7	67.49	198.81	397.62
7	46.79	79.55	233.97	467.94
8	70.19	119.32		
9	102.94	175.		
9½	121.66	206.83		
10	145.06	246.6		
10½	168.46	286.38		
11	196.53	334.1		
11½	224.61	381.83		
12	252.69	429.57		

Para la tabla 4.3 consideramos lo siguiente.

- 1) Los gastos listados es el flujo a través de la propela. El flujo desarrollado en el tanque es aproximadamente el doble del valor listado para velocidades de 350 RPM y tres veces para unidades directas o con velocidades de 1750 RPM.
- 2) El flujo para dos propelas a velocidades de 1750 RPM es el doble que el de una propela considerando que tengan un espaciamiento de 6 diámetros.
- 3) El flujo para dos propelas a velocidades de 350 RPM es 1.7 veces el flujo de una sola propela.

- Consumo de Potencia.

Como se dijo anteriormente el consumo de potencia de las propelas con respecto a otros impulsores es bajo.

Hay formulas teóricas para calcular la potencia consumida por las propelas; pero vuelvo a recalcar que los datos encontrados experimentalmente son más confiables.

Teórico:

- Oldshue basandose en las gráficas desarrolladas por el Comité Regulador Nacional de aeronáutica de los Estados Unidos obtuvo que:

$$P = ND^3 \frac{\pi N D^2}{2g} [1 + \text{Tg}^2 (\beta - \alpha)] [\text{Celev. Seno } (\beta - \alpha) + \text{Carrast Cos } (\beta - \alpha)]$$

.....4.5

$$Np = [1 + \text{Tg}^2 (\beta - \alpha)] [\text{Celev. Sen } (\beta - \alpha) + \text{Carrast Cos } (\beta - \alpha)]$$

.....4.6

La Figura 4.6 muestra una gráfica de coeficientes de elevación y arrastre para una propela típica donde α y β se encuentran en la figura 4.5 -

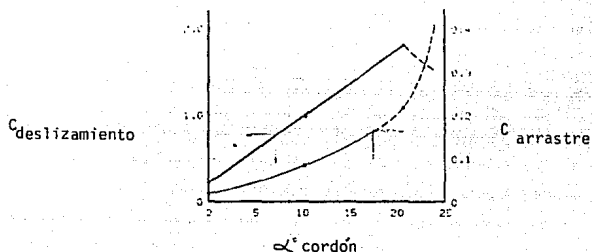


figura 4.6

- Experimentales:

Generalmente se reportan gráficas de N_p contra Re para distintas geometrías de propelas, la figura 4.7 representa los datos obtenidos experimentalmente para la propela usada en este trabajo³⁶; donde observamos que a Re mayores a 3,000 (región turbulenta) el N_p se mantiene constante en un valor de - 0.9.

Conclusiones:

- Sintetizando los principales puntos de operación de una propela tenemos que:

- 1.- Altas velocidades
- 2.- Bajas viscosidades
- 3.- Volúmenes pequeños
- 4.- Bajo consumo de potencia, por lo tanto bajo torque.
- 5.- El naso es la variable geométrica más importante para describir una propela.

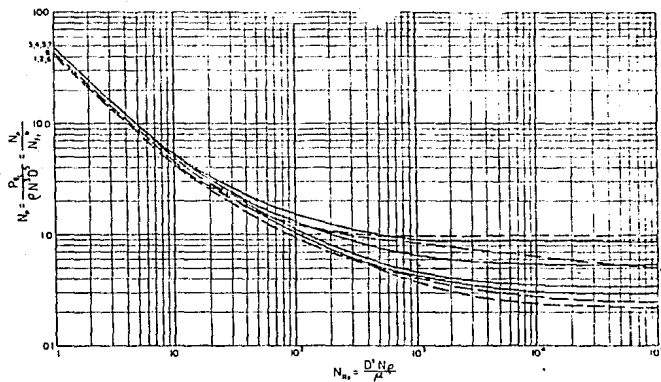


Figura 4.7

Datos de geometría de las propelas de cada una de las curvas representadas en la gráfica.³⁸

CURVA	PASO	D/T	Np a Reynolds de		
			5	300	10 ⁵
1a	1.02	0.33	8.3	0.60	0.22
2a	1.0	0.31	8.3	0.60	0.25
3	1.0	0.40	9.7	0.75	0.30
4	1.0	0.33	9.7	0.82	0.35
5	1.4	0.33	9.7	1.04	0.54
6a	2.0	0.31	8.7	1.00	0.52
* 7	1.8	0.30	9.7	1.27	0.86
8	2.0	0.31	8.7	1.10	1.0

(a) sin baffles

* Propela usada en este trabajo.

- 6.- Para manejar las diferentes curvas de potencia, caracterizar geométricamente a la propela, para elegir el tipo de curva a usar.
- 7.- Conforme aumenta el paso de la propela, aumenta su capacidad de bombeo.
- 8.- Produce mas flujo por HP que los impulsores radiales.
- 9.- Se usa generalmente en aplicaciones de flujo controlado.
- 10.- Alto flujo y bajo corte.
- 11.- Las características de la propela que usamos en este trabajo son: paso de 1.5, Np de 0.9 a Re mayores de 3,000 y Nq de 0.70279.

4.2 Turbina Axial (de aspas inclinadas).

Este tipo de impulsores es el que se usa más en tanques de grandes volúmenes, debido a su diseño sencillo que repercute en pocos problemas para su fabricación. Las velocidades a las que se trabaja son bajas, el consumo de potencia es mayor que en las propelas, por lo que al trabajar a bajas velocidades y altas potencias el torque es alto para una potencia dada, lo que hace que los equipos sean mas grandes que los usados con las propelas, su relación de capacidad de bombeo/HP consumidos es alta por lo que su uso principal es en operaciones de flujo controlado.

El tipo de turbina axial más usada es la de cuatro aspas inclinadas a 45°, manejándose también de seis aspas, ocho aspas, etc., y diferentes ángulos de inclinación.

También en aplicaciones muy específicas, se maneja una turbina axial con hojas curvas o curvadas, la desventaja es que es muy difícil su fabricación.

Aquí cabría el comentario que puede haber diferentes tipos de turbinas axiales pero estas serían para aplicaciones muy específicas, por lo que hay muy pocos estudios sobre las mismas.

La figura 4.8 muestra una turbina axial típica.

La tabla 4.4 muestra los rangos de aplicación de las turbinas axiales.

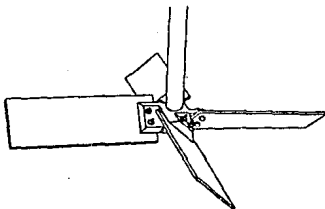


Figura 4.8

TABLA 4.4

RANGOS DE TRABAJO GENERALMENTE USADOS EN TURBINAS
AXIALES.

CONCEPTO	R A N G O	
Volumen	1300 Gal.	- 32,000 Gal.
Viscosidad	1 Cps	- 50,000 Cps.
RPM	25	- 350
Potencias	1 HP	- 500 HP
Diámetro de Turbina	12"	- 72" ⁴⁵
Dimensiones del Tanque	Max	Min
Diámetro del Tanque	200"	- 60"
Altura del Tanque	230"	- 90"

- Geometría:

Este tipo de impulsores tiene un ángulo de hoja constante, por lo que el paso es variable o varía constantemente de la punta de la hoja a la masa a la que están unidas las hojas.

La manera de caracterizar este tipo de impulsores es por medio de:

- Ángulo de inclinación de la hoja (θ).
- W/D que indica la relación entre el ancho de la hoja y el diámetro de la turbina.
- Número de hojas que tiene el impulsor.

Con estos datos podremos elegir el tipo de curva a usar cuando busquemos N_p o N_q .

- Flujo:

El patrón de flujo puede verse en la figura 4.9 para un Tanque con baffles.

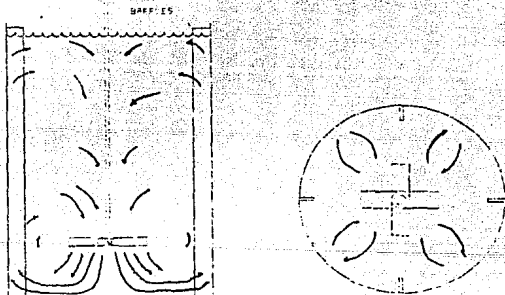


Figura 4.9

a) Factor de Gasto.-

Teórico:

- Van de Vusse, obtuvo una ecuación para determinar la capacidad de bombeo, de turbinas axiales, conforme a un análisis de los diferentes vectores de velocidad de la hoja de la turbina y del fluido, quedando:

$$Q = (W - W1) \frac{\pi D^3}{2} [(1/6) \text{sen. } \gamma \text{ cos } \gamma + \text{sen}^2 \gamma (b/D)] \quad \dots\dots 4.7$$

Para una turbina axial a 45° ($\gamma = 45^\circ$)

$$Q = 0.7853 (W - W1) D^3 [(1/6) + (b/D)] \quad \dots\dots 4.8$$

Rearreplando obtenemos

$$Q/ND^3 = (1 - k) 4.93 [(1/6) + (b/D)] \quad \dots\dots 4.9$$

Donde γ es el ángulo entre el plano de hoja inclinada del impulsor y el plano en el cual el impulsor gira, b es el ancho de la hoja del impulsor en dirección paralela al eje de rotación (pie) y k es la relación entre la velocidad tangencial del fluido en la periferia de un impulsor y la velocidad periférica del impulsor (V_t/V_p).

El valor de k debe ser obtenido de datos experimentales, pero en la práctica lo podemos estimar con:

$$k = N_p / \pi^2 N_q \quad \dots\dots 4.10$$

Experimentales:

Sobre este tipo de impulsores se han hecho bastantes investigaciones con elevada exactitud en la obtención del N_q , una ventaja de estos impulsores es que por su diseño tan fácil de igualar en su fabricación, su N_q y N_p se conserva constante para impulsores del mismo tipo y dimensiones, a diferencia de las propelas en las que difícilmente su geometría se iguala al ser fabricadas, por lo que sus N_q y N_p tienen un cierto rango de variación para propelas del mismo tipo y dimensiones.

En la tabla 4.5 muestra N_q experimentales para diversos tipos de turbinas axiales.

TABLA 4.5

FACTORES DE GASTO EXPERIMENTALES PARA TURBINAS AXIALES.

INVESTIGADOR	Z/T	C/T	# BAFLES	B/T	D/T	W/D	β	# HOJAS	N_p	N_q
Bruxelmane	-	1	4	0.1	0.33	0.2	45°	4	1.5	0.75
Lightin	-	1	4	0.1	0.33	0.2	45°	4	1.27	0.79
Missenard -										
Quint	-	1	2	0.1	0.33	0.28	45°	6	4.1	0.87
Fort	-	1	4	0.1	0.33	0.2	45°	6	1.6	0.96
Nagata	1.0	-	0	-	0.5	0.1	45°	8	0.72	0.31
Nagata	1.0	-	8	0.1	0.5	0.1	45°	8	2.8	0.87
Fort	1.0	-	4	0.1	0.33	0.2	24°	3	-	0.48

La utilidad de este tipo de tablas es que si tenemos una turbina que cheque con las relaciones geométricas y tipo podemos manejar el valor de N_q que se obtuvo experimentalmente para obtener el gasto de la turbina que vamos a usar.

El tipo de turbina que más vamos a usar es la de cuatro aspas a 45° con una relación W/D de 1/8.

b) Consumo de Potencia.-

Debido a que este tipo de turbinas son muy usadas, hay bastantes datos reportados.

Dada su diversidad de formas, se han desarrollado pocos métodos para cálculo teórico de la potencia consumida, por lo que nos enfocaremos a los datos experimentales reportados.

En la figura 4.10 tenemos una gráfica de Re contra N_p para un impulsor de cuatro aspas a 45° con W/D de 1/5.

- Conclusiones:

Resumiendo las características más importantes de las turbinas axiales tenemos que:

- 1.- Diseñadas para operar en tanques relativamente grandes.
- 2.- Operan a bajas velocidades y altos HP, por lo que tienen altos torques.
- 3.- Se usan generalmente en operaciones de flujo controlado.
- 4.- No es muy recomendable trabajar con este tipo de impulsores a grandes viscosidades.
- 5.- El N_p en la región turbulenta para el tipo de turbina a usar es de 1.37.
- 6.- El flujo y el corte aumentan un poco con respecto a la propela.

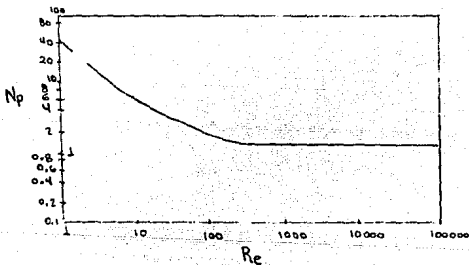


Figura 4.10

V.- FACTORES GEOMETRICOS.

El objetivo de este capítulo es resumir, como afectan los diversos factores geométricos del tanque, colocación de impulsores, etc., en el patrón de flujo, potencia consumida y efectividad de la agitación. También se presentarán las dimensiones estandar y las recomendadas por estudios experimentales para los factores geométricos de diversos impulsores y tanques.

Todos estos datos nos ayudarán para un dimensionamiento confiable del agitador y del tanque donde se va a efectuar la agitación; ya que la mayoría de las veces se calcula o diseña el agitador sin tomar en cuenta como afecta la forma del tanque a la agitación o cual sería la forma ideal del tanque para el tipo de proceso que se quiere efectuar.

5.1 Baffles.

Se deben colocar baffles cuando se están agitando líquidos de baja viscosidad con agitadores colocados en la parte superior del tanque y en el centro de éste. Con esto aseguramos que el lote entero pasara por la zona del impulsor donde hay un máximo de intensidad de agitación.

Otros efectos de colocar baffles son:

- Promover el patrón de flujo requerido por el proceso.
- Flujo directo desde el impulsor, produciendo las corrientes verticales requeridas.
- Cambio del flujo de un patrón rotatorio (esencialmente estático) a un patrón de mezclado.
- Previene excesiva formación de remolino, vórtice e introducción de aire; que hacen que el flujo decrezca.
- Incrementa grandemente la exactitud de la medición de consumo de potencia.
- Asegura que la potencia consumida por el impulsor sea estable y consistente.
- Produce cargas radiales en la flecha, más uniformes (menos balanceo), lo cual permite longitudes de flechas más grandes.

Un Tanque sin baffles producirá amplias variaciones en la potencia, con la consiguiente dificultad en la predicción de la potencia consumida y probables sobre-cargas en el motor. Solamente en las aplicaciones más sencillas de agitación, generalmente a bajas potencias, se recomienda trabajar sin baffles.

Los baffles estándares son cuatro baffles verticales en un tanque cilíndrico, en un ángulo de 90° con respecto a la pared del tanque, donde el ancho de cada baffle está entre $1/12$ y $1/10$ del diámetro del tanque. La potencia se vuelve constante cerca de estos rangos; incrementos adicionales en el ancho de los mismos no producen cambios en la potencia consumida por el impulsor. Antes del rango mencionado la potencia consumida aumenta si aumenta el ancho del baffle y viceversa.

En la práctica normal se deja un espacio entre el baffle y el tanque igual a un $1/3$ del ancho del baffle, y el mismo espaciado entre el baffle y el fondo del tanque, esto para evitar depósito de sólidos.

Conforme la viscosidad aumenta, el ancho del baffle debe ser reducido y su separación con respecto a la pared del tanque aumentada (para evitar zonas estancadas).

Para viscosidades mayores o iguales a 5000 cps los baffles se colocan a la mitad de la pared del tanque y el impulsor.

Aunque en líquidos viscosos generalmente no hay formación de vórtice en ausencia de baffles, algunas veces es recomendable colocar algunos, para evitar el desarrollo de una componente de remolino.

Un número excesivo de baffles o baffles con excesivo ancho, reduciría el flujo de masa y localizaría la agitación en un menor espacio, con lo que el proceso de agitación no será adecuado.

Los baffles se pueden colocar fijos en un tanque o atornillados de manera que si el proceso lo requiere pueden ser removidos, la tabla 5.1 muestra las dimensiones recomendadas para baffleo de tanques.

TABLA 5.1
DIMENSIONES RECOMENDADAS PARA BAFLEO DE TANQUES¹⁶

VISC.LIQ. (cps)	NºBAFLES	B	E
1-250	4	1/12 T	1/3 B
250-5000	4	varía	1/2 B
5000	4	1/48 T	1/2 I

5.2 Posición del Impulsor en el Tanque y número de Impulsores

- Un sólo impulsor puede operar usualmente a una distancia de la superficie de líquido de 0.5 D a 2 D.
- La óptima posición del impulsor para tanques con $Z/T = 1$ es a la mitad de la altura del líquido.
- Si dos impulsores son colocados muy juntos (usualmente menos de 1 diámetro de impulsor de espaciamento), estos se van a comportar como un sólo impulsor, por lo que habrá un descenso en la potencia y el gasto suministrados por los dos impulsores . En la figura 5.1 podemos observar el patrón de flujo en un tanque con dos turbinas axiales.

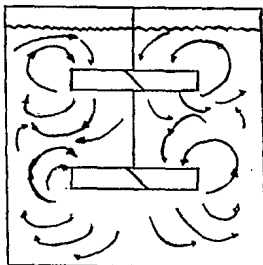


Figura 5.1

- Para la turbina de flujo axial de cuatro aspas de 45° la separación entre el fondo del tanque y el impulsor debe ser de 1 D; si disminuimos esta distancia habrá un aumento en la potencia consumida, la distancia entre el impulsor y la superficie del líquido debe ser mayor o igual a 3 D.
- El consumo de potencia de una sola propela no se ve afectado por el posicionamiento de esta. La distancia entre la superficie del líquido y la propela se debe seleccionar para que no se produzca vórtice.
- Conforme un impulsor se vaya acercando al fondo del tanque, la zona primaria de bombeo (que es la que esta alrededor del impulsor) en la región mas baja es reducida en tamaño y el flujo decrece; por lo que también decrece la potencia consumida, lo mismo sucede con decrementos en la distancia entre el impulsor y la superficie del líquido; un problema adicional con la reducción de esta distancia es la posibilidad de formación de vórtice. La formación de vórtice podría incrementar sustancialmente las fuerzas del fluido y decrecer el bombeo y la potencia consumida por el impulsor, al mismo tiempo.
- La potencia consumida por dos impulsores instalados en una flecha agitadora, no es la potencia de un impulsor sencillo multiplicado por dos, sino que hay una reducción en el consumo de potencia de cada impulsor, conforme los impulsores se van acercando.
- Chudacek, M.W, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1985,24,858-867; encontraron que los máximos números de descarga de flujo de un impulsor ocurrían para una turbina axial de seis aspas a 45° a un claro de 0.25 D y para una propela de 3 aspas a un claro de 0.33 D.
- En líquidos de baja viscosidad, aproximadamente 5 D de espacio entre dos propelas es requerido para obtener potencia a igual a un par de propelas sencillas.³⁸ La figura 5.2 muestra el efecto de espaciamiento de las propelas para altos Re ; para bajos Re el efecto del espaciamiento sobre la potencia se hace mínimo.

- La tabla 5.2 muestra las distancias recomendadas en el posicionamiento de impulsores en un tanque agitado.

TABLA 5.2

DISTANCIAS RECOMENDADAS EN EL POSICIONAMIENTO DE IMPULSORES
EN UN TANQUE AGITADO (ALTOS Re Y BAJAS VISCOSIDADES)

TIPO DE IMPULSOR	DISTANCIA A LA SUP. DE LIQ (Cv)	DISTANCIA AL FONDO DEL TANQUE (C)	SEPARACION DE IMPULSORES (S)
Propelas	Donde no se produzca vórtice.	1 a 2 D	3 D
Turbina Axial de 4 Aspas a 45°	3 D	1 D	1.5 D

Los datos que se dan en la tabla, deben ser tomados como una base para el posicionamiento de los impulsores; ajustes a estas distancias deben ser hechas de acuerdo al proceso de agitación que se vaya a efectuar. En la práctica la separación entre impulsores se recomienda que se seleccione ya con el agitador en el funcionamiento, escogiendo la distancia a la cual la agitación sea la que estamos requiriendo en nuestro proceso.

La elección del número de impulsores a usar en un tanque, es función de la geometría del mismo y la relación geométrica que determina este número es Z/ T. Cada tipo de procesos de agitación tiene su límite de Z/T en el cual hay que pasar de uno a dos impulsores, por lo general en tanques profundos es recomendable usar dos impulsores para asegurar una buena agitación.

5.3 Geometría del Impulsor

- Para turbinas la relación D/T que se recomienda es $1/3$.
- Para propelas la relación D/T que se recomienda es $1/6$.
- Conforme la relación D/T se incrementa, el flujo primario se incrementa y el flujo total decrece.
- La eficiencia de descarga (N_p/N_q) se incrementa con el aumento del ancho del impulsor.
- Curvando las hojas de los impulsores se incrementa la eficiencia de descarga. Si se curva en la dirección de rotación, la eficiencia de descarga decrece.
- La eficiencia decrece al cortar las esquinas de las hojas en la periferia del impulsor.
- Moviendo las puntas de las hojas axialmente con respecto al mamelón del impulsor, la eficiencia decrece.
- Incrementando el diámetro del impulsor, disminuimos la eficiencia de descarga.

Los datos que se dieron arriba deben considerarse como base en la selección del tipo de impulsor a usar; la exacta elección del mismo nos la dará el tipo de proceso de agitación.

El dato de D/T que se da en los impulsores debe manejarse con mucho cuidado, ya que es uno de los parámetros más importantes en el diseño del agitador, la relación exacta se calcula de acuerdo al proceso, por lo que el dato proporcionado debe utilizarse como una referencia.

5.4 Geometría del Tanque

Generalmente el efecto de la forma geométrica del Tanque y especialmente del fondo del mismo no se incluye en el análisis para diseñar un equipo de agitación; siendo que la forma, representa un factor geométrico - significativo con respecto al patrón de recirculación.

En la actualidad, además del tanque clásico de fondo plano, hay diversas formas usadas en la industria.

a) Tanque Cilíndrico de fondo plano.-

Este es el tipo de tanque más usado en la agitación de líquidos, debido a su fácil construcción y bajo costo; por lo que la mayoría de los estudios experimentales se han hecho con este tipo de tanques.

La figura 5.3 nos da los parámetros geométricos reportados por Rushton para un tanque estandar de fondo plano.¹³

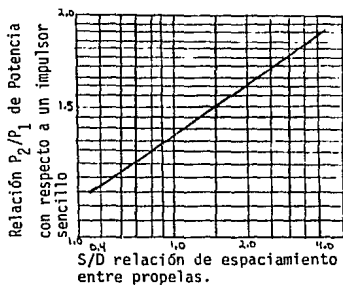
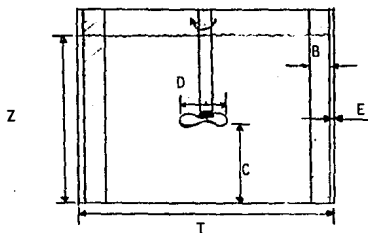


Figura 5.2

Efectos sobre la potencia en propelas duales.



- Z = T
- D = 0.33 T
- B = 0.10 T
- E = 0.02 T
- C = 0.083 T a 0.33 T

Figura 5.3

Para homogenización y suspensión de sólidos, la relación óptima entre la altura del líquido y el diámetro del tanque, Z/T , para un mínimo consumo de potencia es usualmente de 0.6 y 0.7.

b) Tanques de fondo toriesférico (Tanque cilíndrico con tapas toriesféricas).-

Este tipo de tanque le sigue en importancia en cuanto a uso al de fondo plano y generalmente se considera que el comportamiento del líquido agitado en este tipo de tanques es similar al que tiene en el de fondo plano.

La figura 5.4 muestra este tipo de tanque.

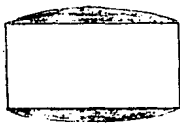


Figura 5.4

c) Tanques esféricos y hemiesféricos.-

Este tipo de geometría es poco recomendable para agitación.

d) Tanque cilíndricos con fondo contorneado.-

Chudacek¹¹ desarrolló dos tipos de tanques con fondo contorneado, especialmente diseñados para suspensión de sólidos, el tanque con fondo totalmente contorneado y el tanque con fondo de cono y rincón redondeado; reportando dimensiones optimizadas para este tipo de tanques; los cuales se muestran en las figuras 5.5 y 5.6.

- La turbina de flujo axial no es recomendable para suspensión de sólidos en el tanque de fondo totalmente contorneado (PBT).

Para el tanque con fondo de cono y rincón redondeado (CFT) con altura de líquido de $Z = 0.8 D$ y agitado por una propela de tres aspas a $0.333 D$ del fondo del tanque, desarrolló la siguiente correlación.

$$Np = 0.3917 X_A^{-1.086} (h/w)^{1.80} C_c^{0.002} \quad \dots\dots 5.1$$

Donde:

$$X_A = \frac{A_b}{\pi/4 (D-d_n)^2} \quad \dots\dots 5.2$$

$$C_c = \frac{A_c}{d^2} 1000 \quad \dots\dots 5.3$$

Siendo X_A , la fracción del área proyectada de la hoja; h , es la altura de la hoja del impulsor en metros; w , es el ancho de la hoja del impulsor (m); C_c , es el coeficiente de comba; A_b , es el área proyectada de la hoja (m^2); A_c , es el área de comba de la hoja (m^2); D , es el diámetro del impulsor (m) - y d_n , es el diámetro del mamelón del impulsor (m).

Esta ecuación es válida para el rango de X_A entre 0.452-0.493, h/w entre 0.512-0.539 y C_c entre 0.001-1.515.

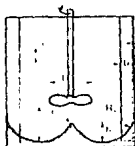


Figura 5.5

Tanque de Fondo totalmente contorneado (PBT)

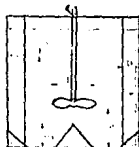


Figura 5.6

Tanque con fondo de Cono y rincón redondeado (CFT)

- El CFT es 140% más eficiente para suspensión de sólidos que el tanque de fondo plano.
- Las zonas muertas que se presentan en el tanque de fondo plano son eliminadas por el CFT, por lo que el mismo es también bastante eficiente en homogeneización de líquidos.
- El N_p y N_q aumentan bastante con el CFT y PBT, siendo el CFT el que tiene el mayor N_q .

e) Tanques cuadrados o rectangulares.-

Este tipo de tanques se usan en tratamiento de aguas, para almacenar grandes volúmenes de líquido, generalmente son fabricados de concreto.

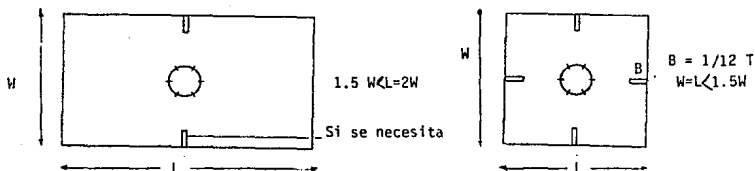
Debido a la forma del tanque hay una considerable acción de bafleo en las esquinas; con lo que a bajas potencias (aproximadamente 2HP/1000 gal o menos) es posible obtener un buen patrón de flujo para homogeneización de líquidos sin utilización de baffles.

El punto de transición (potencia por volumen) en el cual baffles son requeridos es una función del tipo del impulsor, donde para:

- Propelas, puede exceder un HP/1000 gal.
- Turbina de flujo axial a 45° , no debe exceder 0.4 HP/1000 gal., para operar sin baffles.

Para un tanque cuadrado sin baffles el patrón de flujo es muy asimétrico, por lo que es recomendable trabajarlos con baffles.

La figura 5.7 indica las proporciones de baffles generalmente usadas.



Conclusiones

El tipo de tanque con el que se recomienda trabajar, por su economía y fácil construcción es el cilíndrico ya sea de fondo plano o torisférico, - los cuales dan muy buenos resultados en la mayoría de los procesos de agitación.

Generalmente en la literatura se manejan configuraciones de tanques - estandar, que no se recomienda en la práctica manejarlas, ya que limitan - las variables para el diseño del sistema agitador - tanque. En la mayoría - de los casos el equipo se va a calcular para tanques con dimensiones ya especificadas por el proceso.

VI.- CRITERIOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE UN EQUIPO DE AGITACIÓN.

El objetivo de este capítulo es discutir los criterios, ecuaciones y gráficas encontradas en la bibliografía, que se utilizan en el diseño y selección de un equipo de agitación, para los procesos de homogeneización y movimientos de líquidos y para suspensión de sólidos.

6.1 Agitación de Líquidos para homogeneización y movimiento.

Homogeneización se refiere al inter-mezclado de líquidos miscibles para producir algún grado de uniformidad.

Nos enfocaremos en líquidos miscibles con rangos de viscosidad bajos (5000 cps o menos) a medios (5000 cps a 50,000).

Se ha demostrado que la homogeneización depende grandemente de la capacidad total de bombeo introducida en el sistema por el agitador.

Para propósitos de evaluación de la homogeneización, podemos dividir las operaciones de proceso en dos categorías separadas, cada una de las cuales con sus características específicas.

a) Tanque de proceso en línea; estos pueden ser de flujo continuo o batch en naturaleza, pero están directamente relacionados con el ciclo de producción. Los agitadores típicamente usados en estos tanques son los de montaje superior, siendo recomendados impulsores de flujo axial (turbina de aspas inclinadas y propelas) los cuales incrementarán la efectividad del proceso de homogeneización.

b) Tanque de almacenamiento o fuera de línea; estos son acumuladores en los cuales muchos lotes pueden ser almacenados por largos períodos de tiempo. Los agitadores típicamente usados en estos tanques son los de entrada lateral, recomendándose el uso de propela.

- Tiempo de homogeneización.

La caracterización de la homogeneización en tanques agitados es usualmente por medio del tiempo de homogeneización². Este es el tiempo requerido para alcanzar algún grado específico de uniformidad.

El tiempo requerido para alcanzar homogeneización completa es una función de la localización del impulsor y otros parámetros geométricos, pero también es una función del porcentaje de las dos fases usadas.

Generalmente se maneja el tiempo de homogeneización adimensional de - finido como:

$$\Theta^* = N \Theta \quad \dots\dots 6.1$$

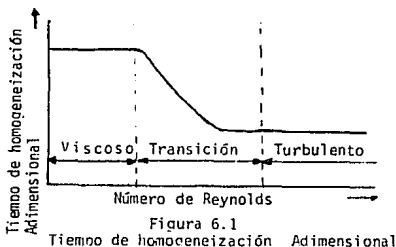
Para efectos gravitacionales despreciables, encontramos que el tiempo de homogeneización adimensional es función del Re y del número de Schmidt.

$$\Theta^* = f(\text{Re}, \text{Sc}) \quad \dots\dots 6.2$$

En un tanque agitado la homogeneización de un líquido se lleva a cabo mediante convección natural (difusión molecular) y convección forzada y dado que el paso de difusión molecular es muy lento, con respecto a la convección forzada, se desprecia; por lo que el número de Schmidt, que es la relación entre el momentum y la difusión molecular ($\text{Sc} = \mu / \rho D_{AB}$). También se puede despreciar; por lo tanto, Θ^* , es función del Re solamente.

$$\Theta^* = f(\text{Re}) \quad \dots\dots 6.3$$

La forma general de esta relación es mostrada en la Figura 6.1.



El tiempo de homogeneización se puede determinar experimentalmente mediante varias técnicas:

- a) Toma de muestras.
- b) Introducción de tintes.
- c) Celda de conductividad.
- d) Indicador acido-base.

* Correlaciones.

-Edward Rzycki, (the chemical engineering Journal, 31 (1985) 75-81), obtuvo una relación para tiempos de homogeneización con respecto a la velocidad de rotación del impulsor en la región de transición (Re de 40 a 1600).

$$\Theta_c / \Theta_s = (N_1 / N_2)^{-1.76} \quad \dots\dots 6.4$$

La ecuación 6.4 es válida para tanques con baffles o sin baffles, y para muchos tipos de impulsores (propelas, turbinas axiales o radiales).

-Yuji Sano y Hiromoto Usui, Journal of chemical engineering of Japan, vol 18, no,1,1985; estudiaron el tiempo de homogeneización en la región turbulenta, Re mayores de 5000.

Llegaron a las siguientes conclusiones:

a) El tiempo de homogeneización en su forma adimensional ($N\Theta = \Theta^*$) usualmente depende de las características geométricas del tanque y del impulsor en la región turbulenta (los efectos del Re y del número de Froude son despreciables).

b) El Θ^* en la región turbulenta en un tanque mezclado es determinado por los siguientes factores:

- Mezclado debido a la acción de corte directa entre líquido y el impulsor.
- Macro-mezclado debido al flujo de circulación en el tanque por la acción de descarga del impulsor.

