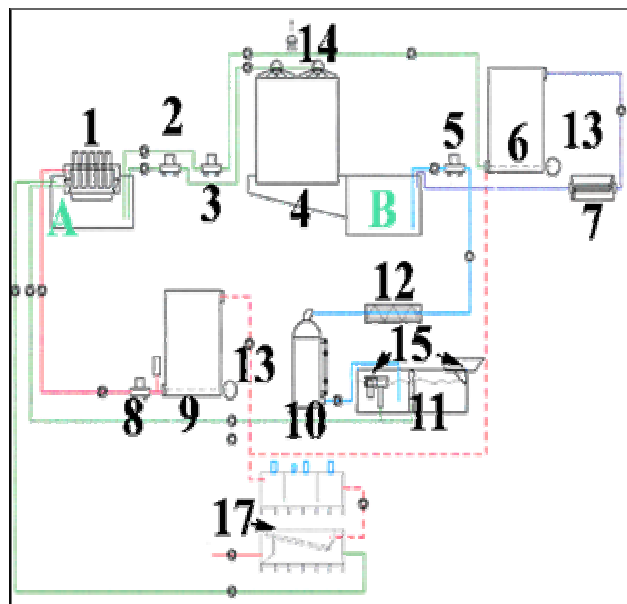


Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua



Oscar Galli Merino
Facundo Miguel Sal



A - Introducción

Hoy la acuicultura a nivel mundial se encuentra en franco crecimiento, según proyecciones de FAO en el año 2015 la producción proveniente de la acuicultura será de 74 millones de Tn. (FAO, 2006). Para lograr la sustentabilidad es necesario intensificar los cultivos, valiéndose de tecnología como sistemas de recirculación de agua (SRA) y tratamiento de la misma, optimizando un recurso tan valioso.

La utilización de la tecnología en el tratamiento del agua tiene como ventajas: un monitoreo y control constante de las variables físico-químicas y sanitarias del agua, la reutilización del agua, producciones de altas densidades, y como desventajas: el alto costo y necesidad de mano de obra calificada.

El uso de esta tecnología se limita en cierta medida, a países desarrollados como: Estados Unidos, Japón y los países europeos como: Noruega, España, Alemania, Francia y otros. Cabe destacar que países en vía de desarrollo como: Chile, México, Brasil y Ecuador utilizan esta tecnología en diferentes etapas de cultivo.

En Argentina el SRA, aun no se utiliza en cultivos de índole comercial, pero si ciertos tratamientos de agua como: filtración mecánica, filtración biológica, aireación y oxigenación.

En este trabajo se desarrollan conceptos generales para comprender el funcionamiento de un SRA y tratamiento de agua, y su aplicación en la acuicultura.

B - Sistemas de tratamiento del agua

El tratamiento del agua en Acuicultura persigue la eliminación de sustancias inertes, la destrucción de gérmenes patógenos y facilitar intercambios de gas entre la fase líquida y la gaseosa.

1 - Aireadores y Oxigenadores

Para la acuicultura intensiva es prudente mantener el agua entrante tan próxima como sea posible a la saturación total de OD (100 %), quiere decir a su máxima solubilidad a una dada temperatura (Egna y Boyd 1997). Sin duda la aireación es el tratamiento del agua más empleado en acuicultura. La elección del material de aireación y de oxigenación se hará de acuerdo:

- a las instalaciones existentes (superficie de agua, superficie de estanques, tiempo de renovación, altura del agua, bombas, etc.)
- al tiempo de utilización por año (amortización)
- finalmente en función de su eficacia, de la cantidad de oxígeno disuelto por hora y del rendimiento energético.

Mecanismos de disolución de oxígeno

La transferencia del O₂ del aire (20.946% en la atmósfera) con el agua están en un equilibrio con el oxígeno atmosférico. Cuando el agua se encuentra insaturada de OD, el oxígeno atmosférico se trasfiere al agua y a la inversa si el agua se encuentra sobresaturada de OD.

La solubilidad del oxígeno en agua a 15 °C es de 47ppm (suponiendo una atmósfera de oxígeno). Las concentraciones obtenidas en los tanques, por ejemplo, son bastantes mas bajas generalmente entre 3 a 12 ppm (Barnabé, 1991).

Hay una serie de obstáculos para lograr la disolución del oxígeno en el agua que se deben evitar mediante medios mecánicos:

- el enriquecimiento del aire con oxígeno aumenta las posibilidades de disolución de este.
- un líquido el agua, y un gas el oxígeno, en contacto, están separados por una película o interfase de naturaleza particular que se opone al paso de los constituyentes de una fase a otra. Como consecuencia la agitación del gas y/o el líquido aumentan las posibilidades de disolución.
- cuanto menos tiempo están en contacto el aire y el agua menos se oxigena esta. Como consecuencia, a mayor tiempo de permanencia de la fase gaseosa (burbujas) en el seno de la fase líquida, mayor será la disolución.
- para un volumen dado de agua, cuanto mayor sea la interfase líquido-gaseosa mayor será la disolución del oxígeno.
- comprimiendo el aire, el agua aumenta el poder de disolución de todos los gases, representa una ventaja para el oxígeno, pero un inconveniente en el nitrógeno (Petit 1980).

1.1 - Clasificación de los sistemas de aireación

Se los puede clasificar en dos grandes grupos:

1.1.1 - Aireadores Mecánicos: la aireación mecánica, se consigue utilizando la energía mecánica para provocar la ruptura del agua en gotas. El aumento de la transferencia del

oxígeno, se logra por incremento en el área de la interfase aire-agua. Estos pueden ser: de eje vertical y horizontal.

En el caso del vertical, la transferencia del oxígeno se logra por la exposición de gotas de agua a la atmósfera, por turbulencia del agua y por arrastre de aire (Tchobanoglous y Schroeder 1985). En el horizontal la transferencia de oxígeno es por turbulencia superficial, por arrastre de aire y por bombeo horizontal. Estos pueden ser eléctricos o a combustión, y también los hay híbridos, ejemplo la bombas pulverizadoras y los aireadores de turbina.

Bombas Verticales: consiste en un motor eléctrico sumergible, con un impulsador adherido a su eje, su potencia va de 1kW a 100kW, pero en acuicultura raramente más grande que 3 Kw (Boyd 1990).

Bomba Pulverizadora: consiste de una bomba de alta presión que descarga agua por una serie de orificios o ranuras (diferentes formas) en una pipa múltiple, la potencia va de 7.5 a 15 kw (Lawson 1995).

Aireadores Difusores - Hélices: se basan en el efecto Venturi. Estos aireadores consisten en un eje hueco que rota por acción de un motor eléctrico. Un difusor y una hélice están localizados al final del eje, sumergidos en el agua. Esta unidad flota de manera tal que parte de ella esta fuera del agua donde contiene un hoyo por el cual entra el aire, este pasa a través del difusor y entra al agua en forma de finas burbujas (figura 7). La potencia de estos va de 0.37 a 11 kW. Se demostró que el ángulo de inclinación que produce un máximo de intercambio de oxígeno es 30 grados (Boyd y Martinson 1984; Lawson 1995).

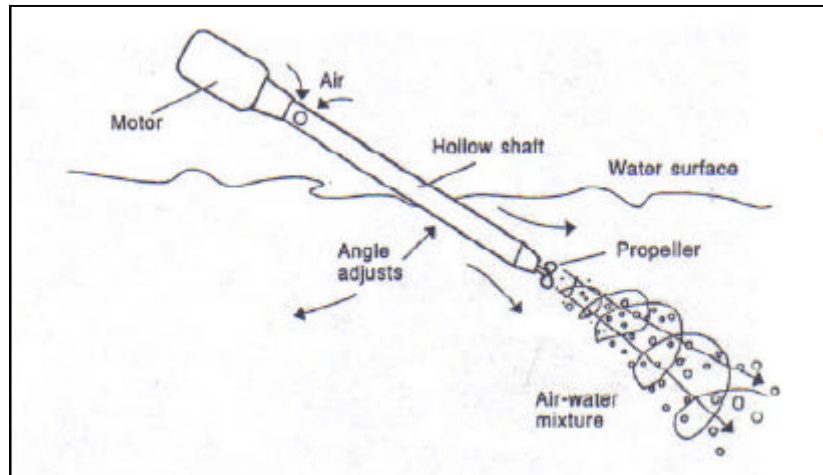


Figura 7: aireador difusor- hélice "venturi" (Lawson, 1995).

Aireadores de Paleta: este consiste en un eje rotatorio propulsado por un motor eléctrico con una serie de paletas (fotos 3 y 4), de cierta forma aparatosos, bajo poder de oxigenación, potencia 1.5 Kw. Hay una variante que utilizan la toma de fuerza de motores a combustión.



Foto 3: aireador de paleta en reposo.



Foto 4: aireador de paleta en movimiento.

Aireadores de Turbina: existen turbinas lentas con reductor de velocidad y turbinas rápidas con toma directa del motor.

Turbinas lentas (figura 8): se caracterizan por la presencia de

un reductor entre el motor (1500 rpm) y la turbina (400 a 700 rpm), es interesante para la acuicultura por:

- su eficacia
- posibilidad de colocarlas en los tanques de cultivo sin necesidad de protecciones para los peces.

