

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN
AGITADOR”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

BETTY JANETH QUISPE NUÑEZ

**LIMA – PERÚ
2010**

DEDICADO

A mis padres que siempre son mi
fuerza para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

A los Ingenieros José Cordero,
Alejandro Benavides y Alfonso
Miranda.

INDICE

1. INTRODUCCION.....	7
2. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS.....	8
2.1. ¿Que es un agitador?	8
2.2. ¿Que es agitación?	8
2.3. ¿Qué es mezcla?	8
2.4. Propiedades de los Fluidos.....	9
2.4.1. Densidad.....	9
2.4.2. viscosidad	9
2.5. Tipo de Fluidos.....	10
2.5.1. Fluidos Newtonianos	10
2.5.2. Fluidos No Newtonianos	11
A. Fluido No Newtoniano independiente del tiempo.....	12
A.1. Fluido Pseudoplastico.....	12
A.2. Fluido Dilatante.....	13
A.3. Fluido Plástico de Bingham o ideal.....	13
B. Fluido No Newtoniano dependiente del tiempo.....	15
B.1. Fluido Thixotropicos.....	15
B.2. Fluido Reopecticos.....	16
2.5.3. Fluidos Viscoelasticos	16
2.6. Números adimensionales.....	17
2.6.1. Numero de Reynold	17
2.6.2. Numero de Froude.....	18
2.6.3. Numero de Potencia.....	18
2.6.4. Numero de Caudal.....	18
3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN AGITADOR.....	21
3.1. Características del Proceso.....	21
3.1.1. Requerimientos de la mezcla.....	22

3.1.2.	Uniformidad de temperatura.....	22
3.1.3.	Homogenización de reactantes.....	23
	A. Mezcla de Fluidos Miscibles.....	23
	B. Mezcla de Fluidos Inmiscibles.....	23
	C. Mezcla entre Sólidos y Líquidos.....	24
	D. Mezcla de Gas y Líquido.....	24
3.1.4.	Procesos aplicativos.....	25
	A. Sólidos en Suspensión.....	25
3.2.	Caracterización del Fluido.....	28
3.3.	Tiempo de mezclado.....	29
3.4.	Dispositivos que afectan el flujo en tanques agitados.....	30
	3.4.1. Placas deflectoras.....	31
	3.4.2. Geometría del tanque.....	34
	3.4.3. Impulsor.....	36
	A. Principales tipos de Impulsores.....	39
	A.1. Hélice.....	39
	A.2. Palas.....	40
	A.3. Turbina.....	41
	B. Impulsores de alta eficiencia Vs. Clásicos.....	42
	B.1. Tres generaciones de la tecnología de impulsores para dispersión de gas.....	42
	B.2. Impulsor A510.....	43
	3.4.4. Potencia consumida.....	45
	A. Efecto de la geometría del sistema.....	49
	B. Consumo de Potencia con fluidos No Newtonianos.....	50
3.5.	Criterios de escalamiento.....	51
4.	APLICACIÓN DE SELECCIÓN DE UN AGITADOR.....	53
	4.1. Caso 1.....	53
	4.1.1. Selección del impulsor.....	55
	4.1.2. Calculo de Potencia.....	57
	4.2. Caso 2.....	59

4.2.1. Selección del impulsor.....	60
4.2.2. Calculo de Potencia.....	61
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
6. BIBLIOGRAFIA.....	65
7. ANEXOS.....	66

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay muchas empresas dedicadas al estudio de los sistemas de agitación, las cuales invierten mucho dinero para obtener agitadores de alta eficiencia y bajo consumo de energía. Todos estos avances no se verán reflejados en un proceso químico, si no se hace una buena selección del sistema de agitación.

El éxito de muchas operaciones industriales depende de una eficaz agitación y mezcla de fluidos. Los ingenieros de planta son conscientes de la necesidad de un sistema de agitación en su proceso, pero muchos de ellos no conocen cuales son los factores que influyen en la selección del mismo, esto se ve reflejado cuando solicitan un agitador a un proveedor y no brindan la información exacta del proceso porque lo consideran innecesario o menos importante; dando como resultado agitadores sobredimensionados o subdimensionados y no cubrirán las necesidades del proceso. Si ellos conocieran cuales son los factores que influyen en la selección de un agitador y como afectan estos en la selección del mismo, brindarían la data necesaria obteniéndose así agitadores que se adapten a sus necesidades.

Por lo tanto conocer los parámetros que influyen en la selección de un agitador (propiedades de los fluidos, geometría del tanque de proceso, etc.) es de mucha importancia, ya que de estos dependerá la obtención de la potencia del agitador, el tipo de impulsor a utilizar y sobre todo la eficacia de un proceso químico y por que no decir la economía de un proceso.

2. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS

2.1. QUE ES UN AGITADOR?

Es un dispositivo que consiste en un motoreductor, un eje y uno o mas impulsores montados en el eje. Un impulsor es un dispositivo instalado en el eje rotatorio y se encarga de promover el intercambio de materiales en el sistema, en orden de satisfacer los requerimientos del proceso.

2.2. QUE ES AGITACION?:

La agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento específico en el interior de un recipiente, generalmente un modelo circulatorio. Los objetivos de la agitación pueden ser:

- Mezcla de dos líquidos miscibles.
- Disolución de sólidos en líquido.
- Mejorar la transferencia de calor.
- Dispersión de un gas en un líquido.
- Dispersión de partículas finas en un líquido.
- Dispersión de dos fases no miscibles.

2.3. QUE ES MEZCLA?:

La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas, es decir el mezclado implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado o dos fluidos, y lograr que ambas fases se distribuyan.

Ejemplo: un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero, en cambio, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material.

2.4. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS:

2.4.1. DENSIDAD (ρ):

Es una propiedad física de la materia que describe la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. La densidad describe cuán unidos están los átomos de un elemento o las moléculas de un compuesto. Mientras más unidas están las partículas individuales de una sustancia, más densa es la sustancia. La densidad es una propiedad intensiva de la materia, definida como la relación de la masa de un objeto dividida por su volumen. La masa es la cantidad de materia contenida en un objeto y comúnmente se la mide en unidades de gramos (g). El volumen es la cantidad de espacio ocupado por la cantidad de la materia y es comúnmente expresado en centímetros cúbicos (cm³).

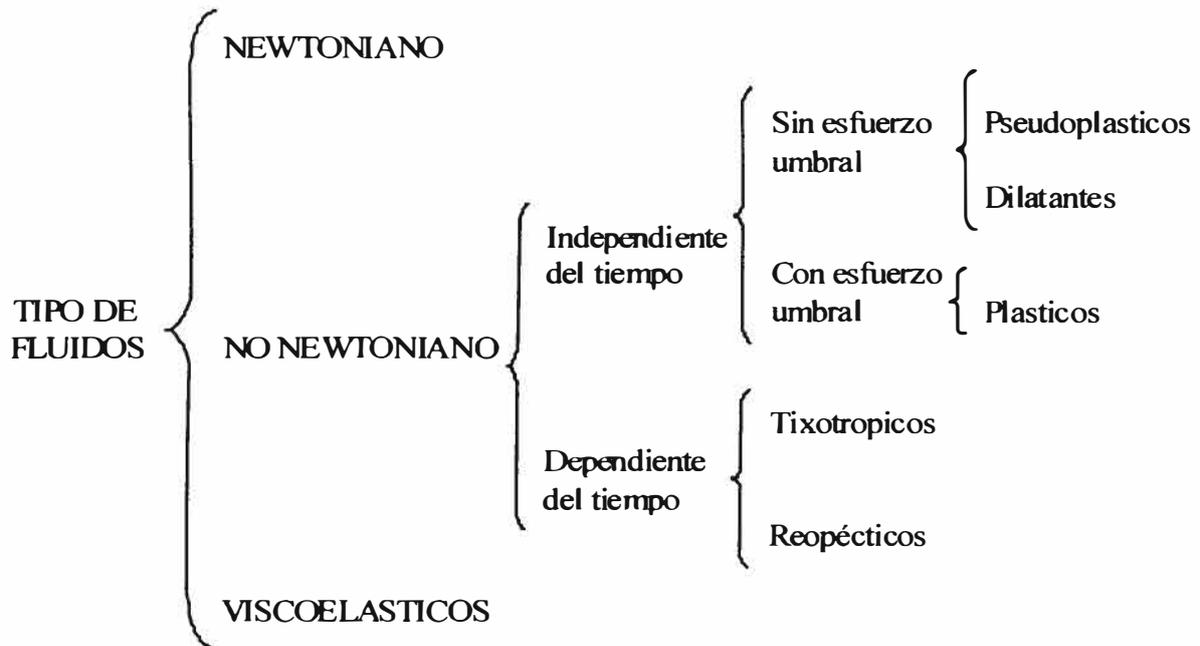
$$Densidad = Masa / Volúmen$$

2.4.2. VISCOSIDAD (μ):

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Es una medida de la fricción interna del fluido, esto es, la resistencia a la deformación. La viscosidad es una manifestación del movimiento molecular dentro del fluido. Las moléculas de regiones con alta velocidad global chocan con las moléculas que se mueven con una velocidad global menor y viceversa, estos choques permiten transportar cantidad de moviendo de una región de fluido a otra. Ya que los movimientos moleculares aleatorios se ven afectados por la temperatura del medio, la viscosidad resulta ser una función de la temperatura. La unidad básica de viscosidad se denomina poise (poise = g/(cm * s)).

2.5. TIPO DE FLUIDOS:

Un esquema conciso de los tipos de fluidos existentes:



2.5.1. Fluidos Newtonianos:

Son los fluidos en que los esfuerzos de corte son directamente proporcionales a la tasa de deformación. Los fluidos más comunes tales como el agua, el aire y la gasolina son newtonianos en condiciones normales.

Si consideramos la deformación de dos fluidos newtonianos diferentes, digamos glicerina y agua podemos darnos cuenta de que se deformarán a diferentes proporciones ante la acción del mismo esfuerzo de corte aplicado. La glicerina presenta una resistencia mucho mayor a la deformación que el agua y por ello podemos decir que es mucho más viscosa.

La ley de viscosidad de Newton está dada por:

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

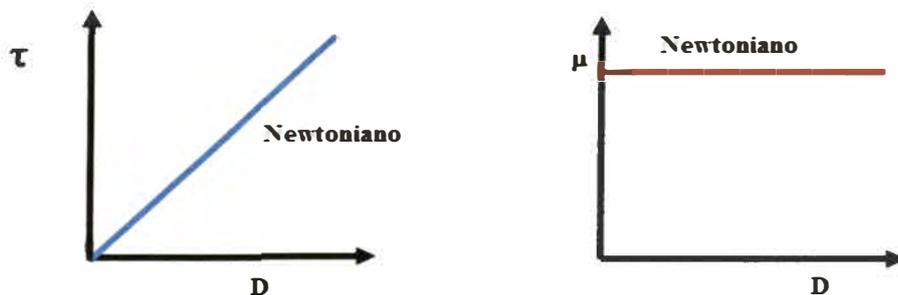
Siendo:

τ = esfuerzo cortante (mPa)

μ = viscosidad dinámica del fluido (mPa·s)

dv/dy = velocidad de deformación del fluido (s^{-1}) = D

En la gráfica 1 se aprecia la proporcionalidad de la viscosidad, así mismo como esta permanece constante al incrementarse el gradiente de viscosidad.



Gráfica 1: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano

2.5.2. Fluidos No Newtonianos:

Son los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación. Es aquel donde la viscosidad varía con el gradiente de velocidad.

Por lo común, los fluidos no newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo.

A. Fluidos No Newtonianos independientes del Tiempo:

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo umbral, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

Un gran número de ecuaciones empíricas se han propuesto para modelar las relaciones observadas entre τ_{yx} y dv/dy para fluidos independientes del tiempo.

$$\tau = \eta \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

Siendo:

τ = esfuerzo cortante (mPa)

η = viscosidad aparente

dv/dy = velocidad de deformación del fluido (s^{-1}) = D

Para los fluidos no newtonianos, la viscosidad se conoce generalmente como “viscosidad aparente” para enfatizar la distinción con el comportamiento newtoniano.

A.1. Fluidos Pseudoplásticos: son aquellos cuya viscosidad aparente disminuye con el aumento de la relación de deformación ($n < 1$). Casi todos los fluidos no newtonianos entran en este grupo; los ejemplos incluyen soluciones poliméricas, suspensiones coloidales y pulpa de papel en agua.

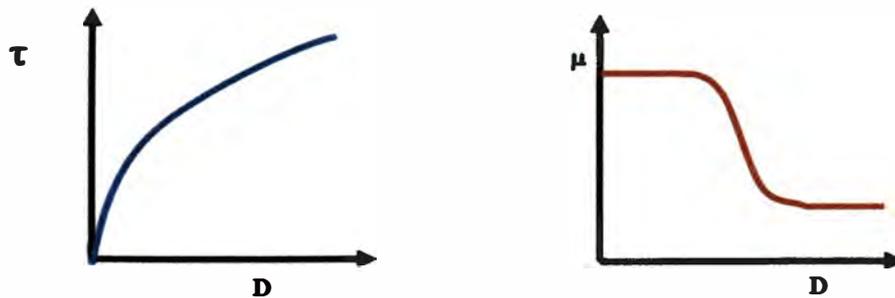


Gráfico 2: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido pseudopástico

A.2. Fluidos Dilatantes: son aquellos cuya viscosidad aparente aumenta con el incremento de la relación de deformación ($n > 1$).

Ejemplo: Suspensiones de almidón, suspensiones de arena.

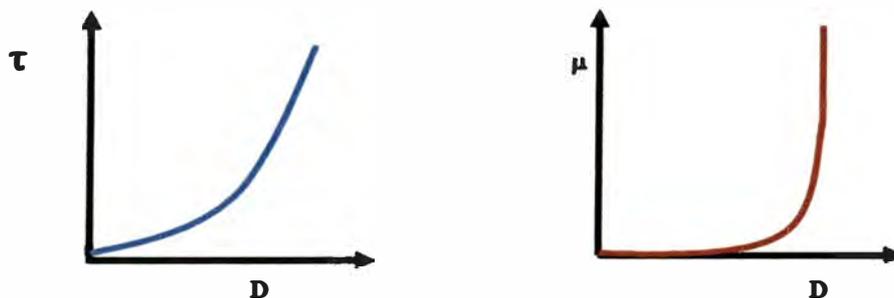


Gráfico 3: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido dilatante.

A.3. Fluidos Plástico de Bingham o ideal: son aquellos fluidos que se comportan como un sólido hasta que se excede un esfuerzo de deformación mínimo τ_y y exhibe subsecuentemente una relación lineal entre el esfuerzo y la relación de deformación (se comporta como un líquido).

Ejemplo: Las suspensiones de arcilla, lodos de perforación, pasta de dientes.

Las curvas de fluidez y viscosidad se representan en la figura.

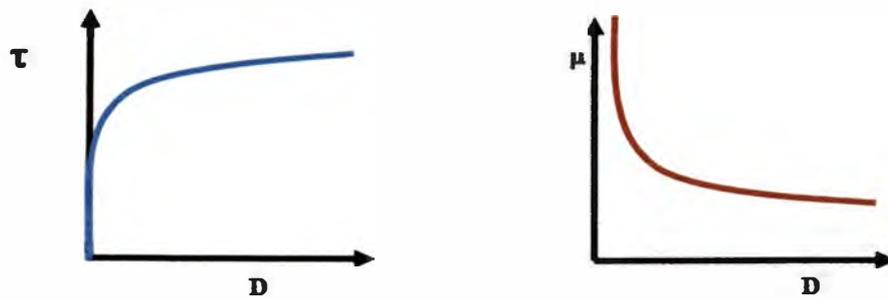


Gráfico 4: Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido plástico.