- Mezclado debido a la difusión turbulenta durante la circulación de líquido.
- Mezclado debido a la difusión molecular, este factor se puede despreciar.

- Khang y Levenspiel⁷⁶, 1975, indicaron que los agitadores de propela en tanques con baffles pueden ser caracterizados como:

$$N/K (D/T)^2 = 1.5 (P_{gc} / \rho N^3 D^3) = 0.9 \quad \dots 6.5$$

Donde K es una amplitud a k-velocidad constante de acuerdo con la ecuación :

$$A = 2e^{-k\theta} \quad \dots 6.6$$

La ecuación para determinación de K (la constante de decaimiento) es válida en el régimen turbulento (Re mayores de 10^5) y corresponde a la región en donde el número de potencia para impulsores es generalmente constante. Una vez que se determina K en la ecuación anterior y conociendo A como la fracción decimal de la fluctuación de concentración deseada, el tiempo de homogeneización es fácilmente calculado.

- Oldshue, 1956, recomendó un factor de corrección para las características del material, tal que:

$$\theta_c = \theta \left(\frac{0.02}{\Delta \rho / \rho_c} \right)^{0.9} \quad \dots 6.7$$

Donde ρ_c es la gravedad específica de una capa fría de líquido y θ_c es el tiempo de homogeneización corregido a una gravedad específica estandar diferencial.

- Joshi, Chem. Eng.Sci.,1982, 37, 813, propusieron un procedimiento teórico para el cálculo del tiempo de homogeneización; para este propósito, el conocimiento de la velocidad de circulación y la longitud de la fase de flujo fue usada. Asumieron que el tiempo de mezclado es al - alrededor de 5 veces el tiempo de circulación o en otras palabras que 5 - circulaciones se necesitan para llevar a cabo un mezclado completo.

Las siguientes ecuaciones fueron recomendadas:

a) Para el caso de la turbina de hojas inclinadas, cuando el borde de arriba de la hoja del impulsor va al frente al girar el flujo del líquido es bombeado cerca del centro hacia abajo. Similarmente, cuando el - borde de abajo va al frente, el flujo del líquido es bombeado cerca del centro hacia arriba. Patrones de flujo similares son generados en el ca so de propelas.

$$\text{Flujo descendente: } N\theta = 5.0 \left[\frac{2Z}{D} + \frac{T}{D} \right] \left(\frac{H_i}{D} \right) \quad \dots\dots 6.8$$

$$\text{Flujo ascendente: } N\theta = 5.0 \left[\frac{2Z}{D} + \frac{T}{D} \right] \left(\frac{Z-H_i}{D} \right) \quad \dots\dots 6.9$$

b) Para el caso de las propelas las ecuaciones serían:

$$\text{Flujo descendente: } N\theta = 6.0 \left[\frac{2Z}{D} + \frac{T}{D} \right] \left(\frac{H_i}{D} \right)^{3.7} \quad \dots\dots 6.10$$

$$\text{Flujo ascendente: } N\theta = 6.0 \left[\frac{2Z}{D} + \frac{T}{D} \right] \left(\frac{Z-H_i}{D} \right) \quad \dots\dots 6.11$$

Donde Θ esta dado en segundos y N en revoluciones por segundo.

La concordancia entre $N\Theta$ obtenida por las ecuaciones para turbinas y propelas con los datos experimentales es excelente; $N\Theta$ para la turbina axial con respecto a los valores experimentales se desvía un 25% más arriba, por lo que para propósitos de diseño $N\Theta$ debe ser tomada 25% más abajo que los valores predichos por dichas ecuaciones.

- Fenic, J.G. y Fondy, P.L., presentaron en una junta anual del AIChE² (American Institute of Chemical Engineering) en Atlantic City, 1966; la siguiente correlación para el tiempo de homogeneización adimensional, en turbinas de flujo axial, el cual definieron como; $\Theta^* = N\Theta (D/T)^{2.3}$, la cual obtuvieron de mediciones con la tecnica indicador ácido-báse, en la cual se considera que la homogeneización se a llevado a cabo cuando la neutralización es completa, y esto se determina por el cambio de color de un indicador. El artículo no explica el uso practico de la gráfica, la cual se muestra en la figura 6.2.

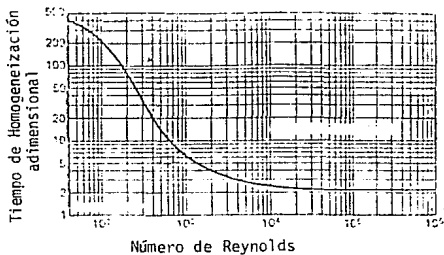


Figura 6.2

- Agitación de Tanques de proceso en línea. (Continuos y por Lotes).

En un sistema en línea, la tubería de entrada introduce material a los fluidos en movimiento, produciendo rápida homogeneización. Debido a que el contenido de los tanques, está en movimiento y los componentes son añadidos directamente en la corriente, el tiempo de homogeneización es relativamente corto.

En este tipo de Tanques, el sistema de agitación más usado es el de entrada superior.

A una potencia dada, los agitadores de entrada superior operan a bajas velocidades con grandes diámetros de impulsor. Esto significa grandes gastos, (Q proporcional a D^3) resultando en Θ cortos.

La eliminación del vórtice moviendo el impulsor fuera del centro del tanque o a través de la instalación de baffles, promueve movimiento del líquido de arriba a abajo, reduciendo Θ .

Moviendo la flecha vertical del agitador de montaje superior fuera del centro o poniéndola con un ángulo de entrada en un cuadrante específico del tanque, producira un efecto similar al bafleo; y los resultados de Θ serán mejorados. Sin embargo, la eficiencia máxima es alcanzada con la flecha del agitador montada en el centro y baffles instalados en la pared del tanque.

* Diseño de agitadores de entrada superior.⁴

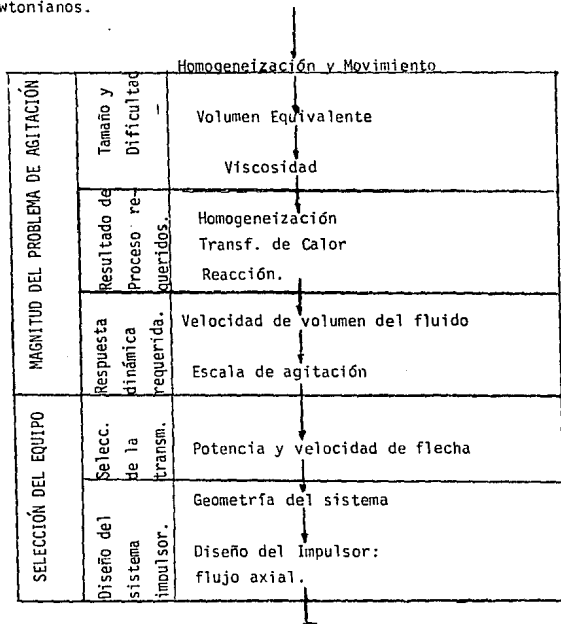
Este método puede ser usado para el diseño de agitadores de turbina y -propela en rangos de aplicación de tanques de proceso requiriendo muy poca agitación a reactores críticos necesitando gran agitación.

Para entender lo necesario para una aproximación organizada al diseño, seguiremos los pasos mostrados en el diagrama de flujo lógico de la figura 6.3, para decidir el agitador adecuado para problemas de homogeneización y movimiento.

La principal base de este método de diseño que vamos a desarrollar, esta en la escala de agitación y la velocidad de volumen del fluido o sea la respuesta dinámica requerida por el proceso; no manejaremos un Θ específico.

La lógica de diseño de los agitadores para homogeneización y movimiento del líquido también aplica a algunos sistemas de dos fases que exhiben comportamiento de una fase. Un ejemplo serían fluidos conteniendo una muy pequeña concentración de sólidos, teniendo muy pequeñas velocidades de asentamiento.

Los procedimientos de este método no aplican a problemas tales como dispersión de líquidos inmiscibles, o la homogeneización de fluidos grandemente no newtonianos.



Diseño Lógico para Problemas de Homogeneización
Y Movimiento de Líquidos.

Figura 6.3

**** Tamaño y dificultad.**

El tamaño de problema de homogeneización y movimiento del líquido, o sea, cuanto material va a ser agitado (ya que no es lo mismo agitar un tanque de 10 galones, que uno de 10,000); se indica por el volumen equivalente, que es una medida de la masa total del sistema.

$$V_{eq} = S_g V \quad \dots\dots 6.12$$

La ventaja que tiene esta definición es que conserva las unidades de volumen y sigue siendo proporcional a la masa de las fases presentes.

La dificultad del problema, es decir que tan difícil de agitar es el líquido o líquidos, es indicada por la viscosidad máxima de la fase líquida al ser agitada. La viscosidad del líquido es la variable principal en problemas de homogeneización y movimiento envolviendo el uso de impulsores de flujo axial. El efecto del incremento del volumen equivalente o viscosidad, incrementa la magnitud del problema de agitación.

**** Resultados de proceso requerido.**

El tipo de proceso de agitación que queremos llevar a cabo, nos definirá el dimensionamiento del agitador.

**** Respuesta dinámica requerida.**

Para especificar el grado de agitación (agitación baja, violenta, etc) se ha definido un nuevo término llamado, respuesta dinámica, que describe los resultados de agitación en términos físicos solamente; la cual para homogeneización y movimiento sería la velocidad volumétrica del fluido, la cual se define como:

$$v_b = \frac{\text{Gasto efectivo del impulsor}}{\text{Area transversal del tanque}} \quad \dots\dots 6.13$$

Esta velocidad es característica de todas las velocidades del líquido agitado (velocidades a la cual el líquido se está moviendo a través del tanque, debido a la acción del impulsor); por lo que, un bajo nivel de respuesta dinámica sería una velocidad muy pequeña a través del fluido agitado, por el otro lado, un alto nivel serían altas velocidades. Un rango de velocidad volumétrica de 6 a 60 pies/min. caracteriza la mayoría de las aplicaciones con agitadores con turbina axial y propela para homogeneización y movimiento; por lo que es conveniente establecer una escala del 1 al 10 que cubra estos rangos de velocidad y que establezca los criterios de desempeño de los impulsores de flujo axial dentro de esta escala de agitación.

La tabla 6.1 es el resultado de tal análisis y define problemas que involucran homogeneización y movimiento de líquidos.

TABLA 6.1

REQUERIMIENTOS DE PROCESO AJUSTADOS AL GRADO DE AGITACIÓN PARA HOMOGENEIZACIÓN Y MOVIMIENTO.

Escala de Agitación	Velocidad volumétrica (pies/min)	Descripción
1	6	<p>Niveles de agitación 1 y 2 son característicos en aplicaciones que requieren velocidades mínimas del líquido, para alcanzar los resultados de proceso. La capacidad de los agitadores del nivel 2 será: *homogenizar líquidos miscibles hasta uniformidad si su diferencia de Sg es menor que 0.1. *homogenizar líquidos miscibles hasta uniformidad si la viscosidad del más viscoso es máximo 100 veces la de los otros.</p>
2	12	<p>*producir una superficie del líquido en el lote, plana pero moviéndose .</p>

3	18	<p>Niveles de agitación de 3 a 6 son característicos de velocidades de líquidos en la mayoría de lotes agitados en la industria química de proceso . La capacidad del agitador en el nivel 6 será:</p>
4	24	<p>*homogenizar líquidos miscibles hasta uniformidad si su diferencia de Sg es menor que 0.6.</p>
5	30	<p>*homogenizar líquidos miscibles hasta uniformidad si la viscosidad del más viscoso es máximo 10,000 veces la de los otros.</p>
6	36	<p>*suspender partículas sólidas (menos de 2% de concentración) con velocidades de asentamiento de 2 a 4 pies/min. *producir ondas en la superficie a bajas μ .</p>

Escala de Agitación	Velocidad volumétrica (pies/min)	Descripción
7	42	Niveles de agitación de 7 a 10 son característicos de aplicaciones requiriendo velocidades altas del líquido para el resultado del proceso, tal como en reactores.
8	48	La capacidad de agitadores en el nivel 10 será: *homogeneizar líquidos miscibles hasta uniformidad si su diferencia de Sg es menor que 1.0.
9	54	*homogeneizar líquidos miscibles hasta uniformidad si la viscosidad del más viscoso es máximo 100,000 veces la de los otros.
10	60	*suspender partículas sólidas (menos de 2% de concentración) con velocidades de asentamiento de 4 a 6 pies/min. *producir oleajes en la superficie del tanque, cuando el líquido tenga viscosidades bajas.

En la tabla 6.1 se enumeran la capacidad del agitador en los niveles 2,6, y 10, entendiéndose que los niveles abajo de estos valores podrán trabajar con estas características de líquidos. La elección del nivel a manejar en el diseño es función de las características del proceso, esto se ejemplifica de la siguiente manera: con los niveles 3 a 6 puedo trabajar con diferencias entre la Sg de los líquidos de menos de 0.6, por lo que si la diferencia entre Sg da 0.5 el recomendable escoger el nivel máximo o sea el 6; pero si la diferencia de Sg me da 0.2 escojo un nivel mas bajo, por lo que elijo el nivel 3, con el que estare seguro que voy a tener los requerimientos de agitación adecuados, sin sobrediseño excesivo del agitador; que elevaría el costo del mismo.

**** Selección de la Transmisión del Agitador.**

El tipo de transmisión a usar en el agitador nos la va a especificar la potencia primaria de movimiento y la velocidad de la flecha del agitador, que son los medios más prácticos para especificar un agitador. Las velocidades y potencias que se obtengan mediante el cálculo quizá no sean estándares, por lo que tendremos que ajustarlas a velocidades y potencias que se encuentran en el mercado. El método de selección se explica en los capítulos VII y VIII.

**** Diseño del Sistema Impulsor.**

El diseño incluye el tipo de impulsor, número de impulsores, localización en el tanque y diámetro del mismo. Un bafleo correcto del sistema es también necesario. Para homogeneización y movimiento el tipo de impulsores es de flujo axial. El procedimiento para el diseño se explica en los capítulos VII y VIII.

**** Gufas de Diseño.**

Para los procesos más comunes de la Industria Química, se han elaborado gufas de diseño, donde la escala de agitación recomendada, es la que ha demostrado ser la más efectiva para obtener la agitación requerida. En la tabla 6.2 se enumeran dichos procesos.

- Agitación de Tanques de Almacenamiento o fuera de línea.

En este tipo de tanque se pueden usar agitadores de entrada superior y de entrada lateral, la elección del agitador a usar va a depender del tamaño del tanque; los agitadores de entrada lateral generalmente se usan en tanques de almacenamiento muy grandes como los de almacenamiento de gasolinas o petroleos en la Industria Petroquímica, donde los volúmenes son de alrededor de 1,000,000 de litros o más. Estos tanques son acumuladores en los cuales un líquido o líquidos se dejan almacenados por largo tiempo y son vaciados o llenados muy pocas veces; por lo que cuando son varios líquidos con densidades diferentes con el tiempo se van a formar estratos o capas en el tanque, los cuales deben ser erosionados para homogeneizar la mezcla. El mecanismo por el cual se lleva a cabo esta erosión, consiste en un desgaste de la interfase que se forma entre las capas, debido al arrastre del material estratificado, dentro de las corrientes de líquido moviéndose dentro del tanque (corrientes formadas por el movimiento del impulsor), como las corrientes y el líquido en la capa tienen diferentes velocidades, un esfuerzo cortante se forma, y cuando este esfuerzo es suficiente para vencer la viscosidad, la línea de flujo es deformada, por lo que se forma un movimiento de torbellino, el cual se esparce a través del líquido estratificado, causando turbulencia y mezclado. La agitación de los líquidos estratificados, como se ve en la figura 6.4, tiene dos pasos de operación separados:

**** Selección de la Transmisión del Agitador.**

El tipo de transmisión a usar en el agitador nos la va a especificar la potencia primaria de movimiento y la velocidad de la flecha del agitador, que son los medios más prácticos para especificar un agitador. Las velocidades y potencias que se obtengan mediante el cálculo quizá no sean estándares, por lo que tendremos que ajustarlas a velocidades y potencias que se encuentran en el mercado.

**** Diseño del Sistema Impulsor.**

El diseño incluye el tipo de impulsor, número de impulsores, localización en el tanque y diámetro del mismo. Un bafleo correcto del sistema es también necesario. Para homogeneización y movimiento el tipo de impulsor es de flujo axial.

**** Guías de Diseño.**

Para los procesos más comunes de la Industria Química, se han elaborado guías de diseño, donde la escala de agitación recomendada, es la que ha demostrado ser la más efectiva para obtener la agitación requerida. En la tabla 6.2 se enumeran dichos procesos.

- Agitación de Tanques de Almacenamiento o fuera de línea.

En este tipo de tanques se pueden usar agitadores de entrada superior y de entrada lateral, la elección del agitador a usar va a depender del tamaño del tanque; los agitadores de entrada lateral generalmente se usan en tanques de almacenamiento muy grandes como los de almacenamiento de gasolinas o petroleos en la Industria Petroquímica, donde los volúmenes son de alrededor de - 1,000,000 de litros o más.

La mayoría de este tipo de tanques recibe varios componentes adicionales a intervalos, dando lugar a la creación de estratos los cuales deben ser gradualmente erosionados.

La agitación de líquidos estratificados, como se ve en la figura 6.4, tiene dos pasos de operación separados:

- 1) Paso de homogeneización, el cual tiene lugar en la zona de turbulencia cerca del impulsor.
- 2) Paso de erosión, el cual es una función de la velocidad en la interfase entre las capas.

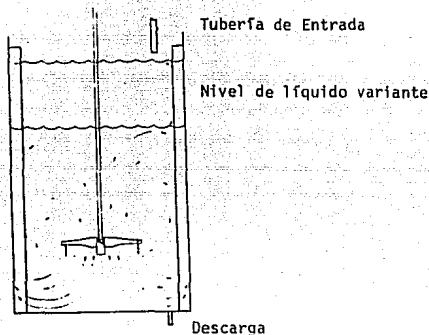


Figura 6.4

Sistema típico fuera de línea mostrado dos diferentes niveles para homogeneización estratificada.

La homogeneización total es una función de la erosión de la interfase entre las capas, consecuentemente esta grandemente extendido debido a que la erosión tiene lugar más lentamente que la homogeneización normal. La mayoría de los tanques de almacenamiento opera intermitentemente, por consiguiente es gastado en conseguir el momento requerido para crear una alta velocidad de erosión en el estrato de la interfase.

Se recomienda arrancar el agitador durante el llenado del tanque para eliminar los problemas de agitación estratificada, seguido de esto, el agitador puede ser apagado y arrancarse para homogeneización simple (muy pocas diferencias entre las características de los líquidos), justo antes de la descarga.

Agregando ingredientes en la superficie del líquido, podría resultar en una extensión de Θ por crear una situación de agitación estratificada, por lo que se recomienda agregar la sustancia dentro del flujo volumétrico creado por el agitador.

* Diseño de Agitadores de montaje superior.⁴

Podemos utilizar el método de cálculo usado en tanques de proceso en línea, que contemplan en sus escalas de agitación este tipo de procesos de agitación estratificada.

* Diseño de Agitadores de Entrada Lateral.

Debido a su bajo costo inicial y fácil instalación, los agitadores de entrada lateral son generalmente preferidos para tanques de gran tamaño donde la agitación es fácilmente completada. Estos agitadores han encontrado su más gran aplicación en tanques de gran tamaño usados para almacenaje de petróleo, - aceite crudo, gasolina y en aplicaciones de pulpa y papel.

En tanques extremadamente largos o donde equipo de repuesto es deseable, múltiples unidades de entrada lateral pueden ser instaladas.

Cualitativamente, los agitadores de entrada lateral proveen una baja eficiencia de agitación debido a la alta potencia requerida para producir una capacidad de bombeo dada. Por lo tanto, muchos tanques y/o procesos en la Industria Química no son adaptables para el uso de agitadores de entrada lateral.

La propela al estar girando en tanques de gran tamaño forma corrientes de líquido^{5b}, las cuales se asemejan a un chorro circular sumergido; las características del mismo nos dirán que tan completamente se puede llevar a cabo la homogeneización en los grandes tanques.

La cantidad de líquido movido por la corriente de chorro puede ser determinada por la ecuación:

$$Q_e = [0.23(x/D_0) - 1] Q$$

..... 6.14

Donde Q es la cantidad de líquido en el origen del chorro, Qe es la cantidad movida en la distancia x a lo largo de la axis del chorro expandiéndose y D₀ es el diámetro del chorro en su origen.

Se ha demostrado que el uso más económico de la energía cinética del flujo movido a una distancia dada ocurre cuando (x/D₀) es = 17.1.

Para una mejor economía de la potencia, deben usarse grandes diámetros de propela, con lo que tendremos grandes diámetros de chorro de líquido.

La potencia requerida para producir flujo en una propela es:

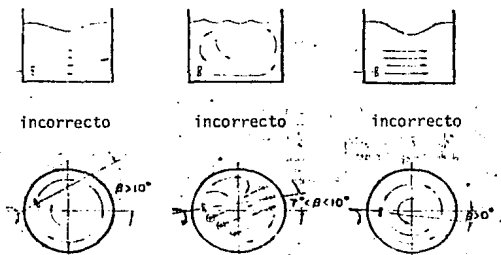
$$P = \rho Q H \quad \dots\dots 6.15$$

Donde H es la carga total contra la cual el flujo tiene lugar.

Debido a que la cantidad de movimiento y turbulencia, determinará cuan rápidamente la homogeneización se lleva a cabo, la cantidad de líquido moviéndose en el chorro y la potencia requerida para moverla, son datos que pueden ser usados para determinar el comportamiento sobre la agitación de corrientes fluyendo.

Podemos decir que incrementando la relación D/T, aumentamos la efectividad de la agitación, por lo que disminuimos el tiempo de homogeneización (incrementar D/T, implica incrementar la capacidad de bombeo y la potencia de salida del impulsor, manteniendo T constante).

El posicionamiento óptimo de agitadores de entrada lateral es mostrado en la figura 6.5.



Un agitador lateral incorrectamente montado puede ser solamente satisfactorio para proveer uniformidad en la porción baja del tanque.

Si un líquido va a ser agregado durante la operación del agitador, el método recomendado de introducción se muestra en la figura 6.6

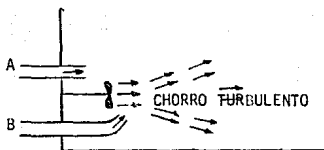


Figura 6.6.

Preferiblemente, el material agregado deberá ser adicionado a la mitad del chorro; cuando esto es hecho, el flujo inducido será homogeneizado con el material adicionado por la turbulencia dentro del chorro. El método A mostrado en la figura 6.6 consiste en adicionar el material al flujo dentro de la propela, por lo que el mismo será una parte del chorro. Si el líquido añadido tiene una baja presión de vapor, cavitación y flasheo⁵⁶ pueden ocurrir en la propela por lo que será necesario añadirlo en la forma en que se muestra en el punto B, es decir al frente de la propela. Un líquido muy denso deberá ser añadido detrás de la propela y preferiblemente desde arriba; si se fuera a agregar en grandes cantidades de acuerdo al método A, la propela probablemente se sobrecargue, debido a que la potencia demandada es proporcional a la densidad.

Si hay insuficiente potencia en la corriente de agitación, o si el patrón de flujo es impropio los líquidos pueden permanecer estratificados en alguna extensión del tanque; la figura 6.7 muestra un agitador lateral con flujo o potencia insuficiente; este problema se soluciona aumentando la potencia y el flujo del agitador.

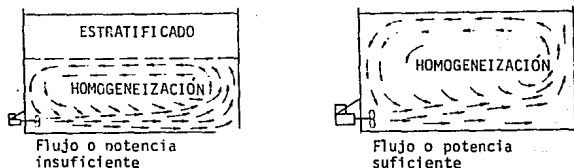


Figura 6.7

- **Transferencia de Calor.**

Diseñar un agitador para alcanzar un coeficiente específico de transferencia de calor es impracticable, el coeficiente es relativamente independiente de la velocidad del agitador por lo que incrementar el nivel de agitación no provee un cambio significativamente económico en el coeficiente y en el proceso de transferencia de calor, por lo que para aumentarlo es mejor cambiar otros factores que no sean las variables de agitación. Generalmente otros procesos de agitación controlan el diseño del agitador. Una aproximación razonable para el diseño, es seleccionar un agitador que provea un adecuado movimiento del líquido, y entonces alterar el área de transferencia, la diferencial de la temperatura o otras condiciones de proceso para dar el resultado deseado.

Por lo que para el proceso de diseño los pasos seguidos para el cálculo de los equipos de agitación en procesos de homogeneización y movimiento serán adecuados.

Algunas recomendaciones son:

- Para una selección rápida sin costo excesivo es usar el doble de la potencia mínima requerida para aplicaciones continuas de homogeneización. Este método se puede usar para obtener costos preliminares para aplicaciones de transf. de calor.
- Las turbinas de flujo axial son los mejores impulsores para transf. calor.
- Los impulsores deben ser localizados aprox. a la mitad de la altura del Tanque.

GUÍAS DE DISEÑO PARA APLICACIONES DE AGITADORES EN PROCESOS INDUSTRIALES DE MOVIMIENTO Y HOMOGENEIZACIÓN DE LÍQUIDOS (AGITADORES DE ENTRADA SUPERIOR)⁸

PROCESO INDUSTRIAL	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	VARIABLE DE DISEÑO PRINCIPAL.	ESCALA DE AGITACIÓN.	INFORMACIÓN DE DISEÑO ADICIONAL.																		
<u>Tratamiento de Aguas</u>																						
- Tanque de Reactivos	Mezclado rápido de agua y químicos para tratamientos.	Viscosidad	3 a 10	La escala de agitación depende del tiempo de retención y la geometría del tanque, tiempo de mezclado debe ser considerado.																		
- Pileta de Compensación.	Homogeneización para prevenir capas de concentración.	Viscosidad	1 o menos	El número y tamaño de los agitadores dependen de la geometría de la pileta. También la agitación es influenciada parcialmente por el nivel del líquido.																		
- Suspensión de Lechada de Cal.	Suspender cal apagada $[Ca(OH)_2]$ en agua.	Viscosidad (valor de diseño basado en el % sólidos).	4 a 5 (0 a 20% Sol) 6 a 7 (20 a 38% Sol)	Las pequeñas partículas dan a la suspensión una viscosidad aparente. Propiedades típicas de una lechada de cal:																		
- Almacenaje de lechada de cal.	Mantener la lechada en suspensión.	Viscosidad	2 a 3 (0 a 20% Sol) 3 a 4 (20 - 38% Sol)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Peso %</th> <th>Sg</th> <th>Visc.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>1.1</td> <td>100 cp</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>1.2</td> <td>200 cp</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>1.3</td> <td>1000 cp</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>1.4</td> <td>5000 cp</td> </tr> <tr> <td>>38</td> <td></td> <td>Pseudoplastico.</td> </tr> </tbody> </table>	Peso %	Sg	Visc.	10	1.1	100 cp	20	1.2	200 cp	30	1.3	1000 cp	38	1.4	5000 cp	>38		Pseudoplastico.
Peso %	Sg	Visc.																				
10	1.1	100 cp																				
20	1.2	200 cp																				
30	1.3	1000 cp																				
38	1.4	5000 cp																				
>38		Pseudoplastico.																				

CONTINUACION TABLA 6.2

PROCESO INDUSTRIAL	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	VARIABLE DE DISEÑO PRINCIPAL.	ESCALA DE AGITACIÓN.	INFORMACIÓN DE DISEÑO ADICIONAL.
-Tanque de Pasivación de cal.	Convertir CaO a Ca (OH) ₂	Viscosidad	8 a 10	A altas velocidades de agitación se pueden formar bolas de sólidos secos, hay que evitarlo. El impulsor de arriba se usa para lograr que la cal se incorpore al líquido.
<u>Industria de la Pintura y barnices.</u>				
- Adoquizado y Refinado.	Homogeneización de la base, vehículos y pigmentos.	Viscosidad (se usa la viscosidad aparente máxima).	6 a 10	Las pinturas comerciales generalmente tienen viscosidad de 1,000 a 50,000 cps. Las pinturas industriales generalmente tienen viscosidad de 100 a 1,000 cps.
- Alimentación y Retención.	Mantener el producto uniforme durante su almacenamiento temporal.	Viscosidad (use la viscosidad aparente máxima)	3	
- Dióxido de Titanio	Mantener suspensión de 60 a 75% TiO ₂	Viscosidad	2 a 3	Sólidos % Visc. diseño (cp) < 60 100 70 500 72 1000 75 2500 Se requieren bajas velocidades de agitación (menos de 45 RPM) debido a las viscosidades latentes.

CONTINUACION TABLA 6.2

PROCESO INDUSTRIAL	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	VARIABLE DE DISEÑO PRINCIPAL.	ESCALA DE AGITACION.	INFORMACIÓN DE DISEÑO ADICIONAL.
<u>Adhesivos</u>				
- Tanque de Mezclado	Mezclado de Ingredientes.	Viscosidad (usualmente alta)	2 a 3	Diseños para grandes relaciones D/T. Una transmisión de velocidad variable puede ser necesaria para manejar diversas formulaciones. Agitadores de 2 velocidades o otros para altas viscosidades pueden ser usados.
- Tanque de Caucho-Cemento.	Cortado y disolución de caucho en un solvente.	Viscosidad máxima.	6 a 8	Puede que se requiera un impulsor especial.
<u>Industria del Azúcar y Almidón.</u>				
- Tanque de Disolución de azúcar.	Disolver azúcar seca para formar jarabe.	Viscosidad del batch final.	3	
- Almacenaje de almidón	Suspensión del almidón en tanques de almacenamiento.	Viscosidad aparente	3 a 4	Diseño para niveles mínimos de líquido o cambios de niveles del líquido con turbinas múltiples.
- Convertidor de almidón.	Conversión ácida del almidón en una columna de pasos.	Viscosidad máxima en la columna.	10 ó más	La mayoría de la potencia es invertida en las etapas más bajas por usar grandes turbinas.
	Conversión Enzimática.	Viscosidad (usualmente baja).	2 a 4	

CONTINUACION TABLA 6.2

PROCESO INDUSTRIAL	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.	VARIABLE DE DISEÑO PRINCIPAL.	ESCALA DE AGITACIÓN	INFORMACIÓN DE DISEÑO ADICIONAL.
- Almacenamiento de jarabe.	Tanque de Almacenamiento.	Viscosidad del jarabe.	2	
<u>Industria de la Fermentación.</u>				
- Marmita. (Anaeróbica)	Fermentación de la cerveza.	Viscosidad	1 a 2	Solamente pequeñas cantidades de movimiento del líquido se requieren.
<u>Industria de la Pulpa y Papel.</u>				
- Cocción del almidón.	Preparación del almidón para lubricantes y revestimientos.	Viscosidad máxima.	6 a 8	La viscosidad pasa a través de un máximo durante la cocción, generalmente cerca de 10,000 cps.
- Almacenaje de Almidón.	Tanque de almacenamiento para almidón.	Viscosidad	3 a 4	La viscosidad generalmente es menor que en el cocimiento.

6.2 Agitación de Líquidos para suspensión de sólidos.

La suspensión de sólidos es probablemente la aplicación más común en agitación de líquidos, ejemplos típicos de ésta operación son; hidrogenación, liquefacción, lavado de cristales, formación del lechadas en tratamiento de aguas, etc.

En estas operaciones, los sólidos en el tanque requieren ser suspendidos - completamente a través del tanque para obtener la máxima área interfacial entre el sólido y la fase líquida; o también se requiere la formación de una suspensión homogénea en la cual los sólidos están uniformemente dispersados a través del tanque para operaciones continuas con sólidos de diferentes tamaños .

El tipo de impulsor que se usa es el de flujo axial (turbina de aspas inclinadas o propelas); debido a que son más eficientes que los impulsores radiales, - es decir se requiere menos potencia con los impulsores axiales que con los radiales, para proveer el mismo grado de uniformidad.

El rango de aplicación generalmente manejado en suspensión de sólidos es para procesos donde las partículas tienen velocidades de asentamiento de 0.5 pies/min., a alrededor de 20 pies/min., y concentración de sólidos hasta 50% en peso.