Turbinas rápidas (figura 9): tienen toma directa del motor y están provista de una hélice que bombea y proyecta el agua. Las hay disponibles en el mercado mundial, desde 47 a 103 Kw/hora/Kg de oxígeno (Wheaton, 1993) lo que las hace muy para tanques poco profundos. Presentan el inconveniente de tener que aislar la hélice de los peces, con lo que el motor debe ser reversible para limpiar la rejilla de protección.

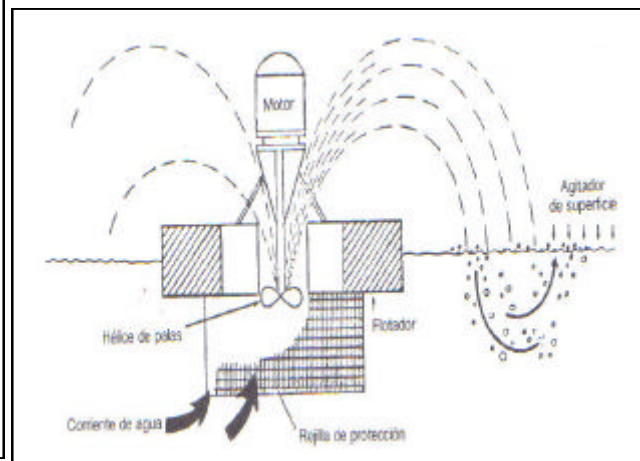
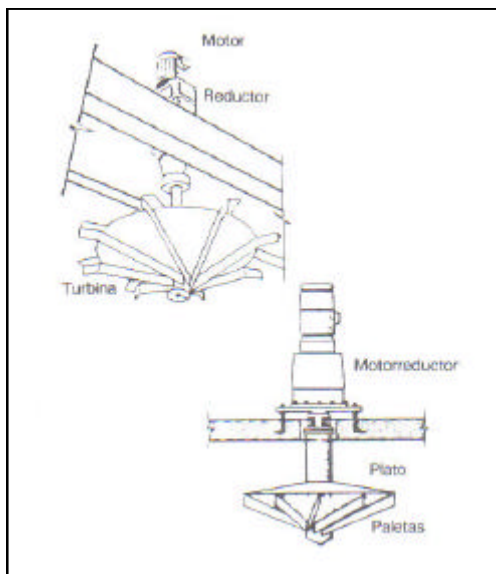


Figura 8: turbina lenta (Barnabé, 1991).

Figura 9: turbina rápida (Barnabé, 1991).

Tubo en U: consta de un tubo en forma de U (figura 10), en el cual el agua viaja hacia abajo por uno de los extremos del tubo y hacia arriba y afuera por el otro. Se inyecta aire al agua a través de un difusor.

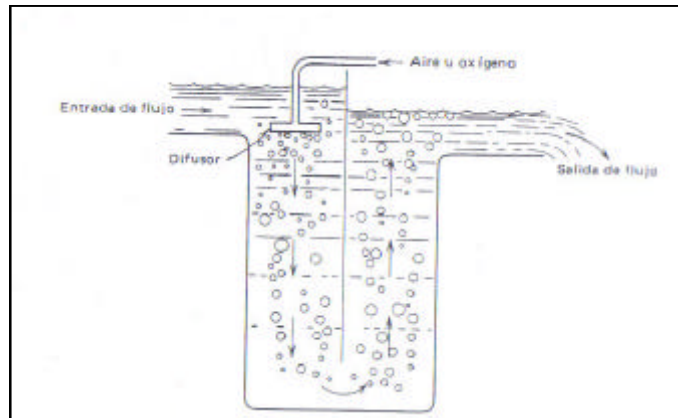


Figura 10: Tubo en U (Wheaton, 1993).

Conos de aireación: consiste en un cono invertido sumergido en agua, donde el agua con aire inyectado a través de un difusor, es bombeada hacia abajo (figura11).

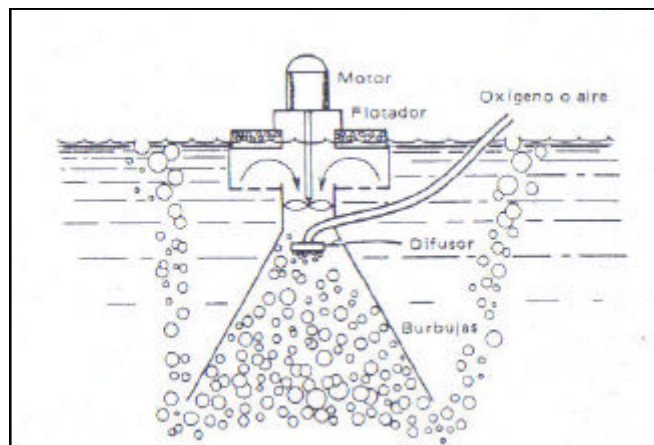


Figura 11: Cono de aireación (Wheaton, 1993).

1.1.2 - Aireadores por Gravedad: los aireadores por gravedad utilizan la energía liberada cuando el agua pierde altitud al aumentar el área superficial aire-agua, por lo tanto se incrementa la concentración de oxígeno del agua. Estos son ampliamente usados en acuicultura, debido a que son de fácil diseño y económicos. Comúnmente se los denomina aireadores de cascada o cataratas.

Según su diseño se los puede clasificar como: vertedero simple (figura 12A) con espumador (figura 12B), con rueda de paleta, con cepillos rotativos, plano inclinado corrugado con o sin orificio (figura 12C Y 12D respectivamente).

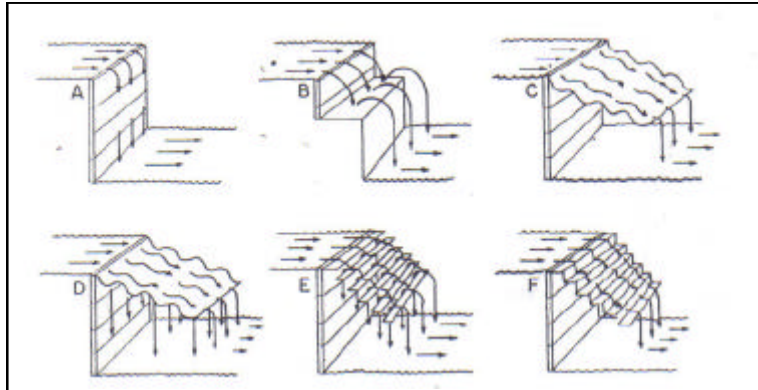


Figura 12: Diferentes tipos de aireadores de cascada. (Lawson, 1995).

1.2 - Oxigenadotes

La aplicación de oxígeno puro esta justificada:

- cuando la temperatura es elevada y la concentración de oxígeno a mantener es próxima a la saturación, porque entonces el rendimiento de los aireadores tiende a cero.

- cuando se quiere sobresaturar de oxígeno el agua sin riesgo de embolia gaseosa debida al nitrógeno.

1.2.1 - Fuentes de Oxígeno puro

Existen tres fuentes de oxígeno puro:

- oxígeno gaseoso de alta presión (comprimido): esta confinado en cilindros metálicos (98 a 99 % pureza) de 3 a 7 m³, muy costoso por lo tanto es utilizado como complemento de los otros.
- oxígeno líquido: el oxígeno líquido (LOX) tiene una pureza de 98 a 99 % de pureza, se produce a gran escala.

- oxígeno generado in situ: este puede ser generado por un proceso llamado adsorción presurizada (PSA), con un rendimiento de 0.5 a 10 m³ por hora, la pureza es de 85 a 95%, es costoso.

1.1.2 - Clasificación de los sistemas de oxigenación

Tubo en U y conos de aireación: funcionan de la misma manera que los mencionados anteriormente, pero con oxígeno puro.

Oxigenadores de Baja Carga (LHO): están siendo usados con más frecuencia, especialmente por su adaptabilidad a altos flujos usando un mínimo de carga o altura hidráulica, de ahí su nombre. Estas unidades consisten en una placa de distribución ubicada sobre cámaras rectangulares múltiples (de 5 a 10). El agua fluye sobre los bordes hasta el final del sistema tipo raceways o es bombeada hacia arriba desde un estanque de peces bajo techo a través de la placa dedistribución, y luego cae a través de las cámaras rectangulares (figura 13) (Timmons, 2002).

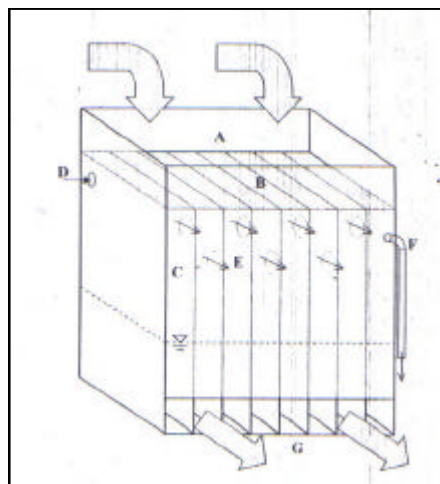


Figura 13: oxigenador de baja carga (LHO). (A) colector. (B) placa de distribución perforada. (C) cámaras de oxigenación. (D) entrada de

oxígeno. (E) perforaciones entre las cámaras. (F) salida de oxígeno. (G) salida de agua oxigenada. (Timmons, 2002).