A continuación se muestran los diagramas reológicos de los fluido no newtonianos independientes del tiempo.

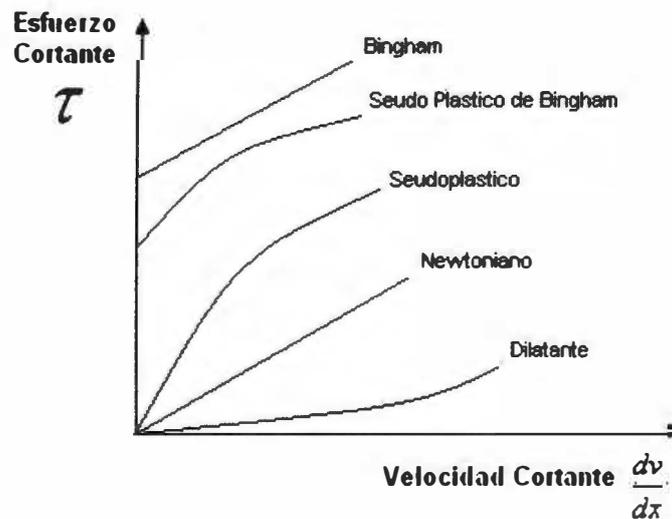


Gráfico 5: (a) Curvas de fluidez de fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

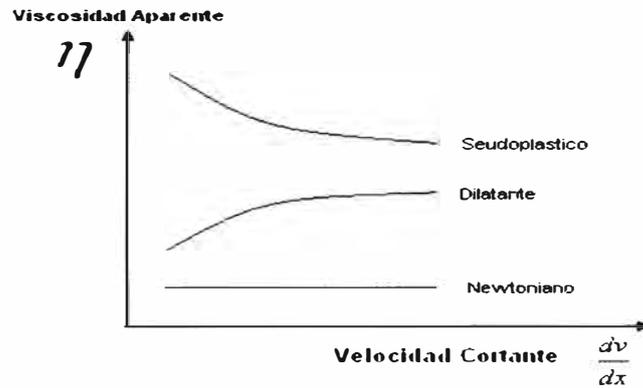


Gráfico 5: (b) Curva de viscosidad de fluido no newtonianos independientes del tiempo.

B. Fluidos No Newtonianos dependientes del tiempo:

El estudio de fluidos no newtonianos dependientes del tiempo es aún más complicado por el hecho de que la variación en el tiempo de la viscosidad aparente es posible.

B.1. Fluidos Thixotrópicos: son aquellos fluidos que muestran una reducción de su viscosidad aparente (η) con el tiempo ante la aplicación de un esfuerzo de corte constante y recuperan su estado inicial después de un reposo prolongado

Ejemplo: Pinturas, Shampoo, yogurt, resinas de poliéster, tintas, pasta de tomate.

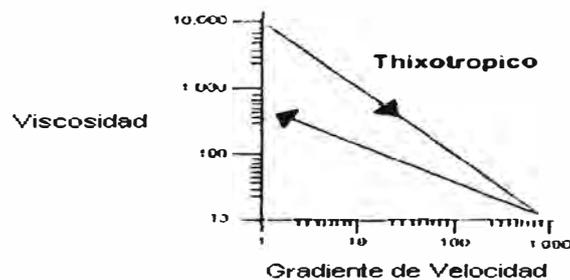


Gráfico 6: curva de viscosidad de los fluidos no newtonianos – thixotrópicos.

B.2. Fluidos Reopéticos: son aquellos fluidos que muestran un aumento de viscosidad aparente (η) con el tiempo.

Ejemplo: Algunas sustancias bituminosas como betunes y ceras.

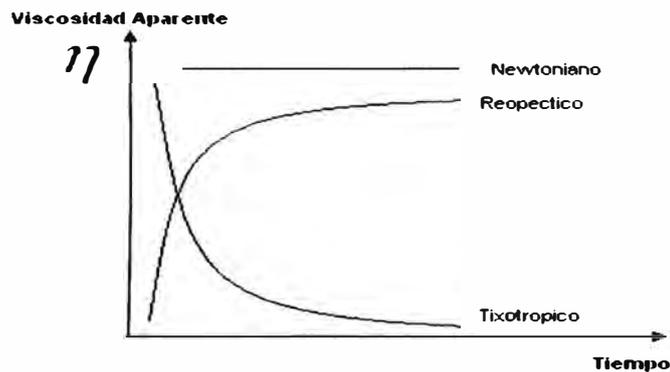


Gráfico 7: Curvas de viscosidad de los fluidos no newtonianos – reopéticos.

2.5.3. Fluidos Viscoelásticos:

Se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos. Después de la deformación, algunos regresan parcialmente a su forma original cuando se libera el esfuerzo aplicado. A tales fluidos se les llama viscoelásticos.

Ejemplo: los pegamentos industriales, la nata, la gelatina, los helados.

2.6. NÚMEROS ADIMENSIONALES:

Un número adimensional es un número que no tiene unidades físicas que lo definan y por lo tanto es un número puro. Los números adimensionales se definen como productos o cocientes que si tienen unidades de tal forma que todas éstas se cancelan.

Dependiendo de su valor estos números tienen un significado físico que caracteriza unas determinadas propiedades para algunos sistemas.

2.6.1. Número de Reynold (N_{re}):

Es un numero adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. El número de Reynolds se encarga de describir el movimiento característico del fluido en el tanque de agitación y esta en función de la velocidad generada por el impulsor, de la viscosidad dinámica del líquido, la densidad de la mezcla y del diámetro del impulsor.

Como todo número adimensional es un cociente. En este caso es la relación de las fuerzas de inercia Vs. Fuerzas viscosas en fluido.

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar dentro del tanque.

Para valores de $N_{re} < 50$ el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por laminas delgadas, que interactúan solo en base a esfuerzos tangenciales, por eso a este flujo se le llama flujo laminar.

Para valores de $N_{re} > 10000$, el régimen es llamado flujo turbulento es decir caracterizado por un movimiento desordenado

$$N_{re} = \frac{N \cdot D_i^2 \rho}{\mu}$$

2.6.2. Número de Froude (N_{fr}):

Es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Interviene en situaciones fluido dinámicas donde hay un movimiento de olas significativo sobre la superficie del líquido.

$$N_{fr} = \frac{N^2 \cdot D_i}{g}$$

2.6.3. Número de Potencia (N_p):

Es una variable adimensional que relaciona el consumo de potencia generada por el impulsor (P) con variables de operación tales como: densidad del líquido (ρ), la velocidad de rotación del agitador (N) y el diámetro del impulsor (D). Cada tipo de impulsor cuenta con un número de potencia propio. Este número adimensional es resultado del esfuerzo necesario del impulsor para contrarrestar la fricción generada entre el fluido en movimiento y las paredes y el fondo del tanque de agitación así también por la resistencia misma producida por los deflectores radiales.

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

2.6.4. Número de Caudal (N_Q):

El número de caudal es propio de tipo de impulsor utilizado. Este número está relacionado a la capacidad de bombeo generado por el impulsor, el número de revoluciones del agitador y el diámetro del impulsor.

Este es probablemente el más importante número adimensional usado para representar el flujo en el tanque de agitación.

$$N_Q = \frac{Q}{ND_i^3}$$

El N_Q depende en gran medida del régimen de flujo, número de Reynolds y la geometría del impulsor.

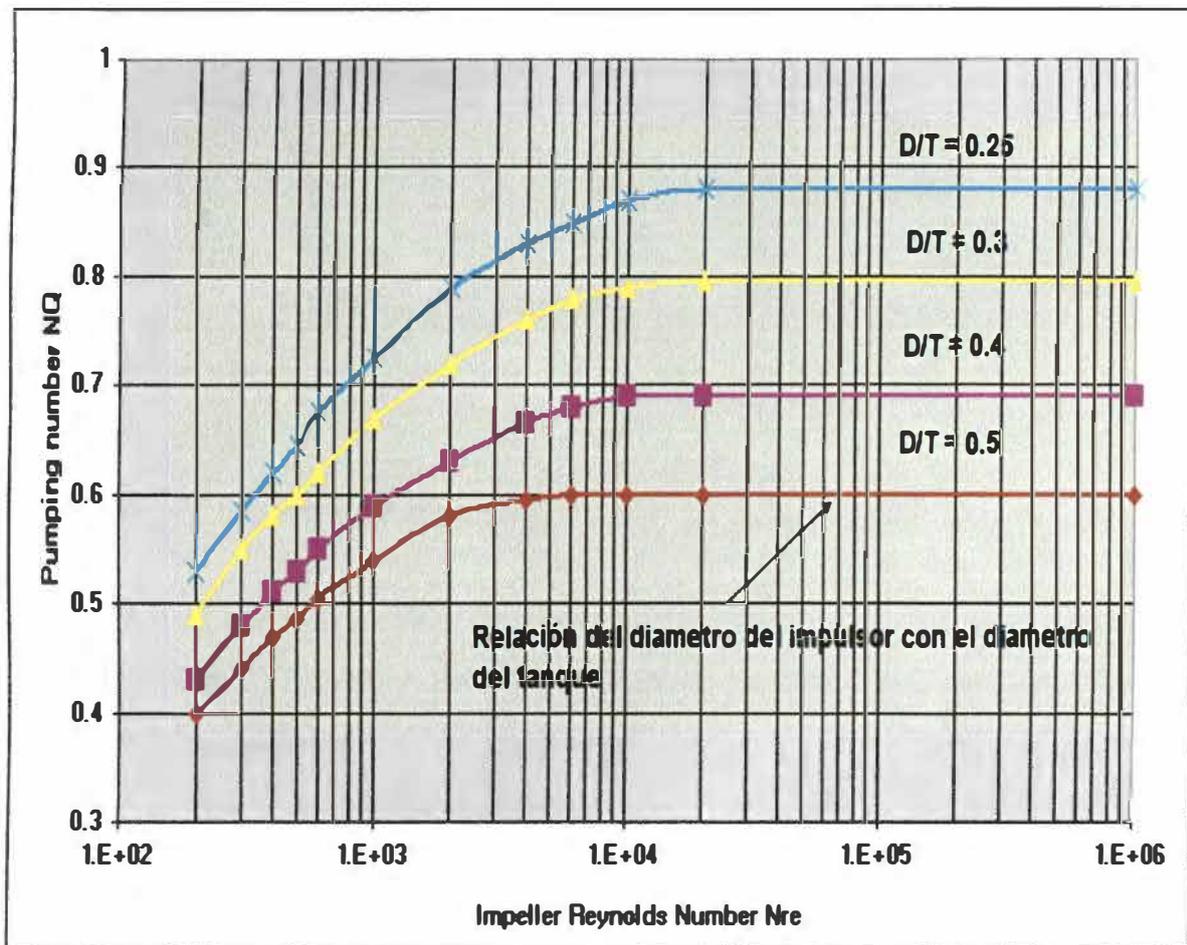


Gráfico 8: Representa un análisis del número de caudal (N_Q) versus el número de Reynolds (N_{re}) para varias dimensiones de tanques.

Tabla 1: Valores de N_Q para impulsores usados en procesos de mezclado.

TIPO DE IMPULSOR	NÚMERO DE CAUDAL (N_Q)
Propela marina	0.4 – 0.6
Turbina de Paletas Inclinas	0.79
Impulsor tipo hydrofoil	0.55 – 0.73
Impulsor de hojas curvas	0.3
Turbina de paletas planas	0.7
Turbina de disco y hojas planas (Rushton)	0.72
Turbina de hojas cóncavas (Rushton)	0.76

3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN AGITADOR:

En este punto analizaremos los factores que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar un agitador.

3.1. CARACTERISTICAS DEL PROCESO:

La agitación juega un rol importante en el proceso de producción de múltiples productos. Para poder seleccionar un agitador, es necesario identificar el proceso para poder determinar los requerimientos de agitación en una mezcla.

En la industria podemos encontrar diversos procesos que incluyen la mezcla de fluidos de baja viscosidad con fluidos de alta viscosidad, sólidos en suspensión, dispersión de gases o sólidos en líquidos, transferencia de masa o calor.

Una clasificación general de los diferentes tipos de mezclas que se aplican a procesos físicos y químicos, se muestra en la siguiente tabla:

PROCESOS FISICOS	TIPO DE MEZCLA	PROCESOS QUIMICOS
<ul style="list-style-type: none">• Suspensión• Dispersión• Emulsión• Mezcla• Bombeo	<ul style="list-style-type: none">• Líquido – Sólido• Líquido – Gas• Líquidos Inmiscibles• Líquidos miscibles• Mov. De fluido	<ul style="list-style-type: none">• Disolución• Absorción• Extracción• Reacciones• Transf. De Calor

3.1.1. REQUERIMIENTOS DE LA MEZCLA:

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

Para lograr un mezclado eficiente depende de una efectiva utilización de la energía que se emplea para generar el flujo de componentes. Para lograr proporcionar un suministro de energía adecuado hay que considerar las propiedades físicas de los componentes, el impulsor y la configuración del tanque de agitación.

3.1.2. UNIFORMIDAD DE TEMPERATURA:

Mientras que la mayoría de los agitadores solo se diseñan con base en el tipo de mezcla requerida, la transferencia de masa necesaria y la reacción que debe producirse, la transferencia de calor puede llegar a ser el mecanismo fundamental de control de proceso. Muchos procesos químicos y biológicos son exotérmicos o endotérmicos y usualmente requieren algún tipo de control de transferencia de calor.

Sistemas típicos donde podemos encontrar la transferencia de calor:

- Reacciones químicas
- Polimerizaciones
- Fermentación
- Esterificación
- Hidrogenación

Cuando la agitación tiene como aplicación un proceso de transferencia de calor, las variables no controladas por la agitación son las que puede tener un efecto mucho mayor en la transferencia de calor, estas variables pueden ser el aumento del diferencial de temperatura o el aumento de la superficie de la transferencia de calor.

La mezcla solo puede afectar al coeficiente de transferencia de calor de la ecuación de Nusselt (h) lo que representa solo una parte de la transferencia de calor global.

3.1.3. HOMOGENIZACION DE REACTANTES:

A. MEZCLA DE FLUIDOS MISCIBLES:

Cuando los fluidos involucrados son miscibles entre si, este tipo de mezclas es considerado como el más sencillo. De esta forma, sólo es necesario uniformizar, es decir, llevar las variaciones de concentración a niveles aceptables.

Sin embargo, estas operaciones de mezclado se complican cuando los fluidos involucrados tienen grandes diferencias de densidades o de viscosidades.

B. MEZCLA DE FLUIDOS INMISCIBLES:

Cuando se requieren mezclar dos fluidos inmiscibles (por lo general éstos son de baja viscosidad) el sistema de agitación se diseña para crear pequeñas gotas de fluido que se dispersan en el interior del segundo fluido. Por lo general esta situación se crea para lograr grandes áreas y realizar la transferencia de masa necesaria. Por ello, en este caso la agitación se emplea para mejorar las condiciones que favorezcan la transferencia de masa. Si la agitación se detiene, las dos fases se separarán, conllevando a la reducción de área interfacial.

Este tipo de agitación se emplea en las unidades de extracción de solventes y emulsiones, frecuentemente encontradas en la industria alimenticia y farmacéutica. Aquí, las gotas de líquido generadas y atrapadas por el segundo fluido son muy estables y sólo se separan pasado un gran periodo de tiempo. Más aún, las emulsiones estables son fluidos comúnmente muy viscosos, cuyas propiedades son no newtonianas.

