

C A P I T U L O V I

DISEÑO DE SISTEMAS DE CIRCULACION

Los estanques presentan diversas formas o geometría, así como varios tamaños y profundidades, utilizándose en distintas tipos de cultivo de organismos acuáticos. Sin embargo la mayoría de los estanques se pueden clasificar como circulares, rectangulares u ovalados con pared divisoria.

La geometría de un estanque es uno de los parámetros importantes para el diseño de circuladores, ya que este parámetro definirá los regimenes de flujo del fluido, así como los problemas al tipo de flujo como son los cortos circuitos y la retención de líquidos.

6.1.- ESTANQUES DE CULTIVO

Los estanques circulares usados comunmente, aprovechan la entrada de agua para producir una componente de velocidad tangencial. Esta componente ocasiona la circulación en el estanque o tanque. La descarga típica se hace a través del centro del tanque por medio de un tubo vertical o través del drenaje del estanque.

Larmoyeux y Piper (1973) y Burrows y Chenoweth (1955) estudiaron los patrones de flujo desarrollados en tanques circulares, de acuerdo a la localización de los chorros de entrada de agua al tanque. Los chorros de agua se orientaron en forma tangencial en varios diámetros y se inclinaron de la horizontal en ángulos variando desde 25 a 50°. En la figura 29 se muestran las zonas de circulación en un tanque circular con una relación de diámetro-profundidad alta. La zona A es una zona turbulenta, donde la mayoría de la energía de salida se disipa. La zona B es una zona de menor velocidad, la cual tiende a presentar poco intercambio con el resto del tanque. La zona B es un "área muerta" particularmente si la relación diámetro-profundidad es muy grande. El contenido de oxígeno, la distribución de comida y otros parámetros de calidad de agua, son pobres en ésta área. La zona C es una área turbulenta. Ya que las boquillas de las tuberías están en la superficie, el agua superficial tiene un mayor impulso. Esto produce un movimiento del agua con un flujo radial neto hacia afuera de la superficie y un flujo radial hacia el centro cerca del fondo. Casi todos los flujos desde la zona A hacia las salidas tienen lugar a lo largo de la zona D. El flujo radial de la zona D provoca las propiedades de autolimpieza de los tanques circulares, una de sus mayores ventajas. En los tanques grandes, el flujo radial en la zona D puede causar un flujo vertical hacia arriba en la malla, si se utiliza la malla en el tubo de desague

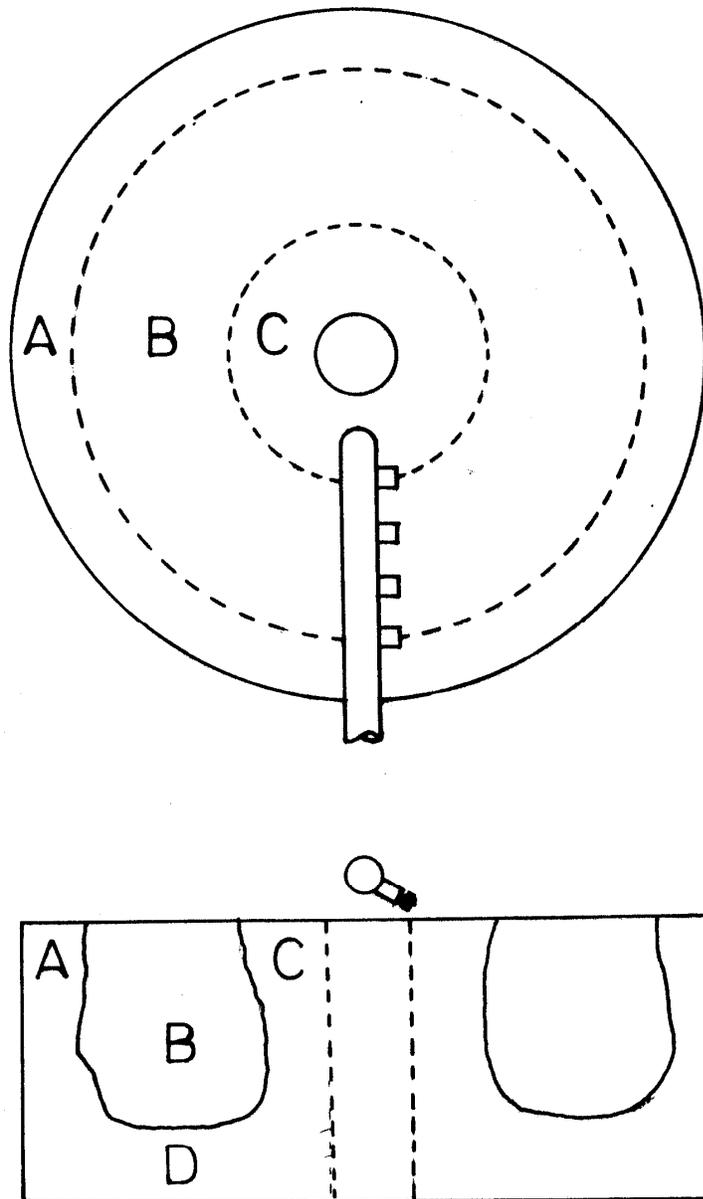


Figura 29.- Tanque Circular Poco Esbelto.