2 - Filtración

La utilización de los filtros en la acuicultura, tiene como objetivo la eliminación de sustancias y organismos indeseables en el agua de cultivo.

Existen cientos de filtros diferentes en el mercado mundial. La selección del tipo correcto para un uso específico, requiere del conocimiento de los diferentes tipos de filtros y sus principios básicos de operación.

2.1 - Clasificación de los Filtros

2.1.1 - Filtros mecánicos

Se utilizan para eliminar partículas en suspensión, estos emplean las diferencias en el tamaño de la partícula en solución.

Cribas fijas: la forma más simple consiste en una criba fija puesta cruzando la trayectoria del flujo, de tal forma que el fluido pasa a través de ella (figura14). Las partículas más grandes que los orificios de la criba no pueden pasar a través de ella, acumulándose. Generalmente las cribas se utilizan para partículas mayores a 1.5 mm de diámetro.

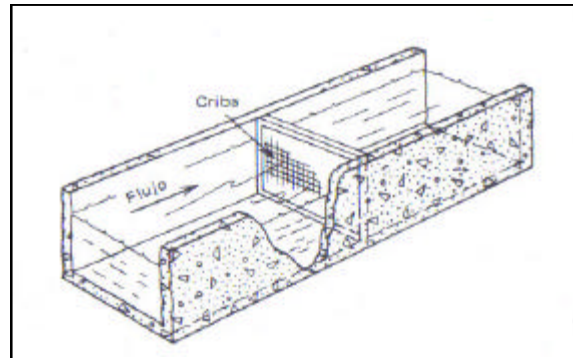


Figura 14: Criba fija, (Wheaton, 1993).

Cribas rotativas: es una criba que gira construida de tal forma que opera solo parcialmente sumergida en el agua que pasa a través de ella. La rotación continua ocasiona que una sección de ella filtre el agua y la otra sección por encima de la superficie alternadamente, donde pasa frente al sistema de retrolavado (figura 15). De esta forma el lavado es continuo y automático, permitiendo que esta opere continuamente con baja pérdida de carga y bajo requerimiento de mano de obra.

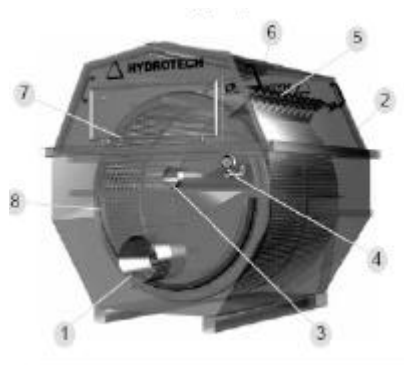


Figura 15: criba rotativa. 1. Entrada 2. Salida 3. Salida sedimento 4. Agua de enjuague 5. Inyector de agua 6. Unidad de manejo 7. Elementos del filtro. (Hydrotech).

Cribas rotativas tipo cadena: el sistema consta de dos cadenas laterales con placas de rejas suspendidas entre ellas (figura 16). El agua que entra por izquierda pasa a través de la criba y sale por la parte de atrás. El material se lleva hacia

arriba fuera del agua en la malla y se deposita en un canal de desecho. Comúnmente remueve materiales grandes, de 1,25 cm o mayores.

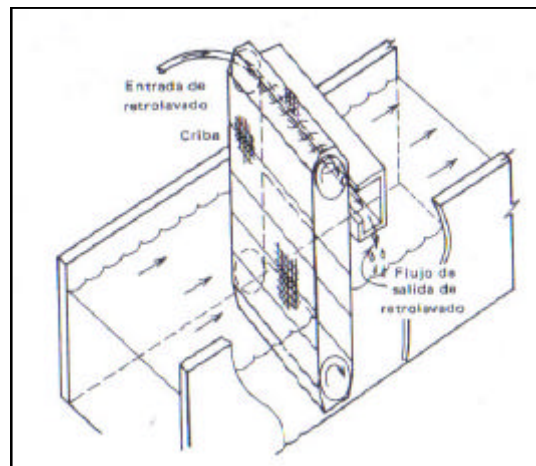


Figura 16: criba rotativa tipo cadena (Wheaton, 1993).

Cribas vibratorias: se usan comúnmente de dos tipos, de flujo axial y de flujo radial. El afluente entra por un extremo de la criba y el material particular se mueve a lo largo de la longitud de la criba por el movimiento vibrador de la misma (figura 17).

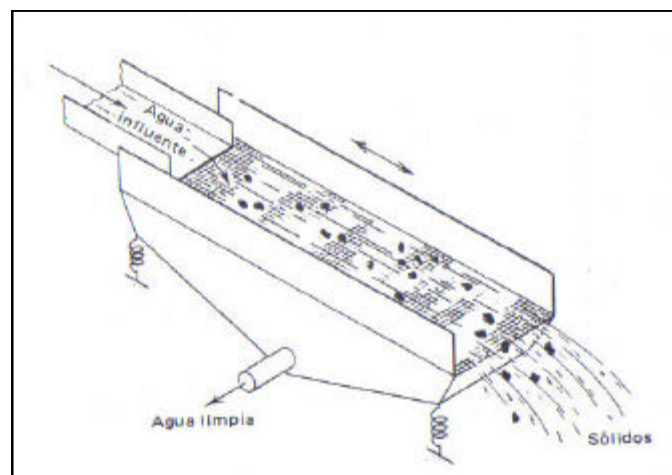


Figura 17: Criba rotatoria (Wheaton, 1993).

Filtros de arena: estos consisten en una capa de arena o cualquier otro material particulado a través del cual se fuerza el paso del agua, quedando así atrapadas partículas muy

grandes en los espacios entre grano y grano de arena. Los tamaños de partícula de arena varían de 2 a 0,02mm. Sin embargo, si se reemplaza la arena por roca, carbón, grava o cualquier otro material se extiende el tamaño de partículas hasta grandes dimensiones, se puede utilizar tierra de diatomeas, arcilla o materiales similares para reducir el tamaño de las partículas hasta micras.

Filtros de arena por gravedad: el agua que contiene al material particulado entra por la parte superior y pasa hacia abajo a través de las capas del filtro. Un tubo perforado o un suelo simplemente perforado proporciona el sistema de conexión del agua limpia. La gravedad proporciona la energía necesaria para inducir el flujo a través del filtro.

Filtros de arena por presión: son similares a los filtros de arena por gravedad, excepto que el filtro está recubierto en un contenedor a presión y la presión se aplica por medio de una bomba (ver figura 18).

Filtros de tierra de diatomeas: estos se utilizan principalmente donde la claridad del agua debe ser alta y/o donde la población de bacterias en el agua es baja, por lo que, en ocasiones, es preciso que el agua pase primero por un filtro de arena (figura 18). Existen cientos de tipos de tierras de diatomeas o aditivos de filtros de la misma, el más fino es capaz de remover partículas de hasta 0,1 μ m.

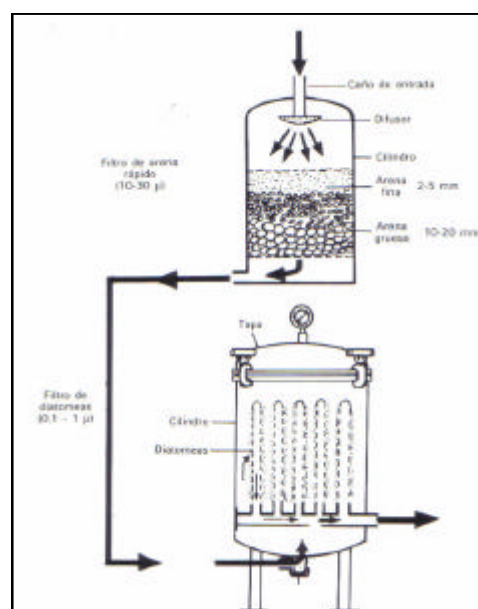


Figura 18: Filtro de arena a presión y filtro de diatomeas (Coll Morales, 1991).

2.1.2 - Filtros de gravedad

Utilizan la fuerza de gravedad para extraer partículas de un fluido (separación gravitacional). Existen tres técnicas de separación gravitacional: sedimentación, centrifuga y el hidroclona.

Sedimentación: es el proceso de permitir que el material particulado, que tenga una mayor densidad que el líquido que lo rodea, se asiente, bajo la fuerza gravitacional en un líquido estático o lentamente móvil.

Centrifugación: se usan para incrementar la fuerza gravitacional experimentada por las partículas durante su asentamiento, existen de muchos tipos. En el mercado se encuentran centrifugas de flujo continuo e intermitente, las primeras se utilizan en los sistemas acuáticos.

Hidroclona: El agua entra tangencialmente por la parte superior de la unidad, creando un espiral líquido (figura, 19). El flujo rotacional hace que el material particulado más pesado se desplace hacia afuera a las paredes de la hidroclona.