Velocidades de asentamiento más bajas de 0.5 pies/min., incluyen lodos activos en tratamiento de aguas, suspensión de papel almacenadas, sólidos biológicos - catalizadores de tamaño microscópico, etc.; que tienen como característica su fácil suspensión, por lo que se pueden incluir en procesos de agitación de líquidos para homogeneización y movimiento; si la concentración es lo suficientemente alta, puede resultar una suspensión pseudoplástica; también altas concentraciones de partículas muy pequeñas pueden producir una suspensión plástica de Bingham en la cual - una fuerza mínima de corte es requerida antes de que el movimiento a través del - sistema pueda ser desarrollado; en estos casos la agitación sería de líquidos no-Newtonianos.

Cuando la velocidad de asentamiento de los sólidos esta en el rango de 20 a - 100 pies/min., las aplicaciones deben ser tratadas de una manera muy especial, dado que proveer velocidades de fluido capaces de suspender partículas dentro de este - rango de velocidades, es un problema bastante complejo.

En suspensión de sólidos se manejan cuatro definiciones de proceso:

a) Uniformidad completa; todas las partículas están suspendidas relativamente uniformes a través del tanque.

También se define como la condición en la cual un incremento adicional en la velocidad del agitador o potencia no tendrá efectos apreciables en el perfil de concentración de sólidos a través del tanque.

b) Suspensión completa de las partículas en el fondo del tanque; todas las partículas se están moviendo arriba del fondo del tanque con alguna velocidad vertical.

c) Movimiento alrededor del fondo del tanque; todas las partículas, sin importar su tamaño, se están moviendo alrededor del fondo del tanque con alguna velocidad.

d) Rellenamiento, pero no formación progresiva de rellenos; el relleno es un depósito de sólidos estacionario o estancado, comúnmente en la periferia del fondo del tanque donde se junta con la pared del mismo, pudiéndose formarse también en otras partes del tanque, dependiendo de los patrones de flujo.

Es frecuentemente menos costoso dejar que algunos de los sólidos se asienten para formar los rellenos, que proveer potencia adicional al agitador para eliminarlos o fabricar un tanque para evitarlos. En general la formación de rellenos por asentamiento de sólidos no debe ser progresiva.

Los rellenos que son progresivos aumentan con el tiempo y pueden eventualmente cubrir al impulsor.

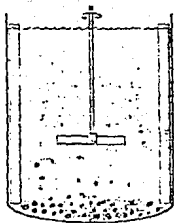
Cuando se trabaja con tanques de fondo plano, generalmente se tiene este problema, por lo que se han desarrollado tanques con fondos contorneados, con lo que se logra evitar la formación de relleno, la desventaja de los mismos es que su costo y dificultad de fabricación es alto; pero la optimización del proceso de suspensión de sólidos amortiza este gasto (la geometría de estos tanques ya se describió en el capítulo de factores geométricos).

Los diversos procesos de suspensión³ se pueden ver en la figura 6.8.

- Incorporación de sólidos secos.⁵

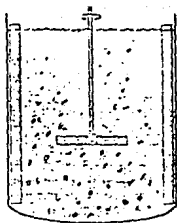
Un problema común encontrado en la Industria Química de Proceso es la incorporación de sólidos secos en el líquido.

ESTA YERBA NO DEBE
SALIR DE LA BOLSITA



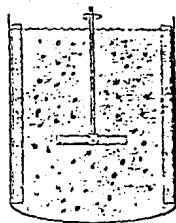
Suspensión Parcial

(Algunos sólidos permanecen sobre el fondo del tanque por períodos cortos)



Suspensión Completa

(Todos los sólidos están fuera del fondo)



Suspensión Uniforme

(Sólidos suspendidos a través del Tanque)

Figura 6.8

La dificultad del problema es influenciado por; (a) tamaño de partículas y características de humidificación del sólido, (b) velocidad y manera en la cual el sólido seco es cargado en la superficie de líquido, (c) cantidad y tipo de movimiento en la superficie agitada.

Si los sólidos secos son muy finos, habrá dificultad para humedecerlos, o añadirlos a una velocidad alta; varias técnicas para promover la incorporación están disponibles. Un procedimiento usual es colocar una turbina de flujo axial adicional, cerca de la superficie del líquido. Removiendo los baffles de la parte de arriba del tanque creará un vórtice que podrá ser de significativa ayuda en la incorporación de sólidos.

La mayor dificultad de un sólido seco es incorporarlo en una lechada (generalmente se requieren niveles de agitación muy altos), en algunos casos este problema es el factor controlante en la selección del agitador.

- Resuspensión de sólidos asentados⁵.

Otros problema común ocurre cuando el agitador debe resuspender una capa de sólidos asentados. La naturaleza de la capa asentada afectará la capacidad de resuspenderlos. Sólidos finos tienden a asentarse muy densamente. La forma de la partícula, unión química, cohesión de la partícula y duración de la condición de asentamiento pueden influenciar el problema; cuando esto ocurre, puede ser difícil,

sino imposible, resuspender las partículas y restablecer el nivel original de suspensión de sólidos. Los problemas de resuspensión pueden también requerir mayores escalas de agitación que las que se necesitan para mantener la suspensión.

Este tipo de problema generalmente se resuelve mediante la aplicación de aire o chorros de agua a la capa sentada, con lo que se liberan los sólidos asentados.

- Consideraciones para el Diseño

- a) Conforme D/T aumenta los hp/volumen disminuyen, se ha encontrado que - hp/volumen es proporcional $(1/D)^{0.33}$.
- b) Conforme aumenta la formación de rellenos, la potencia necesaria para la suspensión de sólidos disminuye.
- c) La relación óptima de Z/T es generalmente alrededor de 0.6 a 0.7 con un impulsor sencillo; conforme Z/T aumenta la potencia aumenta grandemente con un impulsor sencillo. Cuando Z/T es mayor que 1.2 se recomienda la adición de un segundo impulsor.
- d) En general tanques altos requeriran mas potencia que tanques más pequeños, debido a que el impulsor de arriba no puede actuar hasta que el de abajo eleva las partículas y las hace circular hasta la corriente de flujo del impulsor de arriba.
- e) Para suspensión total en el fondo del tanque, una localización del impulsor de 1/3 del diámetro del impulsor arriba del fondo del tanque es recomendado.
- f) Las operaciones por lotes normalmente requieren un poco más de potencia que las operaciones de suspensión de sólidos continuas, debido a que en las continuas el flujo continuo dinámico de la alimentación al descargarse en el tanque permite que el contenido del mismo sea continuamente suspendido a un nivel de potencia más bajo que en las operaciones por lotes.
- g) Conforme aumenta la concentración de sólidos en la suspensión, esta se hace más viscosa, por lo que hay que tomar precauciones en el diseño del agitador.
- h) Una importante consideración en el diseño de un sistema de flujo continuo, es prevenir una falla de la potencia, que resultará en un atascamiento del agitador o en la interrupción de la alimentación o corriente de descarga.

Cuando cualquiera de estos eventos ocurra, es buena práctica tener una bom ba de recirculación auxiliar para prevenir el asentamiento de sólidos. En este tipo de sistemas de flujo continuo, generalmente se dimensiona el agitador para proveer la composición de la alimentación en el punto de salida y el resto del tanque puede estar a concentraciones diferentes que la corriente de alimentación. Mediante la aplicación sucesiva de grandes cantidades de potencia, el contenido total del tanque puede ser esencialmente uniformizado. Esto significa que la com posición a través del tanque, así como a la salida, es la misma que la com posición de la alimentación .

La suspensión total en el fondo del tanque es probablemente satisfactoria - para todas las aplicaciones de flujo continuo, con la salida en o cerca del fondo del tanque, y para todos los procesos de disolución.

- Velocidad de asentamiento³.

Cualquier partícula sólida moviéndose relativa a los alrededores de un fluido, está sujeta a una fuerza de arrastre. La magnitud de esta fuerza puede ser calculada de:

$$F_d = C_d A_p \rho (u_r)^2 / 2gc \quad \dots\dots 6.16$$

El coeficiente adimensional de arrastre (C_d), es algo análogo al factor de potencia (K_p).

El valor de C_d es una función del Re de la partícula:

$$Re_p = d_p u_r \rho / \mu \quad \dots\dots 6.17$$

Para valores de Re_p menores que 0.3, el flujo alrededor de la partícula es esencialmente laminar y corresponde a la región de la ley de Stokes, donde el coe ficiente de arrastre es:

$$C_d = 24/Re_p \quad \dots\dots 6.18$$

A Re_p grandes (1,000 a 200,000). el flujo alrededor de la partícula es completamente turbulento. Para estas condiciones, C_d es constante y es conocido como la ley de Newton:

$$C_d = 0.44 \quad \dots\dots 6.19$$

El coeficiente de arrastre en el rango de transición es función del Re_p .

La velocidad de asentamiento terminal (u_t) de una partícula, será aquella que alcanza cuando la fuerza de arrastre (resultante del movimiento de la partícula a través del líquido) exactamente balancea la fuerza debida a la gravedad, por lo que la partícula ya no se acelera. Por lo que igualando F_d a la fuerza gravitacional resultante de una diferencia de densidades entre el sólido y el líquido, podemos decir que $u_r = u_t$; entonces podemos despejar la velocidad de asentamiento terminal de la ecuación 6.16, usando el coeficiente de arrastre.

Generalmente la velocidad de asentamiento terminal se obtiene experimentalmente, debido a la diversidad de formas de las partículas.

En el rango de la ley de Stokes, la velocidad terminal de la mayoría de las aplicaciones de suspensión de sólidos, es suficientemente baja para que el líquido pueda ser tratado como una fase sencilla para propósitos de diseño.

En la región de transición (entre las regiones de la ley de Stokes y Newton) el cálculo de la velocidad de asentamiento es un proceso iterativo; aunque a veces se maneja:

$$C_d = 18.5 / (Re_p)^{0.6} \quad \dots\dots 6.20$$

El C_d que se manejó anteriormente se aplica para partículas esféricas, la información para otras geometrías está raramente disponible; en el diseño, y dado que las esferas normalmente asientan a velocidad más rápidas que las otras partículas con diferente forma, una práctica común es usar la velocidad de asentamiento de una esfera del mismo diámetro que la partícula.

El asentamiento en un tanque agitado es más complejo que el asentamiento en un fluido estancado, debido a la presencia del campo de flujo turbulento.

Se ha encontrado que la potencia se incrementa con la concentración de sólidos de la siguiente forma:

$$P \propto X^{0.13}$$

..... 6.21

Y también que

$$P \propto (\text{velocidad de asentamiento})^3$$

..... 6.22

- Velocidad mínima de suspensión (velocidad crítica).

La velocidad crítica (N_s), es la velocidad mínima de giro del impulsor para la suspensión, generalmente para la suspensión completa de las partículas en el fondo del tanque.

* O. Molerus y W. Latzel, Chemical Eng. Science, Vol. 42, Nº 6, 1423 - 1437, 1987, presentaron métodos para el cálculo de la velocidad angular mínima de agitación para partículas finas y gruesas.

Partículas finas. Número de Arquímedes ≤ 40 .

Aquí llegaron a la conclusión de que la región responsable de la suspensión completa de las partículas es la capa fronteriza de la pared del tanque donde las velocidades locales del líquido son similares a las velocidades de asentamiento de la partícula.

Y a través de un análisis de flujo de la capa fronteriza en un tanque agitado fueron derivados dos criterios teóricos para la velocidad angular mínima de agitación.

A partir de este cálculo obtuvieron la siguiente ecuación:

$$w = 45.21 \left[d_p g \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho} \right]^{0.555} (D/\sqrt{r})^{0.111} 1/D_s$$

..... 6.23

Válida para:

$$A_R = d_p^3 g \sqrt{v}^2 \left[\rho_s - \rho_f / \rho_s \right] \leq 40 \quad \dots\dots 6.24$$

y concentración de volumen hasta 10%

Donde w , es la velocidad angular en 1/seg; d_p , es el diámetro de la partícula en metros; g , es la aceleración gravitacional en metros/seg²; ρ_s , es la densidad del sólido en kg/metros³; ρ_f es la densidad del líquido; T , es el diámetro del tanque en metros; v , es la viscosidad cinemática en metros²/seg; D_s , es el diámetro del impulsor en metros.

Partículas gruesas. Número de Arquimedes > 40.

La velocidad angular mínima de agitación fue predicha por la evaluación de dos diagramas para el arrastre de partículas fluidizadas, como una función de la concentración y para la tasa de flujo volumétrico de la cabeza de presión de un tanque agitado. No se presenta ninguna ecuación para evaluar w .

- Diseño para suspensión de sólidos.⁵

Generalmente para el diseño no se usan las ecuaciones directamente para calcular N_s , debido a la poca exactitud de estas y a la diversidad de geometrías e impulsores usados; generalmente se usan gráficas para la turbina axial, que es el impulsor más usado. El diseño lo vamos a enfocar para partículas con velocidades de asentamiento de 0.5 a 20 pies/min., en líquidos de baja viscosidad (hasta 100 - cps aprox.).

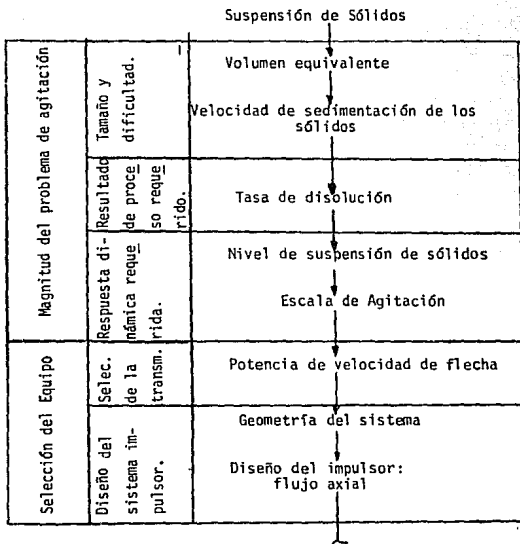
El diseño lógico a seguir se muestra en la figura 6.9 .

* Tamaño y dificultad

El tamaño y dificultad de los problemas de suspensión de sólidos son indicados por el volumen equivalente y la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas (u_d), respectivamente.

El volumen equivalente es:

$$V_{eq} = (Sg)_{s1} V \quad \dots\dots 6.25$$



Diseño lógico para suspensión de sólidos

Figura 6.9

Donde V es el volumen de lechada a ser agitado y $(Sg)_{s1}$ es la gravedad específica de la lechada.

La velocidad terminal de asentamiento, u_t , de partículas esféricas es mostrada en la figura 6.10, como una función del tamaño de partícula y la diferencia en gravedad específica entre el sólido y el líquido, $[(Sg)_s - (Sg)_l]$ en agua, que puede ser usado para estimar velocidades de sedimentación de partículas en cualquier líquido de baja viscosidad.

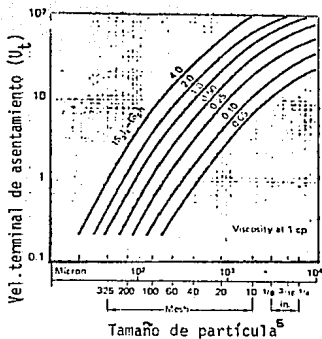


Figura 6.10

Para calcular una velocidad de sedimentación de diseño, u_d , la velocidad terminal, u_t , se combina con un factor de corrección, f_w , de la tabla 6.3:

$$u_d = u_t f_w$$

..... 6.26

TABLA 6.3

FACTOR DE CORRECCIÓN PARA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE SÓLIDOS EN LECHADAS.

Sólidos%	Factor, f_w
2	0.8
5	0.84
10	0.91
15	1.0
20	1.10
25	1.20
30	1.30
35	1.42
40	1.55
45	1.70
50	1.85

Este procedimiento de diseño puede dar selecciones conservadoras, aun cuando las formas de las partículas se desvien marcadamente de las esferas, o cuando la velocidad de asentamiento fuera mas reducida de la que se produce en un sistema de baja velocidad. Para estos casos un diseño óptimo podria ser encontrado mediante la simulación del sistema de agitación.

* Escala de agitación.

Es conveniente expresar la respuesta dinámica para la suspensión de sólidos por medio de una escala de agitación con rango de 1 a 10.

Esto se muestra en la tabla 6.4.

TABLA 6.4

REQUERIMIENTOS DE PROCESO AJUSTADOS AL GRADO DE AGITACIÓN
PARA SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS.

Escala de Agitación

Descripción

1 - 2

Los niveles de agitación de 1 a 2 caracterizan aplicaciones que requieren niveles mínimos de suspensión de sólidos para alcanzar los resultados del proceso: La capacidad de los agitadores del nivel 1 será:
*Producir movimiento de todos los sólidos con las velocidades de asentamiento de diseño.
*Permitir el movimiento de los rellenos de sólidos en el fondo del tanque, los cuales son periódicamente suspendidos.

3 - 5

Los niveles de agitación de 3 a 5 caracterizan la mayoría de los procesos químicos industriales con suspensión de sólidos.
La capacidad de los agitadores en el nivel 3 será:
*Suspender todos los sólidos con velocidad de asentamiento de diseño, completamente fuera del fondo del tanque.

Escala de Agitación

Descripción

*Proveer una lechada uniforme por lo menos a un tercio de la altura del tanque.

*Indicado para formación de la lechada de salida del tanque, a poca elevación del fondo.

6 - 8

Los niveles de agitación de 6 a 8 caracterizan las aplicaciones donde el nivel de suspensión de sólidos se acerca a la uniformidad.

La capacidad de los agitadores en el nivel 6 será:

*Proveer uniformidad en la concentración de los sólidos hasta un 95% de la altura del tanque .

*Indicado para formación de la lechada de salida, a una elevación del 80% de la altura del tanque.

9 - 10

Los niveles de agitación de 9 a 10 caracterizan aplicaciones donde la uniformidad en la suspensión de sólidos es la máxima prácticamente.

La capacidad de los agitadores en el nivel 9 será:

*Proveer una uniformidad de los sólidos en toda la lechada hasta un 98% de la altura del tanque.

*Indicados para formación de lechadas para salidas por medio de rebosaderos.

* Diseño del Sistema Impulsor.

El impulsor básico para suspensión de sólidos es la turbina de hoja inclinada o comúnmente llamada turbina de flujo axial.

Para estimar el diámetro de la turbina de hoja inclinada para la respuesta dinámica requerida, usaremos:

$$D = 394 \left[\frac{Hp}{nN^3} (Sg)_{s1} \right]^{0.2}$$

.....6.27

..... 89

* Guías de diseño.

Para los procesos más comunes de la Industria Química, se han elaborado guías de diseño, donde la escala de agitación recomendada, es la que ha demostrado ser la más efectiva para obtener la agitación requerida. En la tabla - 6.5 se enumeran dichos procesos.

- Transferencia de masa sólido-líquido³.

Se ha encontrado que el coeficiente de transferencia de masa es relativamente independiente del grado de agitación, una vez que la suspensión total se ha establecido. Cambios en el coeficiente de transferencia líquido-filme no son una fuerte función de la operación del agitador. Consecuentemente, una vez que los sólidos son suspendidos en el fondo del tanque, el área superficial es expuesta.

Para lograr un incremento significativo en la tasa de transferencia de masa, bajo estas condiciones, requerirían grandes potencias de salida para la agitación adicional; que económicamente no son factibles, a menos que el proceso requiera específicamente este aumento en la transferencia de masa, para estos casos se recomienda hacer estudios o pruebas piloto para determinar que tanta agitación se necesita y el tipo de geometría del impulsor.

En la práctica se usa la suspensión completa de los sólidos en el fondo del tanque como el punto donde la transferencia de masa es máxima y óptima para un proceso de disolución.

TABLA 6.5

GUÍAS DE DISEÑO PARA APLICACIONES DE AGITADORES EN PROCESOS INDUSTRIALES DE SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS (AGITADORES DE ENTRADA SUPERIOR).⁸

PROCESO INDUSTRIAL	DESCRIPCION DEL PROCESO	VARIABLE DE DISEÑO PRINCIPAL.	ESCALA DE AGITACIÓN	INFORMACIÓN DE DISEÑO ADICIONAL.
<u>Tratamiento de Aguas</u>				
- Tanque de incorporación de Carbón	Incorporar y suspender carbón activado en agua.	Vel. de asentamiento de las partículas de carbón.	4 a 6	Turbinas Duales. Una cerca de la superficie provee un remolino para una rápida incorporación del carbón activado.
- Tanque Superficial	Mantener el carbón en contacto con el agua.	Vel. de asentamiento de las partículas de carbón.	3	Esta escala de agitación es usualmente suficiente, para re-suspender las partículas de carbón después de períodos con la agitación apagada.
<u>Conversión de Combustibles y energía.</u>				
- Tanque de Almacenamiento de piedra caliza - aditiva.	Suspender piedra caliza para un depurador de SO ₂ .	$U_d = 1 \text{ pie/min}$	3	Se requieren usualmente agitadores múltiples para pequeñas configuraciones de tanque Z/T. Las turbinas usualmente están recubiertas de caucho.
- Tanque absorbedor de recirculaciones.	Mantener en suspensión sulfitos de calcio y sulfatos y recircular piedra caliza de los lavadores de SO ₂ .	$U_d = 1 \text{ pie/min}$	3 a 6	La localización del agitador depende de la configuración del tanque; turbina con recubrimiento de caucho.

CONTINUACION TABLA 6.5

PROCESO INDUSTRIAL	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	VARIABLE DE DISEÑO PRINCIPAL.	ESCALA DE AGITACION.	INFORMACIÓN DE DISEÑO ADICIONAL.
<u>Refinación de Minerales</u>				
- Tanque de Lechada.	Disolver fracciones de minerales, como complejos amoniacados en tanques de paso.	Vel. de asentamiento de los sólidos .	6 a 10	El paso en el proceso determina el nivel de escala.
<u>Industria del Fósforo.</u>				
- Tanque de Lodos - Roca	Suspender rocas trituradas de fosfato.	$U_d = 0.5$ a 1	3 a 5	
- Tanque de ataque	Contactar fosfato con ácido sulfúrico (algunas veces en etapas múltiples o compartimientos)	$U_d = 10$ pies/min.	6 a 8	
<u>Industria del Azúcar y Almidón.</u>				
- Tanque de disolución de azúcar.	Disolver azúcar seca para formar jarabe.	Vel. de asentamiento de las partículas iniciales.	3	El diseño de grandes agitadores esta determinado por homogenización - movimiento de líquidos o suspensión de sólidos.

VII.- Selección de las partes Mecánicas.

Después de haber obtenido las condiciones de proceso a las que debemos trabajar nuestro agitador, viene la parte crítica del diseño, que es lo mecánico; - es decir como va estar soportado nuestro agitador, tipo de materiales de la flecha tipo de reductor, tipo de sellos, etc.

Aquí es donde, si se tienen varios agitadores con las mismas condiciones de operación (RPM, HP, Tipo de Impulsor, Número de impulsores, etc.), la elección del agitador a usar va a ser una función de sus características mecánicas y económicas.

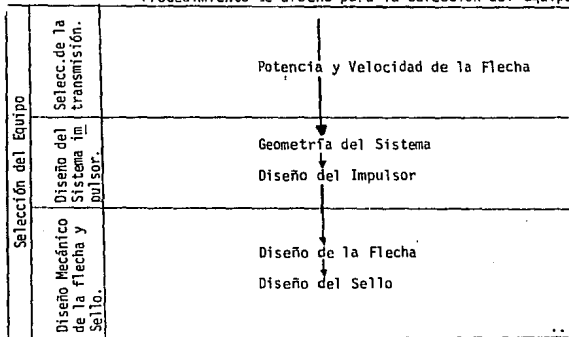
El objetivo de este capítulo es presentar de una manera resumida la bibliografía sobre las principales partes mecánicas que lleva un agitador, tipos de agitadores usados en la Industria y lo más importante, la forma de elegir el reductor más adecuado a las necesidades de agitación.

7.1 Selección del Equipo⁶

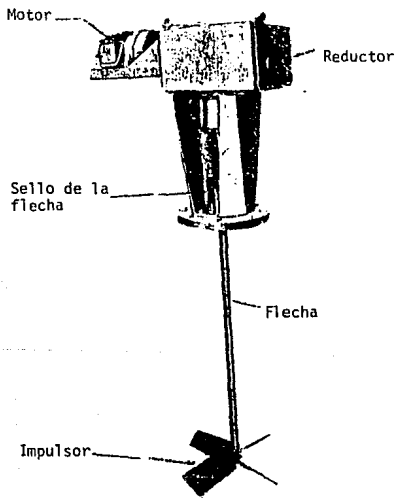
El proceso de diseño comienza con la clasificación del problema de agitación, y termina cuando la potencia del impulsor del agitador, la velocidad de la flecha y el sistema impulsor son determinados.

La selección del equipo requiere un entendimiento de las condiciones de operación, configuración del montaje del agitador, y un análisis mecánico a fondo de los componentes de la turbina del agitador; la figura 7.1 esquematiza este procedimiento.

Figura 7.1
Procedimiento de diseño para la Selección del Equipo



Los principales componentes de un agitador, como lo muestra la figura 7.2, son motor, transmisión del agitador, sello de la flecha, flecha del agitador e impulsor. El motor provee la potencia para mover el impulsor en el fluido de proceso. La transmisión del agitador transmite la potencia, reduce la velocidad del motor e incrementa el torque. En adición, la transmisión del agitador provee de soporte para la flecha del agitador.



Componentes principales de un Agitador

Figura 7.2

7.2 Medio ambiente del agitador.⁶

El medio ambiente total en el cual el agitador opera debe ser entendido muy bien; es una combinación de fuerzas y momentos generados por agitar el contenido del tanque y de las condiciones ambientales afuera y dentro del mismo.

Fuerzas y momentos son un resultado del movimiento del fluido producido por la rotación del impulsor. Las condiciones ambientales, independientes de la agitación, incluyen factores tales como la presión, temperatura y corrosividad. Las fuerzas y momentos producidos por el impulsor rotando en el fluido son mostradas en la figura 7.3

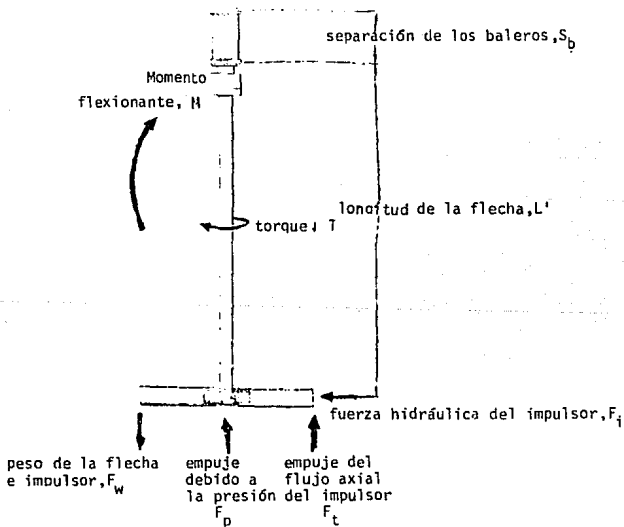


Figura 7.3

Antes de entender completamente la relación entre el diseño mecánico y estas fuerzas, lo siguiente debe ser considerado:

- a) La magnitud y naturaleza de las fuerzas debe ser identificado.
- b) El diseño conceptual del agitador debe tomar en cuenta estas fuerzas.
- c) Los estándares de ingeniería y las tolerancias de manufactura deben ser consistentes con el diseño del equipo.

Al aplicar potencia para mover el impulsor en el líquido se genera un torque, que puede ser calculado con:

$$T_q = 63,025 \quad (H_{pt} / N) \quad \dots\dots 7.1$$

Para impulsores múltiples, el torque total es acumulativo.

Las fuerzas hidráulicas actuando sobre el impulsor generan momentos, los cuales actúan sobre la flecha y son transmitidos a la transmisión del agitador. Debido a la naturaleza al azar de estas fuerzas y la rotación de la flecha, estos momentos flexionantes con frecuencia cambian de dirección durante la operación.

La componente máxima horizontal de estas fuerzas hidráulicas, F_h , puede ser estimada de:

$$F_h = 19,000 \quad H_{pt} \quad f_s / ND \quad \dots\dots 7.2$$

Donde f_s es el factor de servicio de la fuerza hidráulica, que es igual a 1.0 a grados de agitación menores de 7 y condiciones normales y mayores a 1.0 a grados de agitación mayor a 7 y condiciones anormales de agitación.

El momento flexionante, M , es el producto de la fuerza hidráulica, F_h , y la distancia, L' , de la turbina al primer balero de soporte en la transmisión del agitador:

$$M = F_h \quad L' \quad \dots\dots 7.3$$

Por lo tanto, flechas con gran voladizo pueden producir momentos flexionantes muy grandes.

La flecha del agitador y la transmisión también están sujetas a fuerzas verticales. La principal fuerza vertical es el peso de la flecha e impulsor, F_w . En aplicaciones de alta presión, el empuje hacia arriba, F_p , para agitadores de entrada superior actúa sobre los baleros en la transmisión. Para unidades de entrada inferior, el empuje es hacia abajo y se añade a F_w . Un impulsor de hojas inclinadas o de flujo axial normalmente bombea hacia abajo y genera un empuje hacia arriba, F_t . Esta fuerza es generalmente despreciable cuando se compara con el peso de la flecha, el impulsor y la transmisión del agitador.

7.3 Tipos de Montaje.

* Montaje de Pinza:³⁹

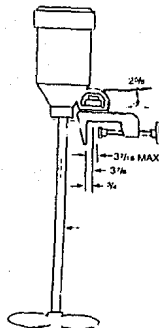
El agitador se monta en el borde del tanque por medio de una pinza; y se usa generalmente en tanques abiertos o tanques semicerrados.

Este tipo de montaje es utilizado en agitadores de baja potencia, llamados portátiles, los cuales usan como impulsor propelas, por lo que sus rangos de operación son iguales a los que se dieron en la tabla 4.1 para este tipo de impulsores.

Los agitadores portátiles generalmente trabajan a 350 RPM (transmisión de engranes) y 1750 RPM (transmisión directa); donde el primer criterio de selección de la velocidad de operación es el tamaño del tanque a ser mezclado. Aplicaciones en tanques grandes usan agitadores de transmisión de engranes. Mientras que tanques pequeños usan de transmisión directa. Una segunda consideración para la selección de la velocidad es la viscosidad de los componentes y el producto final. Los de transmisión directa son usados en líquidos de baja viscosidad, mientras que los portátiles de transmisión de engranes son apropiados en aplicaciones de alta viscosidad; otros factores que afectan la selección de la velocidad serían la sensibilidad del material al corte, el tiempo de homogeneización requerido, etc.

En general este tipo de agitadores son los mas usados en la mayorfa de los procesos, por su facilidad de operación , transportación y economfa.

La figura 7.4 esquematiza estos agitadores.



Agitador portátil de propela

Figura 7.4

Las tablas 7.1 y 7.2 dan los estándares usados en los agitadores portátiles marca NETTCO, para diámetro mínimo de flecha y largo estandar recomendado de la misma, de acuerdo a la potencia requerida del agitador.

Algunas recomendaciones para el uso óptimo de los agitadores portátiles son:

- Colocar la flecha 10 a 20° fuera de la vertical.
- Angular la flecha 10 a 20° fuera de la línea central del tanque, y localizar la propela mas o menos a la mitad del centro del tanque y el borde del tanque.
- Use una propela si el diámetro del tanque es aproximadamente igual a la profundidad del líquido en el tanque.

- Posicione esta propela a 1 ó 2 diámetros del fondo del tanque.
- Si el diámetro del tanque es menor de 2/3 la profundidad del líquido, use dos propelas. La propela de abajo debe estar a 1 ó 2 diámetros de propela del fondo del tanque, la propela de arriba debe estar a la mitad entre la propela del fondo y la superficie del producto .
 - Para humedecer polvos, posicione la propela en el centro del tanque - para crear un vórtice que jale los polvos al líquido. Dos propelas son usadas normalmente en estas aplicaciones. Recordar que un vórtice es usualmente ineficiente para mezclar otros ingredientes.
 - Cuando el tanque es rectangular, se requiere más de un agitador para que la agitación sea eficiente.
 - Para aplicaciones con líquidos de alta viscosidad use dos propelas.
 - Cuando se estén mezclando líquidos de diferentes viscosidades y diferentes densidades, es recomendable usar dos propelas.
 - Cuando el tanque sea muy pequeño, es preferible montar el agitador en un soporte especial.
 - Ajustar bien la pinza al borde del tanque para evitar vibraciones del agitador.