vertical; esto no es deseable, porque los productos de desecho se transportan hacia arriba con el flujo. Este problema se puede eliminar si se utilizan salidas en el fondo y tubos verticales externos al tanque para controlar el nivel del agua.

En la figura 30 se muestran las cuatro zonas como se presentan en tanques con relaciones diámetro-profundidad bajas. El flujo de la zona B tiende a penetrar más cerca del fondo, haciendo que la zona D sea más angosta. Cerca de la criba las altas velocidades tangenciales producidas por la acción de los vórtices mantienen a los sólidos en suspensión en esta área, como es el caso para tanques con relaciones mayores de diámetro-profundidad.

Los tanques circulares tienen varias ventajas. Normalmente, las velocidades de agua son más altas que en los tanques rectangulares, produciendo un mejor acondicionamiento de los peces al trasladarlos a la naturaleza, pero también producen una mayor demanda metabólica para los peces que se van a utilizar para el consumo humano. Los tanques circulares tienden a tener una mejor distribución de comida que los canales de agua, tienen mayor facilidad de autolimpiarse, y requieren de un flujo menor (a menos que la demanda de oxígeno sea el parámetro determinante del flujo debido a la carga de peces). El costo de construcción e instalación de

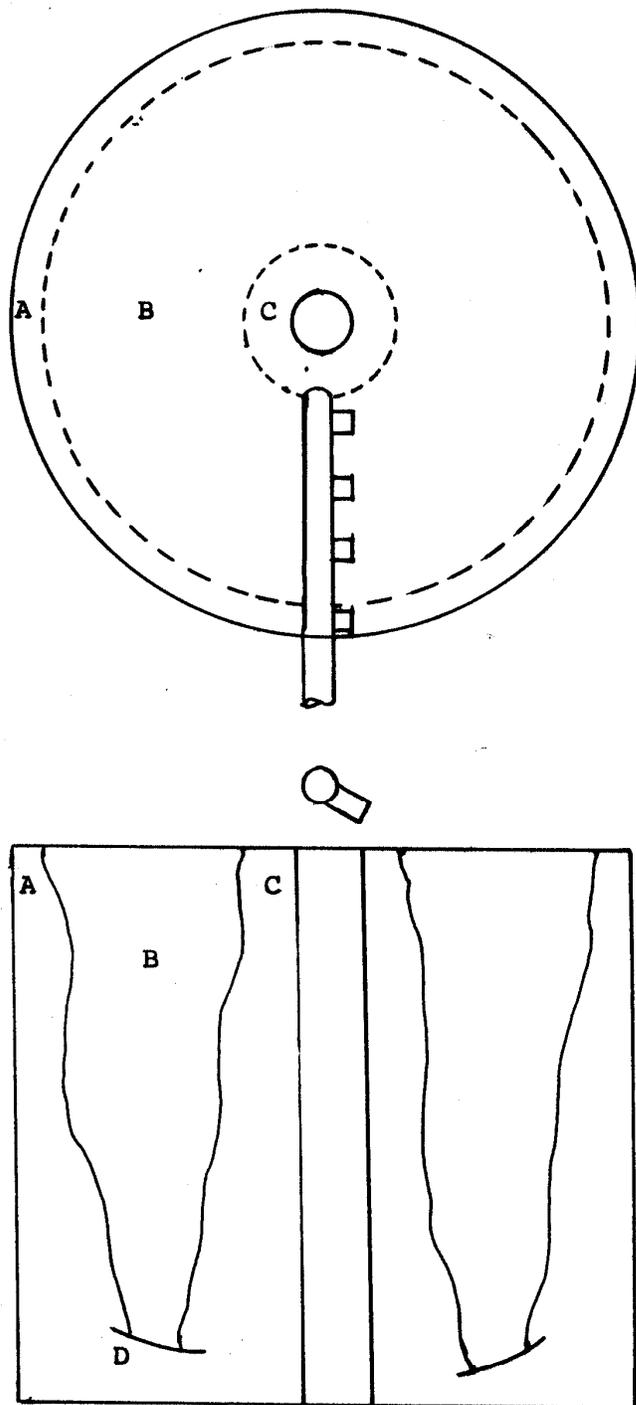


Figura 30.- Tanque Circular Esbelto.

los tanques circulares en relación a los canales de agua depende de los materiales de construcción de uno y de otro.