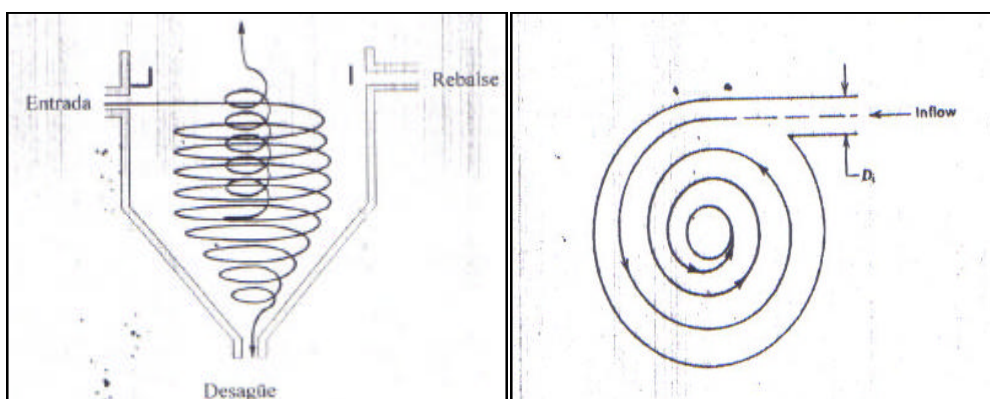


Figura19: Diseño de una hidroclona (Timmons, 2002).

2.1.3 - Filtros químicos

Son principalmente unidades de adsorción, esta se define como un proceso de acumulación o concentración de sustancia en una superficie o interfase.

Filtros de Carbono: Se emplean para eliminar productos orgánicos de excreción (Coll Morales, 1991).

Son de dos tipos: de flujo continuo e intermitente. El de tipo intermitente consiste en un tanque de tamaño apropiado que se llena con carbono activado granulado. El agua se bombea al tanque, comúnmente la mezcla agua-carbón se bate para incrementar la razón de adsorción. Se deja reposar la mezcla y el agua purificada se drena y el carbono se puede desechar o regenerar, es útil en sistemas pequeños, alto costo y mano de obra.

En los sistemas continuos de contacto puede haber uno de, al menos, dos tipos: el primero similar al anterior con la diferencia que el agua ingresa continuamente por un extremo del tanque, pasa por el carbono y sale por el extremo opuesto (figura 20). Por lo tanto el tiempo de contacto es una función de la razón del flujo y el volumen de la capa de carbono. Antes de entrar al filtro de carbón activado el agua deberá pasar por un filtro mecánico. El segundo sistema continuo de contacto aplica carbono molido a un flujo de agua. Después de un tiempo de contacto suficiente, el carbono con los materiales adsorbidos se separa del agua, este sistema elimina los grandes tanques de contacto. El carbón puede volver a activarse por calentamiento o mediante lavado con disolventes orgánicos.

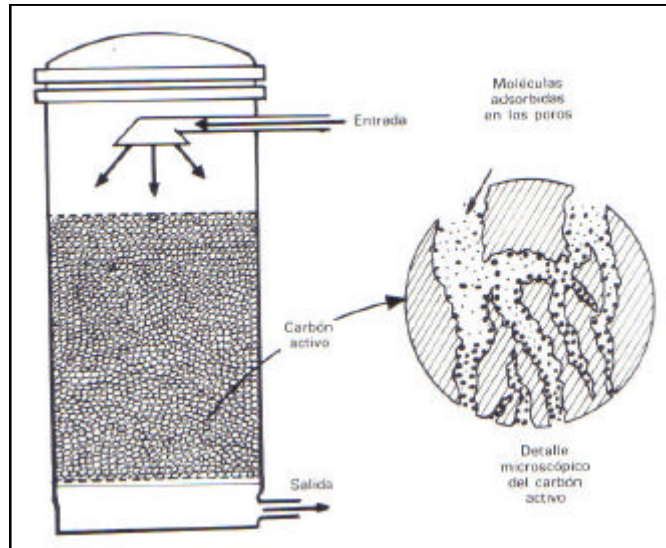


Figura 20: filtro de carbón activado. (Coll Morales, 1991).

Fraccionamiento de espuma: Se emplea para eliminar proteínas y lípidos mediante la producción de espumas. Básicamente su funcionamiento es el siguiente: Se inyecta aire a través de un difusor y sube por una columna mezclándose con el agua. El Oxígeno del aire oxida y coagula la materia orgánica disuelta. El material solidificado va formando una capa de espuma en la superficie que se traslada a un recipiente que se limpia periódicamente. (Coll Morales, 1991)

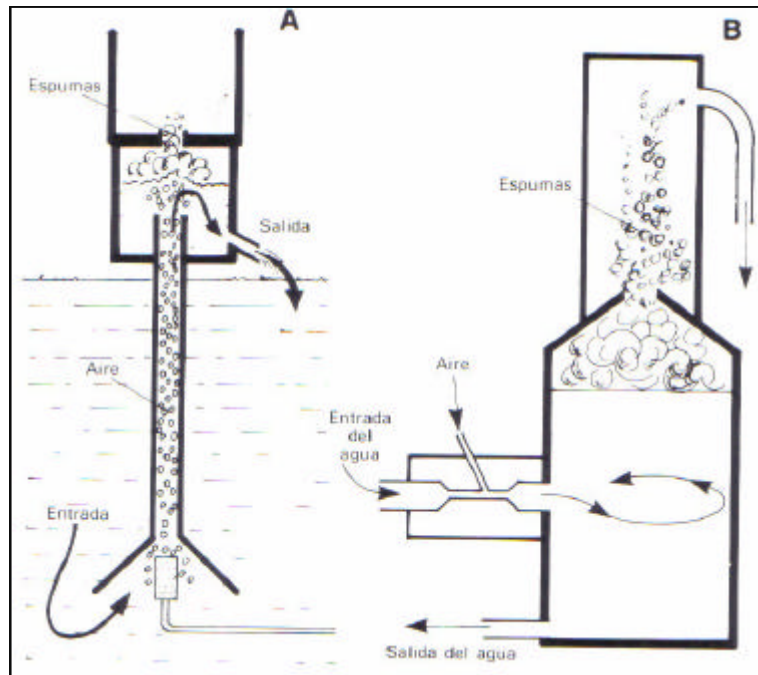


Figura 21: Fraccionador de espuma. A –escala de laboratorio. B –escala industrial. (Coll Morales, 1991).

2.1.4 - Filtros biológicos (Biofiltración)

Para el área ambiental de la acuicultura, el Nitrógeno es de central preocupación como componente de los residuos generados en la crianza de peces. En particular, los peces excretan varios productos nitrogenados residuales por difusión e intercambio iónico a través de las branquias, orina y heces. La descomposición de estos compuestos nitrogenados es especialmente importante en sistemas de recirculación de acuicultura debido a la toxicidad del amoníaco, nitrito y en algún grado el nitrato (Wheaton, 1985). El proceso de la remoción de nitrógeno amoniacal en un filtro biológico se denomina nitrificación, y consiste en la sucesiva oxidación del amoníaco primero a nitrito y finalmente a nitrato. También existe un proceso de reducción anaeróbica de nitrato a nitrógeno molecular gaseoso denominado desnitrificación.

Nitrificación: El amoníaco es el principal producto final del catabolismo de la proteína y es excretado por los peces como amoníaco no ionizado (NH_3) a través de las branquias. El amoníaco, nitrito y nitrato son todos altamente solubles en agua. El amoníaco existe en dos formas: no ionizado y ionizado (NH_4^+ amonio), la concentración relativa de estas formas en la columna de agua es principalmente una función del pH, temperatura y salinidad (Anthonisen et al., 1976). La suma de las dos formas se denomina amoníaco total o simplemente amoníaco (NAT). Un aumento del pH o la temperatura aumenta la proporción de la forma no ionizado del NAT. Para exposiciones de largo plazo, las concentraciones permisibles de NH_3 dependen de la especie y de la temperatura de cultivo, pero como regla general este debe mantenerse bajo 0.05mg/l.

El nitrito es un producto intermedio en el proceso de nitrificación del amoníaco a nitrato. A pesar que es usualmente convertido en nitrato tan pronto como se produce, la falta de oxidación biológica del nitrito resultará en niveles elevados de este que pueden ser tóxicos para los peces; debe ser constantemente monitoreado ya que los altos niveles podrían indicar una inminente falla del biofiltro. La toxicidad del nitrito se debe a su efecto en la capacidad de transporte del oxígeno de la hemoglobina de la sangre. Cuando este penetra en la corriente sanguínea, oxida al hierro en la molécula de la hemoglobina desde el estado ferroso (Fe^{++}) al estado férrico (Fe^{+3}). El producto resultante se denomina metahemoglobina, la que tiene un característico color marrón, llamada comúnmente "enfermedad de sangre marrón" (Tomasso et al., 1979).

El nitrato es el producto final de la nitrificación y es el menos tóxico de los compuestos. En sistemas de recirculación, los niveles de este son corrientemente controlados por recambios

diarios de agua. En sistemas con bajo recambio o altas tasas de retención hidráulica, la desnitrificación se ha tornado cada vez más en una medida importante de control.

