

## **a) TÍTULO**

Conjunto de Reactores Flotantes de Biopelícula con Aireación mediante Chorros Emergidos

## **b) SECTOR TECNOLÓGICO**

Esta invención está relacionada con la ingeniería mecánica aplicada a procesos de tratamiento de aguas residuales en lagunas de oxidación, y de recuperación de cuerpos de agua eutrofizados.

## **c) TECNOLOGÍA ANTERIOR**

Las aguas residuales que afluyen a las corrientes contienen gran cantidad de materia orgánica, cuyos componentes son principalmente el carbono, que está constituido esencialmente por carbohidratos y es el principal constituyente de la demanda biológica de oxígeno  $DBO_5$ , y el nitrógeno, que procede principalmente de las proteínas. En el proceso de descomposición de estas sustancias, las bacterias heterotróficas consumen los compuestos de carbono, agotando el oxígeno disuelto en el agua. Estas condiciones anaeróbicas impiden la presencia de bacterias autotróficas aeróbicas que pueden remover el nitrógeno, y la descomposición de los compuestos nitrogenados origina ion amonio y amoníaco. Este último es un gas oloroso que contamina el aire, y que se disuelve en el agua generando toxicidad para la fauna acuática. Algo similar ocurre con los compuestos de azufre, que en condiciones anaeróbicas originan anhídrido sulfuroso, que es un gas con impactos ambientales similares a los del amoníaco. Esta contaminación orgánica ocasiona la pérdida en la calidad del agua y del aire, y dificulta su aprovechamiento para a los diversos usos urbanos, agrícolas e industriales. Esta contaminación actualmente afecta a gran parte de las fuentes de agua del país.

La afluencia de las corrientes contaminadas con estos nutrientes a las lagunas naturales y humedales produce el fenómeno de eutrofización, que consiste en un rápido crecimiento de las algas, que oxigenan el agua a través de la fotosíntesis ocasionada por la radiación solar que reciben. Esto produce lo que en inglés se conoce como 'algal bloom', que consiste en la proliferación de algas y de la fauna acuática asociada, que periódicamente presentan mortandades masivas, generando una alta concentración de materia orgánica en descomposición que consume todo el oxígeno disuelto en el agua. Las condiciones anaeróbicas creadas asfixian la fauna acuática y la intoxican con amoníaco y anhídrido sulfuroso, lo cual extiende la mortandad y la concentración de estos contaminantes.

Los conjuntos de reactores de la invención se aplican tanto al mejoramiento del tratamiento de aguas residuales realizado mediante lagunas de oxidación, como a la recuperación in situ de cuerpos de agua eutrofizados. A continuación se describe el estado de la técnica en ambos casos.

Los tratamientos biológicos más utilizados en el país se basan principalmente en procesos anaeróbicos que remueven principalmente  $DBO_5$ , pero que producen grandes cantidades de amoníaco, generando efluentes pestilentes y tóxicos para el medio ambiente.

También se utilizan con este propósito las lagunas de oxidación, que son de tres tipos. En las lagunas anaeróbicas se remueve esencialmente  $\text{DBO}_5$ . En las lagunas facultativas, que tienen menor profundidad y mayor área, se presenta adicionalmente la remoción de nitrógeno. Los mecanismos para dicha remoción son la volatilización del amoníaco, la asimilación a través de algas, y los procesos nitrificación y desnitrificación a través de bacterias aeróbicas y anaeróbicas respectivamente. La volatilización de amoníaco en las lagunas facultativas causa olores pestilentes que afectan las zonas donde se encuentran, convirtiendo la contaminación acuática en una contaminación atmosférica que afecta grandes áreas.

En las lagunas facultativas, se produce una oxigenación del agua debido a la acción del viento y de las algas, en las cuales se produce fotosíntesis a partir de la radiación solar. Esta radiación también es efectiva para controlar patógenos. La eficiencia en la remoción de  $\text{DBO}_5$  en las lagunas facultativas puede superar el 80%.

Por otra parte, los procesos de nitrificación en las lagunas facultativas son limitados por la escasez de superficies de soporte, que son necesarias para el desarrollo de las bacterias nitrificantes, como se explica posteriormente.

Las lagunas de maduración se colocan a continuación de las facultativas para remover nitrógeno utilizando la fotosíntesis y el viento, y patógenos utilizando la radiación solar. Para ello se diseñan con escasa profundidad (del orden de 1 a 1.50 m), y con periodos de retención de más de 5 días. Lo anterior implica la utilización de áreas bastante grandes, por lo cual no son muy utilizadas actualmente.