C. MEZCLAS ENTRE SÓLIDOS Y LIQUIDOS

Este tipo de mezclas se da en procesos de cristalización o en reacciones de sólidos con catálisis a través de un líquido. En estos casos es necesario suspender las partículas sólidas en un líquido que, por lo general, es de baja viscosidad; de esta manera, la agitación tiene la función de evitar la sedimentación (o flotación) y proveer las condiciones necesarias para una buena transferencia de masa entre el sólido y el líquido, y/o promover la reacción. Si la agitación se detiene, por lo general las partículas sólidas se sedimentarán o flotarán, dependiendo de su densidad relativa.

D. MEZCLA DE GAS Y LIQUIDO:

En una gran cantidad de procesos industriales, como la oxidación, la hidrogenación y la fermentación, se requiere el contacto entre un gas y un líquido. Este tipo de proceso conlleva a agitar una mezcla gas-líquido para generar una dispersión de burbujas de gas en la fase líquida. De esta forma, la transferencia de masa se lleva a cabo a través de la interfase que se crea. También es posible conseguir la reacción, sobre la fase líquida, que podría acompañar a esta transferencia de masa.

3.1.4. PROCESOS APLICATIVOS:

A. SÓLIDOS EN SUSPENSION:

La suspensión de sólidos depende de la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas. Estas a su vez dependen del tamaño, forma y densidad de las partículas, de la viscosidad y densidad del líquido y de que la sedimentación sea libre o impedida. En general, las partículas pequeñas y ligeras con velocidad de sedimentación libre inferior a 30 cm/min son fáciles de suspender en un tanque agitado, ya que tienden a seguir el tipo de flujo del líquido. Las partículas mayores tienden a sedimentar, a pesar del movimiento del líquido, pero si la velocidad de sedimentación libre es inferior a 3 m/min es posible obtener una suspensión bastante uniforme en un tanque agitado.

Muchos estudios realizados para operaciones de sólidos en suspensión muestran que impulsores de gran diámetro a bajas velocidades producen resultados óptimos para estos procesos.

La relación adecuada de la altura del fluido con el diámetro de tanque (Z/D_T) para procesos de sólidos en suspensión es de 0.6 a 0.7 utilizando un solo impulsor de flujo axial. Cuando la relación Z/D_T es mucho mayor a la indicada, la potencia se incrementa dramáticamente cuando se usa un solo impulsor. Cuando Z/D_T es aproximadamente 1 se debe considerar usar un segundo impulsor para asegurar el proceso. Los tanques altos siempre requerirán más energía que los tanques bajos debido a que el impulsor superior no puede hacer nada hasta que el impulsor inferior haya recogido todas las partículas y las haya distribuido a la corriente de flujo superior.

Otro punto a tener en cuenta en las operaciones de sólidos en suspensión es reconocer que las operaciones Batch normalmente requieren mayor potencia de 10 a 25% más que las operaciones de flujo continuo. Ya que en las operaciones

continuas a medida que ingresa la alimentación al tanque permite que el contenido en el tanque permanezca suspendido haciendo que la potencia requerida sea para mantener la uniformidad.

Cuando los sólidos están suspendidos en un tanque agitado, existen diferentes formas para definir la condición de suspensión:

- Suspensión prácticamente completa con fileteado: la mayor parte del sólido está suspendido en el líquido, con un pequeño porcentaje de partes fileteadas estacionarias de sólido en la periferia exterior del fondo o de otras partes del tanque. La existencia de una pequeña cantidad de sólidos que no están en movimiento puede permitirse en un tanque de alimentación de una unidad de proceso, toda vez que estas partes fileteadas de sólidos no crezcan ni se aglomeren. La presencia de fileteado es indeseable para una reacción química.
- Suspensión completa o suspensión completa fuera del fondo: todas las partículas están suspendidas fuera del fondo del tanque o bien no permanecen sobre el fondo más que uno o dos segundos. Cuando se alcanza justamente esta condición, en general habrá gradientes de concentración en la suspensión y puede existir una región de líquido sin alta concentración de sólido (líquido claro) cerca de la parte superior del tanque. Este tipo de suspensión es adecuada para todas las aplicaciones de flujo continuo cuando la salida del fluido se encuentra cerca al fondo del tanque o para todas las operaciones de disolución.
- Suspensión uniforme: para velocidades del agitador considerablemente superiores a las que se requieren para obtener una suspensión completa, ya no hay líquido claro cerca de la parte superior del tanque y la suspensión se hace uniforme. Este tipo de suspensión son los requeridos procesos de flujo continuo cuando la salida del fluido se encuentra al nivel de la superficie del líquido en el tanque. Este tipo de suspensión ocurre cuando

la concentración de partículas es constantes a través de todo el tanque de agitación.

Los sólidos en suspensión es probablemente una de las aplicaciones más comunes en la mezcla de fluidos. Lo podemos encontrar en la industria minera para los procesos de cianuración para recuperación del oro, en el tratamiento de efluentes para los procesos de floculación, en los procesos de absorción entre otros.

En estos procesos es muy importante el control de la velocidad de agitación, por ejemplo en los procesos de floculación es imperativo no romper los flóculos formados, es por eso que un incremento en el factor de velocidad seria perjudicial para el proceso por que propiciaría un incremento en el corte del mismo.

En los procesos CIL (carbon in leach) es muy importante mantener una mezcla uniforme en todo el tanque para asegurar un contacto óptimo entre el mineral a extraer y el carbón activado, así mismo el esfuerzo de corte debe ser el mínimo para no romper las partículas de carbón activado.

En el proceso de agitación, es necesario determinar la velocidad a la que es necesario someter el proceso para lograr que los sólidos que intervienen en este se mantengan en suspensión en el tanque, ya que el mantener sólidos en suspensión ayuda a que éstos estén en contacto con las fases líquidas el mayor tiempo posible.

A continuación se detallará cada una de las velocidades de agitación:

- **Suave**

Velocidad característica en procesos de mezclado no críticos, para operaciones de almacenado, tanques de depósitos de alimentos o de floculación.

Cuando se requiere tiempos prolongados de mezclado.

Para procesos de mezclado con poco movimiento en la superficie.

- **Moderada**

Adecuada para la mayoría de las funciones de mezclado.

Empleada en tanques de reacción.

Empleada cuando se requiere tiempos moderados de agitación o mezclado.

Ideal para procesos de mezclado con fuertes movimientos en superficie.

- **Vigorosa**

Ideal para procesos de mezclado críticos.

Empleado en reactores.

Empleado en procesos de transferencia de calor.

Adecuado para el control de pH.

Cuando se requiere tiempos rápidos de agitación.

En procesos de suspensión uniforme.

- **Violenta**

Empleada en aplicaciones muy especiales de tipo crítica.

Utilizada en Reactores.

Utilizada cuando se requiere transferencias críticas de calor.

En procesos donde se requiere altas eficiencias de corte.

En procesos de polimerización.

En procedimientos de mezclado casi instantáneos.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO:

Una vez identificado el proceso, se tiene que caracterizar los fluidos con los que se van a trabajar.

- Tomar los datos de viscosidad (μ) y densidad (ρ), estos datos nos servirán para poder determinar la potencia necesaria para producir la agitación.
- Identificar si el fluido es newtoniano o no newtoniano. Esto nos ayudara a determinar el comportamiento del fluido al ser sometido al esfuerzo que les proporcionara los impulsores.

- Los fluidos newtonianos mantienen una viscosidad independiente del esfuerzo de corte.
- Los fluidos no newtonianos que se encuentran en una mezcla son regularmente pseudo-plásticos (fluidos que al ser sometido a esfuerzo la viscosidad decrece). El mayor esfuerzo de corte se encuentra en la región del impulsor y es común que los fluidos no newtonianos tengan una mayor fluidez alrededor del impulsor y existan zonas estancas en partes más lejanas del tanque (paredes y superficie).

3.3. TIEMPO DE MEZCLADO (t_m):

Se debe identificar si el proceso es batch o continuo y establecer el tiempo de residencia que se dispone para realizar la agitación.

El tiempo de mezcla indica el tiempo necesario para alcanzar el grado de homogeneidad deseado. De hecho, es siempre expresado en relación con el grado de homogeneidad ya que resulta difícil determinar éste experimentalmente.

Para números de Reynolds mayores a 10^5 y considerando tanques con deflectores la relación adimensional del tiempo de mezcla ($N \times t_m$) para los diferentes impulsores es menor a 100 (4).

La relación adimensional es:

$$N \times t_m = f(Nre)$$

Donde: N es el número de revoluciones por minuto (rpm)
 t_m es el tiempo de mezcla

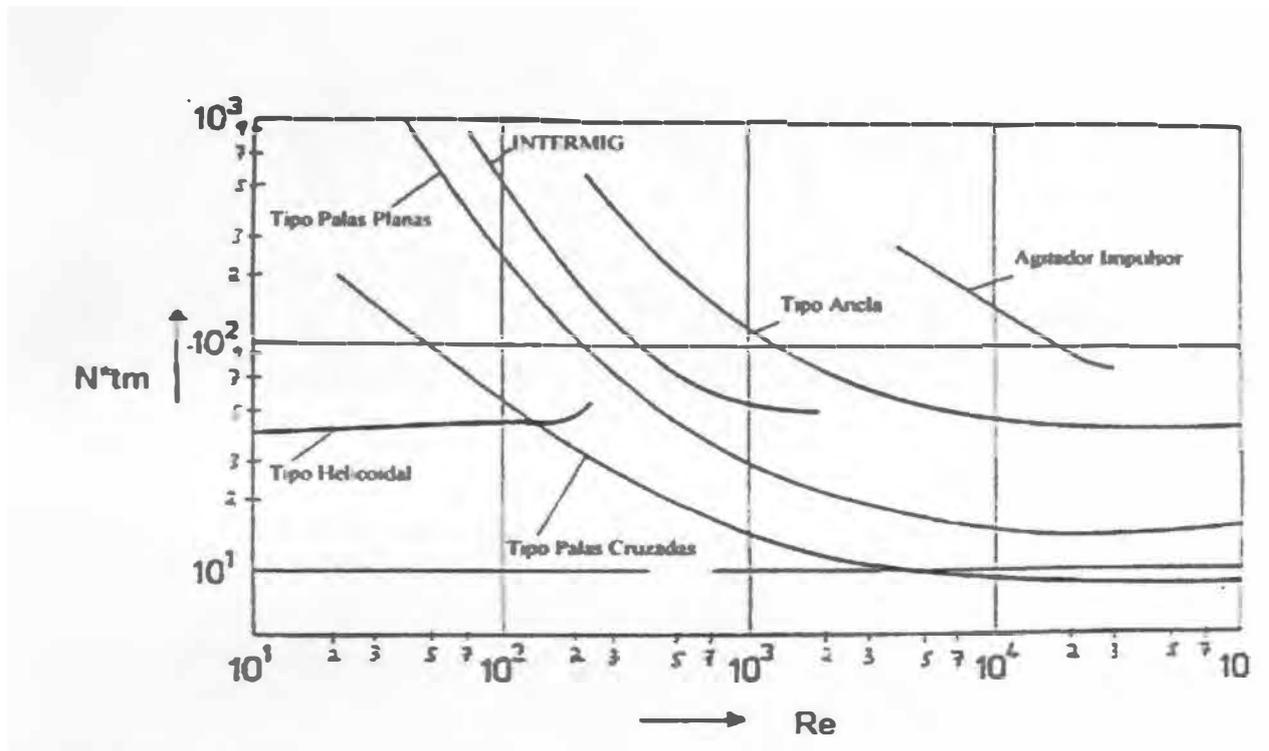


Gráfico 9: número adimensional del tiempo de mezcla frente al Reynolds para impulsores diferentes (7).

3.4. DISPOSITIVOS QUE AFECTAN EL FLUJO EN TANQUES AGITADOS:

El flujo que se presente en un tanque agitado se va haber alterado por muchos factores, dentro de los cuales tenemos: las características del fluido, tamaño y proporciones del tanque, placas deflectoras, etc. Conociendo estos factores, nosotros podemos seleccionar un agitador con un determinado tipo y diámetro de impulsor para generar el flujo deseado.

La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes y el tipo de flujo global del mismo, depende de las variaciones de estas tres componentes de la velocidad, de un punto a otro. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del rodete. La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje. La tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el rodete.

Para el caso corriente de un eje vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal y la componente longitudinal es vertical. Las componentes radial y longitudinal son útiles por que dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla. Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de velocidad es generalmente perjudicial para la mezcla. El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y crea un vortice en la superficie del liquido que debido a la circulación en flujo laminar da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles, de substancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro. Si están presentes partículas sólidas, las corrientes circulatorias tienden a lanzar las partículas contra la pared del tanque, debido a la fuerza centrifuga, desde donde caen acumulándose en la parte central del fondo del tanque. Por consiguiente en vez de mezcla, se produce la acción contraria.

3.4.1. PLACAS DEFLECTORAS:

Los deflectores son placas planas de metal, que ayudan a prevenir un comportamiento de mezcla no deseado, es decir, tenemos un comportamiento no deseado cuando en un tanque de agitación sin deflectores se inicia el proceso de mezclado con la ayuda de un impulsor ya sea axial o radial con líquidos de baja viscosidad, estos tienden a arremolinarse y producir vórtices, siendo inadecuado para el proceso de mezclado y homogenización en el tanque de agitación. Para velocidades de giro elevadas del impulsor, la profundidad del vórtice puede ser tan grande que llegue al impulsor mismo, dando lugar a que en el líquido se introduzca el gas que esta encima de el.

La mejor manera de evitar este efecto indeseado es instalando deflectores, estos son montados en las paredes del tanque de agitación propiciando un patrón de flujo favorable para una buena mezcla. Un tanque sin deflectores virtualmente no tiene corrientes verticales ni gradientes de velocidad que son necesarias para la mezcla.

La gráfico 10 muestra que la pendiente de la curva (AB) en el flujo laminar es aproximadamente menos uno, donde el número de potencia es mucho mas sensible a pequeños cambios en el numero de Reynolds y la necesidad de deflectores disminuye gradualmente a ninguno. La curva (CD) representa como responde el número de potencia en un tanque con deflectores mientras que la curva (BE) a un tanque sin deflectores. Un tanque sin deflectores para fluidos de baja viscosidad puede generar grandes variaciones de potencia, haciendo difícil que la carga sea eficiente.