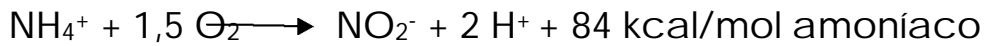
La filtración biológica puede ser una medida efectiva para controlar el amoníaco; en comparación con el recambio del agua para controlar sus niveles. Existen dos tipos de bacterias las que colectivamente ejecutan la nitrificación. Estas son generalmente catalogadas como bacterias quimioautótrofas, ya que obtienen la energía de la oxidación de compuestos inorgánicos a diferencia de las bacterias heterótrofas que obtienen energía oxidando compuestos orgánicos (Hagopian y Riley, 1998). Las bacterias de oxidación del amoníaco obtienen su energía oxidando amoníaco no ionizado a nitrito como: ***Nitrosomonas***, ***Nitrosococcus***, ***Nitrospira***, ***Nitrosolobus*** Y ***Nitrosovibrio***. Las bacterias de oxidación del nitrito al nitrato son: ***Nitrobacter***, ***Nitrococcus***, ***Nitrospira*** y ***Nitrospina***. Las bacterias nitrificantes son principalmente autotróficas obligadas, que consumen dióxido de carbono, y aeróbicas obligadas, que requieren oxígeno para desarrollarse. Las bacterias heterotróficas crecen significativamente más rápido que las bacterias nitrificantes y prevalecen por sobre estas compitiendo por espacio y oxígeno en los biofiltros cuando las concentraciones de materia orgánica disuelta y particulada son altas. Por ese motivo, es imperativo que la fuente de agua para los biofiltros sea mantenida tan limpia como sea posible con la mínima concentración de sólidos totales.

Etapas de la nitrificación: Es un proceso de dos etapas, donde primero el amoníaco se oxida a nitrito y luego el nitrito se oxida a nitrato. Los dos pasos de la reacción normalmente se llevan a cabo secuencialmente, ya que el primer paso tiene una tasa de reacción cinética más alta que el segundo paso, el proceso es normalmente controlado por la oxidación del

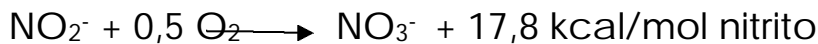
amoníaco y como resultado no existe una apreciable acumulación de nitrito.



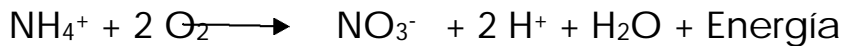
Nitrosomonas



Nitrobacter



Total



La puesta en marcha típica de un biofiltro hasta desarrollar su capacidad máxima se muestra en la figura 22.

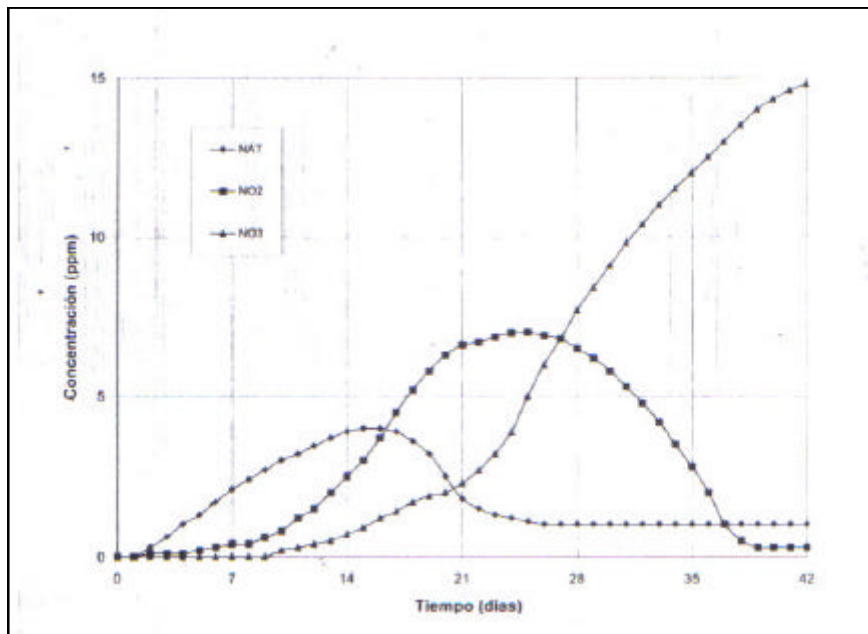


Figura 22: puesta en marcha de un filtro biológico hasta desarrollar su máxima capacidad. (Timmons, 2002).

Nótese que las concentraciones de amonio y nitrito llegan a un máximo los días 14 y 28 respectivamente, y la acumulación de nitrato se inicia después de 21 días. La adición de amonio y nitrito al sistema desde el primer día podría acelerar el

proceso. Por seguridad, en sistemas nuevos no debe colocarse peces antes de observar una caída en el nivel de nitrito, esto es una indicación de que el reactor está totalmente activado. La capacidad de remoción de amoníaco de los filtros biológicos es ampliamente dependiente de la superficie total disponible para el desarrollo de las bacterias nitrificantes. Para una eficiencia máxima, el medio de soporte usado debe balancear una alta superficie específica (superficie por volumen de unidad) con una suficiente fracción de hueco para un adecuado comportamiento hidráulico. El medio usado en los biofiltros debe ser inerte, no compresible, y no degradable biológicamente. Los más utilizados en biofiltros en acuicultura son arena, roca molida o ripio de río, algunas formas de material plástico o cerámico en forma de pequeños gránulos o grandes esferas, anillos o sillas de montar. Los biofiltros deben ser cuidadosamente diseñados para evitar la limitación por oxígeno o la carga excesiva de sólidos, DBO, o amoníaco.

Factores que afectan a la velocidad de nitrificación:

- **pH:** este afecta tanto la velocidad de nitrificación como la relación entre las formas de nitrógeno amoniacal ionizado y no ionizado. El efecto del pH sobre la tasa de nitrificación para biofiltros ha sido investigado por más de 60 años y todavía existe una amplia gama de pH informados como óptimos. Los resultados más recientes sugieren que el rango óptimo es de un pH desde 7.2 a 7.8 (Antoniou et al, 1990) los biofiltros nitrificantes han sido operados en un rango mucho más amplio desde 6 a 9 debido a la adaptación de las poblaciones bacterianas a las condiciones de operaciones reales. Los cambios rápidos en el pH también tienen efectos sobre el comportamiento de los biofiltros, si estos son de más de 0.5 a 1 unidades de pH en un minuto las poblaciones

bacterianas del filtro se estresaran y requerirán un tiempo para la adaptación a las nuevas condiciones ambientales.

- **Alcalinidad:** es una medida de la capacidad de amortiguación de pH (tampón o buffer) de un sistema acuático. Se determinó que para cada gramo de nitrógeno amoniacal reducido a nitrógeno de nitrato, se consumen 7.14 gramos de alcalinidad, esta perdida se puede reemplazar fácilmente por la adición de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) u otro suplemento de bicarbonato. La nitrificación es un proceso de formación de ácido, y si los sistemas de biofiltro están mal tamponados el pH del sistema bajara impactando el desempeño de este.

- **Temperatura:** esta juega un rol significativo en la velocidad de reacción de la nitrificación como lo hace en todas las cinéticas de reacciones químicas y biológicas. En general, las tasas de reacción de la nitrificación siguen una relación que por ejemplo una disminución de 10°C en la temperatura de operación, resulta en un 50% de reducción de tasa de remoción. En la aplicación practica, la temperatura en la cual opera un biofiltro esta normalmente determinada por los requerimientos de las especies en cultivo, y no por las necesidades de las bacterias del mismo.

- **Oxígeno:** este se torna frecuentemente en el factor limitante de la tasa de nitrificación de los biofiltros debido a los bajos niveles de entrada y por la competitiva demanda de las bacterias heterotróficas. Por cada gramo de nitrógeno amoniacal oxidado a nitrógeno nítrico, se requieren 4.57 gramos de oxígeno. Wheaton (1985) y Malone et al. (1998) mencionan que probablemente niveles de 2 ppm de oxígeno en el efluente del biofiltro es adecuado para mantener a un máximo la tasa de nitrificación.

- **Amoníaco:** la concentración del amoníaco como tal puede afectar directamente la tasa de nitrificación, en general la capacidad del biofiltro para oxidar nitrógeno aumenta proporcionalmente con el aumento de la concentración del amoníaco en un rango limitado de concentraciones. Se asume que la relación proporcional existe en el rango de 0 hasta al menos 3 ppm. La proporcionalidad en algún punto decrecerá y eventualmente el incremento de la concentración de NAT no agregara nitrificación adicional, este fenómeno se muestra en la figura 22 (Ebeling, 2000).

- **Salinidad:** similarmente a la temperatura y pH, las poblaciones de bacterias nitrificantes después de algún tiempo pueden aclimatarse a casi cualquier nivel de salinidad. Cambios rápidos mayores a 5 g/l producen shock a las bacterias nitrificantes y hace decrecer las velocidades de remoción del amoníaco y de nitrito (Hochheimer, 1990).

BIOFILTROS

Hay un considerable debate sobre cual es la tecnología de filtro biológico mas apropiada para aplicaciones acuícolas intensivas. El biofiltro ideal seria el que pudiese remover el 100% del amoníaco de la alimentación, no producir nitrito, requerir de poca superficie, usar un medio de soporte barato, no requerir presión de agua ni mantenimiento para operar, y no capturar sólidos. Desgraciadamente, no hay un biofiltro que cumpla con todas esas ideas, cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas y áreas de mejor aplicación.