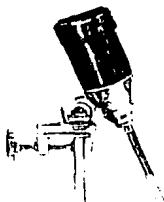
TABLA 7.1
 AGITADOR PORTÁTIL DIRECTO (1750 RPM).³⁹

HP	Ø DE FLECHA (PULGADAS)	LARGO DE FLECHA RECOMENDADO(PULG.)
1/4	3/4	48
1/2	3/4	48
3/4	3/4	48
1	1	66
1½	1	66
2	1	66

39
 TABLA 7.2
 AGITADOR PORTÁTIL ENGRANADO (350 RPM)

HP	Ø DE FLECHA (PULGADAS)	LARGO DE FLECHA RECOMENDADO (PULG.).
1/4	1	72
1/2	1	72
3/4	1	72
1	1	72
1½	1	72
2	1	72

La figura 7.5 muestra como se monta un agitador de pinza al borde del tanque.



* Montaje de Placa.

Este tipo de montaje es utilizado en tanques abiertos donde el agitador es soportado independientemente del tanque por medio de unas vigas a lo largo de la parte abierta del tanque; y en tanques cerrados de tapa plana a presión atmosférica donde el agitador es colocado por medio de tornillos a la tapa del tanque; en este tipo de montaje se usan agitadores con impulsores de propela y turbina.³⁹

Generalmente el montaje de placa se utiliza cuando el tamaño del tanque es demasiado grande para el montaje de pinza o cuando el agitador se requiere que sea fijo.

En agitadores de propela se usan velocidades de 350 y 1750 RPM; los estandares usados en este tipo de agitadores estan dados en la tabla 7.3 y 7.4

TABLA 7.3

MONTAJE DE PLACA, TRANSMISIÓN DIRECTA³⁹
(1750 RPM)

HP	Ø DE FLECHA (PULGADAS)	LARGO DE FLECHA RECOMENDADO (PULG).
1/4	3/4	42
1/2	3/4	42
3/4	3/4	42
1	1	60
1½	1	60
2	1	66

TABLA 7.4

MONTAJE DE PLACA, TRANSMISIÓN DE ENGRANES³⁹
(350 RPM)

HP	Ø DE FLECHA (PULGADAS)	LARGO DE FLECHA RECOMENDADO (PULG).
1/4	1	66
1/2	1	66
3/4	1	66
1	1	66
1½	1.25	72
2	1.25	72

La figura 7.6 ilustra un agitador portátil engranado de placa.



Figura 7.6

La figura 7.7 ilustra el montaje de un agitador portátil de placa para un tanque abierto y uno cerrado.

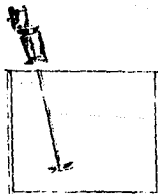
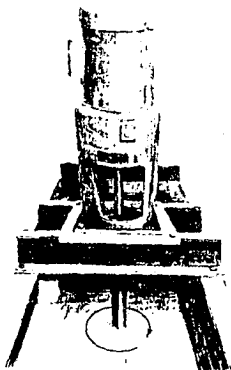


Figura 7.7

Las recomendaciones para su uso óptimo son las mismas que en el montaje de pinza; además, que si se quiere evitar el vórtice hay que darle una pequeña inclinación a la base de la placa.

En agitadores de turbina axial se usan velocidades de 25 a 350 RPM, los rangos de trabajo son los indicados en la tabla 4.4 ; la figura 7.8 muestra un típico agitador de turbina marca NETTCO.

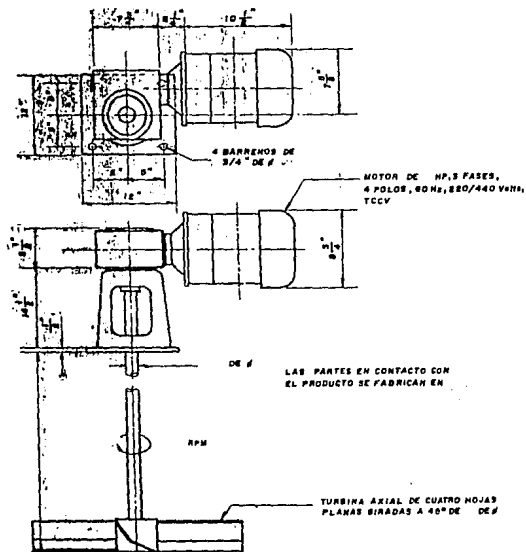
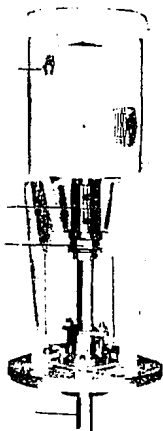


Figura 7.8

* Montaje de Brida.

Se usa en tanques cerrados, principalmente en tanques a presión o vacío ; la colocación del agitador puede ser por arriba del tanque, por abajo y lateralmente, la brida se ajusta al tanque y lleva sello mecánico o estopero dependiendo de la presión de trabajo.³⁹

Las figuras 7.9 y 7.10 ilustran este tipo de agitadores.



Agitador de propela
con montaje de brida.

Figura 7.9

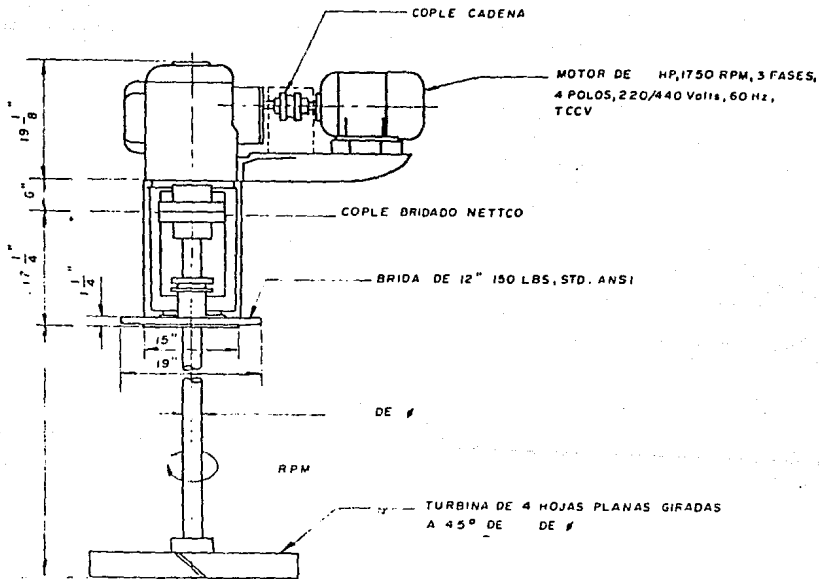
a) Por arriba del tanque.

Este tipo de montaje es el más usado con diferentes arreglos; el agitador es soportado por una estructura montada en el tanque, con soporte del agitador separado del tanque, el agitador montado en un pedestal en el tanque.³⁶

La figura 7.11 ilustra este tipo de montaje.

Las ventajas de este tipo de colocación es que si el sello mecánico sufre algún desperfecto los daños son mucho menores que en desperfectos de sello en - entradas por abajo y laterales; otra ventaja es que, por la posición vertical de la flecha el peso del impulsor más el peso de la flecha actúan como un estabilizador de la flecha.

La única desventaja mecánica de este arreglo es que, grandes longitudes de flecha son requeridas, lo que incrementa el costo del impulsor, particularmente cuando se requiere de metales especiales.



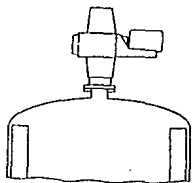
Agitador de turbina axial con montaje de brida.

Figura 7.10

b) Por abajo del Tanque.

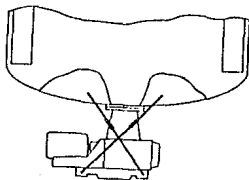
Hay muchas razones para usar este tipo de colocación. Los grandes motores y reductores en los procesos continuos en la actualidad son fáciles de instalar, darles mantenimiento y sencillos de soportar. El largo de la flecha es normalmente más corto que en los de entrada por arriba del tanque. La entrada por abajo, por lo tanto, reduce el costo del agitador y los momentos flexionantes. Lo crítico de esta colocación es el sello de la flecha, montaje y diseño del tanque de agitación.

La figura 7.12 ilustra este tipo de montaje.



Montaje por arriba del tanque

Figura 7.11



Montaje por abajo del tanque

Figura 7.12

c) Entrada Lateral.

Son usados generalmente en tanques de grandes volúmenes de trabajo como por ejemplo: Tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

La figura 7.13 ilustra este tipo de montaje.

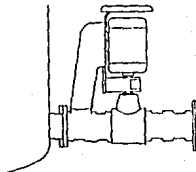
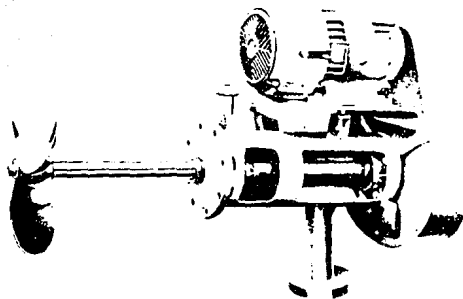


Figura 7.13

Hay situaciones donde las ventajas de usar agitadores de entrada lateral o de entrada por abajo, sopesan las desventajas:

- En el caso de tanques extremadamente grandes.
- Cuando el tanque no tiene la estructura para soportar un agitador de entrada por arriba.
- Cuando la forma del tanque, no permitiera una buena agitación en un arreglo de entrada por arriba.
- Algunos procesos donde la presencia de una flecha de agitador extendiéndose a través de la interfase líquido-vapor o en presencia en el espacio-vapor, afecte el proceso.
- En el caso de grandes tanques cilíndricos verticales, el uso de agitadores laterales puede ser considerablemente menos caro, aun en costo inicial y costo de operación.

La figura 7.14 ilustra en detalle un agitador de montaje lateral.



Agitador de montaje lateral
Figura 7.14

7.4 Motores.

La agitación requiere potencia para mover el líquido, esta es proporcionada por los diferentes tipos de motores, siendo los más usados los motores eléctricos, los cuales podemos dividir en:

a) De corriente alterna; encontrándose de 2 tipos, motor de inducción de jaula de ardilla y rotor devanado, y motor síncrono.

Siendo el más usado el motor de inducción el cual dependiendo de las necesidades puede ser trifásico (220/440 volts), monofásico, a prueba de explosión (para atmósferas con vapores inflamables y explosivos), de velocidad fija, de polos conmutables con 2 velocidades de operación, tropicalizados (con recubrimientos interiores y exteriores para evitar la corrosión).

b) De corriente directa; que generalmente son usados en operaciones con variación de velocidad, el cual dependiendo de las necesidades puede ser a prueba de explosión y tropicalizados.

Algunas recomendaciones para la selección y operación del motor eléctrico a usar serían:

- Seleccionar el tipo de protección del motor de acuerdo a las características del área donde va a operar.
- No trabajar con potencias iguales a las que va a requerir el proceso para su agitación, sino que debemos manejar un factor de margen, para que el motor pueda contrarrestar pequeños imprevistos.

- Para cada tipo de motor, hay potencias que no se fabrican en México, por lo que por economía y funcionalidad, antes de elegir la potencia a usar hay que consultar si en verdad se fabrica en el país.

La tabla 7.5 muestra características de motores de inducción de jaula de ardilla y rotor devanado de 4 polos, trifásicos, que son los de más uso comercial; para otro tipo de motores hay que consultar tablas de fabricantes .

TABLA 7.5
 POTENCIAS COMERCIALES DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE
 ARDILLA Y ROTOR DEVANADO, 4 POLOS, TRIFÁSICO, 1800 RPM.
 (MARCA ASEA)^{6B}

Potencia de Salida Hp	Corriente a plena carga		Peso Neto apróx. Kgs
	220 v (AMP)	440 v	
0.25	-	-	5.5
0.50	2.1	1.0	7.0
0.75	2.9	1.5	14.0
1.0	3.8	1.9	14.0
1.5	5.4	2.7	15.0
2.0	7.1	3.6	15.0
3.0	10.0	5.0	24.5
5.0	15.9	7.9	30.0
7.5	23.0	11.0	43.5
10.0	29.0	15.0	53.0
15.0	44.0	22.0	88.0
20.0	56.0	28.0	105.0
25.0	71.0	36.0	134.0
30.0	84.0	42.0	155.0
40.0	109.0	54.0	205.0
50.0	136.0	68.0	225.0
60.0	161.0	80.0	250.0

* Cheque periódicamente la corriente a la que esta trabajando el motor eléctrico para prevenir cualquier sobrecarga.

A veces cuando las condiciones del medio ambiente de operación del agitador son en atmósferas con vapores inflamables o explosivos y se requiere variación de velocidad, una opción económica puede ser usar un motor neumático, lo único que habría que tener sería un compresor con la presión suficiente, es decir de acuerdo a la potencia y RPM que trabajemos el motor neumático, va a ser la presión y gasto de aire que requeriremos del compresor (tabla 7.6), el rango de potencia de estos equipos es muy limitado (0.2 Hp a 10 Hp), por lo que generalmente se usan en equipos portátiles a potencias bajas (0.5 a 2 Hp).

TABLA 7.6
 GUÍA DE CONSUMO DE AIRE/ PRESIÓN DE AIRE, PARA
 MOTORES NEUMÁTICOS.

HP	PSIG	CFM(AIRE LIMPIO)
0.5	60	15
1.0	85	30
2.0	95	70

Otro tipo de motores que no son muy usados son:

- Turbinas de vapor.
- Máquinas de diesel.
- Máquinas de gas.
- Motores hidráulicos.

7.5 Aparatos para variar la velocidad.

En operaciones que requiere cambios de velocidad, se tienen que usar aparatos para variar la velocidad, hay muchos tipos, su elección dependerá principalmente de lo económico.

Los diferentes tipos que hay son:

- a) Eléctrico; el cual puede ser un termostato para motores de corriente directa y un inversor de frecuencia para motores de corriente alterna.
- b) Hidráulicos; los cuales pueden ser aparatos hidrocineéticos, hidrovicosos e hidroestáticos; los cuales son poco usados.
- c) Mecánico; es el medio más común y más barato de lograr una velocidad variable de operación; son muy usados en la actualidad, hay aquellos en los que la velocidad puede ser cambiada a la vez que el agitador esta en movimiento y - son llamados transmisión de control ~~en~~ movimiento hay otros en los que el agitador debe ser parado para cambiar la velocidad y se les llama de control estacionario los cuales son poco usados en aplicaciones de agitación.

La tabla 7.7 muestra un comparativo entre las características de estos aparatos de variación de velocidad.

TABLA 7.7
CARACTERÍSTICAS DE LOS APARATOS DE VARIACIÓN
DE VELOCIDAD.

TIPO	MANTENIMIENTO	EFICIENCIA	PRECIO	POTENCIA
Inversor de frecuencia.	bajo	alta	alto	constante
Termostato	bajo	alta	bajo	constante
Hidroestático	medio	baja	alto	variable
Hidrocineético	bajo	baja	bajo	variable
Mecánico	alto	alta	medio	variable

Algunas recomendaciones para elegir un variador de velocidad son:

- Si requiere hacer los cambios de velocidad en un lugar lejano a el agitador, utilice un inversor de frecuencia o un termostato.
- Si requiere controlar con exactitud los cambios de velocidad utilice - un inversor de frecuencia (grandes potencias) y un termostato (bajas potencias.)
- Si son pocos los cambios de velocidad, utilice un equipo mecánico de variación de velocidad.

7.6 Coples.

La conexión entre el motor y la transmisión del agitador es normalmente un cople flexible, el cual tiene como función principal compensar los pequeños desalineamientos entre la flecha de salida del motor y la flecha de entrada de la transmisión. Muchos tipos de coples de alineamiento pueden ser usados (un tipo tiene una parte de elastómero flexible y una rejilla de metal flexible entre las aberturas del cople).

Diseños especiales de coples controlan el flujo de potencia entre el motor y la transmisión, coples limitantes de torque, liberan completamente al motor de la transmisión cuando una gran sobrecarga ocurre.

Coples fluidos o coples llenos con balines de acero, reducen los choques de las cargas; estos tipos son útiles en aplicaciones de suspensión de sólidos, donde el impulsor puede ocasionalmente contactar con grandes terrones de sólidos pesados. Otros diseños especiales de coples incluyen coples centrifugos para proteger la transmisión de la aceleración que tiene el motor y coples que permiten la rotación de la flecha en una sola dirección.

7.7 Transmisión del agitador.

La transmisión del agitador es el más importante componente del mismo y es normalmente la parte más crítica y cara. La transmisión, por lo consiguiente, es vital para una correcta selección del agitador.

En la mayoría de las aplicaciones de agitación, alguna forma de reducción de la velocidad es necesaria. Los dos medios más prácticos y eficientes de conseguirla son por medio de engranes y bandas; un tercer método hidráulico, es razonablemente eficiente, pero impráctico para operaciones de velocidad fija.

Los equipos de transmisión de bandas son usualmente limitados a agitadores de entrada lateral con reducción sencilla de velocidad; la transmisión por bandas es eficiente y económica.

La transmisión de engranes, también llamada reductor de engranes, reductores y reductores de velocidad, es la más durable y resistente de todas las transmisiones mecánicas.

La cual transmite grandes potencias con grandes eficiencias y larga vida de servicio, pero generalmente son más caras que otras alternativas.

Las transmisiones de engranes pueden ser manufacturadas con más de una reducción de velocidad, de manera que cualquier velocidad puede ser alcanzada.

Hay muchos tipos de engranes disponibles, algunos de los cuales son diseños patentados y la mayoría tienen materiales especiales.

Unos pocos tipos han estado usándose grandemente en agitadores, principalmente debido a su compatibilidad con el arreglo de los mismos, y son:

- a) Helicoidales.
- b) Cónicos.
- c) Corona y Sinfín.

* Helicoidales y Cónicos.⁷⁶

- La eficiencia se mantiene constante conforme la relación o la reducción de velocidad.
- Los valores de velocidad que se pueden obtener son muy variados.
- Son comúnmente usados en combinación para transmisiones de agitadores con dos o tres reducciones.
- Flechas de salida en ángulo recto con la base del agitador.
- Pueden trabajar con grandes potencias y bajas velocidades.

La figura 7.15 ilustra este tipo de reductores.

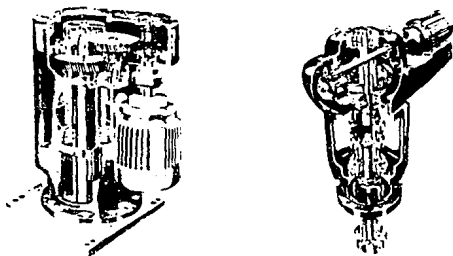


Figura 7.15 .

- * Corona y Sinfn.⁴⁶
- Se pueden obtener grandes reducciones de velocidad con una reducción - sencilla.
 - Flechas de salida en ángulo recto con la base del agitador.
 - La eficiencia decrece conforme aumenta la reducción de velocidad.
 - Ocupa menos espacio para una reduccción de velocidad que una transmisión de engranes con reducción a la misma velocidad, a determinadas potencias.
 - Alta duración.
 - Absorbe mayor carga de golpeo.
 - Gran capacidad de sobrecarga.
 - Sistema extremadamente suave y silencioso para transmitir fuerza.
 - Se usan muy poco a potencias mayores de 100 Hp.
 - El arreglo en ángulo recto de la flecha de salida con la base del agitador, permite el uso de motores estandar, con base de pie en su posición horizontal normal, esto generalmente en equipos grandes (no portátiles) de entrada superior al tanque debido a que la flecha del agitador es vertical.

La figura 7.16 ilustra este tipo de reductores.

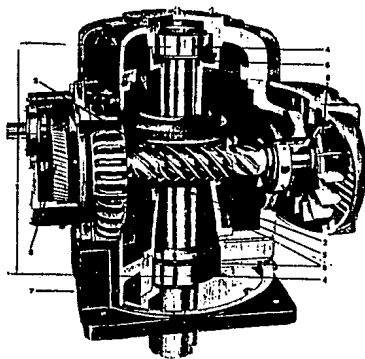


Figura 7.16

Explicar paso a paso como se diseña un reductor de engranes, nos llevaría un estudio muy amplio, que no es el caso de este trabajo monográfico, lo que indicaremos son los términos más usados y sus definiciones, para una mejor comprensión y manejo de los mismos.

- La asociación que normatiza a los fabricantes de reductores, es AGMA (American Gear Manufacturers Association) que es La Asociación Americana de fabricantes de Engranes, la cual ha desarrollado y adoptado estándares de clasificación de engranes para todos los tamaños y aplicaciones, para los tipos: dientes, helicoidales, doble helicoidal y cónico.
- Factor de servicio: relaciona el rango de transmisión, a la potencia transmitida y esta basado en el motor, duración del servicio y clasificación de cargas.
- Potencia de servicio permisible: es la clasificación mecánica de la potencia a un factor de servicio de 1.0 dividida por el factor de servicio de trabajo.
- Un entendimiento del rango de potencia de la transmisión de engranes es necesario en orden de escoger y dimensionar a la misma, para aplicaciones de agitación. Brevemente, la determinación del rango de potencia y la selección del motor es como sigue:
 - 1) Usando AGMA estándares, el rango de potencia de los engranes individuales y flechas son calculados.
 - 2) El rango de potencia de los baleros es calculado basandose en una vida de servicio requerida de los mismos.
 - 3) El rango de potencia más bajo de los engranes, flechas y baleros es el régimen de potencia de la transmisión de engranes.
 - 4) La potencia de servicio (la potencia permitida del motor), es la potencia mecánica dividida por el apropiado factor de servicio de la aplicación.
 - 5) El rango de potencia térmica debe ser mayor que o igual a la potencia de servicio, si no lo es, debe proveerse enfriamiento externo, como ventiladores e intercambiadores de calor.
 - 6) Otras consideraciones de diseño, basadas en la experiencia, son evaluadas junto con el rango de potencia antes que la transmisión de engranes es aprobada para su uso con un motor específico al factor de servicio requerido.

- AGMA estandar 420.04 da las prácticas generalmente usadas para calcular los rangos de dureza y durabilidad para reductores de velocidad cerrados usando engranes helicoidales y cónicos.
- El rango de dureza de un engrane es la máxima potencia permisible a la que el aditamento puede transmitir sin tener una fractura o rompimiento por fatiga de los dientes.
- El rango de durabilidad del engrane, es la potencia a la cual el aditamento puede transmitir con seguridad, sin desarrollar superficies curvas destructivas.
- El rango de potencia de la flecha del reductor, puede ser definido como la potencia que la flecha puede transmitir sin una falla por fatiga, permitiendo una sobre-carga mínima sin una falla por cedencia.
- AGMA define el rango térmico de un reductor como la potencia que puede ser continuamente transmitida por tres horas o más sin exceder las limitaciones de temperatura especificadas. Estas limitaciones son una elevación de la temperatura de operación del pozo de aceite de 100° F arriba de la del ambiente y una temperatura máxima del aceite del pozo de 200° F. El factor de servicio no es aplicado con los rangos térmicos.
- Las cargas externas impuestas por la flecha del agitador sobre la transmisión de engranes deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño y selección de la transmisión de engranes.
- La carga de transmisión, pernos, baleros y la flecha deben ser diseñados de manera que las deflexiones y tensiones de todos los componentes esten entre los niveles de seguridad aceptables .

Otro factor muy importante es la lubricación del sistema reductor por lo que hay que considerar los siguientes puntos:

- El aceite en una transmisión de engranes tiene un doble propósito, uno es lubricar los engranes y baleros y el otro es remover el calor de esas áreas. Este punto es muy importante para el buen funcionamiento del agitador, por lo que siempre hay que mantener el aceite a su nivel adecuado, chequeandolo periódicamente.

- El nivel de aceite de una transmisión de engranes es más importante de lo que la gente piensa, no se piensa que mucho aceite o poco, puede ser dañino para el equipo; si el nivel del aceite es muy alto y rebosa o salpica alrededor del contenedor de aceite, lavará la grasa del balero de baja velocidad, lo cual puede causar una falla. Mucho aceite causará también mucha sumergencia del engrane lo cual generará salpicaduras excesivas pudiendo provocar sobrecalentamiento del reductor.
- La mayoría de los agitadores están lubricados con grasa-aceite.
- Los factores ambientales también afectan la lubricación. Cuando los agitadores están instalados en atmósferas extremadamente abrasivas o con vapor saturado, especial atención debe tenerse con los sellos de aceite, especialmente el sello de la flecha de alta velocidad. Sellos de aceite purgados doblemente engrasados, deben ser usados en estos lugares para proteger el balero de alta velocidad de partículas abrasivas o humedad.

Cada fabricante tiene diferentes tipos de diseños de transmisiones de engranes; en este trabajo utilizaremos reductores con transmisión de corona y sin ffn (algunas veces con combinaciones corona-sin ffn y engranes helicoidales) esto en agitadores de turbina de entrada superior, la cual es diseño NETTCO DE MEXICO (fabricante de agitadores Industriales).

Para agitadores portátiles trabajaremos con engranes helicoidales relación 5/1 y 4/1 (350 y 420 RPM), también diseño NETTCO DE MEXICO.

- * Especificaciones para la transmisión de un agitador de turbina de entrada por arriba.⁶

Quando vamos a elegir un reductor de los que existen en el mercado, o alguno fabricado por compañías dedicadas a la venta de Agitadores Industriales, es recomendable que el agitador cumpla ciertas especificaciones, que asegurarán el buen funcionamiento del mismo.

Estas recomendaciones o especificaciones que deben de cumplir son:

- Motor eléctrico: Motor de corriente alterna, jaula de ardilla, inducción, -- con la capacidad de potencia y torque requerido para la aplicación específica en la que va a ser usado.

Los motores deben estar en concordancia con las especificaciones de NEMA, generalmente un diseño tipo B, NEMA, con capacidad para el torque de arranque, a menos que el requerimiento del mismo sea mas estricto. El factor de servicio del motor debe ajustarse al usado en la planta y a los requerimientos del equipo. El motor debe ser suministrado en la fase apropiada, frecuencia y voltaje disponible en el sitio de instalación.

- Coples: El cople entre el motor y la transmisión debe ser adecuado para anticipar desalineamientos paralelos, angulares y axiales. Diseños especiales de coples pueden ser usados para condiciones de servicio inusuales.

- Reductor: La transmisión debe ser diseñada especialmente para el servicio de agitación con turbina. Reductores de velocidad diseñados para otro tipo de servicios no deben ser usados.

Las transmisiones que permiten el montaje horizontal del motor son preferidos. Muchos motores de velocidad variable no pueden operar en otro tipo de posición más que horizontal. Los motores eléctricos son fáciles de instalar, mantener y reparar en esta posición.

Los engranes helicoidales deben ser endurecidos, a la vez que los engranes cónicos de caja endurecida deben ser igualados, recubiertos y operados en conjunto.

El factor limitante de un reductor debe ser la durabilidad y la dureza. Todas las transmisiones deben ser diseñadas de acuerdo a las especificaciones AGMA mas conservadoras. El factor de servicio basado en la potencia de placa del motor y 24 horas de operación debe ser 1.25 para servicio normal, 1.5 para servicio con choques moderados y 2.0 para servicios con choques muy grandes. La experiencia previa sera útil para determinar un factor de servicio para aplicaciones específicas.

Un aditamento para cambio de engranes (permitiendo que la velocidad de la flecha sea cambiada) debe ser incorporado dentro de la transmisión. La máxima y mínima velocidad de salida que puede ser obtenida cambiando un engrane sencillo debe ser especificada.

El árbol de transmisión y los baleros internos deben minimizar las deflexiones de la flecha interna, producidas por el torque, momentos flexionantes y choques.

Los baleros de rodillos cónicos deben ser lubricados con aceite o si la lubricación es con grasa, deben ser engrasados constantemente. Los baleros deben tener un mínimo B-10 (AGMA estandar) de vida de 30,000 hrs.

La caja de la transmisión debe ser hecha de fierro fundido o de placa de acero, y probada a presión para detectar defectos de construcción que produzcan fugas de aceite.

- Lubricación: La lubricación debe ser tipo por salpicaduras (inducida por la rotación de engranes internos y flechas) o del tipo forzada - (llevada a cabo por una bomba de aceite). Las transmisiones con un tipo de lubricación por salpicaduras deben incorporar un dispositivo de verificación de nivel de aceite. Para transmisiones con lubricación forzada, la bomba de aceite debe estar equipada con un switch indicador de baja presión.

La transmisión debe estar equipada con un pozo seco (contenedor de -- aceite alrededor de la flecha de salida), para que la retención del - aceite lubricante en la transmisión no dependa del sello del mismo.

- Ruido: La transmisión del agitador debe estar diseñada para minimizar el ruido. El fabricante del agitador debe identificar el nivel de ruido anticipado para la transmisión bajo condiciones de carga total.

- * Selección de reductores de corona - sinfín y de combinación corona-sinfín y engranes helicoidales.

La selección del reductor a usar, va a depender en gran medida de la potencia y velocidad requeridas por el impulsor, para llevar a cabo el proceso de agitación eficientemente.

Generalmente los fabricantes de reductores, dividen sus modelos por el tamaño del mismo y reportan sus características de funcionamiento en tablas, donde en base a una velocidad de entrada al reductor (velocidad nominal del motor) y una relación de reducción (velocidad de salida), tendremos varios datos sobre el mismo, siendo los mas importantes:

a) HP entrada: Potencia máxima que resiste ese tamaño de reductor (potencia máxima del motor).

b) HP salida: Potencia que nos va a dar a la salida el reductor, o sea la eficiencia del reductor para transmitir la potencia del motor.

c) HP térmicos: Potencia máxima que puede soportar el reductor sin exceder las limitaciones de temperatura permitidas.

Donde los HP entrada se utilizan en reductores que tienen ventiladores integrados y los HP térmicos son utilizados en equipos que no los tienen, por lo que pueden calentarse demasiado si trabajamos a las potencias reportadas en los HP entrada (siempre los HP térmicos son menores que los HP entrada).

En la selección del reductor adecuado los datos que necesitamos por parte del fabricante son principalmente los HP entrada, salida, térmicos y el factor de servicio el cual se muestra en las tablas 7.8 y 7.9.

TABLA 7.8
FACTOR DE SERVICIO ⁴⁹

CLASIFICACIÓN DE LA CARGA	DURACIÓN DEL SERVICIO	
	3 A 10 HRS	ARRIBA DE 10 HRS
Uniforme	1.0	1.25
Choques moderados	1.25	1.5
Choques fuertes	1.75	2.0

TABLA 7.9
FACTOR DE SERVICIO PARA TRANSMISIONES CON MOTOR ELÉCTRICO. ^{63,74}

APLICACIONES	SERVICIO	
	10 HRS	24 HRS
Líquidos de densidad variable	1.25	1.5
Líquidos puros	1.0	1.25
Líquidos y sólidos	1.25	1.50

- De acuerdo al fabricante, es la potencia máxima que nos va a soportar cada diferente tamaño de reductor, por lo que para seleccionarlos adecuadamente hay que consultar las tablas que proporciona cada uno. En esta tesis voy a trabajar con reductores NETTCO, donde la máxima potencia que soportan, es diferente a los de otros fabricantes; la idea es ejemplificar como podemos seleccionar un reductor para un agitador.

La tabla 7.10 nos muestra la potencia máxima de salida y de entrada, para reductores NETTCO de corona y sinfín.⁴⁹

La tabla 7.11 nos muestra los Hp térmicos y de salida para el caso de reductores NETTCO modelo 5TG debido a que estos no tienen ventilador.

Las relaciones de velocidad que estamos trabajando, con una velocidad de entrada al reductor de 1750 RPM (que es la velocidad que nos da un motor eléctrico estandar, 4 polos, 3 fases) serian las mostradas en la tabla 7.12; AGMA, maneja otras velocidades de salida, que para el caso de estos reductores no las manejamos.

En la tabla 7.13, se muestran las capacidades máximas que se pueden alcanzar con la combinación de engranes helicoidales y corona-sinfín para trabajar con las velocidades indicadas anteriormente, esto en el caso de los modelos T marca NETTCO; con estos reductores se pueden alcanzar otras diferentes revoluciones de salida o con diferentes combinaciones podemos obtener las mismas RPM de salida, solo que con diferentes capacidades de entrada; por lo que en este trabajo usaremos la máxima alcanzada por una combinación y aplicaremos las RPM estandar de salida, ya que con estas podemos cubrir todos los procesos de agitación.