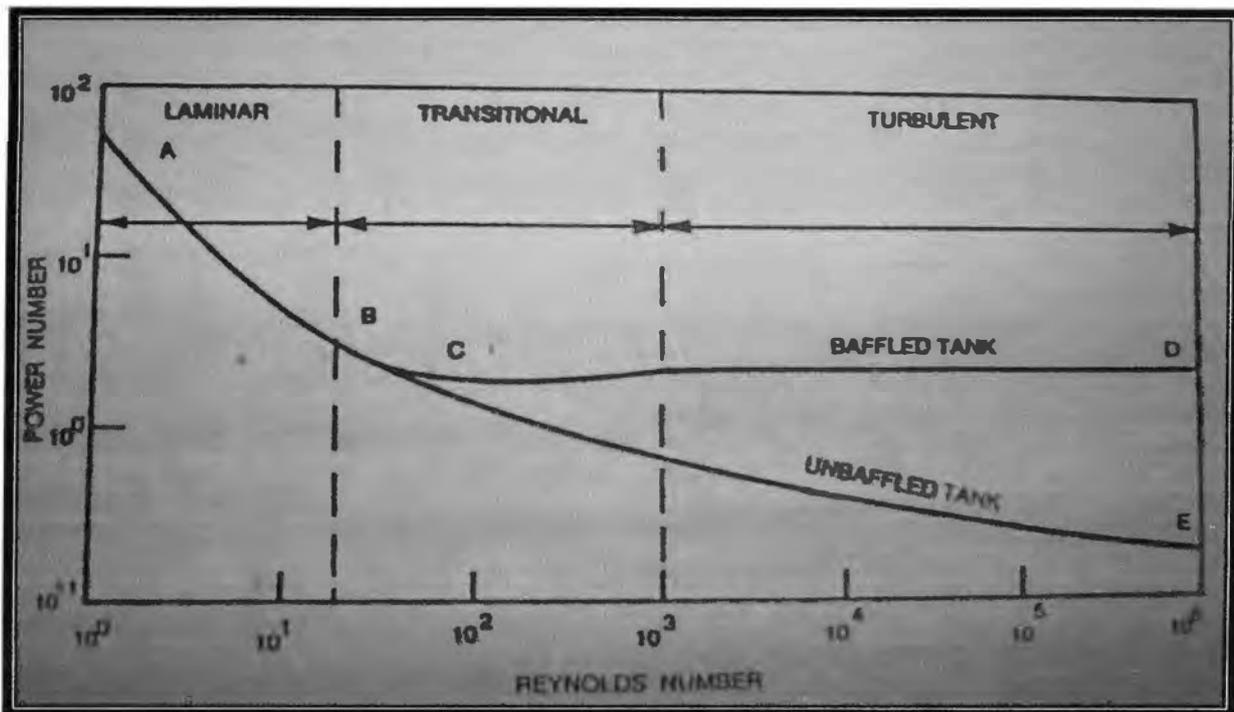


Gráfico 10: Curva típica del numero de potencia versus el numero de Reynolds
(1).

En los tanques de gran tamaño, con agitadores verticales, el método más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectoras, que impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal. Es un método sencillo y eficaz para destruir los remolinos, se instalan las placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En la Grafico 11 se representan las placas deflectoras y el

tipo de flujo a que dan lugar. En tanques grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la formación de vórtice.

Puntos a tener en cuenta:

- Cuando los impulsores son de turbina, la anchura de la placa deflectora no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque.
- Cuando los impulsores son de hélice la anchura de la placa deflectora basta con un octavo.
- Cuando un fluido es muy viscoso no es necesario el uso de baffles.
- A medida que la viscosidad aumenta el ancho de los baffles tiende a ser menor.
- Cuando el tanque de proceso es rectangular no es necesario el uso de baffles.

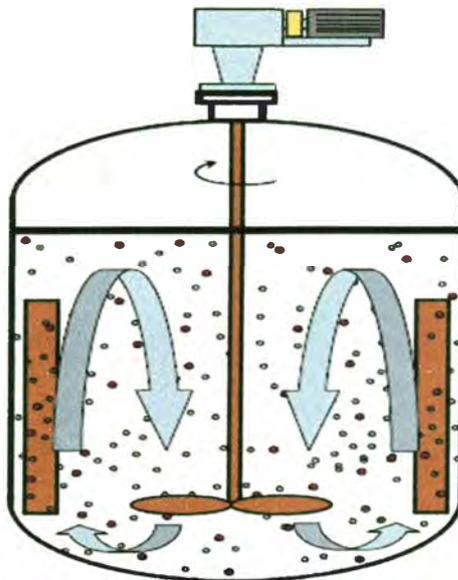


Gráfico 11: Tanque con placas deflectoras.

Otra forma de romper el vórtice en **TANQUES PEQUEÑOS** es el de colocar el agitador en una posición angular (ver grafico 12).

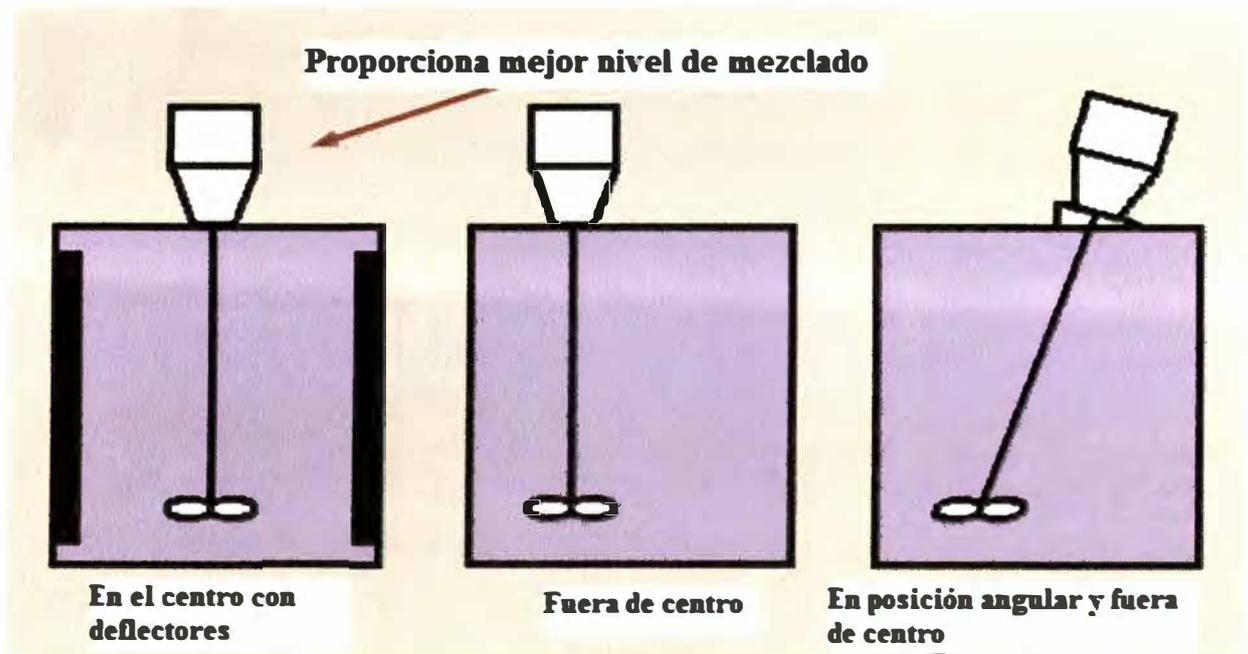


Gráfico 12: Formas de ubicar un agitador en tanques pequeños.

3.4.2. GEOMETRIA DEL TANQUE:

En la industria vamos a encontrar diferentes tipos de tanques de proceso: cilíndricos, rectangulares, etc. La geometría del tanque es un patrón que influye en el tipo de flujo que se genera dentro de un sistema de agitación, por lo tanto no es un factor que se deba dejar olvidado, ya que de este también dependerá el éxito de nuestro proceso.

Para lograr mejores resultados en el proceso de agitación se recomienda:

- El uso de tanques cilindros verticales, con fondo redondeado con el fin de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido (Ver Grafico 13).

- Que la altura del líquido (Z) sea aproximadamente igual al diámetro del tanque (D_T).

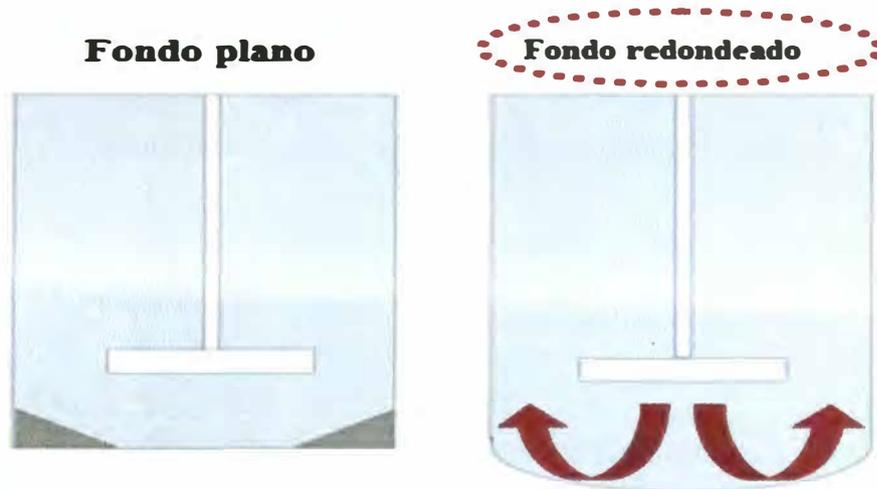


Gráfico 13: Comparación de tanques de fondo plano y tanques con fondo redondeado.

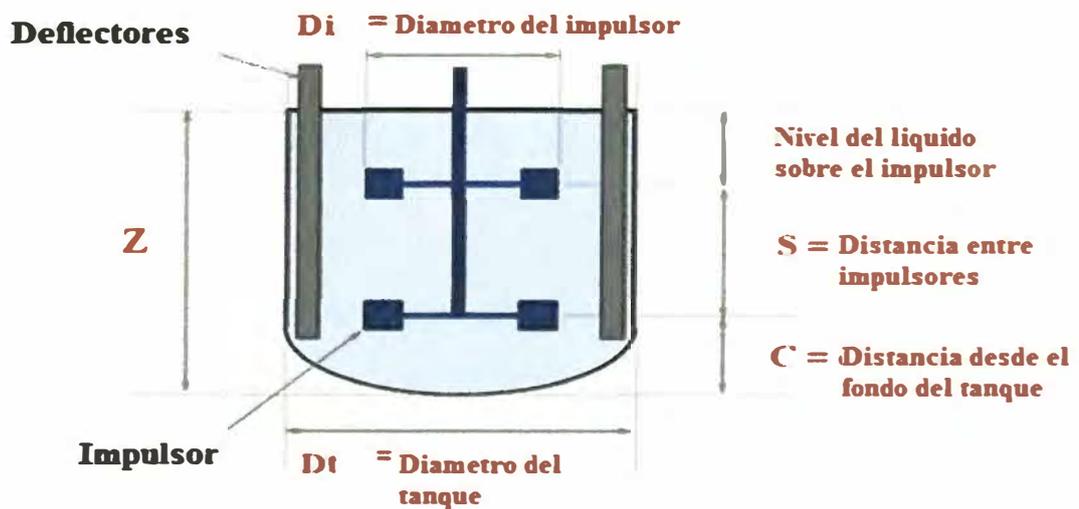


Gráfico 14: Dimensiones en un tanque agitado.

Puntos a tener en cuenta:

- Si la relación de la altura del tanque (Z) y el diámetro del tanque (D_t) es de 0.7 a 1 usar un solo impulsor.

- Si la relación de la altura del tanque (Z) y el diámetro del tanque (Dt) es de 1 a 2 usar dos impulsores.
- Si la relación de la altura del tanque (Z) y el diámetro del tanque (Dt) es de 2 a 2.75 usar tres impulsores.
- Como valor referencial, el diámetro del impulsor debe ser la tercera parte del diámetro del tanque, ya que esta relación variara dependiendo del proceso que se quiere lograr.
- Como valor referencial, la distancia de la base del tanque al impulsor (c) debe ser la tercera parte del diámetro del tanque, ya que esta relación variara dependiendo del proceso que se quiere lograr.
- Cuando el tanque es cilíndrico se recomienda el uso de baffles para evitar la formación de remolinos.
- En el caso que el tanque sea rectangular el uso de baffles no es necesario.

3.4.3. IMPULSOR:

Uno de los conceptos más poderosos en el análisis de la mezcla, es la potencia que suministra el impulsor en forma de flujo y/o velocidad de corte, en las diferentes aplicaciones industriales. Esta relación es expresada:

$$P = Q * H$$

Donde:

P = potencia

Q = flujo o capacidad de bombeo

H = Velocidad de corte

El impulsor produce flujo y/o velocidad de corte, en diferente grado y esto dependerá del diseño del impulsor.

Existen dos tipos básicos de impulsores, de flujo axial y de flujo radial. Los impulsores de flujo axial generan flujos verticales localizados en las partes superior e inferior de las aspas o cuchillas del impulsor, además de ser paralelas al eje mismo. Los impulsores de flujo radial producen una descarga de fluido en dirección horizontal a las aspas o cuchillas del impulsor, haciendo que la descarga de fluidos sea impactada hacia las paredes del tanque de agitación.

El consumo de potencia generado por los impulsores, ya sea de tipo axial o radial, propicia la generación de flujo y carga dentro del tanque de agitación, es decir toda la energía suministrada a los fluidos por medio de los impulsores produce un corte, flujo o carga sobre los mismos, es por eso que con la utilización de impulsores radiales o axiales se genera un balance sobre la carga y el flujo en la mezcla, de esta manera para cada uno de los impulsores está pensado un propósito sobre flujo y carga, ya que el flujo y carga generados por un impulsor de diseño rushton (flujo radial) será muy distinto al flujo y la carga generados por un impulsor de diseño tipo propela marina (flujo axial).

A continuación se muestra el espectro de los impulsores (Grafico 15), que nos indica como un impulsor distribuye la potencia entregada al fluido en función del flujo y la velocidad de corte.

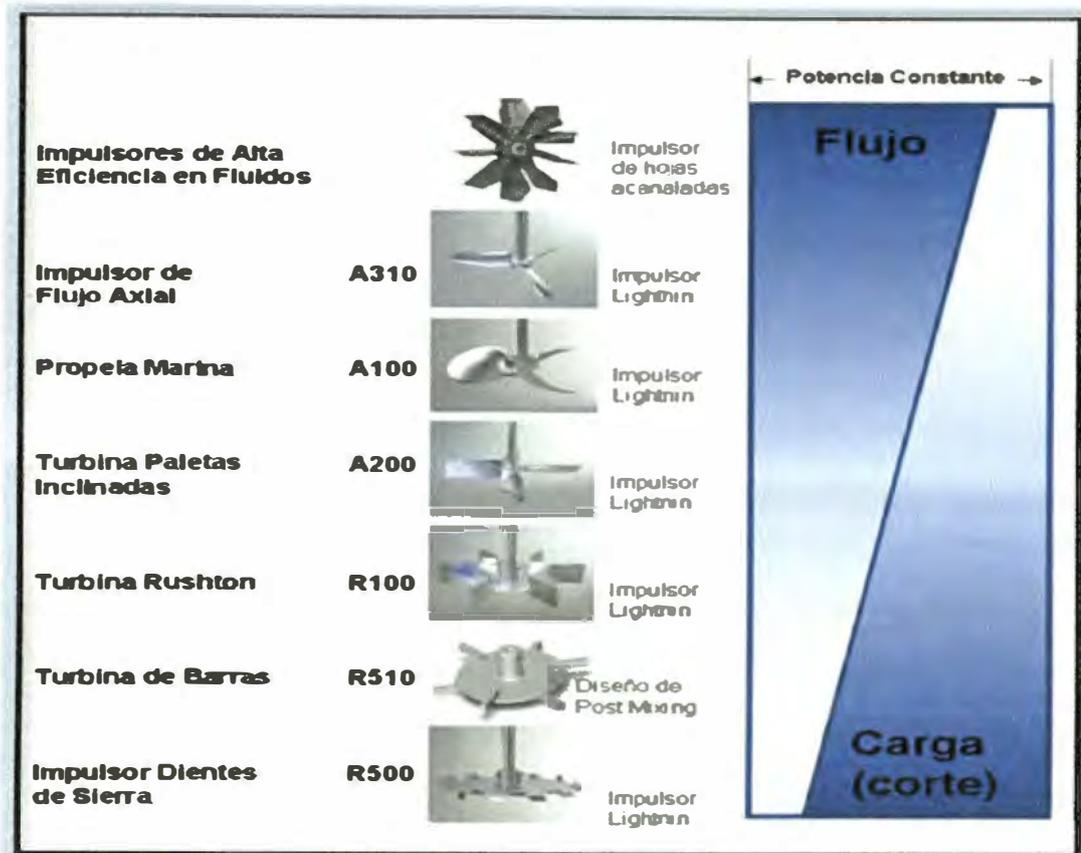


Gráfico 15: Comparación de tipos de impulsores en base a su relación de caudal y efecto de corte.