Biofiltros Sumergidos: consiste en un lecho de medio de soporte sobre el cual se desarrollan las bacterias nitrificantes, a través de la cual pasa el agua residual ya sea en un flujo ascendente o descendente. Los sólidos se pueden acumular dentro del filtro sumergido, junto con la masa celular

producto del crecimiento de bacterias nitrificantes y heterotróficas, este proceso puede eventualmente bloquear los espacios vacíos, y entonces, en una operación a largo plazo, debe usarse algún mecanismo para desaguar los sólidos del filtro. Tradicionalmente se usan medios de gran tamaño, como roca partida uniformemente por sobre los 5 cm de diámetro o de plástico por sobre los 2.5 cm de diámetro, para proveer grandes espacios vacíos para prevenir el atascamiento.

Los inconvenientes de este tipo de filtros incluyen problemas de bajo OD y acumulación de sólidos, por estar muy recargados de materia orgánica y de la dificultad de retro-enjuague.

Una reciente variación del biofiltro sumergido, dio lugar a lo que se denominó biofiltro de lecho móvil o dinámico, en el que se usa un medio de soporte consistente en pequeñas formas de polietileno flotantes (7mm de largo y 10mm de diámetro), en una cama sumergida extremadamente bien aireada (Rusten et al., 1998). El medio tubular tiene aletas internas y externas para aumentar la superficie, y una sección interior dividida para proteger la biopelícula de su total remoción por la agitación del movimiento del lecho. La intensa aireación mantiene el lecho en permanente movimiento y minimiza los problemas de oxigenación y acumulación de sólidos.

Biofiltros Percoladores: operan del mismo modo que los sumergidos, excepto que el agua residual fluye hacia abajo por sobre el medio y mantiene la película bacteriana mojada, pero nunca completamente sumergida (Wheaton et al., 1991). Ya que los espacios vacíos son rellenados con aire en lugar de agua, las bacterias nunca entran en carencia de este.

Los filtros percoladores han sido ampliamente utilizados en acuicultura, porque son fáciles de construir y operar, son auto-aireantes, muy efectivos para desgasificar dióxido de carbono. Pero hoy en día la mayoría de los filtros usan un medio plástico, por su bajo peso, área específica y alta fracción de hueco. Estos no han sido utilizados en sistemas de agua fría de gran escala, probablemente a las bajas tasas de desnitrificación a esas temperaturas y la relativamente baja superficie específica del soporte. (Figura 23)

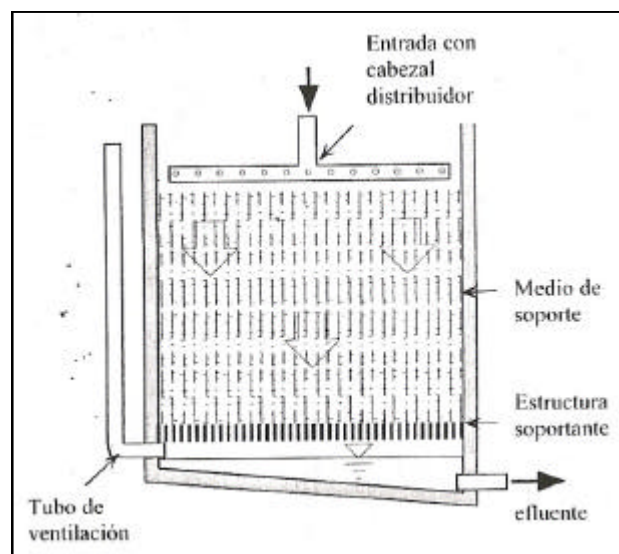


Figura 23: Esquema de filtro biológico percolador (Timmons, 2002).

Contactadores Biológicos Rotatorios (CRB): estos operan rotando el medio de soporte del filtro, que consiste en discos o tubos, a través de un estanque que contiene el agua residual. La película bacteriana en el medio rotatorio está expuesta alternativamente al agua residual y a la atmósfera, la que provee el oxígeno. El soporte está normalmente sumergido a un 40% del diámetro del tambor y es rotado a una velocidad de 1.5 a 2 rpm. Hoy en día los medios de soporte con más alta área de superficie específica son utilizados en la construcción de CRB, lo que reduce su

tamaño físico y aumenta la capacidad de remoción del amoníaco y nitrito. Los CRB se han usado en sistemas de recirculación total, porque requieren muy poca altura hidráulica, tienen costos bajos de operación, provee intercambio gaseoso, y pueden mantener un tratamiento medioambiental aeróbico consistente. Además tienden a ser más auto-limpiantes que los filtros de lecho fijo, la principal desventaja es la naturaleza mecánica de su operación y la ganancia sustancial de peso debida a la biomasa, resultando en una carga adicional en los ejes y rodamientos.

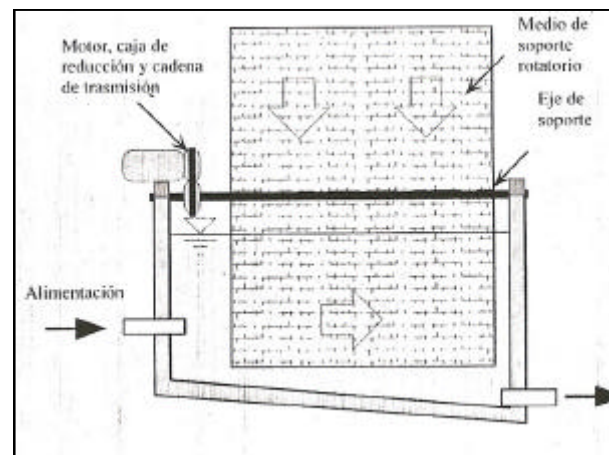


Figura 24: Esquema de un CRB. (Timmons. 2002).

Filtros de Gránulos Sintéticos: el filtro de gránulos flotantes (figura 25) se han convertido en el más popular de los biofiltros para el tratamiento de flujos pequeños a moderados, comúnmente menores que 1000 – 2000 L/min, son filtros de relleno expandibles que poseen un comportamiento de bioclarificación similar a los filtros de arena (Malone y Beecher, 2000). Funcionan como un dispositivo físico de filtración o clarificador extrayendo los sólidos (Chen et al., 1993), simultáneamente ofrece un substrato para el crecimiento de bacterias, por tanto también remueven los residuos del agua a través de biofiltración (Malone et al., 1993). Son resistentes al ensuciamiento biológico y

generalmente requieren de poco agua para retrolavado, este es agitado mediante burbujas o por un agitador mecánico, este procedimiento expande el lecho y separa los sólidos atrapados en los gránulos, estos son de polietileno con un diámetro de 3 – 5 mm. Las ventajas de estos filtros incluyen su diseño modular y compacto, fácil de instalar y operar, además pueden ser usados como filtros de doble propósito para la remoción de sólidos y la nitrificación.

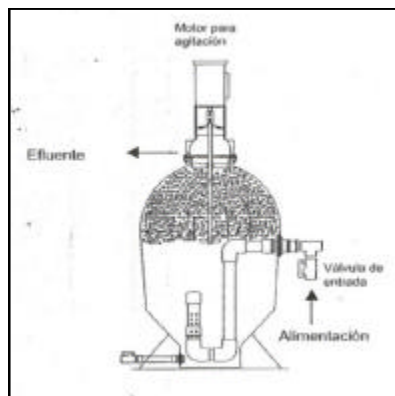


Figura 25: Esquema de un biofiltro de gránulos sintéticos (Timmons. 2002).

Biofiltros de Lecho Fluidizado: estos se han usado en muchas instalaciones de acuicultura comerciales de gran escala ($15\text{m}^3/\text{min}$ a $159\text{m}^3/\text{min}$, 400 a 4000 gpm). Su ventaja principal es que su medio de soporte tiene una superficie específica muy alta, normalmente de arena calibrada o gránulos de plástico muy pequeños. El biofiltro de lecho fluidizado es de fácil escalamiento a tamaños mayores, y su costo por unidad de tratamiento es bajo (Summerfelt y Wade, 1998, Timmons et al., 2000). Ya que el costo de inversión del biofiltro es aproximadamente proporcional a su superficie estos son muy competitivos en el costo y son relativamente pequeños comparados a otros biofiltros. Los biofiltros de lecho fluidizado son eficientes para la remoción del amoníaco; normalmente removiendo el 50 – 90% de este durante cada paso en aplicaciones de acuicultura de agua fría y

moderadamente fría (Summerfelt et al., 2001). Las tasas de nitrificación para los sistemas de agua fría van desde 0.2 a 0.4 kg de remoción de NAT/día/m³ de volumen de lecho expandido; en los sistemas de agua mas tibia, los rangos de la tasa de remoción de NAT van desde 0.6 a 1 kg/día/ m³ de volumen de lecho expandido (Timmons y Summerfelt, 1998). Las principales desventajas de los biofiltros de lecho fluidizado son su alto costo de bombeo de agua y el que no tiene capacidad de intercambio gaseoso como el de las torres de percolación y CBR. Otras desventajas son que pueden ser más difíciles de operar y tener serios problemas de mantenimiento, normalmente asociado a un pobre control de los sólidos suspendidos y el ensuciamiento biológico. En lechos fluidizados, el agua fluye a través de los espacios vacios (figura 26), ya sea hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de la gravedad específica del medio de soporte. El lecho se fluidiza cuando la velocidad del agua a través de la cama es suficiente para suspender el soporte en la corriente, produciendo la expansión de su volumen. La turbulencia resultante mejora las velocidades de transferencia de masa de oxígeno, amoníaco y nítrico hacia y desde la biopelícula adosada al soporte sólido, también remueve el exceso de biomasa sobre las partículas fluidizadas. El resultado es una alta capacidad de nitrificación, pero un alto gasto energético típico de esta tecnología.