Los estanques rectangulares se emplean comunmente debido a que son fáciles de construir. Sin embargo, tienen asociados varios problemas. Los organismos que se colectan de la naturaleza y se ponen en los tanques rectangulares se pueden amontonar en una esquina del tanque y agotar el oxígeno, o pueden intentar nadar continuamente contra la esquina del tanque lastimándose físicamente o cansándose. La circulación en los tanques rectangulares se caracteriza por tener a menudo "areas muertas" y "cortos circuitos". El agotamiento de oxígeno puede ocurrir localmente o los productos metabólicos se pueden acumular en estas áreas muertas, ocasionando fuertes esfuerzos a los peces o bien la muerte. Al parecer no se cuenta en la literatura con estudios definitivos que cuantifiquen la circulación en los diferentes tipos de estanques rectangulares. Una de las razones es que la circulación y los cortos circuitos están en función del diseño de la entrada y la salida, el flujo y otras variables. En los tanques rectangulares los productos de desecho sólidos se acumularán en el fondo a menos que se fuerce el proceso de mezclado, mediante velocidades lo suficientemente altas que permitan remover los desechos.

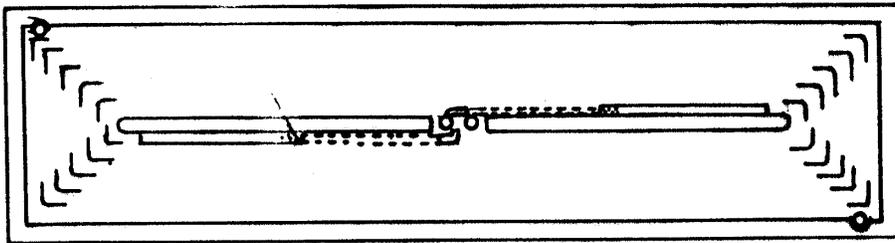


Figura 31.- Sistema de Remoción de Desechos en Tanques Rectangulares.

En la figura 31 se muestra un diagrama de un sistema para remover los desechos sólidos en tanques rectangulares de dimensiones de 1.25 x 2.5 m. Debajo del tanque se construye un canal y el agua se bombea hacia adentro y hacia afuera del tanque. Se coloca una placa sobre la parte superior del canal pero se sostiene de uno a dos centímetros por arriba del fondo del tanque. Esta placa ocasiona que el agua (y el desecho sólido) circule hacia el canal en forma horizontal. Ya que el agua se bombea afuera del extremo del canal, los desechos se transportan con la misma agua. Este diseño proporciona una circulación horizontal suficiente a lo largo del fondo del tanque para remover los sólidos hacia afuera. Las velocidades del agua en el canal se deben mantener por arriba de los 0.8 m/s para prevenir el asentamiento de la partículas. Esto es difícil de lograr si el canal es más largo de 1.00 m.

Los tanques ovalados (fig 32) están hechos de dos secciones rectas paralelas separadas por una pared divisora. Las dos secciones rectas están conectadas con otras dos secciones semicirculares, permitiendo que el agua circule continuamente por el óvalo.

La velocidad se imparte al agua forzando la entrada de agua a través de un inyector y apuntando el inyector en la dirección de la circulación. Las entradas de agua al tanque

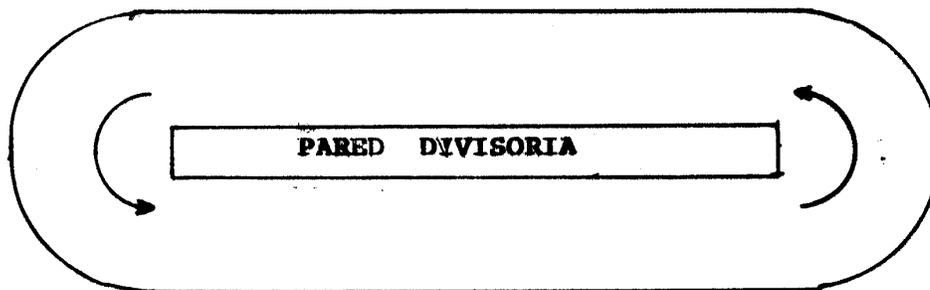
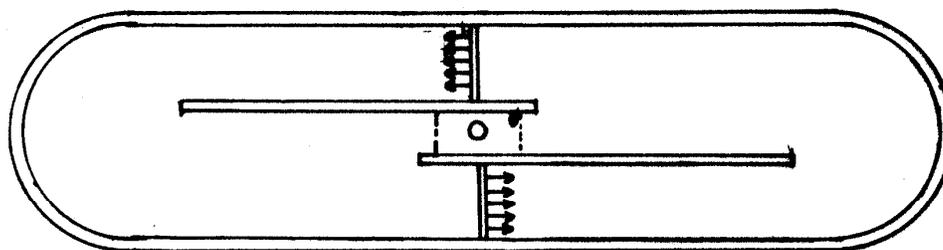