En las lagunas facultativas y de maduración, gran parte de la carga carbonosa y nitrogenada se convierte en algas, que salen junto con el efluente, y se descomponen generando problemas de contaminación en las corrientes donde desemboca. En algunos estudios se recomienda controlar las algas mediante un proceso de mezcla que evite la estratificación del agua, similar a la que realiza el proceso de recirculación a través de los reactores de la invención.

De acuerdo a la revisión de la literatura sobre el estado de la técnica, existe el consenso de que las lagunas de oxidación son sistemas de tratamiento confiables, con una importante capacidad para remover carga orgánica y patógenos, y que tienen bajos costos de operación y mantenimiento. Se recomiendan especialmente para poblaciones y ciudades pequeñas. Sin embargo, se enfatiza que las limitaciones en esta tecnología son la gran cantidad de área que ocupan, y la generación de olores por emisiones de amoníaco y anhídrido sulfuroso, que las hace inviables para zonas muy pobladas. Con los conjuntos de reactores flotantes se pretende suplir estas deficiencias.

En este momento existen en el país centenares de lagunas de oxidación para tratamiento de aguas municipales, que requieren con urgencia mejorar su capacidad para atender una población creciente, y controlar olores que afectan a las zonas vecinas, pero que no disponen de áreas para su ampliación debido al desarrollo de la zona, al incremento del costo del suelo, y a la oposición de las comunidades debido a la contaminación atmosférica. Los conjuntos de reactores flotantes desarrollados en la invención permitirían aumentar la capacidad de las lagunas de oxidación para remover eficientemente el nitrógeno y otros nutrientes, y además controlar olores.

Las otras alternativas para el tratamiento de aguas residuales son las plantas compactas que remueven tanto carbono como nitrógeno. A continuación, se resume el estado de la técnica respecto a estas plantas, las cuales generalmente incluyen la remoción de  $\text{DBO}_5$  mediante procesos anaeróbicos, que realizan también la desnitrificación, y la nitrificación mediante procesos aeróbicos, que remueven nutrientes como el fósforo y el azufre además del nitrógeno amoniacal. También existen plantas de aireación extendida

en los que todos los contaminantes se remueven mediante procesos aeróbicos, en forma poco eficiente energéticamente.

Los procesos de nitrificación utilizan bacterias autótrofas de los géneros nitrosomas y nitrobacter, que consumen oxígeno y convierten el nitrógeno y otros nutrientes en biomasa. Para facilitar el desarrollo de estas bacterias se recomiendan los sistemas de biopelícula, en los cuales se encuentran bioportadores o sustratos que proporcionan una superficie sólida, donde estas bacterias puedan adherirse, formando una capa de biomasa sobre dicha superficie llamada biopelícula.

Las bacterias nitrificantes no se desarrollan adecuadamente en suspensión, como sí sucede con las bacterias heterótrofas que remueven carga carbonosa, y por eso necesitan los sistemas de biopelícula. En estos sistemas también se desarrollan las bacterias que consumen carga carbonosa, las cuales tienen tasas de crecimiento más elevadas y tienden a desplazar las bacterias nitrificantes de la superficie de los bioportadores o del sustrato. Por lo tanto, para remover eficientemente nitrógeno se requiere remover previamente  $\text{DBO}_5$  por otros medios, o disponer de superficies de soporte bastante grandes para remover tanto carbono como nitrógeno.

Los procesos de biopelícula pueden ser de lecho fijo, tales como los filtros percoladores y los biodiscos, donde el agua fluye a través del sustrato que está inmóvil o gira. También se encuentran los procesos de lecho móvil, donde el sustrato está formado por partículas inertes que se mantienen en suspensión en el agua, llamadas bioportadores. En los sistemas de lecho móvil, generalmente el proceso de aireación del reactor mantiene en suspensión los bioportadores debido a la turbulencia que genera, pero en ocasiones se requiere de dispositivos de mezclado adicionales. La biopelícula crece sobre los bioportadores, y periódicamente se desprende en forma de un lodo aeróbico que se decanta. Este lodo es recirculado para aumentar la biomasa en el reactor, o es conducido a sistemas anóxicos para su desnitrificación.