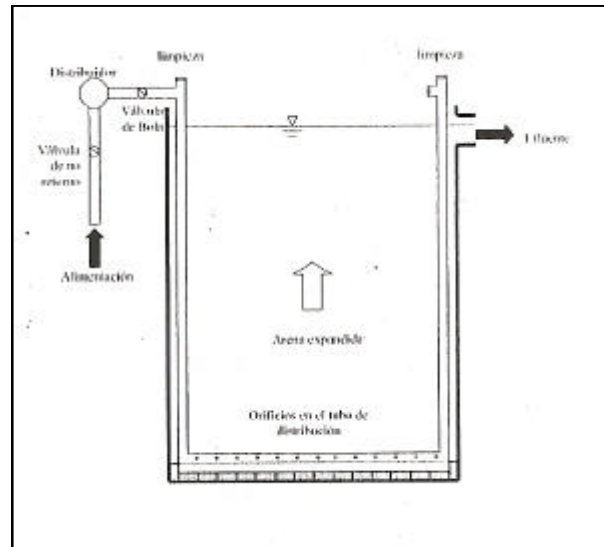


Figura 26: Esquema de un *Biofiltro de Lecho Fluidizado* (Timmons. 2002).

3 – Desinfección

La desinfección se emplea en acuicultura para eliminar bacterias y virus, principalmente, y otros seres vivos que pudieran interferir en los cultivos (hongos, fito y zooplancton, etc.), este debe utilizarse tras la filtración mecánica y biológica, ya que las partículas en suspensión y compuestos orgánicos, generalmente disminuyen la eficacia de estos.

La desinfección de las aguas pueden efectuarse por métodos físicos (UV y calor) o químicos (ozono, cloro).

Para que el desinfectante sea eficaz debe:

- ser capaz de destruir los microorganismos que pueda transportar el agua que se va a desinfectar.
- actuar en un corto período de tiempo, en las condiciones físicas, de pH y temperatura que tenga el agua y con las posibles variaciones en las concentraciones de microorganismos.
- no tener efectos perjudiciales para los animales acuáticos.
- ser fácil de manipular y almacenar.
- ser determinable su concentración en el agua rápidamente, de ser posible, automáticamente (Coll Morales 1991).

3.1 - Rayos Ultravioleta (UV)

Es el sistema más utilizado pero esta reservado a salas de incubación y alevinaje (bajos caudales) y principalmente para desinfectar aguas claras. Estos son solo aplicables en aguas poco cargadas de materia en suspensión (sobre todo orgánicas) o con bajo contenido de hierro. (Barnabe, 1991).

El efecto destructivo del UV sobre bacterias, hongos, virus y otros pequeños organismos están en función de la longitud de onda (λ), la más efectiva es de 2.600 Å. A ambos lados de este valor la efectividad bactericida decae rápidamente (Koller, 1965).

Existen tres tipos de lámparas de vapor de mercurio a baja presión: cátodo caliente, cátodo frío y lámparas germicidas de alta intensidad.

Según Maurel (1983), el dimensionamiento de un aparato de UV se hace principalmente en función de:

- El caudal a tratar.
- El grado de desinfección que se quiera obtener.

Generalmente se utilizan dos diseños para las unidades de desinfección UV:

- *Sistemas Suspendidos*: las lámparas se encuentran suspendidas en sentido perpendicular al flujo de agua que pasa por debajo de ellos (figura 27). Al minimizar la distancia de la superficie del agua a las lámparas se incrementa la intensidad. Si están muy cercanas a la superficie del agua que salpica crea problemas de mantenimiento.

Los parámetros principales para el diseño son: la profundidad del agua, la calidad del agua, la distancia de la lámpara al agua, el espaciamiento de las lámparas y la razón del flujo del agua en el sistema suspendido. Han sido diseñadas

prácticas unidades en suspensión para desinfectar aguas con turbiedad de 240 ppm o más.

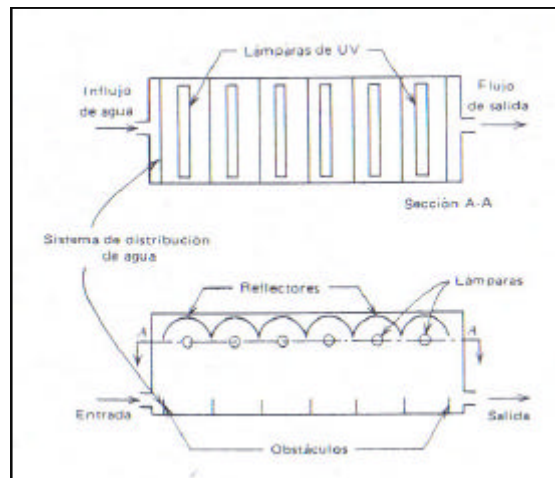


Figura 27: unidad de desinfección UV suspendida. (Wheaton, 1993).

- *Sistemas Sumergidos:* se utilizan con una lámpara sumergida o rodeada por agua. El agua entra por la derecha y sale de la cámara (lámpara de UV) de tratamiento por la izquierda (figura 28).

En estos sistemas aprovechan toda la emisión de la lámpara, excepto la pequeña pérdida que hay en la transmisión y reflexión del cristal.

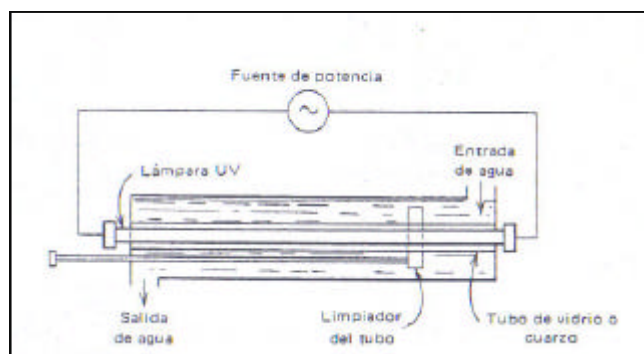


Figura 28: sistema de tratamiento UV sumergido (Wheaton, 1993).

3.2 – Calor

El agua puede ser esterilizada o desinfectada calentándola a temperatura suficientemente alta y manteniendo esta

durante el tiempo deseado. Así, la mortalidad bacteriana esta en función de la temperatura y el tiempo que se mantiene esta, así como también de la especie de microorganismo que se ha de eliminar.

La principal desventaja de utilizar calor para desinfectar agua es el requerimiento de energía para el proceso, ya que no solo se utiliza energía para calentar sino también para enfriar, lo que implica un costo elevado.

3.3 - Ozono (O₃)

Este ha sido reconocido como "agente purificador" desde 1782 (Phillips y Hanel 1960). El ozono es una molécula triatómica de oxígeno, que se obtiene al hacer pasar aire u oxígeno entre dos electrodos sometidos a una fuerte diferencia de potencial. Una vez disuelto en el agua reacciona con la materia orgánica oxidándola rápidamente (ozonización).

La efectividad del ozono esta en función del tiempo de contacto, de la dosis, temperatura, pH y materia orgánica. El ozono tiene afinidad tanto por la materia orgánica como la inorgánica (hierro y manganeso). Concentraciones de 0.1 – 0.5 ppm durante 5 – 15 segundos elimina las bacterias, la mayor parte de las esporas, plancton, larvas de insectos, crustáceos y larvas de peces. Hasta el momento, la utilización de ozono en acuicultura, se ha visto limitada por el problema de la toxicidad del ozono residual, la trucha arco iris muere en cuatro horas con concentraciones de 0.01 – 0.06 ppm (Rosenlund 1975). Es necesaria su completa eliminación, bien por evaporación o mediante un filtro de carbón activado.

3.4 – Cloro

Es un desinfectante tóxico para los animales acuáticos a muy bajas dosis, lo cual resulta riesgoso utilizarlo. Generalmente se emplea el gas Cl₂ y el hipoclorito de sodio o calcio como

fuente. Así el uso del cloro como desinfectante en sistemas de cultivo requiere que se de suficiente tiempo de contacto para que sea efectivo, seguido de la eliminación de este. Puede ser eliminado mediante técnicas químicas (tiosulfato de sodio y sales ferrosas) o de adsorción (carbono activado). La aireación también puede ser utilizada para eliminar el cloro.

C - Sistemas de Recirculación para la Acuicultura (SRA)

Es la tecnología que permite el cultivo de peces a mayor intensidad. En el SRA, el ambiente es totalmente controlado, el agua circula a través del sistema, y solamente un pequeño porcentaje de agua es reemplazado diariamente. La temperatura, salinidad, pH, alcalinidad, composición química y el oxígeno son monitoreados y continuamente controlados. Los residuos sólidos son filtrados y removidos, se incorpora oxígeno para mantener concentraciones suficientes para la densidad de peces en cultivo, Y por ultimo el efluente es tratado en biofiltro para la conversión biológica del nitrógeno amoniacal a nitrato (Timmons, 2002) (figura 29).