TABLA 7.10

49
CAPACIDADES DE REDUCTORES NETTCO, CORONA Y SINFIN, CON 1750 RPM DE
ENTRADA, CON FACTOR DE SERVICIO DE 1.25

Relación (RPM salida)	Capacidad	(M O D E L O)					WT-100
		10TG	T A M A Ñ O D E L R E D U C T O R				
			WT-50	WT-60	WT-80		
5:1	HP entrada	11.78	24.17	32.52	57.86	87.70	
(350)	HP salida	11.18	23.10	31.22	55.82	84.79	
7.5:1	HP entrada	9.29	19.73	29.57	52.87	70.08	
(233)	HP salida	8.67	18.73	28.15	50.51	67.94	
10:1	HP entrada	8.41	18.10	24.55	46.41	61.32	
(175)	HP salida	7.70	16.31	23.12	44.01	58.42	
15:1	HP entrada	6.26	12.93	18.17	29.85	49.12	
(117)	HP salida	5.52	11.90	16.72	27.60	46.28	
20:1	HP entrada	5.46	9.53	13.46	25.47	39.17	
(88)	HP salida	4.82	8.40	12.20	23.21	35.93	
25:1	HP entrada	4.95	9.26	12.71	20.18	32.67	
(70)	HP salida	4.17	8.12	11.27	18.47	29.45	
30:1	HP entrada	3.71	6.07	11.92	18.48	31.55	
(58)	HP salida	2.97	4.95	10.34	16.30	28.20	
40:1	HP entrada	3.16	4.62	7.59	14.42	21.08	
(44)	HP salida	2.55	3.69	6.31	12.15	17.95	
50:1	HP entrada	2.65	4.52	6.48	11.88	17.54	
(35)	HP salida	1.93	3.55	5.18	10.09	14.64	
60:1	HP entrada	2.39	4.19	5.32	9.52	15.03	
(29)	HP salida	1.75	3.24	4.09	7.44	12.28	
70:1	HP entrada	2.08	4.04	4.64	8.16	12.80	
(25)	HP salida	1.39	3.08	3.44	6.53	10.32	

TABLA 7.11

⁴⁹
CAPACIDAD DE REDUCTOR TAMAÑO 5 TG, CORONA Y SINFIN, CON 1750
RPM DE ENTRADA (SIN VENTILADOR), CON FACTOR DE SERVICIO
DE 1.25

Relación (RPM)	HP Térmicos	HP Salida
5/1 (350)	6.06	5.73
7.5/1 (233)	5.73	5.35
10/1 (175)	4.55	4.08
15/1 (117)	4.34	3.88
20/1 (88)	2.94	2.55
25/1 (70)	2.23	1.90
30/1 (58)	1.86	1.44
40/1 (44)	1.11	0.82
50/1 (35)	1.07	0.79
60/1 (29)	0.88	0.62
70/1 (25)	0.51	0.34

TABLA 7.12

RELACIONES DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD
(1750 RPM DE ENTRADA)⁴⁹

Relación	RPM Salida
5/1	350
7.5/1	233
10/1	175
15/1	117
20/1	88
25/1	70
30/1	58
40/1	44
50/1	35
60/1	29
70/1	25

50

TABLA 7.13
CAPACIDAD DE ENTRADA (HP ENTRADA) DE REDUCTORES DE
CORONA Y SINFIN-ENGRANES HELICOIDALES, MODELO T,
1750 RPM DE ENTRADA, FACTOR DE SERVICIO DE 1.25.

RPM Salida	M O D E L O			
	T-50	T-60	T-80	T-100
350	25.12	39	72.25	-
233	20.62	29.75	60.12	-
175	18.5	26.5	52.37	-
117	15.5	22.75	43	75.62
88	13	19.5	34.75	68.5
70	11	17.25	31.25	54.37
58	10.25	15.75	25.25	54.37
44	8.37	12.25	22.37	46.87
35	6.25	8.75	20	44.5
29	6.12	8	18.37	31.87
25	5.62	8	15.65	31.62

7.8 Diseño de la flecha del Agitador.

La función principal de la flecha del agitador, es transmitir el torque del reductor a el impulsor. La flecha debe diseñarse de manera que tenga la suficiente fuerza estructural para proveer una operación libre de problemas, debe también tener en cuenta el momento flexionante y finalmente, la flecha y el impulsor no deben girar muy cerca de su frecuencia natural.

El diseño de la flecha requiere de dos pasos: (1) establecer el diámetro mínimo de la flecha (o la selección del módulo) para soportar las fuerzas actuando a través de la flecha; (2) determinar la frecuencia natural de vibración para la flecha y turbinas. El torque transmitido por la flecha tendrá un valor máximo arriba de la turbina cerca de la superficie del líquido.

Dado que la potencia consumida por los dispositivos de sellado es in -
significante, el torque máximo será:

$$Tq \text{ (max)} = \sum (63,025 \text{ HP}_t / N) \quad \dots\dots 7.4$$

El momento flexionante máximo, M max, es la suma del producto de las
fuerzas hidráulicas y la distancia de los impulsores individuales al primer-
balero:

$$M \text{ max} = \sum (19,000 \text{ HP}_t L / ND) \quad \dots\dots 7.5$$

Dado que el momento flexionante y el torque actua simultaneamente, estas
cargas pueden ser combinadas y resueltas dentro de un esfuerzo cortante y un
esfuerzo tensionante que actua sobre la flecha. El diámetro mínimo de la fle-
cha será el mayor de los dos valores calculados de la siguiente fórmula, que
relaciona el esfuerzo cortante y el esfuerzo tensionante respectivamente:

$$d_s = \left[\frac{16 \sqrt{[Tq \text{ (max)}]^2 + (M \text{ max})^2}}{\pi \sigma_s} \right]^{1/3} \quad \dots\dots 7.6$$

$$d_t = \left\{ \frac{16 [M \text{ max} + \sqrt{(tq \text{ max})^2 + (M \text{ max})^2}]}{\pi \sigma_t} \right\}^{1/3} \quad \dots\dots 7.7$$

Para usar las ecuaciones 7.6 y 7.7, debemos definir el esfuerzo cortante
(σ_s) y tensionante (σ_t) permisible; para acero al carbón y acero inoxidable
común (tipo 304 y 316) los límites de esfuerzo de 6000 psi para cortante y -
10,000 psi para tensionante, son recomendados para condiciones normales de ope-
ración.

* Frecuencia natural de vibración.

El término frecuencia natural, aplicado a un sistema vibratorio describe la frecuencia de vibración a la cual la resonancia ocurre.

La velocidad de operación de la flecha debe estar lo suficientemente lejos de la frecuencia natural del sistema, para prevenir deflecciones que excedan el esfuerzo permitido. Se recomienda que la velocidad de operación de la flecha del agitador no exceda el 65% de la primera frecuencia natural del sistema, esto suponiendo que la flecha del agitador no tiene una desviación estática (desviación de la vertical) mayor que 0.003 pulg/pie, los impulsores están estáticamente balanceados, la velocidad de operación es menor que 100 RPM y es usada la transmisión diseñada para agitadores. Es posible añadir un estabilizador a la turbina, su efecto es incrementar el amortiguamiento del sistema proveyendo un área superficial que se oponga al movimiento lateral de la flecha y la turbina. Si la flecha del agitador cumple con los estándares previamente discutidos y un estabilizador es añadido, se recomienda que N no exceda 80% de la primera frecuencia natural.

El estabilizador no provee amortiguamiento, a menos que el impulsor este sumergido en el fluido de proceso. Sin embargo, en el aire no hay fuerzas hidráulicas de desplazamiento.

Para calcular la primera frecuencia natural de un agitador de entrada por arriba con una flecha en voladizo de diámetro constante, usaremos:

$$N_c = \frac{0.388 \times 10^6 (d^2 F_m)}{L' \sqrt{W_e} \sqrt{L' + S_b}} \quad \dots\dots 7.8$$

Fm es un factor de las propiedades del material que corrige la ecuación 7.8; para otras propiedades aparte de las del acero al carbón, es calculada de:

$$F_m = \left(\int s \quad E_m / \int m \quad E_s \right) \quad \dots\dots 7.9$$

El término W_e es un peso equivalente de todos los pesos concentrados y distribuidos de la flecha e impulsores y es calculado de:

$$W_e = W + W_1 (L_1^- / L^-)^3 + \dots + W_n (L_n^- / L^-)^3 + wL^-/4$$

..... 7.10

Donde L^- es la distancia de la turbina del fondo al primer balero del reductor y L_n^- es la distancia de la parte de abajo de la turbina de arriba al primer balero.

La primera selección del diámetro de la flecha en un análisis de frecuencia natural, debe ser el mínimo aceptable basado en los cálculos de resistencia.

Si la frecuencia natural está muy cerca de la velocidad de operación, las siguientes opciones de diseño están disponibles:

- 1) Use un estabilizador, esto permite la operación cerca de la frecuencia natural del sistema.
- 2) Incremente el diámetro de flecha; a la vez que esto es comúnmente hecho, hay limitantes del diámetro de la flecha de salida para cualquier transmisión de un agitador. Para los reductores que vamos a trabajar los diámetros máximos de flecha ⁴² están indicados en la tabla 7.14.

TABLA 7.14

Modelo	Diámetro máximo de flecha (pulg)	
5 TG	1½	
10 TG	2½	
T, WT 50	2½	3
T, WT 60	3	4
T, WT 80	4	5
T, WT 100	5	5½

- 3) Remueva peso inecesario de las turbinas.
- 4) Remueva peso inecesario de la flecha.
- 5) Corte la flecha; esto es facil de hacer, pero se debe tener cuidado de no comprometer el comportamiento del proceso.
- 6) Escoja una combinación de potencia / velocidad más baja; asegurese que el nivel de agitación sea mantenido.
- 7) Use un balero estático en el fondo del tanque; esto incrementa la consistencia del sistema y cambia el modo de vibración.

* Peso de los impulsores

Antes de que la frecuencia natural pueda ser calculada, se debe estimar el peso de los impulsores de turbina.

Por facilidad de instalación, los impulsores de turbina son normalmente de construcción de hojas con pernos, con mamelón que es removible y ajustado a la flecha.

El peso de las turbinas de acero al carbón o inoxidable, con cuatro hojas, puede ser estimado añadiendo el peso del mamelón y el peso de la hoja. De la tabla 7.15 obtendremos un peso estimado del mamelón.⁷

TABLA 7.15

Diámetro de Flecha (pulgadas)	Peso del Mamelón (libras)
1.5	10
2.0	20
2.5	25
3.0	40
3.5	50
4.0	60
4.5	75
5.0	100
5.5	125
6	150
7	200
8	250
9	300

Calcularemos el peso de la hoja para las cuatro hojas de:

$$W_b = (0.35 D^3 HP_t / N)^{1/4} \dots\dots 7.11$$

Los pesos de turbina obtenidos por este procedimiento simplificado tienen una precisión del 20% más o menos, del peso actual de la turbina en el rango de 20 a 80 pulgadas de diámetro.

7.9 Sello de la Flecha

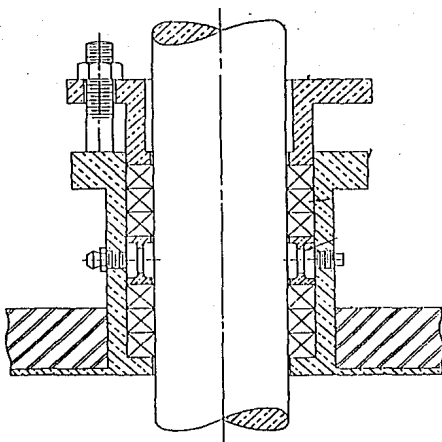
Un dispositivo para sellar, entre el contenido del tanque y la atmósfera es requerido siempre que la presión de proceso es diferente a la atmosférica; cuando el contenido del tanque debe ser retenido debido a su toxicidad, inflamabilidad o evaporación, o en el caso de agitadores de entrada lateral, por debajo del tanque, simplemente para retener el contenido del tanque. Varios dispositivos están disponibles para lograr esto, pero los más comúnmente usados son los prensaestopas (estopero) y el sello mecánico.

- Prensaestopas:

El elemento sellante es un empaque prensado que es comprimido entre la campana y la flecha del agitador, por la placa del prensaestopas y el armazón dividido. El anillo linterna distribuye las fuerzas compresivas y provee un sendero para los lubricantes.

El prensaestopas para bajas presiones, se usa para sellar por arriba los tanques y evita contaminación del producto, está limitado a presiones menores de 15 libras.

El prensaestopas de presión estándar se usa para sellar por arriba tanques para vacío o presiones hasta 150 libras,⁶⁷ puede usar grasa en el anillo linterna o circular líquido a través del anillo linterna para atrapar materiales tóxicos o corrosivos; puede llevar una camisa de agua o vapor, sus limitantes son el vacío total y 150 libras de presión, 400° F de temperatura, esto dependiendo de la selección del empaque.



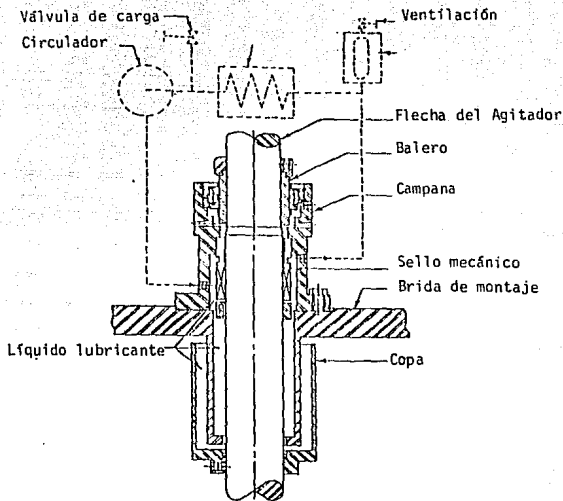
Prensaestopas de presión estandar

- Sello mecánico :

Los sellos mecánicos son mas costosos que los demás tipos de sellos.³ Sin embargo, ofrecen muchas ventajas que compensan su gran costo, y tienen una frecuencia de mantenimiento de la mitad a un cuarto de la que necesitan los prensaestopas. A presiones mayores de 150 libras, es raro encontrar prensaestopas, - sino que solamente se usan sellos mecánicos. Sus ventajas son:

- a) Cero o muy pocas posibilidades de fuga en mucho tiempo.
- b) Reducidos requerimientos de potencia.
- c) Eliminación de rayado y desgaste de la flecha del agitador.
- d) Eliminación de mantenimientos diarios.

Los elementos esenciales para un sello mecánico de un agitador⁶¹ se muestran en la figura 7.17



Sello mecánico sencillo

Figura 7.17

El retén contiene los resortes, sello primario y sello secundario. El retén se mantiene en su lugar por medio de un juego de tuercas, rotando como una unidad con el mango rotante. El sello secundario es un elemento sellante estacionario en el mango. Los resortes alargados con presión hidráulica empujan el anillo del sello primario contra el anillo estacionario de émbolo.

Los sellos mecánicos, están orientados de manera que la fuerza de la presión, empuje en la misma dirección de los resortes. Dado que el anillo del sello primario y el anillo del émbolo son perpendiculares a esta fuerza, la fuerza de sellado se incrementa conforme la presión aumenta. Un lubricante provee una película delgada entre estas caras para prevenir el desgaste prematuro. Sin embargo, si la presión de sellado llega a ser muy grande, este lubricante puede ser apretado entre las caras del sello.

Para grandes presiones de sellado, la cara de presión es reducida, balanceando el sello mecánico.

El arreglo de sello mecánico doble es usado en agitadores por varias razones:

- a) La mayoría de las veces, los sellos de agitadores operan en un espacio con vapor, el cual no produce lubricación.
- b) El lubricante en la cavidad del sello, es usualmente superior a las propiedades lubricantes de la mayoría de los líquidos de proceso.
- c) Materiales peligrosos en tanques de proceso, pueden ser manejados con seguridad debido a que el sello doble es presurizado para gotear dentro del tanque, rara vez fuera de este.

Un sello mecánico sencillo es algunas veces usado dentro de la caja del sello del agitador para aplicaciones de bajas presiones.

7.10 Líquidos Corrosivos

Al estar diseñando el agitador, para un determinado proceso de agitación, hay que tener cuidado de investigar la corrosividad de la sustancia que se va a agitar, para así poder elegir el tipo de metal a usar en la flecha e impulsores.

Muchas veces es más económico utilizar un recubrimiento de hule Hypalon o Neopreno sobre una flecha de acero al carbón en vez de usar acero inoxidable que es bastante caro; esto va a ser principalmente función de la longitud de la flecha, diámetro de turbinas y tipo de aplicación.

El acero inoxidable se usa siempre en la Industria Farmacéutica, alimentos y en la química que maneja productos de alta pureza, donde el usar hule podría contaminar el producto y cuando la longitud y diámetro de la flecha es pequeño.

Los aceros más usados son acero al carbón, inoxidable 304 y 316. Para elección del tipo de acero a usar, consúltense en tablas de resistencia a la corrosión que maneja cada fabricante.

VIII.- Método de Cálculo y Ejemplos prácticos

Con un método de cálculo que nos lleve paso a paso al diseño de un agitador, podemos llegar a seleccionar más eficientemente el equipo de agitación adecuado - para cada tipo de proceso; ya sea que utilicemos equipos portátiles con impulsor - tipo propela o agitadores de turbina y laterales.

Es objetivo de este capítulo proporcionarlo, a partir de los métodos y datos encontrados en la bibliografía.

8.1 Agitadores de turbina axial-entrada superior.

* Homogeneización y movimiento de líquidos en tanques de proceso en línea y al macenamiento.

1.- Identifique y asegurese que verdaderamente sea un proceso de homogeneización y movimiento de líquidos, la tabla 6.2 lo puede ayudar.

2.- Recabe todos los datos de proceso disponibles, entre más tenga más efectivo - va a ser el diseño:

- a) Datos Físico-Químicos del líquido: densidad o gravedad específica, viscosidad, corrosividad, inflamabilidad, concentración, etc.
- b) Datos de proceso: temperatura, presión, gastos volumétricos, etc.
- c) Datos de Geometría del Tanque: diámetro altura, volumen de trabajo, tipo de Tanque (cilíndrico, vertical, horizontal, cuadrado, etc) abierto o cerrado, etc.
- d) Datos mecánicos: tamaño de brida, placa, material requerido, tipo de montaje del agitador, etc.
- e) Datos eléctricos: corriente, voltaje, etc.
- f) Datos ambientales: ubicación del tanque, tipo de medio ambiente (corrosivo, explosivo, tóxico, etc.).

3.- Identifique si los datos del proceso están entre los rangos de la tabla 8.1, dentro de los cuales podemos utilizar este método de cálculo (si los datos cayeran fuera de estos rangos, el agitador obtenido con este método no sería totalmente adecuado).

TABLA 8.1

RANGOS DENTRO DE LOS CUALES PODEMOS UTILIZAR ESTE MÉTODO DE CÁLCULO.⁴

- Líquidos newtonianos.
- Miscibles.
- Diferencia en Sg menor de 1.0.
- Diferencia en viscosidad menor de 100,000 cps.
- Partículas sólidas menor a 2% de concentración.
- Velocidad de asentamiento de las partículas menor a 6 pies / min.
- Volumen del tanque mayor a 1,300 galones.
- Entrada del agitador por arriba del tanque.

4.- Definimos el resultado de proceso que requerimos:

- a) Transferencia de calor.
- b) Reacción química.
- c) Homogeneización.

5.- Definimos el nivel de agitación que necesitamos: fuerte, medio y bajo.

6.- Con el dato de resultado de proceso y nivel de agitación, nos vamos a la tabla 6.1 donde escogemos la escala de agitación y por lo tanto la velocidad volumétrica (v_b); si son dos líquidos sacamos sus diferencias en gravedad específica y viscosidad, y con esto también nos basamos para escoger la escala de agitación.

7.- De acuerdo a la viscosidad y a la relación Z/T de la tabla 8.2, obtenemos el número de impulsores y su colocación en el tanque; con el dato del número de impulsores definimos las ecuaciones que vamos a usar.

TABLA 8.2

NÚMERO DE IMPULSORES PARA HOMOGENEIZACIÓN Y MOVIMIENTO⁴

Viscosidad Co	Impulsores Nº	Claro del Impulsor de abajo	de arriba	Relación Máxima Z/T
Hasta 25,000	1	Z/3	-	1.4
Hasta 25,000	2	T/3	(2/3)Z	2.1
Mayor 25,000	1	Z/3	-	0.8
Mayor 25,000	2	T/3	(2/3)Z	1.6

8.- De la tabla 8.3 obtenemos las recomendaciones de bafleo para el tanque con los datos de viscosidad y volumen del tanque.

TABLA 8.3

RECOMENDACIONES DE BAFLEO PARA HOMOGENEIZACIÓN Y MOVIMIENTO⁴

Volumen gal	Viscosidad Cp	Baffles
Menor 1,000	Menor 2,500	4 a 90°, ancho T/12, separación T/72
Menor 1,000	Mayor 2,500	ninguno
Mayor 1,000	Menor 5,000	4 a 90°, ancho T/12, separación T/72
Mayor 1,000	Mayor 5,000	ninguno

9.- Fijamos una velocidad de la flecha del agitador en RPM, sabiendo que para agitadores de turbina las velocidades de trabajo van de 25 a 350 RPM (esto en agitadores con reductores NETTCO, en la tabla 7.12 se muestra todo el rango de velocidades), por lo que N deberá estar entre este rango, para el caso de otros reductores las velocidades se van a fijar de acuerdo a las especificadas

por AGMA y los fabricantes. Se recomienda fijar 3 velocidades para poder comparar resultados y escoger la combinación HP/N más adecuada.

10.- Calculamos un diámetro de turbina tentativo, suponiendo que el régimen - al que vamos a trabajar es turbulento, esto a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Nq_{\text{turb}} = 0.683 \left(\frac{0.394}{D/T} \right)^{1/2} \dots\dots 8.1$$

$$Q = v_b A \dots\dots 8.2$$

$$A = \frac{1}{2} \pi (T/12)^2 \dots\dots 8.3$$

Donde para una turbina :

$$Nq = Q/N(D/12)^3 \dots\dots 8.4$$

Con lo cual obtenemos

$$D = \left(\frac{21.97 v_b T^{3/2}}{N} \right)^{2/5} \dots\dots 8.5$$

Para dos turbinas:

$$Nq = Q/1.7 N (D/12)^3 \dots\dots 8.6$$

Obtenemos

$$D = \left(\frac{12.92 v_b T^{3/2}}{N} \right)^{2/5} \dots\dots 8.7$$

11.- Con este diámetro supuesto, calculamos D/T, el número de Reynolds y el número de bombeo:

$$N_{Re} = 10.7 Sg N D^2/\mu \quad \dots\dots 8.8$$

Después sacamos el Reynolds ajustado con:

$$N_{Re}^* = N_{Re} \left(\frac{D/T}{0.394} \right)^{1/2} \quad \dots\dots 8.9$$

Con el N_{Re}^* y D/T sacamos Nq^* de las siguientes correlaciones:

Para N_{Re}^* mayores de 20,000 $Nq^* = 0.683 \quad \dots\dots 8.10$

Para $20,000 > N_{Re}^* > 300$

$$Nq^* = \exp [-571 + 1.683 \ln N_{Re}^* - 0.179 (\ln N_{Re}^*)^2 + 0.0064 (\ln N_{Re}^*)^3] \quad \dots\dots 8.11$$

Para $300 > N_{Re}^* > 25$

$$Nq^* = \exp [-0.947 - 0.231 \ln N_{Re}^* + 0.0467 (\ln N_{Re}^*)^2] \quad \dots\dots 8.12$$

Para N_{Re}^* menores de 25

$$Nq^* = 0.3 \quad \dots\dots 8.13$$

El Nq^* obtenido se corrige con:

$$Np = Nq^* \left(\frac{0.394}{D/T} \right)^{1/2} \quad \dots\dots 8.14$$

El Nq también se puede obtener a partir de la gráfica ⁴ 8.1, con los datos de N_{Re} y D/T.

12.- Con este N_q , calculamos D con³⁶:

Para una turbina

$$D = \left(\frac{9.425 v_b T^2}{N_q N} \right)^{1/3}$$

.....8.15

Para dos turbinas

$$D = \left(\frac{5.54 v_b T^2}{N_q N} \right)^{1/3}$$

.....8.16

13.- Comparamos D con el valor de D estimado, si la diferencia entre estos valores es mayor a 0.1, entonces hay que volver al paso 11 y repetir los pasos subsiguientes utilizando D ; esto hasta que la diferencia sea menor a 0.1.

14.- Cuando obtengamos el diámetro de turbina (D) con el que vamos a trabajar, (hay que llevarlo a valores de pulgadas cerradas) tenemos que checar, si la relación D/T esta entre 0.3 y 0.7 (rangos de trabajo recomendados); si se sale de estos limites hay que volver a fijar³⁶ N y repetir los pasos desde el punto 10:

Si D/T es menor que 0.3, entonces intentar con N más baja.

Si D/T es mayor a 0.7, entonces intentar con N más alta.

15.- Con el valor de N y D calculamos la potencia requerida y el gasto con las ecuaciones³⁶:

Para una turbina

$$HP_t = 0.656 \times 10^{-13} f_{\mu} S_g N^3 D^5$$

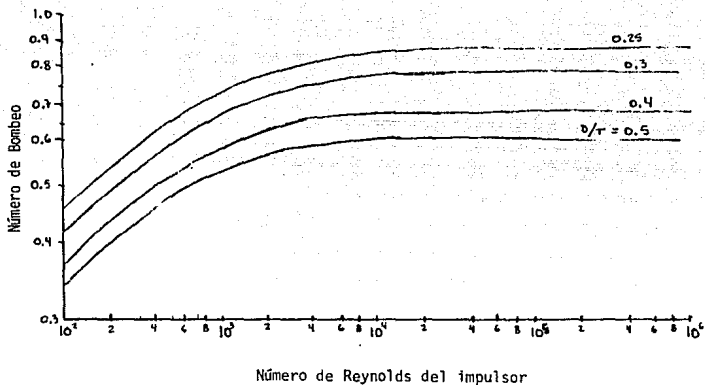
.....8.17

Para dos turbinas

$$HP_t = 1.312 \times 10^{-13} f_{\mu} S_g N^3 D^5$$

.....8.18

.....138



Gráfica 8.1

Donde f_μ es un factor de corrección por viscosidad, que podemos obtener de la gráfica 8.2 con el número de Reynolds³⁶ (que sale de sustituir el D fijado o de trabajo) o a partir de las siguientes correlaciones:

$$\text{Para } N_{Re} \text{ mayores de } 900 \quad f_\mu = 1 \quad \dots 8.19$$

$$\text{Para } 900 > N_{Re} > 8 \quad f_\mu = \exp [3.154 - 0.848 \ln N_{Re} + 0.0565 (\ln N_{Re})^2] \quad \dots 8.20$$

$$\text{Para } 8 > N_{Re} > 1 \quad f_\mu = \exp [3.649 - 0.942 \ln N_{Re} - 0.106 (\ln N_{Re})^2 + 0.0448 (\ln N_{Re})^3] \quad \dots 8.21$$

Para N_{Re} menores a 1

$$f_p = 38,4/N_{Re}$$

.....8.22

El gasto lo obtenemos a partir de :

Para una turbina

$$Q = Nq N(D/12)^3$$

.....8.23

Para dos turbinas

$$Q = 1.7 Nq N(D/12)^3$$

.....8.24

16.- Los cálculos del punto 10 al punto 15, se repiten para cada una de las velocidades seleccionadas en el punto 9.

17.- Para cada una de las velocidades seleccionadas (de preferencia 3), elaboramos una tabla con N seleccionada y los resultados de D y HP_t obtenidos para cada uno de los valores (dividimos HP_t entre 0.85 que es la eficiencia del motor).

18.- En base a la tabla 7.5 de potencia de motores comerciales, la que se obtuvo para cada una de las velocidades fijadas, se lleva a una disponible en el mercado (siempre a la mayor más cercana).

19.- Elegimos el tamaño de reductor adecuado para cada combinación HP/N, esto en base a las tablas 7.10 , 7.11 y 7.13 de características de reductores NETTCO, el cual debe cumplir con lo siguiente:

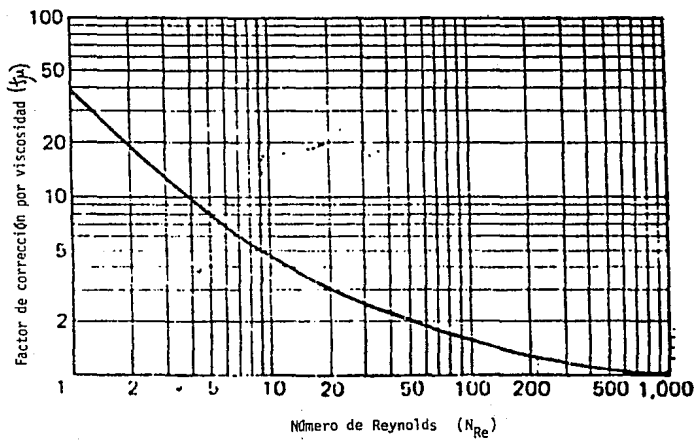
a) Tener un factor de servicio mayor o igual a 1.25.

$$F.S. = \text{Potencia máxima de entrada/potencia del motor.}$$

b) La potencia de salida del reductor tiene que cubrir los HP que va a requerir la turbina (eficiencia del reductor)

c) El diámetro máximo de flecha de salida del reductor tiene que ser mayor que el diámetro mínimo de flecha para soportar las fuerzas que van a actuar sobre el impulsor.

.....140



Gráfica 8.2

20.- De los reductores seleccionados para cada una de las velocidades escogidas, vamos a elegir el que cumpla más efectivamente los siguientes puntos:

- Más económico.
- Factor de servicio más alto.
- Cubra más efectivamente las necesidades de potencia de la turbina, la cual podemos calcular a partir de:

$$\text{HP salida} = \text{HP motor} \cdot \text{eficiencia del reductor} \cdot \text{eficiencia motor}$$

donde:

$$\text{eficiencia del reductor} = \text{HP salida} / \text{HP entrada}$$

$$\text{eficiencia del motor} = 85\% \text{ (motores eléctricos comerciales).}$$

- Tamaño del reductor (entre más grande, más caro y difícil de montar y operar).
- Potencia del motor eléctrico a usar.

21.- De la tabla 7.14 obtenemos el diámetro máximo de flecha para cada modelo o tamaño de reductor.

22.- Con los datos de HP de la turbina, D y N, diseñamos la flecha, lo cual requiere calcular:

- El diámetro mínimo de la flecha para soportar las fuerzas que van a actuar sobre la misma.
- La frecuencia natural de vibración del sistema turbina-flecha.

Calculamos el torque máximo y el momento flexionante máximo:

$$T_q \text{ (max)} = \sum (63,025 \text{ HP}_t / N) \quad \dots\dots 8.25$$

$$M \text{ (max)} = \sum (19,000 \text{ HP}_t \cdot L / ND) \quad \dots\dots 8.26$$

Con estos datos calculamos el diámetro mínimo de flecha:

$$d_s = \left[\frac{16 \sqrt{[T_q \text{ (max)}]^2 + (M \text{ max})^2}}{\pi \cdot \sigma_s} \right]^{1/3} \quad \dots\dots 8.27$$

$$d_t = \left\{ \frac{16 [M \text{ max} + \sqrt{(\tau q \text{ max})^2 + (M \text{ max})^2}]^{1/3}}{\pi \cdot \sigma_t} \right\} \quad \dots\dots 8.28$$

Donde $C_s = 6,000$ PSI y $C_t = 10,000$ PSI para acero al carbón y acero inoxidable 316, 304 comerciales.

El mayor valor que obtengamos entre d_s y d_t será el que tomaremos como mínimo.

Comparamos el diámetro mínimo obtenido, con el diámetro máximo de flecha de salida del reductor seleccionado, si es menor podemos continuar con el método de cálculo, si es mayor hay que elegir un diámetro de flecha de salida mayor, por lo que generalmente hay que irse a un reductor de mayor tamaño o hacer modificaciones mecánicas al seleccionado.

23.- Calculamos la primera frecuencia lateral natural³ (Nc):

$$N_c = \frac{0.388 \times 10^6 (d^2 F_m)}{L \sqrt{W_e} \sqrt{L + S_b}} \quad \dots\dots 8.29$$

Donde:

$$F_m = \left(\rho_s E_m / \rho_m E_s \right)^{1/2} \quad \dots\dots 8.30$$

F_m para aceros comerciales se toma como 1.0

$$W_e = W + W_1 (L_1^- / L^-)^3 + \dots + W_n (L_n^- / L^-)^3 + wL^-/4 \quad \dots\dots 8.31$$

$W = W$ mamelón + W hojas

Para sacar pesos es recomendable consultar a los proveedores de impulsores, para el caso de impulsores NETTCO podemos utilizar la tabla 8.4 y 8.5; o:

$$W_b = (0.35 D^3 HP_t / N)^{1/3} \quad \dots\dots 8.32$$

Donde W_b es el peso de las hojas de una turbina axial de cuatro aspas; el peso del mamelón lo podemos obtener a partir de la tabla 7.15.