Figura 32. - Tanque de Cultivo tipo Ovalado.



se pueden localizar por arriba del mismo, tal como se mencionó en los tanques circulares, o bien acomodados en forma vertical uno arriba de otro y localizados en una posición A o A' (fig. 32).

También es posible controlar la velocidad de circulación de agua poniendo una rueda de paletas en cualquier punto en una o en las dos secciones rectas del tanque. El eje de la rueda de paleta se localiza por arriba de la superficie del agua, pero un lado de la paleta debe estar sumergido. Administrando energía a la paleta, esta produce la circulación del agua, con velocidades de agua relacionadas a la velocidad rotacional y diseño de la paleta. La ventaja más grande de utilizar rueda de paletas es que la velocidad se puede cambiar al cambiar la velocidad rotacional de la rueda. Si la velocidad del agua se controla por llaves, el tamaño de la llave, la presión del agua o la tasa de flujo se deben cambiar para alterar la velocidad de circulación.

El Tanque Foster-Lucas (también conocido como poza de gran tamaño) es un tanque ovalado de diseño específico que se utilizó ampliamente en los cultivos de salmón y trucha. En la figura 33, se presenta el diseño básico de un tanque de Foster-Lucas. La circulación se produce por las chorros que se localizan por arriba del tanque en el punto medio de los lados rectos. El divisor del centro está hecho de dos piezas

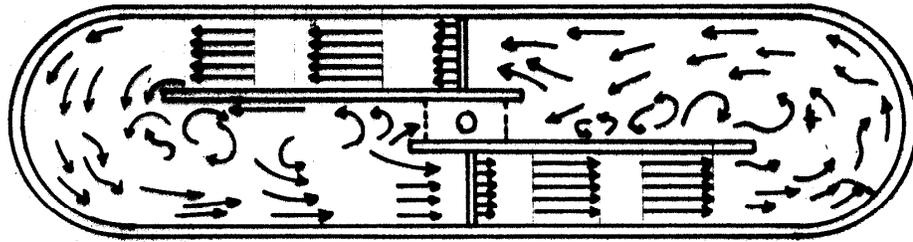


Figura 33.- Tanque de Cultivo tipo Foster-Lucas y Patrón de Circulación.

desfasadas una de otra, con la salida de agua localizada entre las secciones divisorias del centro.

Burrows y Chenoweth (1970) rediseñaron el tanque Foster-Lucas en lo que llamaron tanque de recirculación rectangular (figura 31). La modificación principal consiste en la modificación ovalada del tanque, la inserción de veletas que sirven de guías del flujo en las esquinas, y la sustitución de la salida del centro por dos salidas de malla en el fondo como se muestra en la figura. Este tanque rectangular es más fácil de construir debido a las esquinas cuadradas, pero las veletas guías en las esquinas son de un costo adicional y se deben limpiar periódicamente. Al parecer al cambiar la posición de la salida se mejora la remoción de sólidos.

Burrows y Chenoweth (1955) compararon el patrón de flujo y los cortos circuitos en una poza circular, en un canal de agua y en una poza Foster-Lucas. En las figuras 33 se esquematiza la circulación de cada una de estas fosas respectivamente.

6.2.- TANQUES DE CULTIVO AGITADOS MECANICAMENTE

La agitación mecánica de un líquido, efectuada por lo general mediante un aparato giratorio, es adecuada en especial para dispersar sólidos, líquidos o gases en líquidos, y se utiliza para muchas de las operaciones de transferencia de masa. Los agitadores pueden producir intensidades de turbulencia muy elevadas; dichas intensidades no sólo producen buenos coeficientes de transferencia de masa, sino que también son necesarios para obtener una dispersión efectiva de líquidos y gases. Velocidades elevadas para los líquidos, particularmente deseables cuando se tienen sólidos en suspensión, pueden obtenerse con facilidad.

TIPOS DE IMPULSORES

Existen muchos diseños de impulsores, aquí veremos los casos más populares y que son utilizados en la acuicultura o en tratamiento de aguas. Los impulsores generalmente están montados sobre un eje movido por un motor y arreglado en forma axial (fig. 35). En particular, en los de menor tamaño, el impulsor y el eje pueden entrar en el tanque formando un ángulo con el eje del tanque, con la guía del motor unida al borde del tanque.