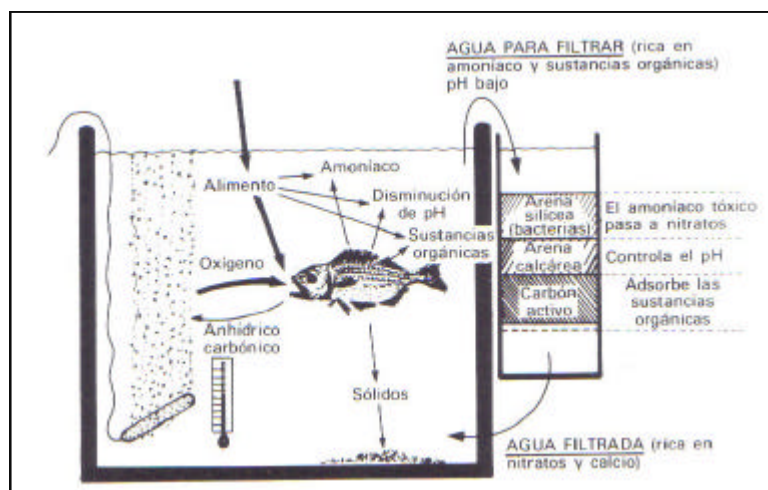


Figura 29: esquema de flujos en un SRA a escala de laboratorio (Coll Morales, 1991).

El SRA es necesario cuando:

- hay déficit de agua y aumenta la auto-contaminación.
- cuando hay que tratar el agua (calentamiento por ejemplo)

y el reciclaje representa una disminución del costo energético, es el caso de las salas de incubación y alevinaje.

Un sistema de recirculación consiste en los siguientes componentes: una cierta cantidad de depósitos de agua para los peces, una unidad de tratamiento del agua, unas bombas y unas tuberías para el suministro de agua así como para su retorno. El corazón del sistema es la unidad de tratamiento de agua.

Diseñar y operar un SRA requiere de una sólida comprensión de las operaciones unitarias y procesos incluidos; la falla de cualquiera de estas operaciones puede ocasionar que falle la totalidad del sistema, usualmente resultan en la muerte de los peces en el proceso (Timmons, 2002).

En la actualidad existen diversos diseños de SRA, por ejemplo los siguientes:

- Sistema de recirculación sencillo para cría de peces en tanques (figura 30):

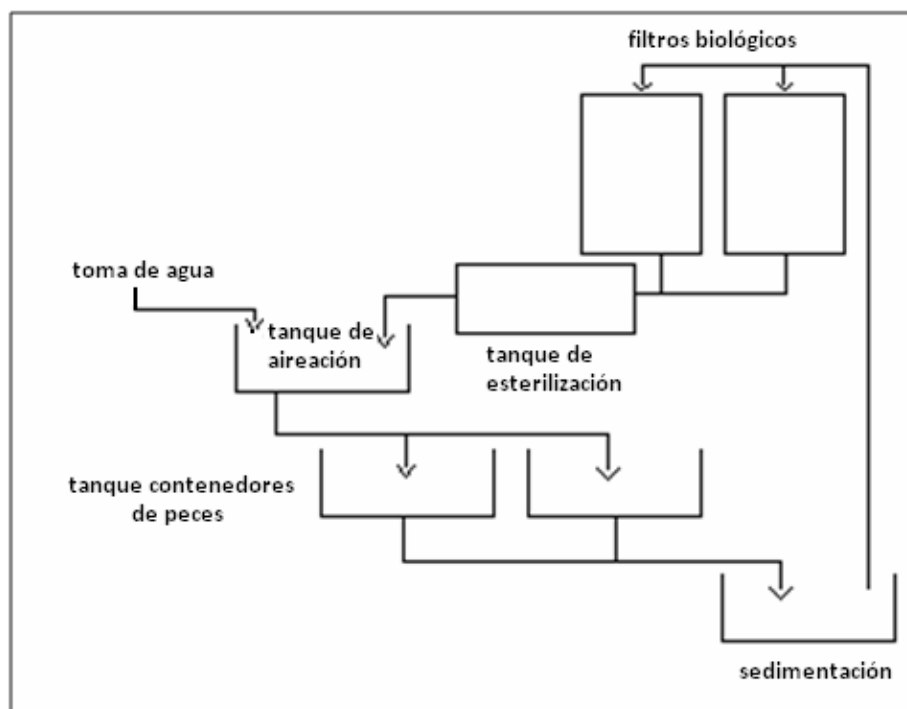


Figura 30: Esquema de un SRA sencillo. (Brown, 2000).

-Sistema de recirculación mas complejo denominado "Hesy" (figura 31):

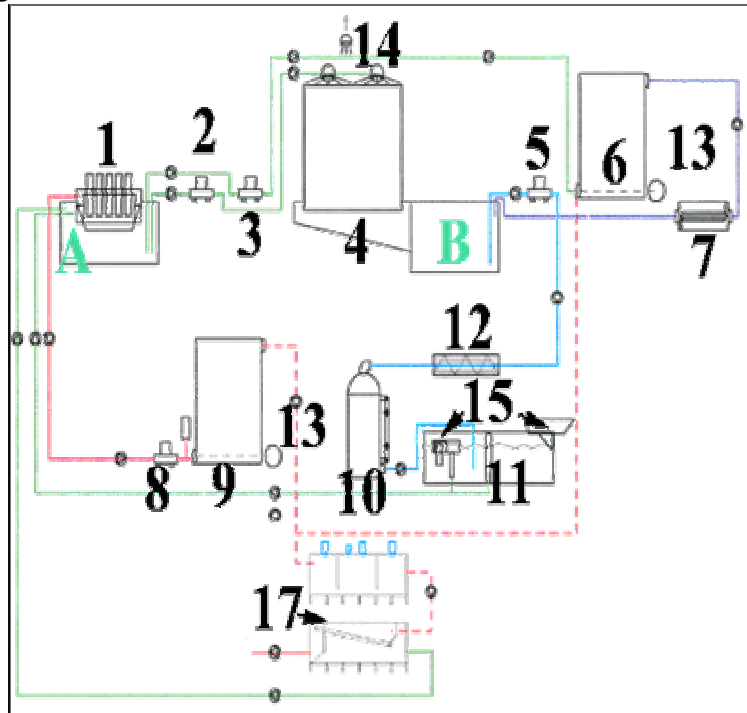


Figura 31: SRA mas complejo: 1) Filtro de Disco/Tambor, 2) Bomba para surtidores, 3) Bomba para filtro sumergido ("up-flow"), 4) Filtro de surtidores 5) Bomba para el reactor 6) Filtro sumergido "up-flow", 7) Instalación U.V. 8) Bomba para filtro 9, 9) Filtro desnitrificador 10) Reactor de oxígeno 11) Depósito de peces 12) Calefacción/refrigeración 13) Soplador 14) Ventilador 15) Comedero 16) Cepilladora 17) Separadora de fangos / Unidad desfosfatadora A) Pozo de bombeo debajo del filtro de tambor/disco B) Pozo de bombeo debajo del filtro de surtidores/ "up-flow". (<http://www.masalles.com/>)

D - Consideraciones Finales

Por lo expuesto en este trabajo, consideramos que el tratamiento del agua en toda su dimensión tiene un rol más significativo en cultivos con tendencias intensivas, debido a que el control y monitoreo de la calidad del agua es de vital importancia en el éxito o fracaso de un cultivo con fines comerciales.

Respecto al sistema de recirculación en acuicultura, en la actualidad cada vez es más utilizado, ya que el agua es un recurso de vital importancia no solo para la acuicultura misma

sino para las demás actividades productivas, por esa razón el concepto de reutilización va de la mano con un concepto más abarcador, el del uso sustentable del recurso.

Cabe destacar que tanto en el sistema de tratamiento de agua como en el SRA se debe contar con el conocimiento y la capacitación que estos requieran. Para la utilización y diseño de estos se requiere manejar ciertos conceptos, lo más amplio posible como: construcciones hidráulicas, físico-química del agua, etc.

E – Bibliografía

Barnabé Gilbert. 1991. Acuicultura 1. Ediciones Omega, SA. Barcelona España. pp. 29 -153

Coll Morales J. 1991. Acuicultura marina animal. Ediciones Mundi-Prensa. 3ª Edición. Madrid España. pp. 522-567.

Egna y Boyd. 1997. Dynamics of pond Aquaculture. Ed CRC PRESS. EEUU.

FAO. 2006. Fisheries Technical Papers T500. www.fao.org

Lawson Thomas, B. 1995. Fundamentals of Aquacultural Engineering. Ed. Chapman & Hall. New York EEUU. pp. 294-309.

Shepherd J. Sistemas de Acuicultura. Editado por Brown L, 2000. Acuicultura Para Veterinarios. Producción y clínica de peces. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza (España). pp. 49-51.

Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W, Summerfelt S.T. y Vinci B.J. 2002. Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Editado por Fundación Chile. Santiago Chile. pp. 207-258; 278-279.

Wheaton Frederick, W. 1993. Acuicultura "Diseño y construcción de sistemas". Ed AGT editor, SA. DF México. pp. 460-675.