En lo más alto de la gama de impulsores mostrada en la figura anterior, se encuentran aquellos impulsores con altos patrones de fluido pero con mínimo índice de corte. Estos impulsores son de hojas tipo paleta, de grandes diámetros, de diferentes formas entre las cuales se encuentran, de rastrillos, espirales y de forma de ancla, todos funcionando muy cerca de las paredes del mismo tanque con la intención de generar un mezclado de alta viscosidad, es también utilizado para lograr una buena suspensión de sólidos en lodos de tipo no-newtoniano. Después de estos encontramos los impulsores de tipo axial, incluyendo a la propela marina, las turbinas tipo hidropalano y aquellas turbinas planas modificadas para flujo axial. Todas estas turbinas son empleadas en mezclas de viscosidades bajas o moderadas, para suspensión de sólidos y transferencia de calor, empleados principalmente en procesos que demandan alta eficiencia de bombeo. Para procesos cuyos resultados exigen progresivamente una mayor

potencia por unidad de volumen y más fuerza cortante, los impulsores de flujo radial son ideales.

Los impulsores radiales de paletas planas, con cuchillas a 90° de la línea central del impulsor, son generalmente las más empleadas en procesos de dispersión de gases y masa, esto debido al equilibrio presentado en cuanto a flujo y corte. Así mismo si utilizamos turbinas de barra de hojas angostas se obtendrían tasas extremadamente altas de flujo de corte, estos impulsores de alta capacidad de corte son empleados para una alta eficiencia de corte para suspensión de sólidos en líquidos o también de líquidos, también son empleados para propiciar tanto una reducción de tamaños de partículas sólidas como buena dispersión del sólido en la mezcla.

Un impulsor de gran diámetro con movimientos lentos produce una gran capacidad de bombeo y una baja velocidad de corte, mientras que un impulsor de diámetro pequeño con altas velocidades produce una baja capacidad de flujo y una alta velocidad de corte.

A. PRINCIPALES TIPOS DE IMPULSORES

Los tres principales tipos de impulsores son: hélices, palas y turbinas. Cada uno de ellos comprende muchas variantes y subtipos, estos tres tipos de impulsores resuelven tal vez el 95% del 100% de todos los problemas de agitación de líquidos.

A.1. HELICE

Una hélice es un impulsor con flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. La hélice de tres palas se basa en el propulsor marino y es ideal para lograr la turbulencia máxima. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor, entre 1150 y 1750 rpm; las grandes giran entre 280

y 350 rpm. Las corrientes de flujo que salen del impulsor continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del tanque. La columna, altamente turbulenta, de remolinos de líquido que abandona el impulsor, al moverse arrastra el líquido estancado. Las paletas del impulsor cortan o cizallan vigorosamente el líquido.



Gráfico 18: Impulsor tipo helice – A100

A.2. PALAS

Los impulsores tipo pala son los más utilizados en la solución de problemas sencillos, un agitador eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. A veces las palas están inclinadas, pero lo más frecuente es que sean verticales. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, sin que haya prácticamente movimiento vertical excepto que las placas están inclinadas. Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo. En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras, en un mismo eje. En algunos diseños las placas se adaptan a la forma de las paredes del tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura. Una pala de este tipo recibe el nombre de agitador de ánora. Las áncoras resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, tal como un tanque encamisado, pero en cambio son malos mezcladores. Casi

siempre operan con juntamente con un agitador de alta velocidad que generalmente gira en sentido contrario.

La longitud total de un impulsor de palas esta típicamente comprendida entre el 50 y el 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la pala es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en tanques sin placas deflectoras, las cuales son necesarias para velocidades mas elevadas, pues de lo contrario el liquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con velocidad alta, pero con poca mezcla.



Gráfico 19: Impulsor tipo ancla consta de dos palas verticales.

A.3. TURBINA

La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con numerosas palas cortas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el tanque. Las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales.

Las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades hasta 100.000 cP (turbinas de hojas verticales). En líquidos de baja viscosidad, las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del rodete hay una zona de corrientes rápidas, elevada turbulencia e intensa cizalladura. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y

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

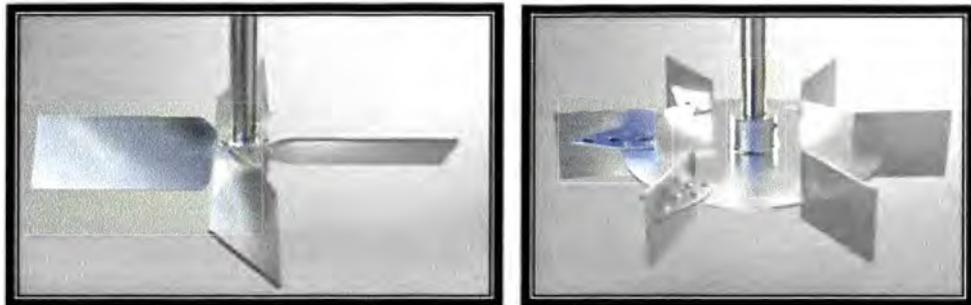


Gráfico 20: (a) Turbina de palas inclinadas. (b) Turbina de disco con palas planas

B. IMPULSORES DE ALTA EFICIENCIA VS. IMPULSORES CLASICOS:

B.1. TRES GENERACIONES DE LA TECNOLOGIA DE IMPULSORES PARA DISPERSION DE GAS.

El BT- 6 es la última innovación en la tecnología de impulsores para dispersión de gas. Por mas de 30 años el D-6 turbina tipo disco con hojas planas fue la primera para esta aplicación. En el año 1980 la empresa Chemineer diseño el impulsor CD-6 el cual se caracteriza por sus hojas cóncavas. El CD-6 se estableció rápidamente como muy superior a la categoría D-6 con su capacidad de dispersar más gases y con un consumo de energía mucho menos sensible a los cambios en la tasa de flujo de gas. El BT-6 es la siguiente generación, combina el concepto de la hoja cóncava con las hojas asimétricas verticalmente que son formadas para hacer uso óptimo de las diferentes condiciones de flujo por encima y por debajo del impulsor.

El grafico 21 muestra una comparación entre la performance de los 3 impulsores a un determinado flujo de gas. El D-6 es claramente inundado y no puede dispersar el gas. El CD-6 dispersa el gas, dirige el gas a las paredes del recipiente y produce

una superficie lisa. El BT-6 no solo fuerza el gas a las paredes, si no que también distribuye el gas en todo el volumen del tanque, de abajo hacia arriba, proporcionando una mejor transferencia de masa y uniformidad. El BT-6 demuestra que genera una dispersión del gas mas uniforme.

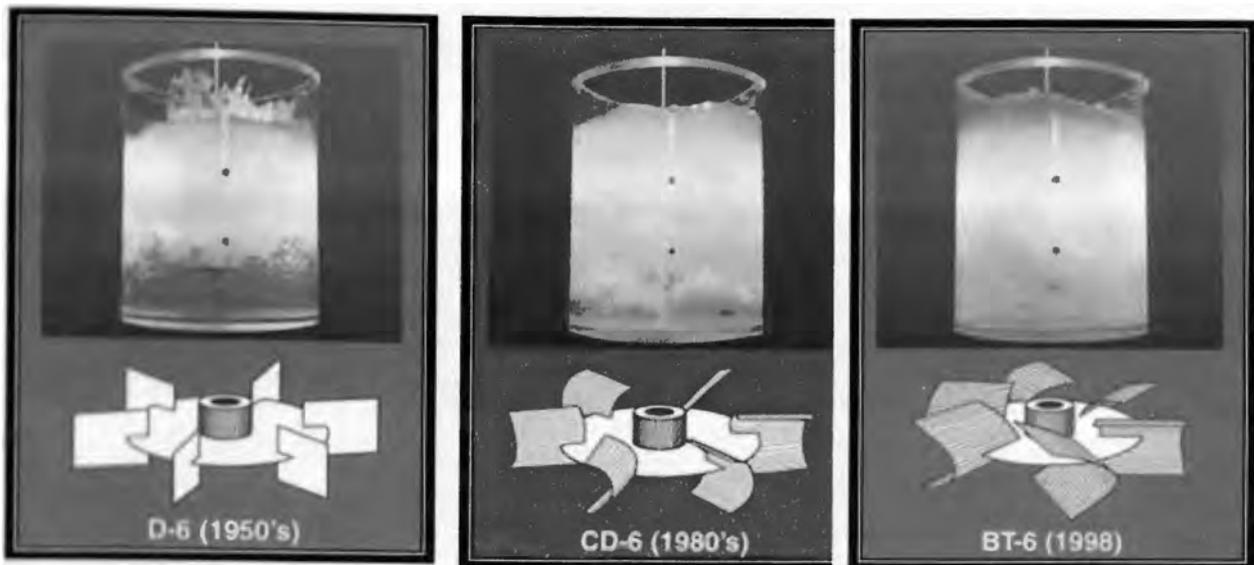


Gráfico 21: Evolución de los impulsores tipo Rushton.

B.2. IMPULSOR A510

El impulsor A510 del fabricante Lightnin, es un impulsor de alta eficiencia que proporciona flujo axial, son fabricados con tecnología láser, produciendo mucho mayor flujo que los impulsores clásicos por la misma potencia.

El patrón de flujo A510 se extiende verticalmente hacia abajo, llegando hasta el fondo del tanque por debajo del impulsor y desde allí recorre los lados del tanque, proporcionando una dispersión uniforme en todo el tanque.

La geometría del A510 fue determinada mediante el uso del velocímetro láser Doppler y la dinámica de fluidos computacional.



Gráfico 22: Impulsor de alta eficiencia A510

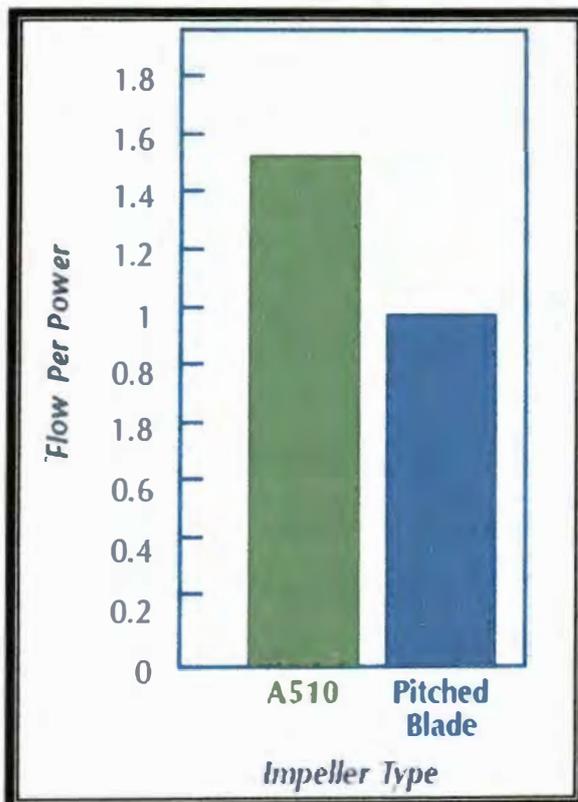


Gráfico 23: El impulsor A510 genera un flujo 50% mayor que la turbina de pala inclinada.

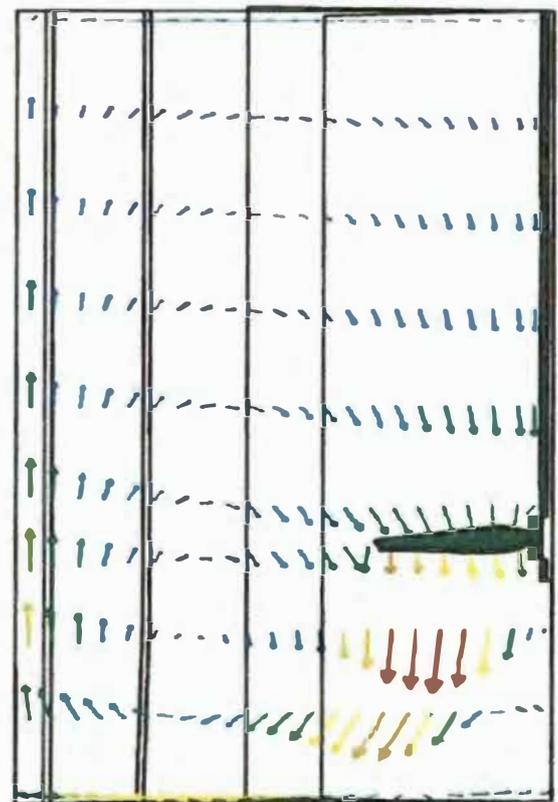


Gráfico 24: El diagrama de la velocidad del impulsor A510 muestra: (a) Un patrón uniforme de flujo. (b) Un fuerte movimiento vertical en el lado de la descarga. (c) Fuerte flujo axial hacia las paredes y el fondo salen del impulsor.

3.4.4. POTENCIA CONSUMIDA:

Un importante factor en el diseño de un agitador es la potencia que se requiere para mover el impulsor. Siempre que una potencia es aplicada al sistema de mezclado, se genera una capacidad de distribución de fluido, es decir una capacidad de bombeo o caudal (Q) que es el flujo interno en el sistema, de la misma manera es generada una carga (H) que es el esfuerzo cortante en el mezclado.

Para estimar la potencia que se requiere para hacer girar un impulsor dado con una velocidad determinada es preciso disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o del número de potencia) en función de otras variables del sistema. La forma de tales correlaciones se encuentra por análisis dimensional, en función de las medidas importantes del tanque y del impulsor, la distancia del impulsor desde el fondo del tanque (C), la profundidad del líquido (Z), así como las dimensiones de las placas deflectoras (J) cuando se utilizan. Las variables que intervienen en el análisis son las medidas importantes del tanque y del impulsor, la viscosidad (μ), la densidad (ρ) del líquido y la velocidad (N). Por otra parte, salvo que se tomen precauciones para evitarlo, se formará un vórtice en la superficie del líquido. Algo de líquido se elevará por encima del nivel medio o nivel sin agitación de la superficie del líquido, y esta elevación de la gravedad (g) como un factor en el análisis.