Propulsores de tipo marino

Se operan a velocidad relativamente elevada, particularmente en líquidos con baja viscosidad; son especialmente útiles por su gran capacidad para la circulación del líquido. Generalmente la relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque, d_i / T , se fija a 1:5 o menos. El flujo del líquido es axial y el propulsor está puesto de tal forma que produce un flujo descendente hacia el fondo del tanque. Al describir el propulsor, el término "cabeceo" se refiere a la relación entre el diámetro del propulsor y la distancia que avanza por revolución un propulsor libre que opera sin deslizamiento. El término "cabeceo cuadrado", que es el más común en el diseño de agitadores, significa un cabeceo igual a la unidad. Los propulsores se utilizan con más frecuencia para las operaciones de mezclado de líquidos que para la transferencia de masa (fig. 34a).

Propulsores de Paletas o Turbinas, especialmente el diseño de hojas planas, se utilizan a menudo para operaciones de transferencia de masa (fig. 34b y c). El diseño de hoja curva (fig. 34d) es útil para la suspensión de pulpas frágiles, cristales y similares; la turbina de hoja sumergida (fig. 34e) es útil para mezclar líquidos. El impulsor cubierto (fig. 34f) se usa poco en el contacto gas-líquido. El flujo de líquido desde el impulsor es radial, excepto en

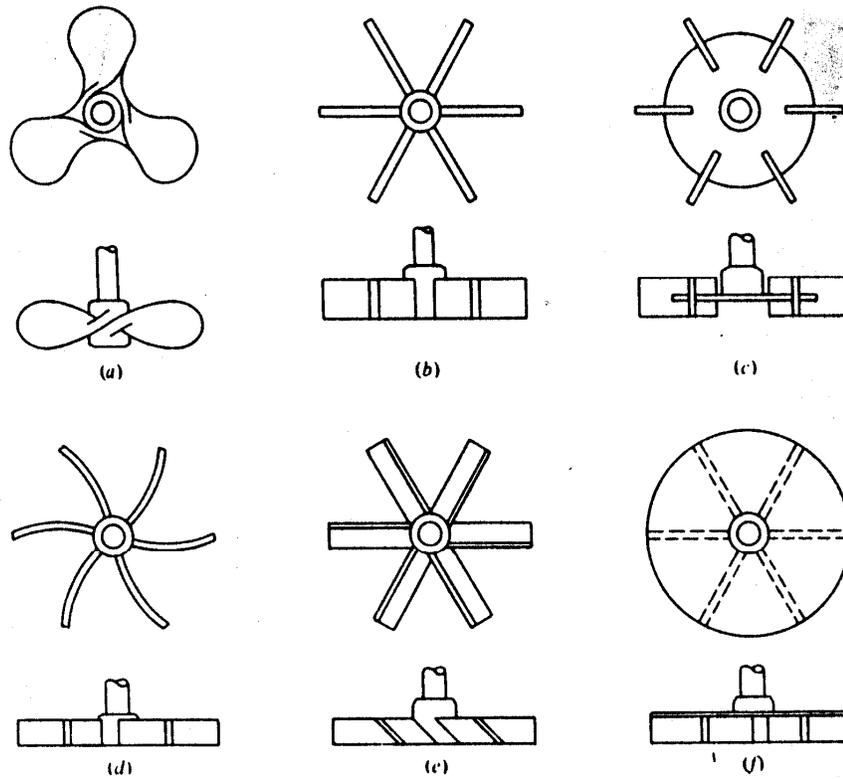


Figura 34.- Impulsores con Proporciones Típicas: (a) Propulsor de tipo Marino, (b) Turbinas de Disco de Hoja.

el caso del diseño de hoja sumergida, en el cual el axial. Aunque la mejor relación d_1 / T depende de la aplicación, el valor de 1/3 es muy común. Frecuentemente las turbinas operan con velocidades periféricas del orden de 2.5-4.6 m/s, según sea el uso.