24- Si la turbina no tiene estabilizadores, N no debe ser mayor de 0.65 Nc; si tiene, N no debe ser mayor que 0.8 Nc, si es mayor hay que escoger un diámetro más grande, reducir la longitud de la flecha, ponerle estabilizadores al impulsor, escoger una combinación HP/N más baja o usar una chumacera en el fondo del tanque.

TABLA 8.4

44

PESOS APROXIMADOS DE TURBINAS

Díametro (pulg)	Peso (lb)
12	2.72
14 a 18	3.3
20	11.0
22 a 28	19.0
30 a 42	45.0
44 a 52	76.0
54 a 58	106.0
60 a 70	163.0

TABLA 8.5

PESOS DE FLECHA POR PIE DE LONGITUD.

44

Díametro de flecha (pulg)	Peso (lb)
3/4	1.0
1.0	2.5
1½	4.0
1½	6.0
2	10.0
2½	13.0

25.- Elegimos el soporte del agitador, el cual va a ser función de que el tanque sea abierto o cerrado.

26.- Escogemos sello mecánico o estopero de acuerdo al tipo de proceso:

- Prensaestopas para presiones menores a 15 lb/pulg².
- Prensaestopas de presión estandar, para presiones hasta 150 lb/pulg².
- Sello mecánico sencillo, presiones hasta 750 PSI.
- Sello mecánico doble, presiones arriba de 750 PSI.

27.- Escogemos el tipo de motor de acuerdo al medio ambiente, voltaje, velocidad, etc.

28.- Escogemos material de la flecha e impulsor de acuerdo a la corrosividad del líquido a agitar.

29.- Por último hacemos la descripción del agitador que vamos a usar para el proceso separando sus partes de la siguiente forma:

- Descripción del reductor.
- Tipo de motor.
- Tipo de flecha y dimensiones.
- Tipo de impulsor y dimensiones.

- Ejemplo práctico:

En todos los ejemplos, vamos a seguir paso a paso los métodos de cálculo propuestos para cada uno de los diferentes procesos de agitación, el número de paso va a corresponder al del método de cálculo, esto para cada uno de los ejemplos.

La compañía San Pablo Equipos⁵⁴ necesita homogeneizar aceite de coco, Hidróxido de Potasio (KOH) y agua en un reactor cerrado.

- 1.- Es un proceso de homogeneización y movimiento de líquidos.
- 2.- Datos del problema:
 - a) Datos Físico-Químicos:
 - Concentraciones: Hidróxido de Potasio al 1%
 - Densidad relativa: Sg del aceite de coco a 70°F = 0.9
Sg del agua a 70°F = 1.0
Sg del KOH al 1% a 59°F = 1.0
Sg final de la mezcla 197.6° F = 1.0
 - Viscosidad : Viscosidad del aceite de coco a 140°F = 10 cps
Viscosidad del agua 197.6° F = 1 cps
Viscosidad del KOH al 1% a 197.6° F = aprox. 1 cps
Viscosidad final de la mezcla 197.6° F = 5,000 cps
 - Mezcla no corrosiva, no inflamable.
 - b) Datos de Proceso:
 - Temperatura = 197.6° F
 - Presión = 36 lbs/pulg² = 36 PSI
 - Tiempo requerido de agitación = 6 a 7 horas
 - c) Datos de geometría del tanque:
 - Diámetro (T) = 74.8 pulg.
 - Altura del tanque en su parte recta (H) = 90.55 pulg. = 7
 - Tanque cilíndrico con tapas toriesféricas.
 - Cerrado.
 - Volumen de trabajo = 1,723 galones.
 - Altura de la parte toriesférica = 8 pulg.

d) Datos mecánicos:

- Brida: recomendar dimensiones.
- Tanque en acero al carbón.
- Entrada del agitador por arriba.

e) Datos eléctricos:

- Voltaje = 220/440 volts.

f) Datos ambientales:

- El tanque esta ubicado en un lugar cerrado, con atmosfera no corrosiva, ni explosiva.

3.- Al checar si estos datos caen dentro de los rangos de la tabla 8.1, vemos que este método es adecuado para este tipo de proceso.

4.- Es un proceso de reacción y homogeneización.

5.- Nivel de agitación medio.

6.- De la tabla 6.1 escogemos un nivel de agitación de 4, con lo que obtenemos $v_b = 24$ pies/min.

7.- Con la viscosidad máxima de 5,000 cps y $Z/T = 1.21$, de la tabla 8.2 obtenemos:

$$\text{Número de impulsores} = 1$$

$$\text{Claro del impulsor} = Z/3 = 90.55/3 = 30.18 \text{ pulg.}$$

8.- Con viscosidad máxima de 5,000 cps y volumen de 1,723 galones, de la tabla 8.3 obtenemos que el tanque debe llevar 4 baffles a 90° , con un ancho de $T/12 = 6.23$ pulgadas y separación de la pared del tanque, $T/72 = 1.03$ pulg.

9.- Fijamos tres velocidades de cálculo: 70, 88 y 117.

Comenzamos los cálculos con 88 RPM (los cálculos se van a repetir en la misma forma para las otras velocidades).

10.- Con la ecuación 8.4 obtenemos :

$$D = \left(\frac{21.97 (24) (74.8)^{3/2}}{88} \right)^{2/5} = 27.25 \text{ pulg} = 27 \text{ pulg.}$$

11.- Sacamos D/T = 0.3643 y N_{Re} con la ecuación 8.8:

$$N_{Re} = \frac{10.7 (1.0) (88) (27)^2}{5,000} = 137.28$$

Sacamos el Reynolds ajustado con la ecuación 8.9:

$$N_{Re}^* = 137.28 \left(\frac{0.3643}{0.394} \right)^{1/2} = 132$$

Con D/T y N_{Re}^* obtenemos N_q^* de la ecuación 8.12 o de la gráfica 8.1, con la ecuación obtenemos:

$$N_q^* = \exp [-0.947 - 0.231 \ln 132 + 0.0467 (\ln 132)^2] = 0.3822$$

El cual corregimos con la ecuación 8.14:

$$N_q = 0.3822 \left(\frac{0.394}{0.3643} \right)^{1/2} = 0.3974$$

12.- Calculamos D' con la ecuación 8.15:

$$D' = \left(\frac{9.425 (24) (74.8)^2}{0.3974 (88)} \right)^{1/3} = 33.07 \text{ pulgadas}$$

13.- Al comparar D' con D (27.25 pulg \neq a 33.07 pulg), por lo tanto como no son iguales volvemos a repetir los pasos desde el número 11, utilizando D' en los cálculos.

11'- Obtenemos N_q con D'/T = 0.450;

$$N_{Re} = \frac{10.7 (1.0) (88) (33.7)^2}{5,000} = 213.87$$

$$N_{Re}^* = 213.87 \left(\frac{0.450}{0.394} \right)^{1/2} = 228.56$$

$$N_q^* = \exp [-0.947 - 0.231 \ln 228.56 + 0.0467 (\ln 228.56)^2] = 0.4390$$

$$N_q = 0.4390 \left(\frac{0.394}{0.450} \right)^{1/2} = 0.4107$$

12'. Calculamos D";

$$D'' = \left(\frac{9.425 (24) (74.8)^2}{0.4107 (88)} \right)^{1/3} = 32.71$$

13'- Comparamos, $[D'' - D'] = [33.07 - 32.71] = 0.36$ que es mayor a 0.1, por lo tanto volvemos a iterar, utilizando D".

11"- $D''/T = 0.4373$

$$N_{Re} = 201.49$$

$$N_{Re}^* = 212.27$$

$$Nq^* = 0.4302$$

$$Nq = 0.4083$$

12"- $D''' = 32.78$ pulg

13". Comparamos, $[D''' - D''] = [32.78 - 32.71] = 0.07$ que es menor que 0.1, por lo tanto suspendemos la iteración.

14.- Fijamos $D = 33$ pulg y checamos que D/T este entre 0.3 y 0.7;

$$D/T = 33/74.8 = 0.44, \text{ valor que esta dentro del rango permitido.}$$

15.- Calculamos la potencia requerida con las ecuaciones 8.8, 8.17 y 8.20:

$$N_{Re} = \frac{10.7 (1.0) (88) (33)^2}{5,000} = 205.08$$

Con la ecuación 8.20 obtenemos :

$$f_{\mu} = \exp [3.154 - 0.848 \ln 205.08 + 0.0561 (\ln 205.08)^2] = 1.258$$

Sacamos los HP que va a consumir la turbina, con la ecuación 8.17:

$$HP_t = 0.656 \cdot 10^{-13} (1.258) (1.0) (88)^3 (33)^5 = 2.2$$

Calculamos el gasto con la ecuación 8.23:

$$Q = 0.4083 (88) (33/12)^3 = 747.24 \text{ pies}^3/\text{min.}$$

Con lo que obtenemos que con una turbina de 33 pulg de diámetro, $HP/N = 2.2/88$.

16.- Para cada una de las otras velocidades (70 y 117 RPM) repetimos cada uno de los pasos del 10 al 15.

17.- Con los cálculos hechos para cada una de las velocidades obtenemos la siguiente tabla.

N	D	HP _t	HP _t /0.85	Q	D/T
70	35	1.77	2.08	713.83	0.46
88	33	2.2	2.58	747.24	0.44
117	29	3.02	3.55	711.92	0.38

18.- En base a la tabla 7.5 las potencias que obtuvimos las llevamos a comerciales:

N	D	HP _m
70	35	3.0
88	33	3.0
117	29	5.0

19.- Elegimos el tamaño del reductor adecuado para cada combinación HP/N, por lo que de la tabla 7.10 de características de reductores NETTCO, con un factor de servicio de 1.25 (de la potencia de entrada reportada en la tabla, el reductor soporta un 25% más), obtenemos:

- a) Para la relación $HP/N = 3.0/70$ RPM, elegimos un reductor modelo 10 TG con una reducción 25/1, y con un factor de servicio de 2.06.

$$F.S. = \frac{4.95 * 1.25}{3.0} = 2.06$$

- b) Para la relación $HP/N = 3.0/88$ RPM, elegimos un reductor modelo 10 TG con una reducción 20/1, y con un factor de servicio de 2.27.

$$F.S. = \frac{5.46 * 1.25}{3.0} = 2.27$$

- c) Para la relación $HP/N = 5.0/117$ RPM, elegimos un reductor modelo 10 TG con una reducción 15/1, y con un factor de servicio de 1.56.

$$F.S. = \frac{6.26 * 1.25}{5.0} = 1.56$$

20.- Como el tamaño de los tres reductores es el mismo, descartamos la opción (c) por tener un motor de mayor potencia (5 HP), lo cual la hace mas cara; de las dos restantes elegimos la opción (b) por ser la que tiene un F.S. más sobrado, lo cual nos va asegurar una mayor duración del reductor.

Checamos que este reductor cubra las necesidades de potencia de la turbina (2.2 HP), con:

$$HP \text{ salida} = 3.0 (4.82/5.42) 0.85 = 2.25 \text{ HP}$$

Como 2.25 HP es mayor que 2.2 HP (que es la potencia que requiere la turbina) podemos trabajar con este reductor.

21.- De la tabla 7.14 obtenemos que para un reductor 10 TG el diámetro máximo de flecha es de $2\frac{1}{2}$ pulg.

22.- Con $HP_t = 2.2$ y $D = 33$ pulg., calculamos el diámetro mínimo de la flecha; por lo que con las ecuaciones 8.25 y 8.26 calculamos el torque máximo y el momento flexionante máximo:

$$Tq \text{ (max)} = \frac{63,025 (2.2)}{88} = 1575.62 \text{ pulg-lb}$$

Y

$$L = L' = H - H_f + \text{altura parte toriesférica} = 90.55 - 30.18 + 8 = 68.37 \text{ pulg}$$

$$M \text{ (max)} = \frac{19,000 (2.27) (68.37)}{(88) (33)} = 984.11 \text{ pulg-lb}$$

Sacamos el diámetro mínimo de la flecha con las ecuaciones 8.27 y 8.28, considerando que $\sigma_s = 6,000$ PSI y $\sigma_t = 10,000$ PSI para acero al carbón y acero inoxidable que son los metales de flecha más comerciales, obtenemos:

$$d_s = \left[\frac{16 \sqrt{(1575.62)^2 + (984.11)^2}}{\pi (6,000)} \right]^{1/3} = 1.16 \text{ pulg}$$

$$d_t = \left[\frac{16 [984.11 + \sqrt{(1575.62)^2 + (984.11)^2}]}{\pi (10,000)} \right]^{1/3} = 1.13 \text{ pulg.}$$

Entonces como d_s es el mayor valor ese es nuestro diámetro mínimo.

Al comparar d_s con el diámetro de la flecha de salida del reductor tamaño 10 TG, encontramos que 2 1/2 pulg es mayor que 1.16 pulg, por lo que podemos utilizarlo sin ningún problema.

23.- Calculamos la primera frecuencia natural o velocidad crítica (N_c) con la ecuación 8.29 y $d = 2.25$ pulg., Fm lo vamos a tomar como 1.0 ya que estamos usando metales comerciales en las flechas, utilizando las tablas 8.4 y 8.5, obtenemos el peso equivalente a partir de la ecuación 8.31:

$$W_e = 25 + \frac{1.08 (68.37)}{4} = 43.46 \text{ lb}$$

$S_b = 16.5$ pulg (sacado de tablas del fabricante NETTCO)

$$N_c = \frac{0.388 * 10^6 (2.25) (1.0)}{(68.37) \sqrt{43.46} \sqrt{68.37 + 16.5}} = 210.24 \text{ RPM}$$

24.- Como la turbina no tiene estabilizadores, N debe ser menor a 0.65 (210.24) o sea N debe ser menor a 137 RPM, como nuestra N de trabajo de 88 RPM no sobrepasa estos valores podemos utilizarla sin ningún problema

25.- Ya que el tanque es cerrado y con presión el soporte del agitador va a ser de brida, cuyo tamaño es de 8 pulg. nominales (como comercialmente se maneja) que es una brida con diámetro de 13.5 pulg. que soporta 150 PSI de presión.⁶⁹

26.- Escogemos un prensaestopas de presión estandar, ya que la presión interna es de 36 PSI (presión moderada).

27.- Como el medio ambiente es normal, escogemos un motor tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, 4 polos, 220/440 volts, trifasico, TCCV, 1750 RPM (que es la velocidad de diseño del reductor).

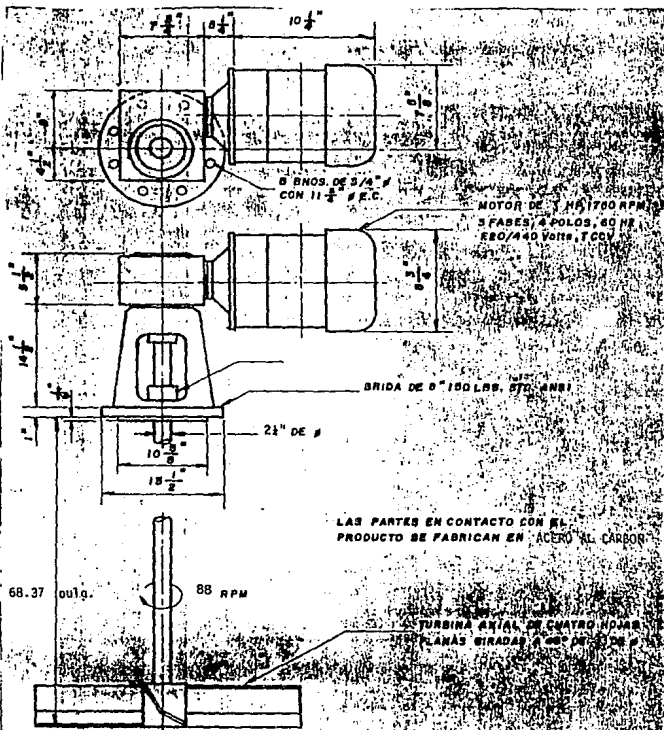
28.- Como la mezcla es no corrosiva, elegimos acero al carbón como el material de la flecha, turbina y brida.

29.- La descripción del agitador a usar sería:

- a) Agitador con reductor NETTCO tamaño 10 TG, corona y sinfn, reducción 20/1, - factor de servicio de 2.27, velocidad de salida de 88 RPM, montaje de brida de 8 pulg. diámetro nominal en acero al carbón, 150 lbs estandar.
- b) Motor eléctrico, 3 Hp, tipo inducción, jaula de ardilla, y rotor devanado, - trifásico, 4 polos, 220/440 volts, 1750 RPM, TCCV.
- c) Flecha de 68.37 pulg. de longitud y 2½ pulg. de diámetro, en acero al carbón.
- d) Un impulsor de flujo axial, 4 aspas a 45°, 33 pulg. de diámetro, en acero al carbón.

El dibujo del agitador se observa en la figura 8.1

Características	TABLA NETTCO	COMPARATIVA Monografía
Modelo	5 TGF	10 TG
Potencia (HP)	1	3
RPM	88	88
Dim. flecha (pulg)	1½ x 73	2½ x 68.37
Ø impulsor (pulg)	20	33



* Suspensión de sólidos en tanques de proceso en línea y de almacenamiento.

1.- Identifique y asegúrese que verdaderamente sea un proceso de suspensión de sólidos, la tabla 6.5 lo puede ayudar.

2.- Recabe todos los datos de proceso disponibles entre más tenga más efectivo va a ser el diseño:

a) Datos Físico-Químicos del líquido y sólidos:

- Concentración en peso de los sólidos.
- Tamaño de la partícula aproximado.
- Sg del sólido.
- Sg de la solución.
- Sg del líquido.
- Viscosidad del líquido.
- Viscosidad final de la mezcla, etc.

b) Datos de Proceso.

c) Datos de Geometría del Tanque.

d) Datos Mecánicos.

e) Datos Eléctricos.

f) Datos ambientales.

3.- Identifique que los datos del problema estén dentro de los rangos de la tabla 8.6, que son para los cuales este método de cálculo es válido; si la concentración de sólidos es menor de 2% y las velocidades de asentamiento son menores a 6 pies/min, podemos utilizar el método de cálculo para homogeneización y movimiento de líquidos.

TABLA 8.6

RANGOS DENTRO DE LOS CUALES PODEMOS UTILIZAR ESTE MÉTODO DE CÁLCULO.⁵

- Líquido Newtoniano.
- Volumen del Tanque mayor a 1300 galones.
- Entrada del Agitador por arriba del tanque.
- Velocidad de asentamiento de partículas sólidas de 0.5 a 20 pies/min.
- Concentración de partículas sólidas mayor a 2%.
- Viscosidad menor a 100 cps.
- Z/T menor a 1.8.

- 4.- Definimos el resultado de proceso que requerimos:
- Nivel mínimo de suspensión.
 - Disolución de sólidos.
 - Uniformidad de la suspensión.
 - Máxima suspensión de sólidos.
- 5.- Definimos el nivel de agitación que necesitamos: fuerte, medio y bajo.
- 6.- Con el dato de resultado de proceso y nivel de agitación, de la tabla 6.4 escogemos la escala de agitación.
- 7.- Calculamos la velocidad terminal de asentamiento del sólido (u_t) con la figura 6.10, utilizando la diferencia entre $(Sg)_s - (Sg)_l$ y el tamaño de la partícula.
- 8.- Calculamos la velocidad de asentamiento, sacando el factor de corrección de la tabla 6.3 con el dato de concentración de sólidos⁵ en %:

$$u_d = u_t f_w \quad \dots 8.33$$

- 9.- Con la relación Z/T de la tabla 8.7, obtenemos el número de impulsores, su separación y claro.

5
 TABLA 8.7
 NÚMERO DE IMPULSORES PARA SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS

Nº de Impulsores	Claro del Impulsor		Relación Máxima Z/T
	Abajo	Arriba	
1	Z/4	-	1.2
2	T/4	(2/3)Z	1.8

10.- El tanque va a llevar 4 baffles a 90° de T/12 de ancho y T/72 de separación de las paredes del tanque.

11.- Seleccionamos tres D/T, dentro del rango de 0.25 a 0.6, en base al número de turbinas:

2 Turbinas, D/T esta aproximadamente entre 0.25 a 0.35.

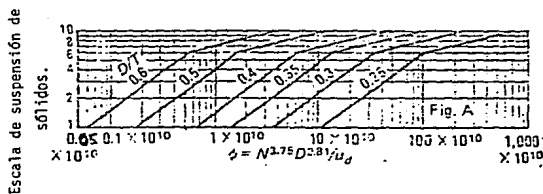
1 Turbina, D/T esta aproximadamente entre 0.4 a 0.6.

Y a cada una vamos a calcularle HP/N.

12.- Con la escala de agitación y la relación D/T, de la gráfica 8.3 obtenemos ϕ , con lo cual calculamos la velocidad de suspensión para cada relación seleccionada:

$$N = \left[\frac{\phi U_d}{2.8T} \right]^{1/2.35} \quad \dots 8.34$$

Las RPM obtenidas, las llevamos a velocidades comerciales de reductores (la cercana más alta), las cuales las obtenemos de la tabla 7.12.



13.- Calculamos la potencia consumida por las turbinas; considerando que $N_p = 1.37$, ya que por las bajas viscosidades siempre se trabaja en la región turbulenta (hay que pasar el diámetro de turbina obtenido a tamaños comerciales):

$$HP_t = 8.99 * 10^{-14} n N^3 D^5 (Sg)_{s1} \quad \dots 8.35$$

14.- Como los motores eléctricos tienen en promedio eficiencia de 85%, dividimos HP_t entre 0.85, con lo que nos aseguramos que el motor comercial que elegimos cubra los requerimientos de potencia de la turbina.

De la tabla 7.5, elegimos la potencia comercial (siempre la mayor más cercana).

Para cada uno de los diámetros de turbina seleccionados, elaboramos una tabla con los datos de N y HP_m obtenidos.

15.- Elegimos el tamaño de reductor adecuado para cada combinación HP/N , esto en base a las tablas 7.10, 7.11 y 7.13 de características de reductores NETTCO, el cual debe cumplir con lo siguiente:

a) Tener un factor de servicio mayor o igual a 1.25.

F.S. = Potencia máxima de entrada/potencia del motor.

b) La potencia de salida del reductor tiene que cubrir los HP que va a requerir la turbina (eficiencia del reductor).

c) El diámetro máximo de flecha de salida del reductor tiene que ser mayor que el diámetro mínimo de flecha para soportar las fuerzas que van a actuar sobre el impulsor.

16.- De los reductores seleccionados para cada una de las velocidades escogidas, vamos a elegir el que cumpla más efectivamente los siguientes puntos:

a) Más económico.

b) Factor de servicio más alto.

c) Cubra más efectivamente las necesidades de potencia de la turbina, la cual podemos calcular a partir de:

$HP_{salida} = HP_{motor} * \text{eficiencia del reductor} * \text{eficiencia motor}$

donde:

$\text{eficiencia del reductor} = HP_{salida} / HP_{entrada}$

$\text{eficiencia del motor} = 85\%$ (motores eléctricos comerciales).

d) Tamaño del reductor (entre más grande, más caro y difícil de montar y operar).

e) Potencia del motor eléctrico a usar.

17.- De la tabla 7.14 obtenemos el diámetro máximo de flecha para cada modelo o tamaño de reductor.

18.- Con los datos de HP de la turbina, D y N , diseñamos la flecha, lo cual requiere calcular:

a) El diámetro mínimo de la flecha para soportar las fuerzas que van a actuar sobre la misma.

b) La frecuencia natural de vibración del sistema turbina-flecha.

Calculamos el torque máximo y el momento flexionante máximo, con las ecuaciones 8.25 y 8.26.

Con estos datos calculamos el diámetro mínimo de la flecha, con las ecuaciones 8.27 y 8.28.

Donde $\sigma_s = 6,000$ PSI y $\sigma_t = 10,000$ PSI para acero al carbón y acero inoxidable 316, 304 comerciales.

El mayor valor que obtengamos entre d_s y d_t será el que tomaremos como mínimo.

Comparamos el diámetro mínimo obtenido, con el diámetro máximo de flecha de salida del reductor seleccionado, si es menor podemos continuar con el método de cálculo, si es mayor hay que elegir un diámetro de flecha de salida mayor, por lo que generalmente hay que irse a un reductor de mayor tamaño o hacer modificaciones mecánicas al seleccionado.

19.- Calculamos la primera frecuencia lateral natural (N_c), con la ecuación 8.29.

We lo sacamos a partir de la ecuación 8.31 y la tabla 8.4 de pesos de impulsores NETTCO; para pesos de flechas utilizamos la tabla 8.5.

20.- Si la turbina no tiene estabilizadores N no debe ser mayor de 0.65 N_c ; si tiene, N no debe ser mayor que 0.8 N_c , si es mayor hay que escoger un diámetro más grande, reducir la longitud de la flecha, ponerle estabilizadores al impulsor, escoger una combinación HP/ N más baja o usar una chumacera en el fondo del tanque.

21.- Elegimos el soporte del agitador, el cual va a ser función de que el tanque sea abierto o cerrado.

22.- Escogemos sello mecánico o estopero de acuerdo al tipo de proceso:

- a) Prensaestopas para presiones menores a 15 lb/pulg².
- b) Prensaestopas de presión estandar, para presiones hasta 150 lb/pulg².
- c) Sello mecánico sencillo, presiones hasta 750 PSI.
- d) Sello mecánico doble, presión arriba de 750 PSI.

23.- Escogemos el tipo de motor de acuerdo al medio ambiente, voltaje, velocidades, etc.

24.- Escogemos material de flecha e impulsor de acuerdo a la corrosividad del líquido a agitar.

25.- Elegimos el tipo de cople a usar en base al tamaño de sólido y % de conc.:

- a) Cople flexible para aplicaciones de sólidos muy pequeños y bajas conc.
- b) Coples limitantes de torque o coples fluidos, en aplicaciones con sólidos en forma de terrones y concentraciones altas.

26.- Por último hacemos la descripción del agitador que vamos a usar para el proceso, separando sus partes de la siguiente forma:

- a) Descripción del reductor.
- b) Tipo de motor.
- c) Tipo de flecha y dimensiones.
- d) Tipo de impulsor y dimensiones.

- Ejemplo práctico:

La compañía Arcillas Tratadas, S.A., necesita aumentar la mezcla y suspender sólidos en un tanque de reacción de concreto.⁵⁴

1.- Es un proceso de suspensión de sólidos y homogeneización de líquidos.

2.- Datos del problema:

- a) Datos Físico - Químicos:

- Concentración en peso de los sólidos = 5%
- Tamaño de partícula = 50 MESH.
- Gravedad específica de la solución = 1.05.
- Gravedad específica de los sólidos = 2.1.
- Gravedad específica del líquido = 1.0.
- Viscosidad final de la mezcla = 50 cps.
- Líquido no corrosivo.

b) Datos de proceso:

- Presión atmosférica.
- Temperatura ambiental.
- Sedimentación libre de los sólidos.

c) Datos de geometría del tanque:

- Diámetro del tanque (T) = 157 pulg.
- Altura del tanque (H) = 157 pulg.
- Altura del líquido (Z) = 150 pulg.
- Tanque cilíndrico de fondo plano.
- Volumen de trabajo = 13,273 galones.

d) Datos Mecánicos:

- Tanque de concreto.
- Montaje de placa del agitador al centro.

e) Datos eléctricos:

- Voltaje 220/440 volts.

f) Datos Ambientales:

- Tanque al aire libre.
- Ambiente no corrosivo.

3.- Los datos caen dentro de los rangos de la tabla 8.6, por lo que podemos usar este método de cálculo.

4.- El resultado de proceso requerido, es que la suspensión sea uniforme.

5.- Nivel medio de agitación.

6.- De la tabla 6.4, en base a los datos anteriores, elegimos un nivel de agitación de 6.

7.- De la figura 6.10, con el tamaño de partícula de 50 MESH y $(Sg)_s - (Sg)_l = 2.1 - 1.0 = 1.1$, obtenemos la velocidad terminal de asentamiento del sólido,

$$u_t = 7 \text{ pies /min.}$$

8.- Con 5% de concentración en peso de los sólidos, de la tabla 6.3 obtenemos que $f_w = 0.84$ por lo que:

$$u_d = 7 * 0.84 = 5.88 \text{ pies/min.}$$

9.- Con $Z/T = 150/157 = 0.955$, obtenemos de la tabla 8.7,

Número de impulsores = 1

Claro (H_i) = $Z/4 = 150/4 = 37.5$ pulg.

10.- El tanque va a llevar 4 baffles a 90° de :

Ancho = $T/12 = 157/12 = 13$ pulg.

Separación con respecto a la pared del Tanque = $T/72 = 157/72 = 2.18$ pulg.

11.- Seleccionamos $D/T = 0.4$, 0.5 y 0.6

12.- Calculamos la velocidad de suspensión para $D/T = 0.4$ (el mismo procedimiento se sigue para los otros valores seleccionados), obteniendo ϕ de la gráfica 8.3 con $NA = 6$ obteniendo:

$D/T = 0.4$, por lo tanto $D = 0.4 (T) = 0.4 (157) = 62.8$ pulg.

$$N = \frac{r (2 * 10^{10}) (5.88)^{1.75}}{(62.8)^{2.81}} = 40.25 \text{ RPM}$$

Con la tabla 7.12, pasamos 40.25 RPM a 44 RPM.

Para los tres valores de D/T elegidos obtenemos la siguiente tabla:

D/T	ϕ	N	N comercial	D
0.4	$2 \cdot 10^{10}$	40.25	44	62.8
0.5	$1.7 \cdot 10^{10}$	32.61	35	78.5
0.6	$0.5 \cdot 10^{10}$	20.52	25	94.2

13.- Calculamos la potencia consumida para cada tamaño de turbina:

Para D = 62.8 = aprox. a 63 pulg., y N = 44 RPM obtenemos,

$$HP_t = 8.99 \cdot 10^{-14} (1.0)(44)^3 (63)^5 (1.05) = 7.98$$

Para D = 78.5 = aprox. a 79 pulg., y N = 35 RPM obtenemos,

$$HP_t = 8.99 \cdot 10^{-14} (1.0)(35)^3 (79)^5 (1.05) = 12.45$$

Para D = 94.2 = aprox. a 94 pulg., y N = 25 RPM obtenemos,

$$HP_t = 8.99 \cdot 10^{-14} (1.0)(25)^3 (94)^5 (1.05) = 10.82$$

14.- Sacamos la potencia mínima del motor para cada diámetro de turbina:

$$D = 63 \text{ pulg, } HP \text{ motor mínimo} = 7.98/0.85 = 9.38$$

$$D = 79 \text{ pulg, } HP \text{ motor mínimo} = 12.45/0.85 = 14.64$$

$$D = 94 \text{ pulg, } HP \text{ motor mínimo} = 10.82/0.85 = 12.72$$

De la tabla 7.5 elegimos la potencia comercial con lo que obtenemos:

$$D = 63 \text{ pulg, } HP = 10$$

$$D = 79 \text{ pulg, } HP = 15$$

$$D = 94 \text{ pulg, } HP = 15$$

15.-Elegimos el tamaño del reductor adecuado para cada combinación HP/N, por lo que de la tabla 7.10 y 7.13 de características de reductores NETTCO, con factor de servicio de 1.25 (de la potencia de entrada reportada en la tabla, el reductor soporta un 25% más), obtenemos:

- a) Para la relación HP/N = 10/44 RPM, con diámetro de turbina de 63 pulg., elegimos un reductor modelo WT-80 con una reducción 40/1, y con un factor de servicio de 1.8.

$$F.S. = \frac{14.42 * 1.25}{10} = 1.8$$

También para esta misma relación, podemos elegir un reductor de engranes helicoidales-corona y sinfn modelo T-60 cuyo factor de servicio es de 1.53.

$$F.S. = \frac{12.25 * 1.25}{10} = 1.53$$

- b) Para la relación HP/N = 15/35 RPM, con diámetro de turbina de 79 pulg., elegimos un reductor modelo WT-100 con una reducción 50/1, y con un factor de servicio de 1.46.