Es posible convertir todas las distintas medidas lineales en relaciones adimensionales, llamadas “factores de forma”, estas se obtienen dividiendo las distintas medidas lineales del equipo por el diámetro del tanque (Dt) o diámetro del impulsor (Di). A continuación los factores de forma típicos:

$$S_1 = \frac{D_i}{D_T} ; S_2 = \frac{C}{D_T} ; S_3 = \frac{Z}{D_T} ; S_4 = \frac{W}{D_i} ; S_5 = \frac{J}{D_T} ; S_6 = \frac{L}{D_i}$$

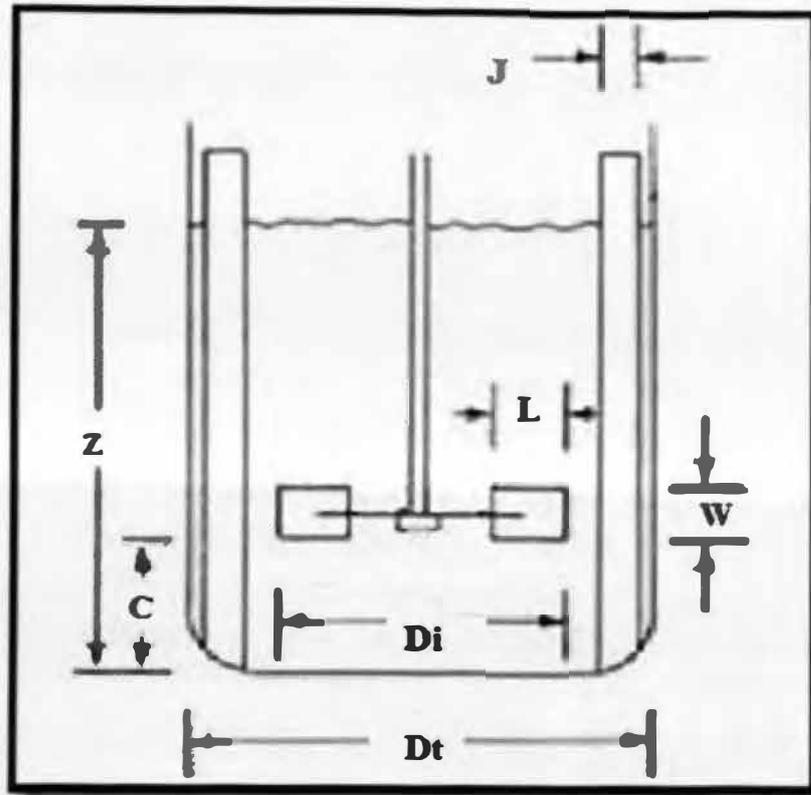


Gráfico 25: Dimensiones de tanque e impulsor.

Dos mezcladores que tienen las mismas proporciones geométricas, pero diferentes tamaños, tendrán idénticos factores de formas, pero diferirán en la magnitud de D_i . Se dice que los diseños que cumplen este requerimiento son geoméricamente semejantes.

Cuando se ignoran temporalmente los factores de forma y se supone que el líquido es newtoniano, la potencia (P) es una función de las variables restantes.

$$P = \psi(N, D_i, \mu, g, \rho) \dots\dots\dots(a)$$

Al aplicar el método de análisis dimensional, resulta:

$$\frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D_i^5} = \psi\left(\frac{\rho \cdot N \cdot D_i^2}{\mu}, \frac{D_i \cdot N^2}{g}\right) \dots\dots\dots(b)$$

Tomando en cuenta los factores de forma, la ecuación (b) se escribe como:

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

El primer grupo adimensional de la ecuación (b) es el número de potencia (N_p), el segundo es el número de Reynolds (N_{re}) y el tercero es el número de Froude (N_{fr}). La ecuación (c) se escribe entonces:

$$N_p = \psi(N_{re}, N_{fr}, S_1, S_2, \dots, S_n)$$

A bajos Reynolds ($N_{re} < 10$) el flujo viscoso prevalece en el tanque y a $N_{re} > 10000$ el flujo es turbulento en todas partes. Existe una región de transición en los números de Reynolds intermedios.

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

El número de Froude (N_{fr}) es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unida de área que actúa sobre el fluido. Interviene en situaciones fluodinámicas donde hay un movimiento de ondas significativo sobre la superficie del líquido. No es importante cuando se usan deflectores o cuando $N_{re} < 300$. Los tanques sin deflectores rara vez se utilizan con bajos números de Reynolds y entonces el N_{fr} no se incluye en las correlaciones.

En el gráfico 26 se muestran las curvas típicas del N_p en función del N_{re} para tanques con deflectores ajustados con impulsores localizados centralmente.

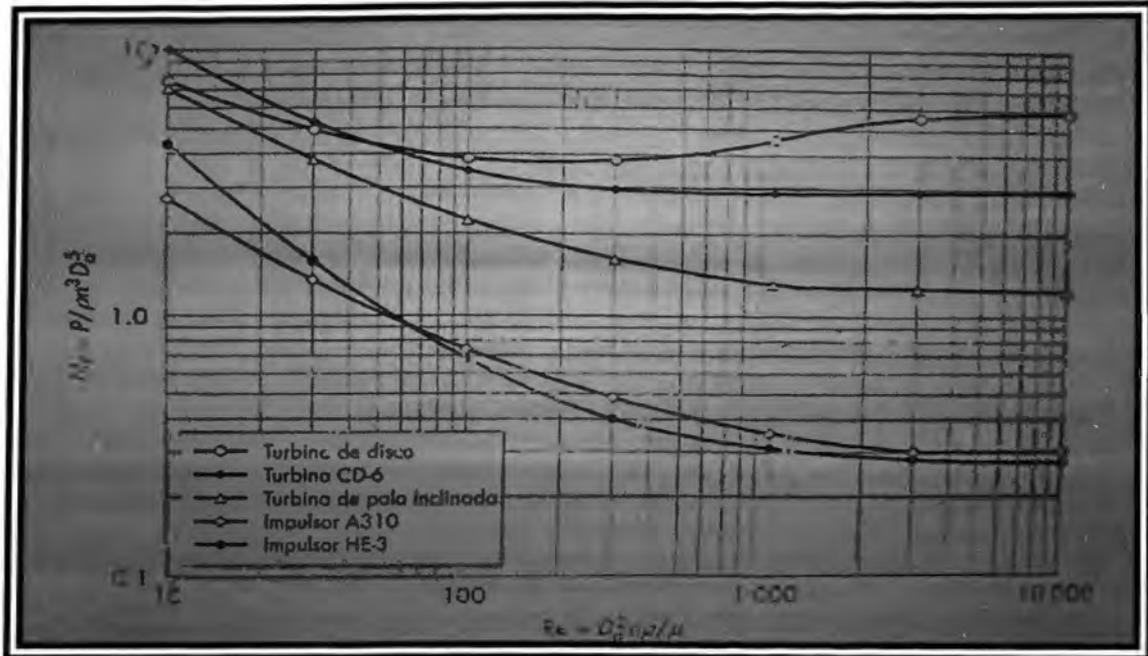
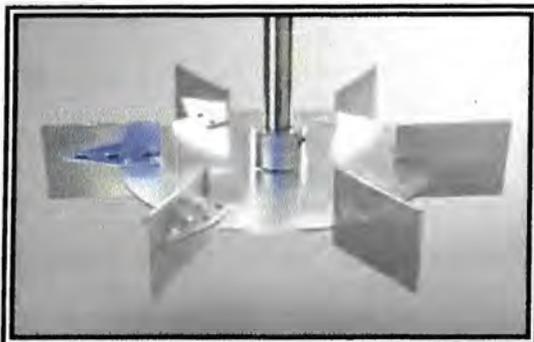
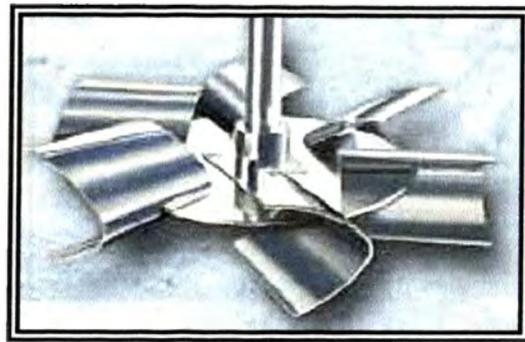


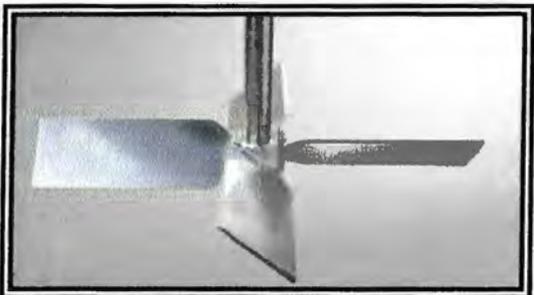
Gráfico 26: Numero de potencia (N_p) en función del número de Reynolds (N_{re}) para turbinas e impulsores de alta eficiencia



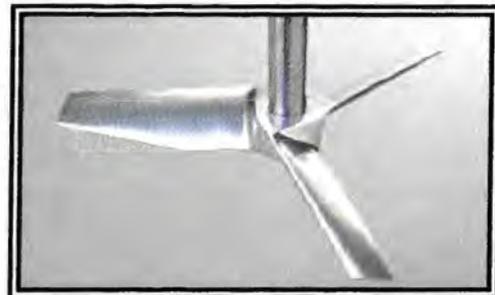
Turbina de Disco



Turbina CD-6



Turbina de Pala Inclinada



Impulsor A-310 Ó A-510 (impulsor de alta eficiencia)

Gráfico 27: Impulsores mencionados en grafico

En el gráfico 26 se puede apreciar que a bajos N_{re} la potencia es más sensible a pequeños cambios. A altos N_{re} el nivel de turbulencia es tan alto que las fuerzas viscosas dejan de tener importancia siendo la que predomine la fuerza de inercia haciendo que el N_p sea constante. Así mismo apreciamos que la turbina CD-6 es similar a la turbina de disco pero consume menor potencia. Los impulsores de alta eficiencia A-310 tienen números de potencia mucho más bajos que los de turbinas, pero además tienen bajos números de flujo y son generalmente operados a altas velocidades.

A. Efecto de la Geometría del Sistema:

Los efectos de los factores de forma sobre el N_p en la ecuación (c) son algunas veces pequeñas y otras muy grandes. Con una turbina de palas planas que opera a elevados números de Reynolds en un tanque con deflectores, los efectos de modificar la geometría del sistema se resumen como sigue:

- Al disminuir S_1 , el N_p aumenta cuando las placas deflectoras son pocas y estrechas, mientras que N_p disminuye cuando las placas son muchas y anchas. Con cuatro placas deflectoras y S_5 igual a $(1/12)$ una modificación de S_1 casi no tiene efecto sobre N_p .
- El efecto de modificar S_2 , depende del diseño de la turbina. Al aumentar S_2 aumenta N_p para una turbina de disco con palas. En una turbina de palas inclinadas, al aumentar S_2 disminuye considerablemente N_p ,
- Con una turbina abierta de palas rectas, el efecto que produce la variación S_4 , depende del número de palas. Para una turbina de seis palas, N_p es directamente proporcional a S_4 ; mientras que para una turbina de cuatro palas N_p aumenta con S_4 . Para turbinas de palas inclinadas, el efecto de la anchura de la pala sobre el consumo de potencia es mucho menor que para turbinas de palas rectas.
- Dos turbinas de palas rectas instaladas sobre el mismo eje consumen del orden de 1.9 veces la potencia de una sola turbina, siempre que el espacio

entre los dos impulsores sea al menos igual al diámetro del impulsor. Dos turbinas poco separadas entre sí pueden consumir hasta 2.4 veces la potencia de una sola turbina.

B. Consumo de Potencia con Fluidos No Newtonianos:

En las correlaciones de datos de potencia para líquidos no newtonianos, el N_p se define de la misma forma que para fluidos newtonianos. El N_{re} no se define fácilmente, ya que la viscosidad aparente del fluido varía con la velocidad de corte (gradiente de velocidad), y ésta varía considerablemente de un punto a otro en el tanque. Sin embargo, se han obtenido correlaciones útiles, utilizando una viscosidad media aparente (μ_a) calculada a partir del gradiente promedio de la velocidad de corte. El N_{re} es entonces:

$$N_{re_n} = \frac{\rho \cdot N \cdot D_i^2}{\mu_a}$$

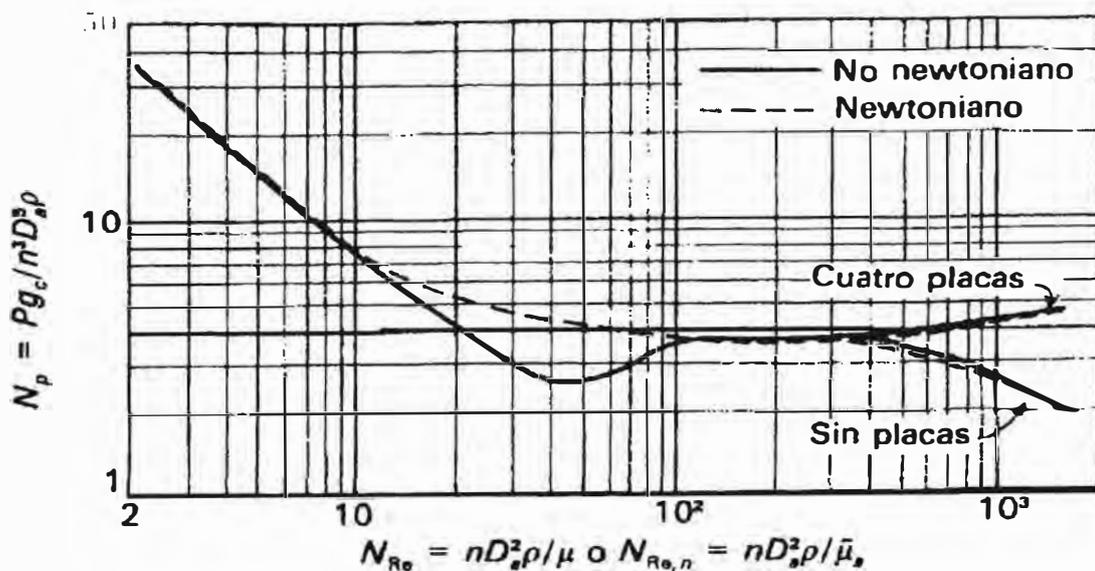


Gráfico 28: Correlación de potencia para una turbina de seis palas con líquidos pseudoplásticos (3).

En el gráfico 28, se puede observar que para N_{re} menores de 10 y mayores de 100, los resultados que se obtienen para líquidos seudoplásticos son los mismos que para los líquidos newtonianos. En el intervalo intermedio de N_{re} entre 10 y 100, los líquidos seudoplásticos consumen una potencia menor que los líquidos newtonianos.

3.5. CRITERIOS DE ESCALAMIENTO

Existen unos principios para el escalado que permiten el establecimiento de la forma de proceder para cada caso. Usando la semejanza geométrica, las variables a nivel de macroescala son las siguientes:

- Los tiempos para mezclado y circulación en los recipientes de mayor tamaño son superiores al de los recipientes de menor tamaño.
- La zona del impulsor de máxima velocidad de cizallamiento será mayor en los recipientes de mayor tamaño, pero la zona de valor medio será menor: de esta manera, existirá una mayor variación que en un recipiente de una unidad piloto.
- En los tanques de mayor tamaño se desarrolla un flujo de recirculación desde el impulsor a través del tanque y de vuelta al impulsor. Comportamiento que resulta similar al de un conjunto de tanques en serie.
- La transferencia térmica normalmente es más necesaria en unidades a gran escala. La introducción de serpentines, tubos verticales o cualquier otro equipo para la transferencia de calor, provoca un aumento de las zonas donde existe una baja recirculación.
- En los sistemas gas-líquido, la tendencia para un aumento de la velocidad superficial de gas tras el escalado puede incrementar aún más el tiempo de circulación global.

Cuando la potencia por unidad de volumen es constante y se mantiene la semejanza geométrica en el escalamiento, la velocidad del impulsor cambia con $D_a^{-2/3}$, como se muestra a continuación.

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_{a1}}{D_{a2}} \right)^{2/3}$$

4. APLICACIÓN DE SELECCIÓN DE UN AGITADOR

4.1. Caso 1: Almacenamiento de Floculante

En las plantas de tratamiento de agua, es muy conocido el uso de coagulantes y floculantes, con el fin de clarificar el agua mediante la remoción de la turbidez de naturaleza coloidal y sólidos suspendidos.

Los floculantes pueden ser de tipo mineral ó orgánico; el de tipo orgánico se puede encontrar como natural ó sintético. En la actualidad son utilizados los de origen sintético, estas son macromoléculas de cadena larga, solubles en agua y se les denomina polielectrolitos. Los floculantes para el tratamiento de agua pueden ser adquiridos en forma sólida o líquida.