La biopelícula se desarrolla principalmente en las cámaras internas o en concavidades que tienen los bioportadores, pues la cara externa se encuentra sometida a la abrasión producida por los choques que se producen entre ellos, la cual dificulta el crecimiento de bacterias allí.

Existen numerosos diseños patentados de bioportadores, que tienen en común la densidad próxima a la del agua para darles movilidad en ella, la resistencia a la abrasión, y la de ofrecer una elevada área específica (superficie de soporte de biomasa por metro cúbico de bioportadores). Las principales limitaciones en su uso son la obstrucción que ocurre en las cámaras internas en algunos de ellos, y su elevado costo, que llega a representar una porción sustancial del costo de los proyectos.

Los sistemas de biopelícula actualmente tienen mejor aceptación que los sistemas de lodos activados tradicionales, puesto que en ellos se logra una acumulación de biomasa por unidad de volumen muy superior, lo que se traduce en reducción en el tamaño de los reactores, y mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno, lo cual implica menores costos de aireación. Además, ofrecen mayor estabilidad y confiabilidad en su funcionamiento, sin los riesgos de pérdida de biomasa por arrastre hidráulico que tienen los reactores de lodos activados.

Por otra parte, los reactores de lecho móvil tienen la ventaja de que no se obstruyen con frecuencia como los de lecho fijo, siempre y cuando se mantengan las condiciones de mezcla y turbulencia en su interior para realizar un lavado de los excesos de biopelícula, los cuales dificultan el proceso de nitrificación y pueden obstruir la cámara interna que tienen los bioportadores.

En el mercado se encuentra numerosas empresas que ofrecen bioportadores fabricados generalmente en plástico, que tienen densidades similares a las del agua para que se mantengan suspendidos con la turbulencia generada por la aireación, y que ofrecen una importante área específica, que permite el soporte de gran cantidad de microorganismos en tanques de volumen limitado. La mayoría de los bioportadores tiene la forma de ductos con múltiples celdas, y recientemente han salido al mercado bioportadores en forma de hojuelas con concavidades.

Las plantas de tratamiento generalmente incluyen un tanque a la entrada donde ocurre de digestión anaeróbica de las aguas residuales afluentes. A continuación, el caudal sale hacia la unidad de nitrificación y luego continúa hacia el decantador, donde la biopelícula erosionada se decanta en forma de lodo. Este lodo se bombea hacia el tanque anaeróbico a la entrada, donde se produce su desnitrificación. Este proceso consume una cantidad importante de carbono, que se suma al que se remueve en el proceso anaeróbico en este tanque.

En ocasiones, parte del lodo aeróbico se recircula hacia la unidad de nitrificación para aumentar la biomasa allí, generándose un sistema de lodos activados paralelo al de biopelícula, como es el caso de IFAS (siglas de su denominación en inglés Integrated Fixed Film Activated Sludge). El lodo estabilizado se acumula en el tanque anaeróbico, desde donde se lleva a los procesos de secado y de disposición final, para lo cual se requieren estructuras y equipos que tienen costos de inversión y operación importantes.

Las bacterias que consumen carbono son más agresivas que las que consumen nitrógeno, y cuando el carbono abunda, desplazan a éstas de los bioportadores. Entonces para realizar procesos de nitrificación eficiente, es necesario tener una relación C/N, entre los compuestos de carbono y el nitrógeno amoniacal, lo más baja posible. Por lo tanto, la remoción de carbono en una unidad anaeróbica es fundamental para asegurar un proceso de remoción de nitrógeno eficiente. El proceso de desnitrificación que ocurre en dicha unidad consume carbono y contribuye a su reducción.

En las lagunas de oxidación provistas de conjuntos de reactores de la invención, se llevan a cabo los procesos de tratamiento descritos anteriormente en forma más eficiente y económica. El caudal afluente entra por el fondo de la laguna, cuyo gran volumen y tiempo de retención facilitan el desarrollo de un proceso anaeróbico bastante eficiente, que remueve gran parte del carbono que entra a la planta.

El agua, con una relación C/N bastante baja, es captada por la tubería perforada de succión de la bomba, que se encuentra suspendida sobre la zona anaeróbica, y llevada a los reactores de biopelícula flotantes, donde se realiza el proceso de nitrificación. Este proceso genera un lodo aeróbico que sale del reactor por las paredes en malla, y cae hacia el fondo de la laguna, donde se produce el proceso de desnitrificación en condiciones anaeróbicas. Esto ocurre sin necesidad de utilizar una bomba de recirculación de lodos que se requiere normalmente en las plantas existentes. El único equipo electromecánico empleado es la bomba, la cual haría tanto el proceso de aireación por chorros emergidos, como la recirculación del agua en la laguna.