FORMACION Y PREVENCION DE VORTICES

La figura 35 muestra los patrones típicos de flujo para líquidos en una sola fase de viscosidad moderada. En el caso de un impulsor localizado en forma axial y que opera a bajas velocidades en un tanque abierto con una superficie gas-líquido, la superficie líquida está nivelada y el líquido circula alrededor del eje. Cuando la velocidad del impulsor se aumenta para producir condiciones de turbulencia, también se incrementa la potencia que se requiere para que gire el impulsor; se empieza entonces a formar un vórtice alrededor del eje (fig. 35a y b). A velocidades mayores, el vórtice finalmente alcanza al impulsor. Si se arrastra aire hasta el líquido, el impulsor trabaja parcialmente en el aire y se necesita disminuir la potencia. El arrastre de gas dentro del líquido frecuentemente es indeseable; además, la formación de vórtices provoca dificultades cuando aumentan de escala los experimentos modelo o los estudios en planta piloto; en consecuencia, de ordinario se toman medidas para evitar la formación de vórtices de las siguientes formas:

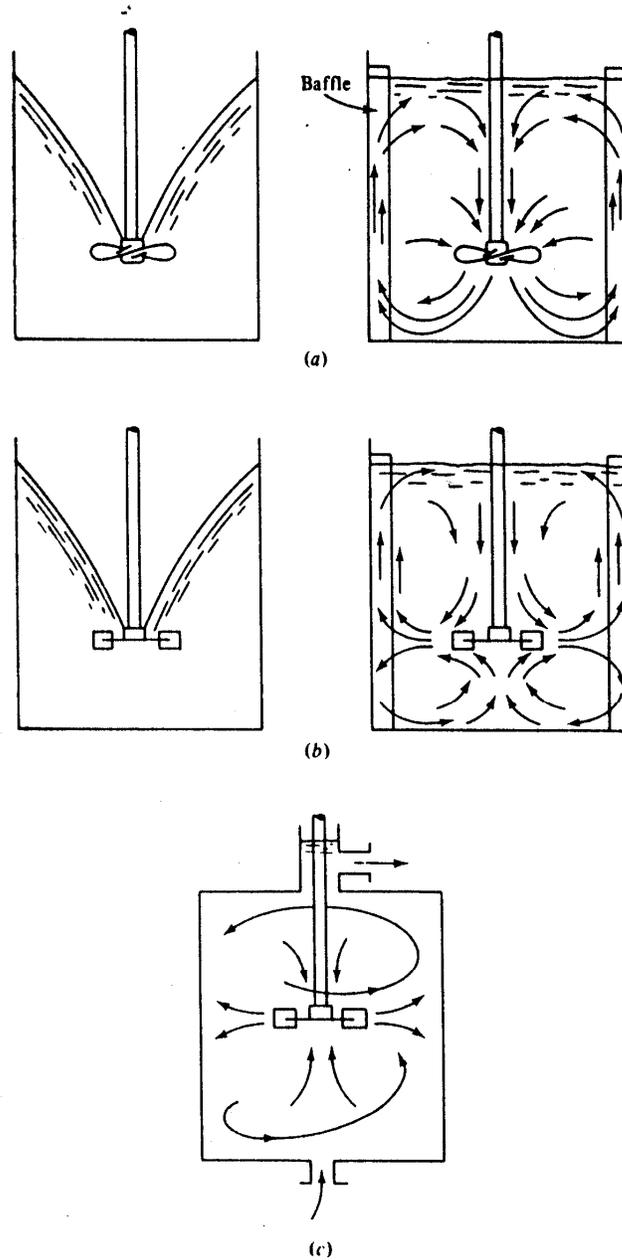


Figura 35.- Agitación de Líquidos en Presencia de una Interfase Gas/Líq. con o sin Mamparas de Pared: (a) Impulsor Marino, (b) Turbinas de Disco de Hoja Plana y (c)

- a. Operaciones sólo en el rango laminar para el impulsor (Re de 10 a 20). En general es prácticamente lento para fines de transferencia de masa.
- b. Localización del impulsor fuera del centro, sobre un eje que entra en el tanque formando un ángulo con respecto al eje del tanque. Se usa con poca frecuencia en instalaciones permanentes y por lo común se utiliza en trabajo a pequeña escala con impulsores en que la guía del agitador está unida al borde del tanque.
- c. Instalación de mamparas. Este es el método más utilizado. Las mamparas estándar constan de cuatro tiras planas, verticales arregladas en forma radial a intervalos de 90° alrededor de la pared del tanque, que se extienden en la profundidad total del líquido (fig. 35 a y b der). El espesor de la mampara estándar es generalmente $T/12$ o con menos frecuencia $T/10$ (mamparas al 10%).