También para esta misma relación podemos elegir un reductor de engranes helicoidales-corona y sinfn modelo T-80 cuyo factor de servicio es de 1.66.

- c) Para la relación HP/N = 15/25 RPM, con diámetro de turbina de 94 pulg., elegimos un reductor modelo T-80 con una reducción 70/1, y con un factor de servicio de 1.96.

16.- Elegimos la opción (a) que es la más económica y tiene F.S. adecuado para el trabajo de agitar una suspensión de sólidos, el reductor puede soportar una sobrecarga repentina.

Checamos que el reductor tamaño WT-80 cubra las necesidades de potencia de la turbina (7.98 HP), con:

$$HP \text{ salida} = 10 (12.15/14.42) 0.85 = 7.14$$

Comoaramos la potencia requerida por la turbina y la potencia de salida del reductor, como 7.98 es mayor que 7.14, concluimos que este no nos va a dar los requerimientos de potencia de la turbina, por lo que elegimos la misma opción pero con el reductor de engranes helicoidales - corona y sinfn modelo T-60, el cual tiene una eficiencia de transmisión de potencia de 98.5%, por lo que:

$$\text{HP salida} = 10 * 0.985 * 0.85 = 8.3$$

Como 8.3 es mayor que 7.98, podemos trabajar con este reductor.

17.- De la tabla 7.14 obtenemos que para un reductor tamaño T-60, el diámetro de flecha máximo de salida es de 4 pulg..

18.- Calculamos el diámetro máximo de flecha para $\text{HP}_t = 7.98$, $D = 63$ pulg., - $N = 44$ RPM, con las ecuaciones 8.25, 8.26, 8.27 y 8.28:

$$T_q (\text{máx}) = \frac{63,025 (7.98)}{44} = 11,430 \text{ pulg} - \text{lb}$$

Y

$$L' = H - H_t = 157 - 37.5 = 119.5 \text{ pulg}$$

$$M (\text{máx}) = \frac{19,000 (7.98) (119.5)}{44 (63)} = 6,536 \text{ pulg} - \text{lb}$$

Con lo que obtenemos:

$$d_s = \left[\frac{16 \sqrt{(11,430)^2 + (6,536)^2}}{\pi (6,000)} \right]^{1/3} = 2.23 \text{ pulg.}$$

$$d_t = \left[\frac{16 [6,536 + \sqrt{(11,430)^2 + (6,536)^2}]}{\pi (10,000)} \right]^{1/3} = 2.15 \text{ pulg.}$$

Entonces como d_s es el mayor valor, ese es nuestro diámetro mínimo.

Al comparar d_s con el diámetro de flecha de salida máximo, encontramos que 4 es mayor que 2.23 pulg.; como este diámetro esta muy sobrado, de la tabla 7.14 obtenemos que también podemos trabajar con un diámetro de flecha de salida de - 3 pulg.

19.- Calculamos la velocidad crítica con la ecuación 8.29 y $d = 3$ pulg., Fin lo tomamos como 1.0 ya que vamos a usar metales comerciales, utilizando las tablas 8.4 y 8.5 obtenemos el peso equivalente de la flecha y turbina:

$$W_e = 39 + \frac{1.44 (119.5)}{4} = 82.02 \text{ lb}$$

Donde $S_b = 24.5$ pulg.

$$N_c = \frac{0.388 * 10^6 (3)^2 (1.0)}{119.5 \sqrt{82.02} \sqrt{119.5 + 24.5}} = 268.88 \text{ RPM}$$

20.- Como N es menor que N_c (44 es menor que 268.88 RPM), podemos trabajar con este diámetro de flecha de salida.

21.- El montaje del agitador va a ser de placa al centro del tanque (esto a solicitud de la compañía).

22.- Como el tanque es abierto, no utilizamos prensaestopas, ni sello mecánico.

23.- Escogemos un motor eléctrico, corriente alterna, 10 HP, tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, 4 polos, 220/440 volts, trifásico, 1750 RPM, TCCV, normal ya que el medio ambiente no es corrosivo.

24.- El material de la flecha e impulsor es en acero al carbón.

25.- Seleccionamos un cople normal ya que los tamaños de partículas son muy pequeños y la concentración es baja, con lo cual es difícil que el agitador tenga sobrecargas por golpes con sólidos o atascamiento de la turbina por asentamiento de los sólidos.

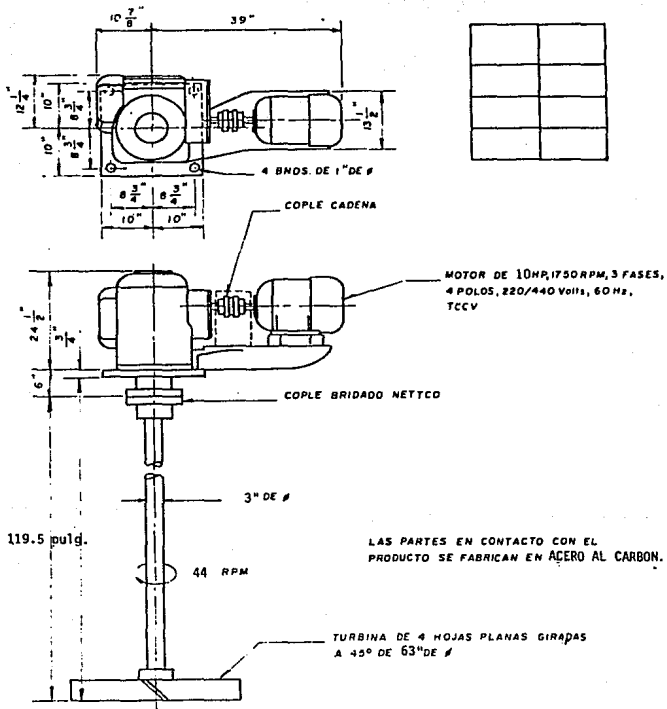
26.- La descripción del agitador quedaría:

- a) Agitador con reductor NETTCO tamaño T-60, engranes helicoidales - corona y - sinfn, relación total de reducción 40/1, F.S. = 1.53, velocidad de salida de 44 RPM, montaje de placa el centro del tanque, eficiencia del reductor de 98.5%.

- b) Motor eléctrico de 10 HP, tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, trifásico, 4 polos, 220/440 volts, 1750 RPM, TCCV.
 - c) Flecha de 119.5 pulg., de longitud y 3 pulg. de diámetro, en acero al carbón.
 - d) Un impulsor tipo turbina axial, 4 aspas a 45°, 63 pulg. de diámetro, en acero al carbón.
- El dibujo del agitador se observa en la figura 8.2.

TABLA COMPARATIVA

Características	NETTCO	Monografía
Modelo	T- 80L	T- 60L
Potencia (HP)	15	10
RPM	116	44
Dim.Flecha (pulg)	4 x 107	3 x 119.5
Ø impulsor (pulg)	2T (32)	63



8.2 Agitadores portátiles de propela - entrada superior.

1.- Identifique y asegurese que verdaderamente sea un proceso de homogeneización y movimiento de líquidos, la tabla 6.2 lo puede ayudar.

2.- Recabe todos los datos de proceso disponibles, entre más tenga más efectivo va a ser el diseño:

- a) Datos Físico - Químicos del líquido.
- b) Datos de proceso.
- c) Datos de Geometría del Tanque.
- d) Datos mecánicos.
- e) Datos eléctricos.
- f) Datos ambientales.

3.- Identifique si los datos del proceso están entre los rangos de la tabla 8.8 - dentro de los cuales podemos utilizar este método de cálculo (si los datos cayeran fuera de estos rangos, el agitador obtenido con este método no sería totalmente adecuado).

TABLA 8.8
RANGOS DENTRO DE LOS CUALES PODEMOS UTILIZAR ESTE MÉTODO DE
CÁLCULO. ^{4,39,40}

- Líquidos Newtonianos.
- Miscibles.
- Diferencia en Sg menor de 1.0.
- Viscosidades menores a 5,000 cps.
- Diferencia en viscosidad menor a 5,000.
- Partículas sólidas menor a 2% en concentración.
- Velocidad de asentamiento de las partículas menor a 6 pies/ min.
- Volumen del tanque menor a 3,000 galones.
- Entrada del agitador por arriba del tanque.

4.- Definimos el resultado de proceso que requerimos:

- a) Transferencia de calor.
- b) Reacción química.
- c) Homogeneización.

5.- Definimos el nivel de agitación que necesitamos: fuerte, medio y bajo.

6.- Con el dato de resultado de proceso y nivel de agitación, nos vamos a la tabla 6.1 donde escogemos la escala de agitación y por lo tanto la velocidad volumétrica (v_b); si son dos líquidos sacamos sus diferencias en gravedad específica y viscosidad, y con esto también nos basamos para escoger la escala de agitación.

7.- De acuerdo a la relación Z/T obtenemos el número de propelas y su colocación en el tanque, a partir de la tabla 8.9; de acuerdo al número de impulsores son las ecuaciones que vamos a usar.

TABLA 8.9 39
NÚMERO DE IMPULSORES PARA HOMOGENEIZACIÓN Y MOVIMIENTO.

Relación Z/T	Impulsores Nº	Claro del Impulsor	
		de abajo	de arriba
Menor a 1.5	1	1 a 2 D	-
Mayor a 1.5	2	1 a 2 D	3 D con respecto a la primera turbina. 0.5 D a 2 D con respecto a la superficie del líquido.

8.- De la tabla 8.3 obtenemos las recomendaciones de bafleo para el tanque.

9.- Fijamos una velocidad de flecha del agitador en RPM, recordando que para agitadores de propela las velocidades de trabajo son dos, 350 y 1750 RPM; las cuales podemos elegir de acuerdo a la tabla 8.10, o usar las dos y comparar cual da la relación HP/N más adecuada.

TABLA 8.10
VELOCIDADES A USAR DE ACUERDO A VOLUMEN Y
VISCOSIDAD.⁴⁰

Volumen gal.	Viscosidad cps	Velocidad RPM
menor de 500	menor de 100	1750
mayor de 500	mayor de 100	350
menor de 50	menor de 500	1750
mayor de 50	mayor de 500	350

10.- Calculamos el diámetro de propela, considerando que debido a las altas velocidades y bajas viscosidades, el régimen es generalmente turbulento, utilizamos las siguientes ecuaciones:³⁶

$$Nq = 0.70279 \text{ (propela tipo NETTCO, paso 1.5 y 3 aspas)}^{40}$$

$$Q = v_b A \quad \dots\dots 8.36$$

$$A = 4 \pi (T/12)^2 \quad \dots\dots 8.37$$

Donde para una propela:

$$Nq = Q/N (D/12)^3 \quad \dots\dots 8.38$$

Con lo cual obtenemos:

$$D = \left[\frac{13.4108 v_b T^2}{N} \right]^{1/3} \quad \dots\dots 8.39$$

Para dos propelas a 350 RPM:

$$Nq = Q/1.7 N (D/12)^3 \quad \dots\dots 8.40$$

Con lo cual obtenemos:

$$D = \left[\frac{7.888 v_b T^2}{N} \right]^{1/3} \quad \dots\dots 8.41$$

Para dos propelas a 1750 RPM (Separación 6D):

$$Nq = Q/2N (D/12)^3 \quad \dots\dots 8.42$$

Con lo cual obtenemos:

$$D = \left[\frac{6.7054 v_b T^2}{N} \right]^{1/3} \quad \dots\dots 8.43$$

Checamos con la tabla 8.11 que el valor que obtuvimos de D, caiga dentro de los rangos comerciales de diámetros de propela y que D/T este cerca de 0.17.

TABLA 8.11
DIÁMETROS COMERCIALES DE PROPELAS ³⁷

N RPM	Rango Pulg.
350	8 a 13
1750	3 a 7

El diámetro de propela obtenido lo pasamos a diámetros de propelas usados comercialmente (números cerrados).

11.- Calculamos Q, con las ecuaciones 8.38, 8.40 ó 8.42, esto en función del número de propelas y la velocidad del agitador.

12.- Calculamos la potencia consumida (para una eficiencia de 85% del motor eléctrico):

$$\text{Para una propela: } HP_p = 0.656 * 10^{-13} N_p N^3 D^5 S_g \quad \dots\dots 8.44$$

$$\text{Para dos propelas: } HP_p = 1.312 * 10^{-13} N_p N^3 D^5 S_g \quad \dots\dots 8.45$$

Donde el N_p lo calculamos con el número de Reynolds a partir de la figura - 4.7:

$$N_{Re} = 10.754 N D^2 S_g / \mu$$

A N_{Re} mayores a 3,000, $N_p = 0.9$

13.- Obtenemos la potencia de trabajo, considerando que la eficiencia promedio de los motores eléctricos es 85%:

$$HP = HP_p / 0.85$$

De la tabla 7.5, pasamos a potencias comerciales, la obtenida (siempre la potencia mayor más cercana).

Checamos que los HP del motor, sean menores a 2 HP, si son mayores hay que trabajar con un agitador de turbina.³⁹

14.- A 350 RPM tenemos que usar un reductor de engranes helicoidales relación 5/1, por lo que la potencia máxima que debe soportar es:

$$\text{HP máxima de entrada} = \text{HP motor} * 1.25$$

Y su eficiencia mínima de transmisión de potencia debe ser :

$$\% \text{ eficiencia mínima de transmisión} = \frac{\text{HP propela}}{\text{HP motor}} * 100$$

A 1750 RPM no tenemos que utilizar reductor, ya que usando un motor de 4 polos, trifásico, 220/440 volts, obtenemos esa velocidad.

15.- Con los datos de HP motor y D, diseñamos la flecha, la cual requiere calcular:

- El diámetro mínimo de flecha para soportar las fuerzas que van actuar sobre la misma.
- La frecuencia natural de vibración del sistema propela - flecha.

Calculamos el torque máximo y el momento flexionante, con las ecuaciones 8.25 y 8.26.

Con estos datos calculamos el diámetro mínimo de flecha, con las ecuaciones 8.27 y 8.28.

Donde $\sigma_s = 6,000 \text{ PSI}$ y $\sigma_t = 10,000 \text{ PSI}$ para acero al carbón y acero inoxidable 316, 304 comerciales.

El mayor valor que obtengamos entre d_s y d_t será el que tomaremos como mínimo.

Comparamos el diámetro mínimo obtenido, con el diámetro máximo de flecha de salida del agitador, el cual podemos obtener a partir de la tabla 8.12, si es menor podemos continuar con el método de cálculo, si es mayor hay que elegir un diámetro de flecha de salida mayor (esto en el caso de agitadores con velocidad de 1750 RPM).

TABLA 8.12

37

DIÁMETRO DE FLECHA MÍNIMO PARA AGITADORES PORTÁTILES.

N RPM	HP	Diámetro de Flecha Pulg.
350	0.25 a 2	1
1750	0.25 a 0.75	0.75
1750	1 a 2	1

16.- Calculamos la velocidad crítica (N_c), con la ecuación 8.29, We los sacamos a partir de la ecuación 8.31 y las tablas 8.5 y 8.13, para pesos de propelas y flechas respectivamente.

TABLA 8.13

40

PESOS APROXIMADOS DE PROPELAS DE 3 ASPAS CON PASO DE 1.5

Diámetro de Propela Pulg.	Peso lb
3.0	2.0
3.5	2.33
4.0	2.66
4.5	3.0
5.0	3.33
5.5	3.66
6.0	4.0
6.5	4.33
7.0	4.66
8.0	5.33
9.0	6.00
9.5	6.33
10.0	6.66
10.5	7.00
11.0	7.33
12.0	8.00
13.0	8.66
14.0	9.33

17.- N no debe ser mayor que Nc, si es mayor hay que escoger un diámetro más grande, reducir la longitud de la flecha, usar chumacera en el fondo del tanque.

18.- Elegimos el soporte del agitador, el cual va a ser función de que el tanque sea abierto o cerrado.

19.- Escogemos sello mecánico o estopero de acuerdo al tipo de proceso.

20.- Escogemos el tipo de motor de acuerdo al medio ambiente, voltaje, velocidades etc.

21.- Escogemos material de flecha e impulsor de acuerdo a la corrosividad del líquido a agitar.

22.- Por último hacemos la descripción del agitador que vamos a usar para el proceso, separando sus partes de la siguiente forma:

- a) Descripción del reductor y tipo de montaje.
- b) Tipo de motor.
- c) Tipo de Flecha y dimensiones.
- d) Tipo de impulsor y dimensiones.

- Ejemplo práctico:

La compañía ICI de México (ICI FARMA), necesita homogeneizar una mezcla de silicónes.

1.- Es un proceso de homogeneización y movimiento de líquidos.

2.- Datos del problema:

a) Datos Físico - Químicos:

- Densidad relativa = 1.01 a 1.02.
- Viscosidad final de la mezcla = 100 a 200 cps.
- Mezcla no corrosiva, no inflamable.

b) Datos de proceso:

- Temperatura = 77 a 158° F.
- Presión = atmosférica .

c) Datos Geométricos del Tanque:

- Diámetro = 45.27 pulg.
- Altura del tanque en su parte recta (H) = 59 pulg.
- Altura del líquido en el tanque (Z) = 55 pulg.
- Tanque cilíndrico con fondo plano.
- Abierto.
- Volumen de trabajo = 41 galones.

Aquí voy a tomar que el líquido llega hasta las 59 pulg., por si en algún momento se trabaja así, no halla problemas de agitación.

d) Datos Mecánicos:

- Entrada del agitador por arriba.
- Tanque en acero inoxidable 316 (grado farmacéutico).
- Montaje de pinza.

e) Datos Eléctricos:

- Voltaje 220/440 volts.

f) Datos Ambientales:

- Tanque ubicado en lugar cerrado, con atmosfera no corrosiva, ni explosiva.

3.- Al checar que los datos esten dentro de los rangos de la tabla 8.8, concluimos que podemos utilizar este método de cálculo.

4.- Proceso de homogeneización.

5.- Nivel de agitación bajo.

6.- De la tabla 6.1, obtenemos $v_b = 10$ pies/min.

7.- Sacamos $Z/T = 55/45.27 = 1.21$, por lo que de la tabla 8.9 obtenemos:

Número de impulsores = 1

Claro del impulsor = 1 a 2D.

8.- De la tabla 8.3, con $V = 411$ gal. y viscosidad = 200 cps, obtenemos que el tanque debe de llevar 4 baffles a 90° , con un ancho de 4 pulg. y una separación del tanque de 0.63 pulg., pero como el montaje del agitador es de pinza, con la inclinación que le demos al mismo, podemos eliminar los baffles.

9.- Usando la tabla 8.10, escogemos $N = 350$ RPM.

10.- Calculamos D con la ecuación 8.39 con lo que obtenemos:

$$D = \left[\frac{13.4108 (10) (45.27)^2}{350} \right]^{1/3} = 9.22 \text{ pulg.} = \text{aprox. } 9 \text{ pulg.}$$

Checamos con la tabla 8.11 que este valor de D caiga dentro de los rangos comerciales de diámetros de propela, y que D/T este cerca de 0.17; al checar vemos que $D/T = 0.19$ y D cae dentro de los diámetros comerciales de propela.

11.- Calculamos Q con la ecuación 8.38:

$$Q = 0.70279 (350) (9/12)^3 = 103.77 \text{ pies}^3/\text{min.}$$

12.- Calculamos la potencia consumida por la propela con la ecuación 8.44:

$$N_{Re} = 10.754 (9)^2 (350) (1.02) / 200 = 1,554.86$$

De la figura 4.7, obtenemos $N_p = 1.0$:

$$HP_p = 0.656 * 10^{-13} (1.0) (350)^3 (9)^5 (1.02) = 0.169$$

Considerando que la eficiencia de los motores eléctricos es aproximadamente 85%, tenemos que:

$$\text{HP} = 0.169 / 0.85 = 0.198$$

De la tabla 7.5, pasamos a potencia comercial, escogemos:

$$\text{HP motor} = 0.25$$

Checamos que los HP del motor sean menores a 2 HP, como lo son, podemos trabajar con agitadores portátiles.

14.- Seleccionamos un reductor de engranes helicoidales relación 5/1 cuya potencia de entrada máxima sea:

$$\text{HP máx. entrada} = \text{HP motor} * 1.25 = 0.25 * 1.25 = 0.3125$$

Y su eficiencia de transmisión de potencia sea mínimo:

$$(\text{HP propela} / \text{HP motor}) * 100 = (0.198 / 0.25) * 100 = 79\%$$

15.- Con los HP propela = 0.169 y D = 9 pulg., calculamos el diámetro mínimo de la flecha, por lo que con las ecuaciones 8.25 y 8.26 calculamos el torque máximo y el momento flexionante máximo:

$$Tq(\text{máx}) = 63,025 (0.0169) / 350 = 30.43 \text{ pulg-lb}$$

Y

$$L' = H - H_i = 59 - [2 (9)] = 41 \text{ pulg. (tomamos } H_i = 2D)$$

$$M(\text{máx}) = 19,000 (0.169) (41) / 350 (9) = 41.79 \text{ pulg-lb}$$

Sacamos el diámetro mínimo de flecha:

$$d_s = \left[\frac{16 \sqrt{(30.43)^2 + (41.79)^2}}{\pi (6,000)} \right]^{1/3} = 0.35 \text{ pulg.}$$

$$d_t = \left[\frac{16 [41.79 + \sqrt{(30.43)^2 + (41.79)^2}]}{\pi (10,000)} \right]^{1/3} = 0.36 \text{ pulg.}$$

Entonces como d_t es el mayor valor, ese es nuestro diámetro mínimo.

Al comparar d_t con el diámetro de flecha de salida del agitador (el cual sacamos de la tabla 8.12), encontramos que 1 pulgada es mayor que 0.36 pulgadas, por lo que podemos utilizar d sin ningún problema.

16.- Calculamos la velocidad crítica (N_c) con la ecuación 8.29 y $d = 1$ pulg., -
- Fm lo tomamos como 1.0 ya que vamos a usar metales comerciales, utilizando las ta-
- blas 8.5 y 8.13 obtenemos su peso equivalente:

$$W_e = 6 + \frac{0.208 (41)}{4} = 6.533 \text{ lb}$$

$S_b = 7$ pulg. (sacado de tablas de fabricante NETTCO para agitadores portátiles)

$$N_c = \frac{0.388 * 10^6 (1)^2 (1.0)}{41 \sqrt{6.533} \sqrt{41 + 7}} = 534.40 \text{ RPM}$$

17.- Como 350 RPM son menores que 534.40 RPM, podemos trabajar con este diámetro de flecha.

18.- El soporte del agitador va a ser de pinza (esto a pedido de la Compañía ICI).

19.- Como el tanque es abierto no utilizamos prensaestopas, ni sello mecánico.

20.- Como el medio ambiente es normal, escogemos un motor tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, 4 polos, 220/440 volts, trifasico, TCCV, 1750 RPM.

21.- Como el proceso es farmacéutico, elegimos acero inoxidable 316 grado farmacéutico (pulido tipo espejo).

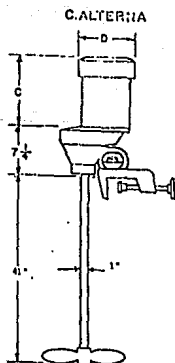
22.- La descripción del agitador será:

a) Agitador portátil, montaje de pinza, reductor de engranes helicoidales, relación de reducción 5/1, factor de servicio mínimo = 1.25, velocidad de salida de 350 RPM, eficiencia de transmisión de potencia mínima de 79%.

- b) Motor eléctrico, 0.25 HP, tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, trifásico, 4 polos, 220/440 volts, 1750 RPM, TCCV.
- c) Flecha de 41 pulg. de longitud y 1 pulg. de diámetro de acero inoxidable 316 grado farmacéutico.
- d) Una propela tipo marina de 3 aspas, de 9 pulg. de diámetro en acero inoxidable 316 grado farmacéutico.

Tabla Comparativa

Características	Nettco	Monografía
Modelo	Pinza	Pinza
Potencia (HP)	0.25	0.25
R.P.M.	350	350
DIM. Flecha (pulg)	1 X 50	1 X 41
Ø Impulsor (pulg)	2P (8)	9



8.3 Agitadores de entrada lateral.

* Homogeneización y movimiento de líquidos en tanques de almacenamiento de grandes dimensiones.

1.- Identifique y asegurese que verdaderamente sea un proceso de homogeneización y movimiento de líquidos en tanques de almacenamiento de grandes dimensiones (generalmente tanques con gasolina o petróleo crudo).

2.- Recabe todos los datos de proceso disponibles, entre más tenga más efectivo va a ser el diseño:

a) Datos Físico - Químicos del líquido o líquidos:

- Viscosidad.
- Viscosidad diferencial (si más de un líquido esta presente).
- Densidad.
- Densidad diferencial (si más de un líquido esta presente).
- Etc.

b) Datos de proceso:

- Tiempo de homogeneización requerida.
- Condición de estratificación.
- Agitador trabajando durante el llenado o vaciado.
- Etc.

c) Datos de Geometría del tanque:

d) Datos Mecánicos.

e) Datos eléctricos.

f) Datos ambientales.

3.- Identifique si los datos del proceso estan entre los rangos de la tabla 8.14, dentro de los cuales podemos utilizar este método de cálculo (si los datos cayeran fuera de estos rangos, el agitador obtenido con este método no sería totalmente adecuado).

TABLA 8.14
RANGOS DENTRO DE LOS CUALES PODEMOS UTILIZAR ESTE MÉTODO DE
CÁLCULO.

- Volúmenes mayores a 12,500 galones.
- Volúmenes mayores a 300 barriles de petróleo.
- Grandes tanques de almacenamiento.
- Viscosidades menores a 1,000 cps.
- ° API menores a 90.
- Sg menor a 1.0.

4.- Calculamos la potencia requerida, la velocidad de diseño para este tipo de agitadores es de 280 RPM.

4.1 Para homogeneización de aceite vegetal en tanques mayores de 5,000 galones, use:

1 HP por cada 12,642 galones.

4.2 Para homogeneización de petróleo crudo, utilizamos:

$$HP = (HP/volumen) * \text{factor de tiempo} * \text{factor de densidad} * \text{factor de viscosidad.}$$

Donde:

- a) HP/volumen en barriles recomendado mínimo, es de 0.25 HP/1,000 barriles. La figura 8.4 puede ser usada directamente para un tiempo de homogeneización de 12 horas, con 10 cps o menos de viscosidad y una diferencia de densidades de 15° API o menos.
- b) El factor de tiempo lo sacamos de la figura 8.5 con el tiempo de homogeneización requerido en horas.

- c) El factor de viscosidad lo sacamos de la figura 8.6, con el dato de la viscosidad final de homogeneización en cps.
- d) El factor de densidad lo sacamos de la figura 8.7, con el dato de diferencia en densidad (máxima - mínima) en ° API.
- 4.3 Para homogeneización de asfalto ligero, usamos la tabla 8.15.

60
 TABLA 8.15
 POTENCIAS PROMEDIO DE HOMOGENEIZACIÓN DE ASFALTO LIGERO.

Viscosidad final de la mezcla (cps)	Tiempo de homogeneización (HRS)	HP/1,000 Barriles
100	1	7.5
100	4	3.0
400	3	7.5
400	8	4.0
1,000	8	7.5

- 60
 4.4 Para homogeneización de gasolina, utilizamos:

HP requeridos = (HP/volumen) * factor de tiempo * factor de densidad.

Donde:

- a) HP/volumen mínimo requerido, los sacamos con 0.20 HP/1,000 barriles.
- b) El factor de tiempo (FT) lo sacamos de la figura 8.8, con el tiempo de homogeneización requerido en horas.
- c) El factor de densidad (FD) lo sacamos de la figura 8.9, con los datos de la densidad máxima y mínima en ° API.

5.- Como los motores eléctricos tienen en promedio eficiencia de 85%, dividimos los HP obtenidos entre 0.85, con lo que nos aseguramos que el motor comercial que elegimos cubriera los requerimientos de potencia de la propela.

De la tabla 7.5, elegimos la potencia comercial (siempre la mayor más cercana). Si la potencia es mayor a 50 HP, es necesario utilizar más de un agitador.

6.- Con el dato de HP (obtenido a partir de las gráficas) y N, calculamos el diámetro de propela máximo:

$$D = \left[\frac{HP_p * 0.656 * 10^{13}}{N_p N^3 Sg} \right]^{1/5} \quad \dots\dots 8.46$$

Donde el N_p lo calculamos con Re y la gráfica 4.7:

$$N_{Re} = 10.754 N D^2 Sg/\mu$$

A N_{Re} mayores a 3,000, $N_p = 0.9$

Como por lo general trabajamos en la región turbulenta:

$$D = 12.71 \left(\frac{HP_p}{Sg} \right)^{1/5} \quad \dots\dots 8.47$$

Donde Sg es la máxima encontrada en la mezcla.

7.- Calculamos el gasto volumétrico:

$$Q = 0.70279 N \left(\frac{D}{12} \right)^3 \quad \dots\dots 8.48$$

8.- Con el dato de HP del motor y N escogemos el reductor adecuado:

a) Utilizamos un factor de servicio de 1.25, que es el que se usa en aplicaciones de agitación durante 24 hrs.

b) Calculamos la potencia equivalente:

$$\text{Potencia equivalente} = \text{HP motor} * 1.25$$

- c) Con el dato de HP equivalente y N = 280 RPM, nos vamos a la tabla 8.16 para reductores FALK, montados en flecha y seleccionamos el más adecuado.

TABLA 8.16

REDUCTORES FALK MONTADOS EN FLECHA, TIPO MJF.
(MOTORES 1750 RPM) ^{63, 60, 64}

HP Equiv. (máx)	N (RPM)	Tamaño de unidad	Diámetro máx. flecha agitador (pulg)	Longitud máx. de flecha (pulg)
3.75	280	1107 MJF	1.5	18
9.375	280	1115 MJF	2.0	24
18.75	280	1203 MJF	2.4	27
43.75	280	1215 MJF	3.0	36
62.50	280	1315 MJF	4.0	42

- d) Checamos que el reductor elegido cubra efectivamente las necesidades de potencia de la propela, lo cual podemos calcular a partir de:

$$\text{HP salida} = \text{HP motor} * \text{eficiencia del reductor} * \text{eficiencia motor}$$

Donde:

$$\text{eficiencia del reductor} = 98.5\%$$

$$\text{eficiencia del motor} = 85\% \text{ (motores eléctricos comerciales).}$$

9.- El diámetro de brida del agitador, se calcula en función de la brida del tanque o del tamaño que usan los diferentes fabricantes de agitadores.

10.- Escogemos el sello mecánico o estopero de acuerdo a las presiones del líquido en el tanque y al tipo del mismo.

11.- Escogemos el tipo de motor de acuerdo al medio ambiente, voltaje de la planta, etc.

12.- Escogemos el material de la flecha e impulsor de acuerdo a la corrosividad del líquido a agitar.

13.- Por último, hacemos la descripción del agitador que vamos a usar para el proceso, separando sus partes de la siguiente forma:

- a) Descripción del reductor.
- b) Tipo de motor.
- c) Tipo de brida y dimensiones.
- d) Tipo de sello.
- e) Tipo de flecha y dimensiones.
- f) Dimensiones de propela.

- Ejemplo práctico:

Petróleos Mexicanos, necesita homogeneizar combustóleo 500 SF, en un tanque de almacenamiento de 200,000 barriles de capacidad.⁶⁵

1.- Es un proceso de homogeneización y movimiento de líquidos.

2.- Datos del problema.

a) Datos Físico-Químicos:

- Combustóleo 500 SF.
- Viscosidad máxima = 1,000 cps.
- Sg máxima = 0.975.
- °API = 13.63.

b) Datos de Proceso:

- Tiempo de homogeneización requerido = 15 hrs.

- Agitador trabajando durante el llenado.
- Temperatura = 122° F.
- Capacidad del tanque = 200,000 barriles.

c) Datos Geométricos del tanque:

- No se proporcionan.

d) Datos mecánicos:

- Recomendar diámetro de brida.
- Acero al carbón, como material de flecha y propela.
- Reductor de engranes helicoidales.
- Agitador soportado con base de cemento.

e) Datos eléctricos:

- Voltaje = 220/440 volts.

f) Datos ambientales.

- Medio corrosivo.
- Tanque al aire libre.

3.- Checamos que los datos esten dentro de los rangos de trabajo de la tabla 8.14, como estan, podemos usar este método de cálculo.