Cuando hablamos de floculantes y agitación se puede encontrar tres casos específicos (como referencia se puede revisar el Anexo I):

- **Preparación del floculante:** cuando se adquiere el floculante en estado sólido (en forma de polvo o perlas de color blanco), se debe aplicar una mediana a leve agitación, para lograr la mezcla con el agua, si la agitación no es adecuada se podría formar grandes agregados de gel que serían muy difíciles de disolver completamente.
- **Almacenamiento del floculante:** una vez preparado el floculante, este pasa a otro tanque de donde se procederá a la dosificación; como la dosificación es gradual el floculante preparado permanecerá sin moverse en el tanque produciéndose una separación de fases no deseada, por lo cual es necesario una agitación lenta para asegurar que no se produzca la separación de fases y lograr una mezcla total y homogénea del producto en el agua.

- **Proceso de floculación:** es un proceso de agitación suave y continúa de agua coagulada con el propósito de formar flóculos a través del agregado de las partículas más diminutas presentes en el agua. Consiste en un acondicionamiento del agua para formar flóculos que pueden ser removidos fácilmente mediante sedimentación o filtración.

Dependiendo de los casos, el tipo de agitación a aplicar tendrá diferentes características, es por eso la importancia de identificar el proceso.

En este caso, se tomara como ejemplo el “Almacenamiento de floculante”, una vez identificado el proceso, se establece que el tipo de agitación que se requiere es una agitación lenta y continua, porque solo se requiere la homogenización de la mezcla.

Caracterización del fluido: es un floculante orgánico aniónico diluido en agua con las siguientes características:

Forma: Líquida

Color: Blanco

Densidad: 1.03 – 1.06 g/cm³

Viscosidad: 300 Cps.

Características del tanque:

Diámetro de Tanque: 1.5 mt.

Altura de Tanque: 1.5 mt.

Consideraciones Adicionales:

Nivel máximo del fluido (h máx.): 1.3 mt

Nivel mínimo del fluido (h min.): 0.5 mt

4.1.1. Selección del impulsor

Para realizar la selección del Impulsor, tomaremos como referencia los impulsores del fabricante de agitadores LIGHTNIN; a continuación los números de potencia y números de caudal para cada tipo de impulsor.

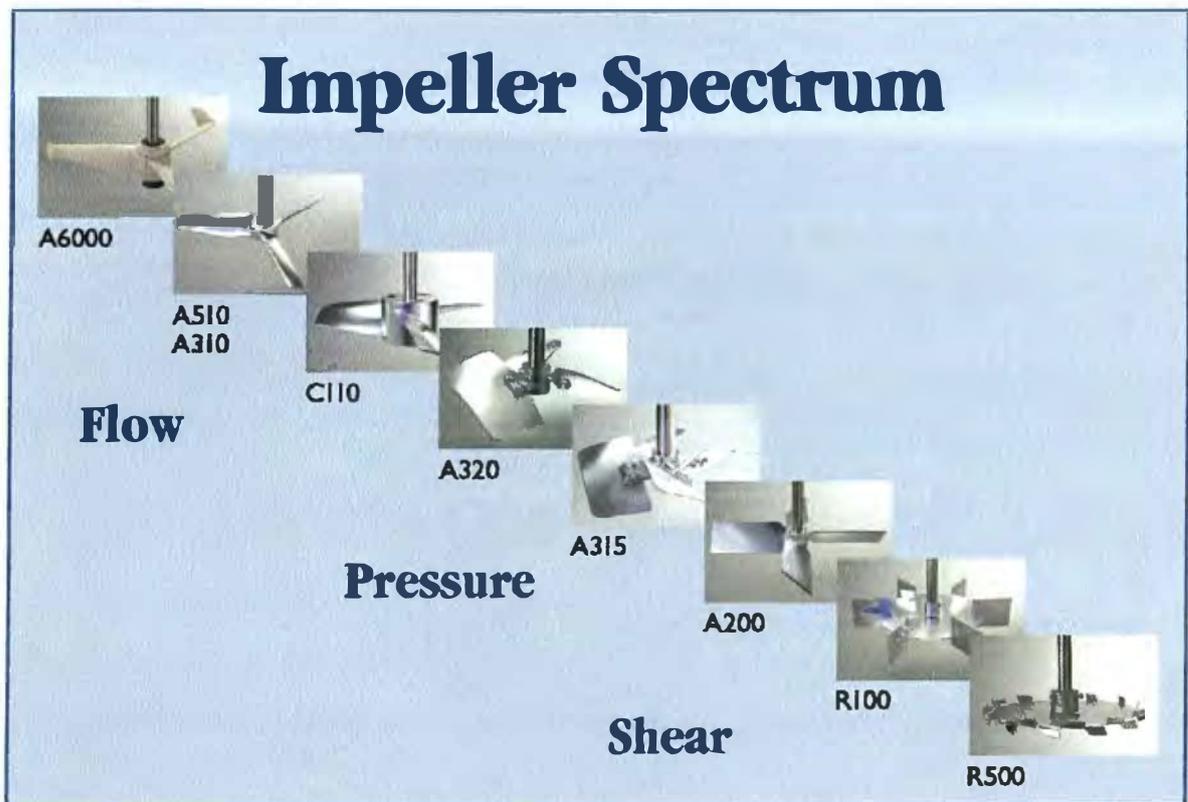


Gráfico 29: Impulsores del Fabricante Lightnin

TABLA 2: Números de caudal y potencia para los diferentes tipos de impulsores
(valores pertenecen a los impulsores del Fabricante Lightnin).

IMPELLER	Np	Nq
A100	0.87	0.77
A200	1.27	0.79
A210	0.53	0.55
A310	0.3	0.56
A311	0.85	0.49
A315	0.75	0.73
A510E_32	0.45	0.64
A6000	0.23	0.59
R100 - 4	3.9	0.65
R100 - 5	4.85	0.75
R100 - 6	5.75	0.8
R100 - 8	7	1
R500	0.45	0.2

Se selecciono el impulsor A310 (revisar Anexo I), es un impulsor tipo turbina con 3 hojas inclinadas con ángulo de 22 °. Como el fluido es viscoso, se ha seleccionado un impulsor de 0.63 metros de diámetro, es decir con una relación de diámetros (D/Dt) igual a 0.42 y no el recomendado 0.33, porque se quiere asegurar el movimiento del fluido en los extremos y en todo el tanque.

Existen muchos criterios para seleccionar la ubicación del impulsor, en este caso tomaremos el expuesto por Dickey (1984 – Tabla 3) quien realizo un estudio basado en la viscosidad del liquido y la relación del nivel del fluido y el diámetro de tanque (h/Dt). En la siguiente tabla nos indican si es necesario el uso de uno o dos impulsores y la distancia adecuada por encima del fondo:

TABLA 3: Criterios para ubicar un impulsor en base a la viscosidad del líquido, este estudio fue realizado por Dickey (4).

Viscosity [cP (Pa sec)]	Maximum level h/D_i	Number of Impellers	Impeller Clearance	
			Lower	Upper
$\leq 25,000 (< 25)$	1.4	1	$h/3$	—
$\leq 25,000 (< 25)$	2.1	2	$D_i/3$	$(2/3)h$
$\geq 25,000 (> 25)$	0.8	1	$h/3$	—
$\geq 25,000 (> 25)$	1.6	2	$D_i/3$	$(2/3)h$

En base a esta tabla podemos decir que necesitamos un solo impulsor y este debe estar ubicado a un tercio del fondo nivel del fluido.

4.1.2. Cálculo de Potencia

En el mercado podemos encontrar motores con reductores de velocidad desde 40 rpm a 1800 rpm, se seleccionará las revoluciones en base al requerimiento del proceso, cabe recordar que el número de revoluciones tiene una relación directa con la potencia del motor.

Para este proceso se requiere una agitación suave que asegure una mezcla homogénea no siendo necesario generar turbulencia en el interior del tanque, sabemos que contamos con un tiempo de mezclado ilimitado por lo tanto no es necesario aplicar un número de revoluciones muy alto, como hemos seleccionado un impulsor con una relación de diámetros de 0.42 se asegura movimiento en los extremos del tanque sin necesidad de altas revoluciones, en consideración a los puntos descritos se selecciono un número de revoluciones (N) de 60 rpm. Realizando los cálculos de potencia obtenemos que la potencia necesaria para llevar a cabo este proceso sea de 0.044HP.

CALCULOS PARA DETERMINAR LA POTENCIA REQUERIDA POR UN AGITADOR:

EQUIPO		
IMPELLER	Np	Nq
A310	0.3	0.56

CLIENTE :	Tratamiento de Aguas
PROCESO :	Almacenamiento de Floculante

DATOS DE INGRESO		
Diametro (Dt), mt	1.5	59.06 pulg.
Altura (Z), mt	1.5	59.06 pulg.
Nivel liquido (h), mt	0.5	19.69 pulg.
N (rpm)	60	
Diametro (D), pulg.	25	0.635 mt.
Densidad (ρ), g/cm ³	1.06	
T.R. est (min)	60	
Viscosidad (μ), cp	300	

POTENCIA

$$SHP = P = N_p \times N^3 \times D^5 \times \rho / K.$$

$$N^3 = 216000$$

$$D^5 = 9765625$$

$$K = 6.57E-14$$

$$\text{Potencia} = 4.40E-02 \text{ HP}$$

$$\text{Potencia} = 3.30E-02 \text{ Kw}$$

VOLUMEN DE TANQUE / FLUIDO.

$$\text{Volumen 1 (m}^3\text{)} = 0.88 \text{ Del liquido}$$

$$\text{Volumen 1 (Gl)} = 233.44 \text{ Del liquido}$$

$$\text{Volumen 1 (KGl)} = 0.233441215 \text{ Del liquido}$$

$$\text{Volumen 2 (m}^3\text{)} = 2.65 \text{ del tanque}$$

$$\text{Volumen 2 (Gl)} = 700.323646 \text{ del tanque}$$

PARAMETROS IMPORTANTES	
D / Dt (Ideal) =	0.33
D / Dt (calculado) =	0.4233333

NUMERO DE FLUJO

$$Q = NQ \times D^3 \times N / K$$

$$D^3 = 15625$$

$$K = 231$$

$$Q = 2272.727273 \text{ Gl / min.}$$

$$516.14 \text{ m}^3 \text{ / hora}$$

NUMERO DE REYNOLDS.

$$Nre = 10.754 N D^2 \rho / \mu$$

$$D^2 = 625$$

$$Nre = 1424.905$$

$$\text{LAMINAR} \quad Nre < 50$$

$$\text{TURBULENTO} \quad Nre > 10000$$

P / V (HP / KGl) =	0.18869
P / V (Kw / m ³) =	0.03739

Potencia (HP)	0.0440
---------------	--------

Q	2,272.73 Gl. x min.
	516.14 mts.3 x hr.

4.2. Caso 2: Preparación de químicos

En la gran mayoría de industrias vamos a encontrar el uso de reactivos químicos. Muchos de los reactivos utilizados se encuentran en el mercado a concentraciones mayores de las deseadas para el proceso, es por tal motivo que antes de ser utilizados tienen que ser diluidos para obtener la concentración adecuada (mezclas líquido - líquido) o tienen que ser disueltas (mezcla un sólido - líquido).

Uno de los reactivos químicos ampliamente utilizados en el tratamientos de aguas industriales para la protección de calderas es el metabisulfito de sodio conocido como secuestrante de oxígeno. El metabisulfito de sodio se encuentra en estado sólido, para poder ser inyectado al caldero tiene que estar disuelto. Este proceso consiste en agregar una cantidad determinada de metabisulfito de sodio en un tanque con agua desmineralizada y mediante una agitación rápida de 1 ó 2 minutos lograr la disolución para su posterior inyección, este es un proceso batch.

Caracterización del fluido: el metabisulfito es completamente soluble en el agua, el producto final es un fluido newtoniano

Densidad de la mezcla: 1.02 g/cm³

Viscosidad de la mezcla: 4 Cps.

Características del tanque:

Diámetro de Tanque: 1.0 mt.

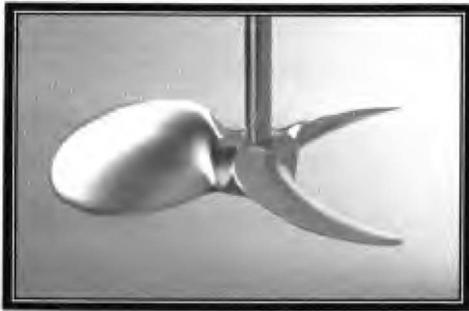
Altura de Tanque: 1.0 mt.

Consideraciones Adicionales:

Nivel máximo del fluido (h máx.): 0.85 mt

4.2.1. Selección del impulsor

En este caso requerimos de una agitación vigorosa con un tiempo de mezcla limitado, tenemos como opción 2 tipo de impulsores, el A100 (impulsor tipo hélice) o el impulsor A310 (impulsor tipo turbina de 3 hojas).



A100



A310

Los impulsores tipo hélice (A100), son recomendados para trabajar con fluidos de baja viscosidad y a altas revoluciones, la relación de diámetros (D / Dt) para trabajar con estos impulsores normalmente es menor a un cuarto del diámetro del tanque ($Dt/4$).

Los impulsores A310 son recomendados para trabajar con fluidos de baja a mediana viscosidad, con un amplio grado de revoluciones, la relación de diámetros (D / Dt) recomendado es de 0.3 a 0.6 del diámetro del tanque.

A continuación el número de potencia y el número de caudal de los dos impulsores:

IMPELLE	Np	Nq
A100	0.87	0.77
A310	0.3	0.56

Realizando la corrida con ambos impulsores, podemos ver que utilizando el A310 a una menor potencia consumida genera mayor turbulencia y mayor caudal; por lo tanto seleccionaremos el impulsor A310 (corrida 2).

4.2.2. Cálculo de Potencia:

Realizando ambas corridas se ha seleccionado la corrida 2, obteniendo como potencia consumida 0.1098 Hp.

CORRIDA 1:

EQUIPO		
IMPELLER	Np	Nq
A100	0.87	0.77

CLIENTE :	Calderas S.A.
PROCESO :	Disolución de Metabisulfito de sodio

DATOS DE INGRESO		
Diametro (Dt), mt	1	39.37 pulg.
Altura (Z), mt	1	39.37 pulg.
Nivel liquido (h), mt	0.85	33.46 pulg.
N (rpm)	280	
Diametro (D), pulg.	10	0.254 mt.
Densidad (ρ), g/cm ³	1.02	
T.R. est (min)	1	
Viscosidad (μ), cp	4	

POTENCIA

$$SHP = P = N_p \times N_3 \times D_5 \times \rho / K$$

$$N_3 = 21952000$$

$$D_5 = 100000$$

$$K = 6.57E-14$$

$$\text{Potencia} = 1.28E-01 \text{ HP}$$

$$\text{Potencia} = 9.59E-02 \text{ Kw}$$

VOLUMEN DE TANQUE / FLUIDO.

$$\text{Volumen 1 (m}^3\text{)} = 0.67 \text{ Del liquido}$$

$$\text{Volumen 1 (Gl)} = 176.38 \text{ Del liquido}$$

$$\text{Volumen 1 (KGl)} = 0.176377807 \text{ Del liquido}$$

$$\text{Volumen 2 (m}^3\text{)} = 0.79 \text{ del tanque}$$

$$\text{Volumen 2 (Gl)} = 207.5033025 \text{ del tanque}$$

PARAMETROS IMPORTANTES	
D / Dt (ideal) =	0.33
D / Dt (calculado) =	0.254

NUMERO DE FLUJO

$$Q = NQ \times D_3 \times N / K$$

$$D_3 = 1000$$

$$K = 231$$

$$Q = 933.3333333 \text{ Gl / min.}$$

$$211.96 \text{ m}^3 / \text{hora}$$

NUMERO DE REYNOLDS.

$$Nre = 10.754 N D_2 \rho / \mu$$

$$D_2 = 100$$

$$Nre = 76783.56$$

$$\text{LAMINAR } Nre < 50$$

$$\text{TURBULENTO } Nre > 10000$$

P / V (HP / KGl) =	0.72525
P / V (Kw / m ³) =	0.14371

Potencia (HP)	0.1279
---------------	--------

Q	933.33 Gl. x min.
	211.96 mts.3 x hr.