MECANICA DE FLUIDOS

El estudio de las características de los tanques con agitación frecuentemente incluye consideraciones acerca de la similitud, que son de importancia particular cuando se desea obtener leyes sencillas que describan tanques de

diferentes tamaños. Por ejemplo, con atención apropiada a la similitud y describiendo los resultados en función de grupos adimensionales, es posible experimentar con un tanque lleno de aire y esperar que los resultados de potencia, grado de turbulencia y similares, sean aplicables a tanques llenos de líquido. Tres tipos de similitud son significativos cuando se trabaja con el movimiento de líquidos:

1. La similitud geométrica se refiere a las dimensiones lineales. Dos tanques de diferentes tamaños son similares geoméricamente, si son iguales las relaciones entre las dimensiones correspondientes en las dos escalas; esto se refiere al tanque, impulsores y profundidad del líquidos. Si las fotografías de dos tanques se pueden superponer, éstos son similares geoméricamente.
2. La similitud cinemáticase refiere al movimiento, y requiere de la similitud geométrica y de la misma relación entre las velocidades en partes correspondientes de los tanques. Esto es de especial importancia para los estudios de transferencia de masa.
3. La similitud dinámica se refiere a las fuerzas: En tanques cinemáticamente similares se requiere que sean iguales todas las relaciones entre las fuerzas en posición equivalentes.

El complejo movimiento en un tanque con agitación no puede describirse totalmente en forma analítica, pero las ecuaciones de movimiento pueden describirse en función de grupos adimensionales como:

$$f \left\{ \frac{\bar{L} \omega \rho}{\mu}, \frac{\omega^2}{\bar{L} g}, \frac{\Delta p q_c}{\rho \omega^2} \right\} = 0 \quad \text{--- (14)}$$

Donde \bar{L} = alguna longitud característica y Δp es una diferencia de presión. El primero de estos grupos es la relación entre las fuerzas de inercia y de viscosidad, el familiar número de Reynolds. Si la longitud característica se toma como d_i y si la velocidad proporcional a la velocidad del extremo del impulsor se toma como $\pi N d_i$, de donde se omite π , el grupo se vuelve el número de Reynolds del impulsor, $Re = d_i^2 N \rho_L / \mu_L$.

El segundo grupo, la relación entre las fuerzas de inercia y de gravedad, que es importante cuando la superficie líquida está ondulada o curva como en un vortice, es el número de Froude. Con ω y \bar{L} definidas como antes, se vuelve $Fr = d_i N^2 / g$.

La tercera es la relación entre las diferencias de presión que resultan en flujo y las fuerzas de inercia. Si Δp se toma como fuerza/área, entonces el grupo puede reconocerse

como un coeficiente de arrastre, que generalmente se escribe como $F_D/A(\rho v^2/2q_c)$. El grupo puede desarrollarse en un "número de potencia" adimensional como sigue. La potencia requerida por el impulsor es el producto de Δp y la rapidez de flujo volumétrica del líquido Q_L , de tal forma que

$$\Delta p = \frac{P}{Q_L} \text{ - - - - - (15)}$$

La velocidad del fluido es proporcional a Nd_1^2/T o para tanques similares geoméricamente, a Nd_1 , de tal forma que Q_L es proporcional a Nd_1^3 . La sustitución de éstos transforma al grupo en $Po = Pq_c/\rho N^3 d_1^5$.

Para tanques similares geoméricamente, la ecuación (14) puede escribirse como:

$$f(Re, Fr, Po) = 0 \text{ - - - - - (16)}$$

Para similitud no geométrica, adicionalmente se pueden requerir diferentes relaciones dimensionales

$$\frac{T}{d_1'} \quad \frac{Z}{d_1'} \quad \frac{C}{d_1'} \quad \frac{l}{d_1'} \quad \frac{u}{d_1'} \quad \frac{nb}{T}$$

Para dispersiones de dos fases, pueden ser significativos otros grupos como el número de Weber

$We = \rho \omega^2 d_p / \sigma_{gc}$, la relación entre las fuerzas de inercia y la de tensión interfacial. Por supuesto, los números de Sherwood y Schmidt son importantes en la transferencia de masa. Para la similitud dinámica entre dos tamaños diferentes de tanques operados con un vórtice, se requiere que los números de Reynolds y de Froude sean iguales para los dos tanques. Puesto que los impulsores pueden ser similares geoméricamente pero de diferente tamaño, se vuelve imposible especificar la velocidad de los impulsores en los dos tanques que contienen el mismo líquido. Entonces, números de Reynolds iguales requieren:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left[\frac{d_{12}}{d_{11}} \right]^2 \text{ - - - - - (17)}$$

Mientras que para números de Froude iguales se requiere:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left[\frac{d_{12}}{d_{11}} \right]^{0.5} \text{ - - - - - (18)}$$

En donde 1 y 2 designan los dos tamaños; las dos condiciones no pueden cumplirse simultáneamente. Por esta razón la mayoría del trabajo con tanques abiertos se ha hecho con mamparas, para prevenir la formación de vórtices. Cuando no hay formación de vórtices, el número de Froude ya no es importante, y la ecuación (16) se vuelve:

$$f (Re, Po) = 0 \quad - - - - - (19)$$

Potencia en sistemas sin vórtices. Para tanques similares geoméricamente, operados en una sola fase, y para líquidos newtonianos, las características con respecto a la potencia de los impulsores se representan por curvas. Estas curvas representan la ecuación (19) y se obtuvieron experimentalmente. Cuando los números de Reynolds son menores de 10, las curvas tienen una pendiente de -1, y con números de Reynolds muy grandes, el número de potencia se vuelve constante. Entonces, las curvas son bastante análogas a las curvas para el coeficiente de arrastre de un cuerpo sumergido, o al factor de fricción para el flujo en un tubo.