4.- Calculamos la potencia requerida con las gráficas para homogeneización de petróleo crudo (punto 4.2):

a) Calculamos los HP mínimos con:

$$\frac{0.25 \text{ HP}}{1,000 \text{ bls}} * 200,000 \text{ barriles} = 50 \text{ HP}$$

- b) Con tiempo de homogeneización = 15 hrs y sabiendo que el agitador va a ser operado durante el llenado del tanque de almacenamiento, de la línea número 2 de la figura 8.5 obtenemos:
Factor de tiempo = 0.47.
- c) Con viscosidad máxima = 1,000 cps, obtenemos de la figura 8.6 que el factor de viscosidad es = 5.0.
- d) Con °API máximo = 13.63, obtenemos de la figura 8.7:
Factor de densidad = 0.95.

Con lo que obtenemos:

$$HP_p = 50 \text{ HP} * 0.47 * 5.0 * 0.95 = 111.625$$

5.- Considerando que la eficiencia de los motores eléctricos es aproximadamente 85% obtenemos:

$$HP = 111.625 / 0.85 = 131.32$$

Como la potencia es mayor a 50 HP, vamos a trabajar con varios agitadores laterales:

$$HP_p = 111.625 / 3 = 37.2$$

Y

$$HP = 37.2 / 0.85 = 43.76$$

De la tabla 7.5 obtenemos que:

$$HP \text{ motor} = 50 \text{ HP}$$

6.- Con la ecuación 8.47 y $HP_p = 37.2$ obtenemos:

$$D = 12.71 (37.2 / 0.975)^{1/5} = 26.33 \text{ pulg.} = \text{aprox. } 26 \text{ pulg.}$$

7.- Calculamos el gasto volumétrico con la ecuación 8.48:

$$Q = 0.70279 (280) (26/12)^3 = 2,001.5 \text{ pies}^3/\text{min.}$$

8.- Elegimos el reductor FALK adecuado:

$$\text{Potencia equivalente} = 50 * 1.25 = 62.5$$

De la tabla 8.16 escogemos un reductor tamaño 1315 MJF, con un diámetro max del agitador de 4 pulg. y una longitud máxima de 42 pulg.,

Checamos que el reductor cubra efectivamente las necesidades de potencia de la propela, con:

$$\text{HP salida} = 50 \text{ HP} * 98.5\% * 85\% = 41.86$$

Como 41.86 es mayor que 37.2, podemos utilizar este reductor.

9.- El diámetro nominal de brida para este tamaño de reductor, utilizado por el fabricante NETTCO, es de 12 pulg., diámetro nominal, 150 lb estandar.

10.- Como el volumen del tanque es muy grande, escogemos un sello mecánico doble para una flecha de 4 pulg., de diámetro.

11.- Como el medio ambiente es corrosivo, escogemos un motor eléctrico de 50 HP, tropicalizado, tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, 4 polos, 220/440 volts, trifásico, TCCV, 1750 RPM.

12.- El material de la flecha y propela, es acero al carbón.

13.- La descripción del equipo sería:

- a) Tres agitadores de montaje lateral, reductor de engranes helicoidales marca FALK, tamaño 1315 MJF, relación 6.25/1, 280 RPM de salida, F.S. = 1.25. -
- b) Motor eléctrico de 50 HP, tropicalizado, tipo inducción, jaula de ardilla y rotor devanado, 4 polos 220/440 volts, trifásico, TCCV, 1750 RPM.
- c) Brida de 12 pulg., de diámetro nominal, 150 lb estandar, en acero al carbón.
- d) Sello mecánico doble para flecha de 4 pulg., de diámetro, en acero al carbón.
- e) Flecha de 4 pulg., de diámetro y 42 pulg. de longitud en acero al carbón.
- f) Una propela tipo marina de 3 aspas, de 26 pulg., de diámetro en acero al carbón.

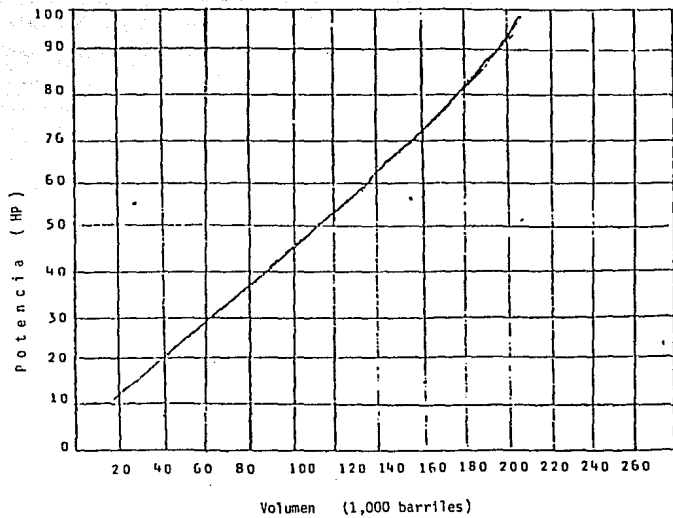


FIGURA 8.4

- Línea 1.- Tiempo total de mezclado para un tanque lleno estratificado.
- Línea 2.- Tiempo mínimo de mezclado después de llenado el tanque, donde el agitador es operado durante el llenado.

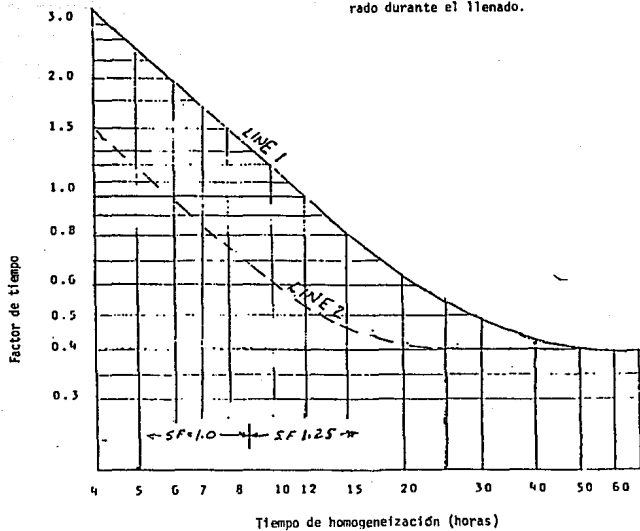


FIGURA 8.5

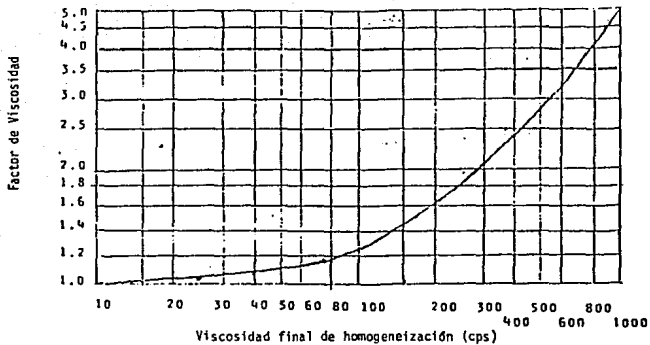


FIGURA 8.6

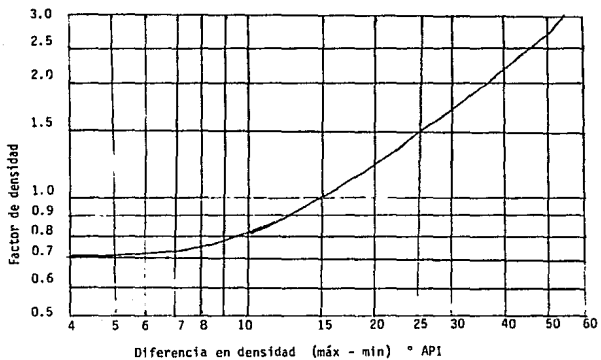
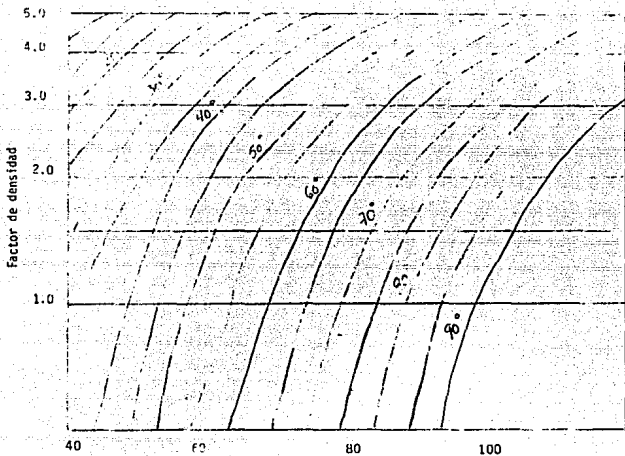


FIGURA 8.7



Densidad de la fase más ligera (°API)

FIGURA 8.9

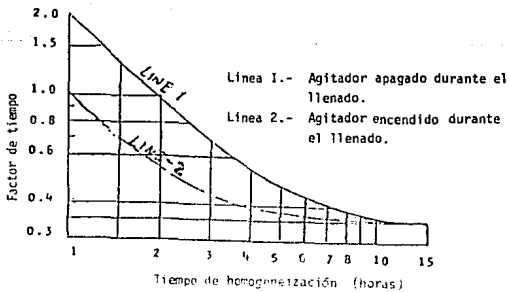


FIGURA 8.8

TABLA RESUMEN DE LOS EJEMPLOS PRACTICOS

No.de Ejemplo y de Pagina	1, Pag. 136	2, pag. 150	3, Pag. 166	4, Pag.
Tipo de Industria	Jabonera,Shampoos	Arcillas	Farmaceutica	Petrolera
Tipo de Agitador	Entrada Superior	Entrada Superior	Portatil,Entrada Superior.	Entrada Lateral
Clasificación del Proceso	Homog.y Movimiento de Líquidos.	Suspensión Sólidos	Homog. y Movimiento de Líquidos.	Homog. y Movimiento de Líquidos.
Volumen de líquido	1,723 galones	13,273 galones	41 galones	200,000 Barriles.
Gravedad específica del líquido(sg)	1.0	1.0	1.01 a 1.02	0.975
Dificultad del Problema o variable de Diseño principal	$\mu = 50,000$ cps	$u_d = 5.88$ pies/min	$\mu = 100$ a 200 cps	$\mu = 1.000$ cps $\Theta = 15$ Hrs
Resultado de Proceso Requerido	Reacc.Qqm. y Homog.	Uniformidad de la Suspensión.	Homogeneización	Homogeneización
Respuesta Dinámica Requerida (Grado de Agitación)	Nivel de Agitación Medio. $v_b = 24$ pies/min	Nivel Medio de agitación.	Nivel bajo de agitación. $v_b = 10$ pies/min	Nivel bajo de agitación.
Escala de Agitación	4	6	2	—
Tipo de Tanque	Tanque Cil.con tapas toriesféricas, P=36PSI	Tanque Cil.de fondo plano, Abierto	Tanque Cil.de fondo plano,Abierto	Tanque de Almacena-miento Cil.fondo plano.
Velocidad de la Flecha (RPM)	88	44	350	280
Tipo de Impulsor	Turbina de flujo axial 4 Aspas,giradas a 45°	Turbina de flujo axial 4 Aspas,giradas a 45°	Propela marina de 3 Aspas.	Propela marina de 3 Aspas.
Número de Impulsores	1	1	1	1
Número de Baffles	4	4	4	No lleva
Diámetro del Impulsor (pulg)	33	63	9	26
HP del impulsor	2.2	7.98	0.169	37.2

Continua.....

TABLA RESUMEN DE LOS EJEMPLOS PRACTICOS

No.de Ejemplo y de Pagina	1, Pag. 136	2, pag. 150	3, Pag. 166	4, Pag.
Tipo de Industria	Jabonera,Shampoos	Arcillas	Farmaceutica	Petrolera
Tipo de Agitador	Entrada Superior	Entrada Superior	Portatil,Entrada Superior.	Entrada Lateral
Clasificación del Proceso	Homog.y Movimiento de Líquidos.	Suspensión Sólidos	Homog. y Movimiento de Líquidos.	Homog. y Movimiento de Líquidos.
Volumen de líquido	1,723 galones	13,273 galones	41 galones	200,000 Barriles.
Gravedad específica del líquido(sg)	1.0	1.0	1.01 a 1.02	0.975
Dificultad del Problema o variable de Diseño principal	$\mu = 50,000$ cps	$\mu_d = 5.88$ pies/min	$\mu = 100$ a 200 cps	$\mu = 1.000$ cps $\Theta = 15$ Hrs
Resultado de Proceso Requerido	Reacc.Quím. y Homog.	Uniformidad de la Suspensión.	Homogeneización	Homogeneización
Respuesta Dinámica Requerida (Grado de Agitación)	Nivel de Agitación Medio. $v_b = 24$ pies/min	Nivel Medio de agitación.	Nivel bajo de agitación. $v_b = 10$ pies/min	Nivel bajo de agitación.
Escala de Agitación	4	6	2	—
Tipo de Tanque	Tanque Cil.con tapas toriesféricas, P=36PSI	Tanque Cil.de fondo plano, Abierto	Tanque Cil.de fondo plano, Abierto	Tanque de Almacenamiento Cil.fondo plano.
Velocidad de la Flecha (RPM)	88	44	350	280
Tipo de Impulsor	Turbina de flujo axial 4 Aspas, giradas a 45°	Turbina de flujo axial 4 Aspas, giradas a 45°	Propela marina de 3 Aspas.	Propela marina de 3 Aspas.
Número de Impulsores	1	1	1	1
Número de Baffles	4	4	4	No lleva
Diámetro del Impulsor (pulg)	33	63	9	26
HP del impulsor	2.2	7.98	0.169	37.2

Continua.....

CONTINUACION TABLA RESUMEN

Gasto (pies ³ / min)	747.24		103.77	2,001.5
HP Motor	3.0	10	0.25	50
Número de Agitadores	1	1	1	3
Tipo de Reductor	Corona y Sinffn	Engranés Helic. Corona y Sinffn	Engranés Helic.	Engranés Helic.
Montaje	Brida, 8" diámetro nominal .	Placa	Pinza	Brida, 12" diámetro nominal.
Factor de Servicio	2.27	1.53	1.25	1.25
Relación de Reducción	20/1	40/1	5/1	6.25/1
Diámetro y Longitud de flecha (pulg)	2½ x 68.37	3 x 119.5	1 x 41	4 x 42
Tipo de Sello	Prensaestopas	No lleva	No lleva	Sello mecánico doble
Material	Acero al Carbón	Acero al Carbón	Acero Inoxidable 316, Grado Farmac.	Acero al Carbón

IX.- CONCLUSIONES

La idea central de hacer esta monografía fue el de presentar, al interesado en los problemas de agitación de líquidos newtonianos en procesos de homogeneización - movimiento de líquidos y suspensión de sólidos, un método de cálculo que lo lleve paso a paso al diseño del equipo de agitación más adecuado.

En base a la literatura y a los manuales de la compañía NETTCO se conjuntó un método para estos procesos, enfocándolos principalmente a agitadores de turbina y propela.

Los métodos se estructuraron de manera que la persona que los siga no necesitará ser muy conocedora de la teoría de agitación, en apoyo a estos métodos se presentó de forma muy resumida toda la teoría y recomendaciones prácticas en agitación.

Se usaron ejemplos prácticos, con los cuales se calcularon y en algunos casos se optimizaron los agitadores.

Nomenclatura

Ap	=	Area frontal de la partícula sólida
A	=	Area seccional transversal del tanque, pie ² .
B	=	Ancho del Baffle, pulgadas.
C	=	Claro del impulsor, pulgadas.
Cv	=	Distancia del impulsor a la superficie del líquido, pulgadas.
Cd	=	Coefficiente de arrastre, adimensional.
Celev	=	Coefficiente de elevación, adimensional.
Carrast	=	Coefficiente de arrastre, adimensional.
D	=	Diámetro del impulsor, pulgadas.
ds	=	Diámetro de flecha mínimo para el esfuerzo cortante, pulgadas.
dt	=	Diámetro de flecha mínimo para el esfuerzo tensionante, pulgadas.
d	=	Diámetro de la flecha, pulgadas.
dp	=	Diámetro de la partícula.
dv/dy	=	Gradiente de velocidad, ¹ /seg.
E	=	Separación del baffle con respecto a la pared del tanque, pulgadas.
Em	=	Módulo de elasticidad para otro material, PSI.
Es	=	Módulo de elasticidad para el acero, PSI.
$\frac{f}{f_0}$	=	Factor de corrección por viscosidad de la potencia, adimensional.
Fm	=	Factor de propiedades del material, adimensional.
f_w	=	Factor de corrección para la velocidad de asentamiento, adimensional.
F	=	Fuerza, Lb fuerza.
Fd	=	Fuerza de arrastre, Lb fuerza.
Fh	=	Fuerza hidráulica de la turbina, Lb fuerza.
fs	=	Factor de servicio de la fuerza hidráulica, adimensional.
gc	=	Constante adimensional = 32.17 lb pie/ (lb fuerza) (seg) ² .
HP	=	Caballos de potencia.
H	=	Altura de la parte recta del tanque, pulgadas.
Hi	=	Claro del impulsor o altura del impulsor con respecto al fondo del tanque, pulgadas.

H	=	Carga de velocidad.
HP _t	=	Potencia del impulsor, HP.
HP _m	=	Potencia del motor eléctrico, HP.
I	=	Distancia entre la hoja de la turbina y la pared del tanque, pulgadas.
L	=	Largo de la flecha, pulgadas.
L'	=	Largo de la flecha desde la fuerza hidráulica (impulsor) al primer ba lero, pulgadas.
l	=	Longitud de la hoja del impulsor, pulgadas.
M _{max}	=	Momento flexionante máximo, pulgadas - Lb.
N	=	Velocidad rotacional, RPM.
N _q	=	Número de bombeo, adimensional.
n	=	Número de impulsores.
N _c	=	Frecuencia natural del agitador, RPM.
N ₁₋₂	=	Número de hojas del impulsor.
N _p	=	Factor de potencia, adimensional.
N _s	=	Velocidad crítica de suspensión, RPM.
N _{Re}	=	Número de Reynolds, adimensional.
P	=	Potencia del impulsor, HP.
Q	=	Capacidad de bombeo (gasto), pies ³ /min.
Re	=	Número de Reynolds, adimensional.
S _g	=	Gravedad específica, adimensional.
S	=	Espacio entre impulsores, pulgadas.
S _b	=	Separación de los baleros, pulgadas.
(S _g) _l	=	Gravedad específica del líquido libre de sólidos, adimensional.
(S _g) _s	=	Gravedad específica de las partículas sólidas, adimensional.
(S _g) _s	=	Gravedad específica de la lechada, adimensional.
Sc	=	Número de Schmidt, adimensional.
T	=	Diámetro del tanque, pulgadas.
T _{q máx}	=	Torque máximo, pulgadas - Lb.
u	=	Velocidad, pie/segundo.

U_d	=	Velocidad de asentamiento de diseño, pie/minuto.
U_t	=	Velocidad de asentamiento terminal, pie/ minuto.
U_r	=	Velocidad relativa entre la partícula y el fluido, pie/minuto.
V	=	Volumen, galones.
V_b	=	Velocidad de volumen del líquido, pie/minuto.
W	=	Peso del impulsor, Lb.
W_b	=	Peso de la hoja del impulsor, Lb.
W_e	=	Peso equivalente, Lb.
w	=	Peso de la flecha, Lb/pulgadas.
w	=	Ancho de la hoja del impulsor, pulgadas.
X	=	Concentración de sólidos por ciento en peso.
Z	=	Altura del líquido en el tanque, pulgadas.
μ	=	Viscosidad, CPS.
ρ_m	=	Densidad de otro material Lb/pulgada ³ .
ρ_s	=	Densidad del acero, Lb/pulgadas ³ .
ρ_l	=	Densidad del líquido, Lb/pulgada ³ .
σ_s	=	Esfuerzo cortante permisible, PSI.
σ_t	=	Esfuerzo tensionante permisible, PSI.
θ	=	Tiempo de homogeneización, segundos.
θ^*	=	Tiempo de homogeneización, adimensional.
T	=	Esfuerzo cortante, Lb fuerza / pie ² .
ν	=	Viscosidad cinemática, pie ² / segundo.
β	=	Ángulo del cordón de la hoja, grados.
α	=	Ángulo de ataque (ángulo entre el cordón de la superficie aerodinámica y el vector velocidad de la corriente libre), grados.
1	=	Impulsor de arriba.
2	=	Impulsor de abajo.
N_{Fr}	=	Número de Froude = DN^2/g .
N_{Sc}	=	Número de Schmidt = $\mu / \rho D_{AB}$.
D_{AB}	=	Coefficiente de difusión

BIBLIOGRAFIA

* Artículos

- Serie Chem.Eng. Refresher; Liquid Agitation.

- 1) Gates, L.E. Henley, T.L. Fenic, J.G. "How to select the optimum turbine", Chem. Eng., Dec. 8, 1975, P. 110 - 114.
- 2) Dickey, D.S. Fenic, J.C. "Dimensional analysis for fluid agitation systems", Chem,Eng. Jan. 5, 1976, P. 139 - 145.
- 3) Dickey, D.S., Hicks, R.W. "Fundamentals of agitation"., Chem. Eng. , Feb. 2, 1976, P 93- 100.
- 4) Hicks, R.W. Morton, J.R. Fenic, J.G. " How to design agitators for desired - process response"., Chem. Eng., April 26, 1976, P. 102-110.
- 5) Gates, L.E. Morton, J.R. , Fondy, P.L. "Selecting agitator systems to suspend Solids in liquids", Chem. Eng. May 24, 1976, P. 144-150.
- 6) Hill, R.S., Kime, D.L. "How to specify drive trans for turbine agitators", - Chem. Eng., August 2, 1976 P. 89- 94.
- 7) Ramsey, W.D., Zoller, G.C. "How the design of shafts, seals and impellers - affects agitator performance"., Chem. Eng., August 30, 1976, P. 101 - 108.
- 8) Gates, L.E., Hicks, R.W., Dickey, D.S. "Application Guidelines for turbine agitators"., Chem. Eng., Dec.6, 1976, P.165 - 170.

- General.

- 9) Oldshue, J.Y "Fluid mixing technology and practice". Chem. Eng., June 13, - 1983, P. 62 - 71.
- 10) Lee, J.C. " Symposium on fluid mixing". The Chem. Eng.. July, 1982, P. 337 - 338.

- Mezclado.

- 11)- Brodberger, J.R. Valentin, G., Storck, A. "Use of a conductimetric micro-probe to study mixing within agitated reactors". Int. Chem., Eng., Vol 26, Nº 1, Jan, 1986, P. 69 - 77.
- 12)- Weetman, R.J., Salzman, R.N. " Impact of side flow on mixing impeller". Chem., Eng., Progress, June, 1981, P. 71 - 75.
- 13)- Harvey, P.S., Greaves, M. "Turbulent flow in an agitated vessel. Part I: A predictive model". Trans. Inst. Chem. Eng., Vol. 60, 1982, P. 195.
- 14)- Harver, P.S. Greaves, H " Turbulent flow in an agitated vessel. Part II: Numerical solution and model predictions". trans. Inst. Chem., Eng. Vol.60, 1982, P. 201.
- 15)- Ottino, J.M. Ranz, W.E. Macosko, C.M. " A framework for description of mechanical mixing. of fluids". Am. Inst. Chem., Eng. 1. Vol 27, Nº 4, July 1981, P. 565.
- 16)- Balayga, J., Bourne, J.R. "Calculation of micromixing in homogeneous stirred tank reactors". Chem., Eng. Res. Des. Vol. 66, Jan, 1988, P. 33.

- Impulsores.

- 17)- Chudacek, N.W. "impeller power numbers and impeller flow number in profiled bottom tanks". Ind. Eng., Chem. Process Des. Dev. 1985, 24, Nº 3, P. 858 - 867-
- 18)- Sano, Y. Usui, H. "Effects of paddle dimensions and baffle conditions on the interrelations among discharge flow rate, mixing power and mixing time in mixing vessels", J. Chem., Eng. Japan, Vol. 20 Nº 4 Aug. 1987, P. 399 - 404.
- 19)- Wichterle, K, Mistschka, P. Hajek , J. Zak, L. " Shear stresses on the walls of vessels with axial impellers". Chem., Eng. Res. Des., Vol. 66, Jan., 1988 P. 102.

- Factores Geométricos.

- 20)- Unno, H., Akehata, T. " Effect of feeding and/or outlet position of flow in continuous stirred - tank reactor". Journ. Chem. Eng. Japan, Vol 17, Nº 4 1984, P. 356- 361.

- Homogeneización.

- 21)- Shive, S.J. Wong, C.W. "Studies on homogenization efficiency of various agitators in liquid blending". The Canadian Jour, Chem. Eng. Vol. 62, Oct., 1984, P. 602- 609.
- 22)- Smith, J.M. Schoenmakers, A.W. "Blending of liquids of differing viscosity". Chem. Eng. Res. Des. Vol. 66, Jan., 1988, P. 16- 21.

- Tiempo de Mezclado.

- 23)- Sano, Y., Usui, H. "Interrelations among mixing time, power number and discharge flow rate number in baffled mixing vessels". J. Chem. Eng. Japan, Vol, 18, Nº 1, 1985, P. 47- 52.
- 24)- Saito, F., Kamiwano, M. " A technique for prediction of the mixing time of high - viscosity liquid - mixing systems with negligible diffusivity of solute". Che. Eng. J. (lausanne), Vol, 36, Nº 2, 1987, P. 93-100.

- Transferencia de Calor.

- 25)- Bondy, F., Lippa, S. " Heat transfer in agitated vessels". Chem. Eng., April 4, 1983, P. 62- 71.
- 26)- Bourne, J.R. Buerli, M. Regenass, W. " Heat transfer and power measurements in stirred tanks using heat flow calorimetry". Chem. Eng. Sci., Vol. 36, P. 347 - 354, 1981.
- 27)- Buerli, M. Regenass, W. "Power and heat transfer to agitated suspensions: Use of heat flow calorimetry". Chem. Eng. Sci., Vol 36, P. 782- 784, 1981.
- 28)- Bowsher, M.E. Hooley, D.F. " Optimizing reactor agitation in heat - transfer - limited situations". Chem. Eng., June 27, 1983, P. 45- 50.
- 29)- Barabash, V.M. Begachev, V.I. Braginskii, L.N. "Calculation of heat transfer in vessels with mechanical mixing". Theoretical Found. Chem. Eng., 1982, P. 525- 530.
- 30)- Havas, G. Deak, A. Sawinsky, J. " Heat transfer coefficients in an agitated vessel using vertical tube baffles". Chem. Eng. J., Vol. 23, 1982, P. 161 - 165.

- Suspensión de Sólidos.

- 31) Conti, S. Sicardi, S., Specchia, V. "Effect of the stirrer clearance on particle suspension in agitated vessels". The Chem. Eng. J. 22, 1981, P. 247- 249.
- 32)- Tojo, K. Mlyanami, K. "Solids suspension in mixing tanks". Ind.Eng. - Fundam., 21, 1982, P. 214 - 220.
- 33)- Molerus , O. Latzel, W. " Suspension of solid particles in agitated - vessels - I. Archimedes Numbers 40." Chem. Eng. Sci., Vol. 42, Nº 6 - 1987, P. 1423- 1430.
- 34)- Molerus, O. Latzel, W. "Suspension of solid particles in agitated vessels - II. Archimedes Numbers 40, reliable prediction of minimum stirrer - angular velocities". Chem. Eng. Sci. Vol 42, Nº 6, 1987, P. 1431- 1437.

- Transferencia de Masa.

- 35)- Patil, Voko, Joshi, J.B., Sharma, M.M. " Solid - Liquid mass transfer - coefficient in mechanically agitated contactors". Chem. Eng. Res. Des., Vol. 62, Nº 4, 1984, P. 247.

- Diseño.

- 36)- Dickey, D.S. "Program chooses agitator". Chem. Eng. Jan, 9, 1984, P. 73 - 81.

- Agitadores Portátiles.

- 37)- Boletín, NETTCO Agitadores Portatiles, NSP - G -2.
- 38)- Catalogo MP 77, Portable mixmor, Philadelphia Mixers.
- 39)- Portable and Fixed Mount. Propeller Mixers. Catalogo NETTCO, NSP -1, Enero, 1986.
- 40)- Propeller Mixer Selection Data. Section 6, Page. 1-6, Feb. 1, 1978. NETTCO.
- 41)- Cuadernos de Calculo de Agitadores Portatiles para clientes de NETTCO.
- 42)- Catalogo 3-540, Lightnin , Portable, Fixed mount Mixers.

- Tiempo de Mezclado.

- 43)- Ryzski, E. "Mixing time (time to homogenization) in the transition region of mixing". The Chem. Eng. J., 31, 1985 P.75- 81.

- Agitadores de Turbina.

- 44)- Pesos aproximados de Reductores, motores, flechas y turbinas, NETTCO, Section 62, Page 58, Jan.1, 1976.
- 45)- Dimensiones de turbinas NETTCO, tabla del fabricante.
- 46)- Boletín nº WT - T - 1, Mark II, NETTCO.
- 47)- Dibujos de agitadores NETTCO, Modelos TG, WT, T.
- 48)- Catálogo de agitadores "Philadelphia".
- 49)- Tabla de Dimensiones y capacidades de reductores marca Fran.
- 50)- Tabla de capacidades de reductores marca NETTCO, modelos WT y T.
- 51)- Sample top entry right angle agitator drive specification, NETTCO, Section 1, P. 15- 17.
- 52)- Instructivo de instalación y mantenimiento para los unidades WT y T, NETTCO.
- 53)- Boletín nº TG 1 /M, NETTCO.
- 54)- Cuadernos de cálculo para clientes de NETTCO.
- 55)- TGL/TGF Drives. Turbine Selection. Section 2. P. 8- 12, NETTCO.
- 56)- Safe operating speeds. Section 3, Nov., 1971. NETTCO.

- Agitadores de Entrada Lateral.

- 57)- Oldshue, J.Y, Hirschland, H.E., Gretton, A.T. "Blending, of low - viscosity liquids with side - entering mixers" Chem. Eng. Progress, Vol. 52, nº 11 , Nov., 1956, P. 481- 484.
- 58)- Rushton, J.H. "Mixers for large tank blending". Petroleum Refiner, Vol. 33 nº 8, August., 1954, P. 101- 107.

- 59)- Klausdieter, K. " Suspension by side entering agitators". Chem. Eng. process, Vol. 18, nº 4, Jul - Aug. 1984, P. 233- 238.
- 60)- Side drive selection data. K - KB- X- 100 - 110, Section 3. NETTCO.
- 61)- Installation, operating and maintenance instructions. NETTCO models KB side drives. K - KB- 2 - 301.
- 62)- Dibujos de agitadores NETTCO, Modelo k y KB.
- 63)- Catálogo de reductores montados en flecha, marca " Mecánica Falk" boletín 371- 110E, Oct, 1981.
- 64)- Boletín, NETTCO Agitadores serie KB. Nº KB-2.
- 65)- Cuadernos de cálculo para clientes de NETTCO.
- Partes mecánicas del Agitador.
- 66)- Memorias del seminario de " Agitación y Filtración" en República Dominicana, Abril de 1987.
- 67)- Presaestopas y sellos mecánicos, dibujos de fabricación.
- 68)- Tabla de características de motores ASEA, Manual del fabricante.
- 69)- Tabla de características de Bridas NETTCO.
- 70)- Tabla de características de Motores neumáticos marca GAST, manual del fabricante.
- 71)- Guía y datos sobre la corrosión para metales marca SOLAR, manual del fabricante.
- 72)- Dimensiones de bridas marca TAYLOR, manual del fabricante.
- 73)- NETTCO Agitating Equipment, parts 530- 41
- 74)- Seminario de generalidades sobre engranes, Mecánica FALK , México, D.F.
- 75)- Boletín 431- 110E, Mayo 1987, Coples flexibles, Steelflex, Mecánica FALK.

* Libros.

- 76)- Oloshue James Y.
Fluid Mixing Technology
Mc Graw-hill Publications Co.
N.Y. (1983)
- 77)- Foust, A.S., Wenzel, L.A.
Principios de Operaciones Unitarias
Cfa. Editorial Continental.
México,D.F. (1985)
- 78)- Uhl, V.W. and Gray,J.B.
Mixing, Theory and Practice
Academic Press
N.Y. (1966) Vol. I
N.Y. (1967) Vol. II
- 79)- Perry, R.H. Chilton, C.H.
Manual del Ingeniero Químico
5FD, Mc Graw-hill de México
D.F. (1982)
- 80)- Holland, F.A. and Chapman, F.S.
Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks
- 81)- Nagata, S:
Mixing: Principles and Applications
Wiley, New York, 1975