CORRIDA 2:

EQUIPO		
IMPELLER	Np	Nq
A310	0.3	0.56

CLIENTE :	Calderas S. A.
PROCESO :	Disolución de Metabisulfito de sodio

DATOS DE INGRESO		
Diametro (Dt), mt	1	39.37 pulg.
Altura (Z), mt	1	39.37 pulg.
Nivel liquido (h), mt	0.85	33.46 pulg.
N (rpm)	280	
Diametro (D), pulg.	12	0.305 mt.
Densidad (ρ), g/cm ³	1.02	
T.R. est (min)	1	
Viscosidad (μ), cp	4	

POTENCIA

$$SHP = P = Np \times N3 \times D5 \times \rho / K.$$

$$\begin{aligned} N3 &= 21952000 \\ D5 &= 248832 \\ K &= 6.57E-14 \end{aligned}$$

$$\text{Potencia} = 1.10E-01 \text{ HP}$$

$$\text{Potencia} = 8.23E-02 \text{ Kw}$$

VOLUMEN DE TANQUE / FLUIDO.

$$\begin{aligned} \text{Volumen 1 (m3)} &= 0.67 && \text{Del liquido} \\ \text{Volumen 1 (Gl)} &= 176.38 && \text{Del liquido} \\ \text{Volumen 1 (KGl)} &= 0.176377807 && \text{Del liquido} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen 2 (m3)} &= 0.79 && \text{del tanque} \\ \text{Volumen 2 (Gl)} &= 207.5033025 && \text{del tanque} \end{aligned}$$

PARAMETROS IMPORTANTES	
D / Dt (ideal) =	0.33
D / Dt (calculado) =	0.3048

NUMERO DE FLUJO

$$Q = NQ \times D3 \times N / K$$

$$\begin{aligned} D3 &= 1728 \\ K &= 231 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= 1172.945455 \text{ Gl / min.} \\ &= 266.38 \text{ m3 / hora} \end{aligned}$$

NUMERO DE REYNOLDS.

$$Nre = 10.754 N D2 \rho / \mu$$

$$\begin{aligned} D2 &= 144 \\ Nre &= 110568.3264 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LAMINAR} & \quad Nre < 50 \\ \text{TURBULENTO} & \quad Nre > 10000 \end{aligned}$$

P / V (HP / KGl) =	0.62230
P / V (Kw / m3) =	0.12331

Potencia (HP)	0.1098
---------------	--------

Q	1,172.95 Gl. x min.
	266.38 mts.3 x hr.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.** Para realizar la selección correcta de un agitador, es necesario comprender e identificar el proceso y el objetivo de la operación de mezclado.
- 2.** Es muy importante reconocer cuales son los parámetros que influyen en la selección de un agitador y comprender como estos influyen en el proceso de agitación.
- 3.** Un agitador bien seleccionado puede evitar un embotellamiento en los procesos de fabricación.
- 4.** Una correcta selección de un impulsor se vera reflejado en un proceso exitoso con bajos consumos de energía.
- 5.** El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado, depende del tipo de impulsor, de las características del fluido, del tamaño y proporciones del tanque y del uso de deflectores.
- 6.** Los impulsores de flujo axial consumen menor energía y generan mayor flujo que los impulsores de flujo radial.
- 7.** La viscosidad del fluido es uno de los diferentes factores que influyen en la selección del tipo de impulsor, las turbinas pueden usarse por debajo de los 1000 cP, los impulsores tipo ancha pueden usarse hasta 500000 cP y los impulsores helicoidales para viscosidades mayores.
- 8.** La eficiencia del proceso de agitación depende de una efectiva utilización de la energía que se emplea para generar el flujo.
- 9.** Cuando el tiempo de mezclado es ilimitado, no es necesario aplicar grandes cantidades de energía (altos rpm), en cambio cuando el tiempo de mezcla es corto es necesario aplicar altos rpm para lograr la mezcla.
- 10.** Para tanques grandes es necesario el uso de deflectores para eliminar remolinos y vórtices, en tanques pequeños se recomienda ubicar el agitador fuera de centro.

6. BIBLIOGRAFIA

- 1. Y. Oldshue, N.R. Herbst. A Guide to fluid mixing – Lightnin and SPX Process Equipment Operation. McGraw-Hill. U.S.A. Quinta edición mayo 2007.**
- 2. Y. Oldshue. Fluid Mixing Technology. McGraw-Hill. 1983.**
- 3. McCabe – Smith - Harriott. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Cuarta Edición. Capítulo nueve – Agitación y mezcla de líquidos.**
- 4. Stanley M. Walas. Chemical Process Equipment selection and Design. Howard Brenner Massachusetts Institute of Technology. Capítulo 10 – Mixing and Agitation.**
- 5. Christie J. Geankoplis. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Compañía editorial continental, S.A. Mexico. 3 era Edición. 1998.**
- 6. <http://www.monografias.com/trabajos30/transfereencia-masa/transfereencia-masa.shtml#teoricos>**
- 7. <http://www.unizar.es/detml/jblasco/ATAgitacion/puntoTres.htm>**
- 8. <http://www.revistadelaofil.org/Articulo.asp?Id=120>**

7. ANEXOS:

1. Consideraciones referenciales, para tener en cuenta según la aplicación industrial.

Donde: A310 y A100 son impulsores de flujo axial.

Industry/ Applications	Impeller	D/T	P/V Kw/m3	Comments
Waste Water Treatment				
Polyelectrolyte Make Up	A310/A100	0.2 - 0.3	0.135	Mild to Medium Agitation to blend polymer into water
Polyelectrolyte Storage	A310/A100	0.2 - 0.3	0.060	Mild Agitation based on final solution viscosity which depends on the concentration
Treatment Chemical Make Up	A310/A100	0.2 - 0.3	0.040	Mild Agitation
Flash Mixer	A310/A100	0.2	2.500	Based on retention time, & tank geometry. Blend time to be 1/3 of the retention time.
Neutralisation Tank	A310/A100	0.3 – 0.45	0.220	Based on retention time, & tank geometry. Blend time to be 1/3 of the retention time.

Equalisation Basin	A310/A100	0.2 - 0.3	0.010	No of units depends on tank geometry, design to achieve uniformity of feed to processing.
Flocculation	A310/A100	0.2 - 0.3	0.040	Very gentle fluid motion for coagulation of flocs
Lime Slurry Make Up	A310/A100	0.3	0.220	for 0 to 20% solids 6 - 7 for 20 to 38% solids
Lime Slurry Storage	A310/A100	0.25 – 0.45	0.040	for 0-20%visc=200cps 3 - 4 for 20 to 38%, 30%visc=1000cps, 38% visc=5000cps
Lime Slaking	A310/A100	0.4 – 0.55	0.525	High degree of agitation to prevent balls of dry solids forming - use dual impellers for optimum control
Anoxic Zone	A310/A100	0.2 - 0.3	0.040	Mild Agitation
Sludge Holding	A310/A100	0.2 - 0.3	0.040	Mild Agitation based on viscosity which depends on the solids content
Sludge Digestion	A310/A100	0.2 - 0.3	0.040	Mild Agitation
Paint & Varnish				
Feed & Hold	A310/A100	0.3 – 0.65	0.065	Maintain Uniformity,Use Apparent viscosity at 2.3sec-, 1, Typical viscosities 1000 TO 50000 cps.

Base Paint Make Up	A310/A100	0.35 – 0.55	0.130	Use Apparent viscosity at 2.3sec-1
Thin & Tint	A310/A100	0.45 – 0.6	0.600	Rapid blending based on maximum viscosity. Typically 1000 to 50000cps
Resin Reactors	A310/A100	0.35 – 0.45	0.950	Rapid Blending, Suspension during dissolving and Heat Transfer, Base on Maximum viscosity.
Underbody Waxes & Sealants	A310/A100	0.45 – 0.55	0.130	Use Apparent viscosity at 2.3sec-1 Typically 15000 to 20000cps
Titanium Dioxide Holding Tanks	A310/A100	0.35 – 0.4	0.130	<60% visc=100cps 70% visc=500cps 75% visc=2500cps
Sugar & Starch				
Wet Milling of Corn - Grind Tank	A310/A100	0.35 – 0.45	0.065	Suspend Corn after grinding. Design for Off Bottom Suspension - Settling Velocity 2ft/min
Starch Storage	A310/A100	0.3 - 0.5	0.13	Suspend Starch, base on Apparent viscosity at 2.3sec-1 with multiple impellers for varying level.
Starch Cooking	A310/A100	0.4 - 0.6	0.400	Based on maximum viscosity. Typically 10000 to 25000cps. Dual impellers usually required.
Starch Conversion	A310/A100	0.35 – 0.5	0.750	Usually a multistage column, selection based on maximum viscosity in column.

Syrup Storage	A310/A100	0.3 – 0.45	0.130	Holding Tank, selection based on maximum viscosity of syrup.
Additive Make Up	A310/A100	0.25- 0.35	0.300	Generally low viscosity 10 to 100 cps
Sugar Disolver	A310/A100	0.3 - 0.4	0.130	Maintain solid particles in suspension while dissolving. Design Viscosity = 100cps
Food & Beverages				
Yeast and Enzymes	A310/A100	0.25 – 0.35	0.150	Mild to Medium Agitation based on the maximum viscosity.
Additives/Flavours	A310/A100	0.25 – 0.35	0.100	Mild Agitation
Milk Processing	A310/A100	0.1 - 0.2	0.100	Mild blending, usually angle mounted side entry units. The angle depends on the Z/T ratio
Synthetic Proteins	A310/A100	0.3 - 0.4	0.080	Mild blending, based on product viscosity.
Fruit Juice Concentrates	A310/A100	0.4 – 0.55	0.130	Mild to medium agitation based on the maximum viscosity
Fruit Juice Dilution	A310/A100	0.35 – 0.45	0.150	Selection based on the viscosity ratio
Tomato Paste	A310/A100	0.5 – 0.65	0.200	Viscosity of concentrate = 30000 cps
Soft Drinks	A310/A100	0.25 – 0.35	0.130	Low viscosity mild blending to ensure uniformity
Mash Tanks	A310/A100	0.4 - 0.5	0.400	Slurrying Grain and water. Selection based on

				Apparent viscosity of 1500cps
Cereal Cookers	A310/A100	0.45 – 0.55	0.400	Cooking Grain slurry, requires rapid blending and heat transfer to prevent burning, base on maximim viscosity
Finished Product Storage	A310/A100	0.3 - 0.4	0.080	Mild Blending to ensure uniformity. Selection based on maximum viscosity
Adhesives				
Blend Tanks	A310/A100	0.5 – 0.65	0.130	Blend ingredients, Selection based on maximum viscosity 25000 to 100000 cps
Starch Cooking	A310/A100	0.4 - 0.6	0.500	Based on maximum viscosity. Typically 10000 to 25000cps. Dual impellers usually required.
Petroleum				
Oil / Petroleum / Additive Blending	A310/A100	0.25 – 0.35	0.06	Mild Blending to ensure uniformity. Selection based on maximum viscosity
Additive Make Up	A310/A100	0.25 – 0.35	0.06	Mild Blending to ensure uniformity. Selection based on maximum viscosity
Bitumen	A310/A100	0.3 - 0.4	0.13	Based on viscosity which is very temperature sensative.

Pulp & Paper				
Inks	A310/A100	0.3	0.200	Based on poroduct viscosity
Chemical Recovery Section	A310/A100	0.3	0.150	Based on poroduct viscosity
Coating and Preparation Plants				
Clay Storage	A310/A100	0.35 – 0.45	0.150	Design typically around 5000cps at 2.3sec-1 for 75% solids
Calcium Carbonate Make Down	A310	0.35 – 0.45	0.700	High level of agitation to wet out solids
Calcium Carbonate Storage	A310/A100	0.35 – 0.45	0.150	Design typically around 1500cps at 2.3sec-1 for 70% solids
Titanium Dioxide Storage	A310/A100	0.35 – 0.45	0.130	Base on final slurry viscosity which depends on the solids concentration.
Miscellaneous Make Up Tanks	A310/A100	0.35 – 0.45	0.150	Based on poroduct viscosity
Fibres and Plastics				
Product Storage	A310/A100	0.35 – 0.5	0.130	Based on poroduct viscosity
Emulsion Storage / Blending	A310/A100	0.35 – 0.5	0.150	Based on poroduct viscosity
Slurry Tank	A310/A100	0.35 – 0.5	0.150	Based on poroduct viscosity
Pharmaceuticals / Personal Care				
Fermentation Products Holding	A310/A100	0.35	0.150	Mild to Medium agitation based on the maximum

				viscosity to ensure uniformity
Antibiotics	A310/A100	0.25 – 0.35	0.080	Blend constituents, Mild Agitation
Medicants antiseptics	A310/A100	0.25 – 0.35	0.080	Blend constituents, Mild Agitation
Cosmetics and Perfumes	A310/A100	0.25 – 0.35	0.080	Blend constituents, Mild Agitation
Insecticides & disinfectants	A310/A100	0.25 – 0.35	0.080	Blend constituents, Mild Agitation
Compounds & general processing	A310/A100	0.25 – 0.35	0.130	Blend constituents, Mild to Medium Agitation
Shampoo	A310/A100	0.4 - 0.5	0.600	Selection based on blending low viscosity additions into high viscosity batch (5000 to 10000cps)
Fertiliser				
Phosphoric Acid Digesters	A310/A100	0.35 – 0.4	0.220	Maintain uniformity of solution during Crystal growth
Phosphoric Acid Storage Tanks	A310/A100	0.25 – 0.35	0.060	To maintain a small % of gypsum solids in suspension
Leach Tanks/Dissolvers	A310/A100	0.3 – 0.45	0.300	Suspend solids usually 20 to 30% by wt to promote contact with the acid. The overall blend time has to be at least 1/3 of the retention time in continuous processes

Urea Make Up	A310/A100	0.25 – 0.35	0.130	Dissolve prills by lifting the solids off the tank bottom to aid dissolution.
Urea Holding	A310/A100	0.25 – 0.35	0.130	Maintain uniformity of solution
Soaps and Detergents				
Fabric Softener	A310/A100	0.5 - 0.65	0.500	Large D/T based on non newtonian nature of the material.
Storage Tanks	A310/A100	0.3 - 0.45	0.130	Blending to maintain uniformity. Selection based on maximum viscosity
Minerals Processing				
Leach Tank	A310/A100	0.35 - 0.45	0.250	Suspend solids to be contacted by the acid or leaching agent. Base on the settling velocity of solids
Mineral Holding /storage	A310/A100	0.35 - 0.45	0.300	Level of agitation will depend on off bottom or uniform suspension is required.
Acid / Chemical Make Up	A310/A100	0.3 - 0.4	0.130	Blend constituents together in the required blend time.
Reaction Chemical Storage	A310/A100	0.25 - 0.35	0.060	Gentle agitation to maintain uniformity.