Toda la energía en la corriente del líquido debida al impulsor, se disipa a través de la turbulencia y la viscosidad como calor. El gradiente de velocidad en el líquido que fija la rapidez de deslizamiento y, por lo tanto, la intensidad de la turbulencia, es mayor en la punta del impulsor y menor a una distancia relativamente alejada. Con números de Reynolds altos para todas las curvas en donde el número de potencia se vuelve constante, la potencia del impulsor es independiente de la viscosidad del líquido y varía sólo con $\rho L N^3 d_i^5$. Como ya se mostró que, para tanques similares geoméricamente, Q varía con $N d_i^3$, entonces a un número de potencia constante, P es proporcional a $Q N^2 d_i^2$ para

un líquido determinado. En consecuencia un impulsor pequeño que opere a alta velocidad producirá menos flujo y más turbulencia que un impulsor grande que opere a baja velocidad, a la misma potencia. Por tanto los impulsores pequeños, a velocidades altas, son especialmente adecuados para dispersar líquidos y gases, mientras que los impulsores grandes son particularmente eficaces para suspender sólidos.

Impulsores. Tanto las turbinas abiertas como las de hoja plana en disco se utilizan ampliamente, en particular debido a las altas velocidades de descarga normales al flujo del gas mantenidas por dichas turbinas. En especial en los tamaños grandes, se prefiere el tipo de disco. Se especifican mejor mediante $d_i/T = 0.25$ a 0.4 y alejadas del fondo del tanque a una distancia igual al diámetro del impulsor. En algunos casos, pueden utilizarse impulsores diseñados para inducir al flujo del gas desde el espacio arriba del líquido hacia abajo en la masa en agitación.

Para producir dispersiones efectivas del gas con turbinas de hojas planas de disco, la velocidad del impulsor debe ser mayor que la dada por:

$$\frac{Nd_i}{(\sigma g_c / \rho_L)^{0.25}} = 1.22 + 1.25 \frac{T}{d_i} \quad - - - (20)$$

Flujo de gas. Si la rapidez del flujo del gas es muy grande, especialmente para líquidos de viscosidad alta, las burbujas del gas quedan atrapadas debajo del ojo del impulsor y bloquean el flujo del líquido en la parte inferior del impulsor. Este efecto debe minimizarse para velocidades del impulsor mayores que las de la ecuación (20). En cualquier caso, para la mayoría de las instalaciones, la velocidad superficial del gas en el área transversal; del tanque no excede $V_G = 0.080$ m/s.

Potencia del Impulsor. La presencia de gas en el contenidos de un tanque hace que disminuya la potencia requerida para mover el impulsor a una cierta velocidad, probablemente debido al descenso de la densidad media de la mezcla. De las muchas correlaciones que se han intentado, a pesar de algunos defectos, se recomienda para turbinas de hojas planas en disco en agua y soluciones acuosas de no electrolitos. Se ha encontrado que puede aplicarse a tanques con un rango en capacidad de 4 m^3 y mayores. Las líneas representan adecuadamente los datos; sus ecuaciones son:

$$\frac{P_G}{P} = \begin{cases} 1 - 12.2 \frac{Q_G}{Nd_1^3} & \frac{Q_G}{Nd_1^3} < 0.037 \quad \text{-- (21)} \\ 0.62 - 1.85 \frac{Q_G}{Nd_1^3} & \frac{Q_G}{Nd_1^3} > 0.037 \quad \text{-- (22)} \end{cases}$$

En donde P_c es la potencia con flujo de gas y P la potencia cuando no hay flujo de gas. Son comunes los niveles de potencia con gases de 600 a 1000 W/m^3 , aun cuando se han utilizado valores hasta cuatro veces mayores. Más aún, la relación entre potencia requerida/volumen del tanque, decrece con el tamaño del tanque.

Con el fin de que el motor de agitación no sufra una sobrecarga, en caso de que el flujo del gas se suspenda repentinamente, el motor y el eje pueden fabricarse del tamaño necesario, como si no hubiese gas.