Otra diferencia importante es que, mientras en las plantas de tratamiento tradicionales las diversas unidades se encuentran una continuación de la otra, en el sistema propuesto por la invención el proceso aeróbico estaría ubicado sobre el anaeróbico, economizando espacio.

A continuación, se describen las tecnologías existentes para realizar procesos de nitrificación in situ en lagunas, similares a las que realizan los conjuntos de reactores de la invención. La tecnología más antigua es el Contactor Biológico Rotatorio, llamado

RBC por sus siglas en inglés Rotating Biological Contactor, que consiste en un tambor giratorio que contiene un estrato plástico en su interior, que alberga la biopelícula. Este tambor se encuentra parcialmente sumergido, de tal forma que al girar, la biopelícula se encuentra expuesta alternativamente al agua y al aire. El RBC no genera un proceso de recirculación y mezcla dentro del cuerpo de agua. Para utilizarlo en lagunas, es necesario dividir las lagunas en canales mediante pantallas, y los RBC se instalan a través de éstos, de tal forma que intercepten todo el flujo. Esta solución es costosa y actualmente tiene poca utilización en las lagunas.

Recientemente se han desarrollado otros equipos flotantes para tratamientos de lagunas in situ mediante biopelículas. Uno de ellos es llamado AquaMat, desarrollado por Nelson Environmental Inc, que consiste en biopelículas de formadas por cintas, ubicadas en zonas aireadas por difusores de burbujas o aspiradores aireadores. La firma Environmental Dynamics Inc desarrolló otro sistema de tratamiento, donde el agua asciende debido arrastre proporcionado por difusores de burbujas a través de un módulo flotante, el cual contiene un decantador lamelar, que actúa como reactor de lecho fijo, propiciando la nitrificación, y la concentración y decantación de lodos producidos en el fondo de la laguna. Estos reactores se comercializan con las marcas registradas ATLAS-IS e IS Solutions.

Otro equipo flotante es el sistema TVT BioReactor, desarrollado por la firma TVT US Corporation y protegido con la patente US 6231766, que consiste en reactores flotantes de lecho fijo, aireados mediante aspiradores aireadores provistos de impulsores helicoidales, que generan un proceso de recirculación de corto alcance.

Un cuarto equipo flotante desarrollado por Eros G. Kaw está amparado por las patentes US 8066873 B2 y EP 2658815. Este reactor consiste en una cámara flotante que contiene una película de lecho móvil, que es aireada por una manguera perforada alimentada por un soplador, con la cual se generan burbujas, que además de airear el agua la recircula a través del reactor.

El reactor propuesto en la invención se diferencia de todos los reactores flotantes citados en el compendio del estado de la técnica en los siguientes puntos:

- La aireación se hace mediante chorro emergido.
- El único equipo electromecánico que se utiliza es la bomba, que realiza funciones de aireación y de recirculación simultáneamente.
- La recirculación realizada por el conjunto de reactores cubre un área mucho más grande que las alternativas existentes, y permite mantener las condiciones aeróbicas cerca de la superficie, y anaeróbicas cerca del fondo. Esto facilita los procesos de digestión anaeróbica y el control de olores.

Actualmente, una de las alternativas más utilizadas para mejorar la capacidad de tratamiento de las lagunas existentes y remover nitrógeno amoniacal, es la laguna aireada de mezcla completa. Allí se implementa un sistema de aireación, con el cual se genera una mezcla completa de la biomasa suspendida en todo el cuerpo de agua. En ocasiones se requiere la ayuda de mezcladores para ello. La laguna aireada generalmente va precedida de una laguna anaeróbica para remover la mayor parte de la carga orgánica carbonosa. También debe tenerse otra laguna a continuación para decantar y digerir los lodos producidos.

En la laguna aireada, las bacterias nitrificantes no cuentan con suficientes áreas de soporte lo cual limita su desarrollo, y por lo tanto el proceso de nitrificación es ineficiente. Además, los lodos aeróbicos que salen de hacia la laguna de sedimentación no tienen procesos adecuados de desnitrificación, puesto que allí no cuentan con las fuentes de carbono requeridas.

Los conjuntos de reactores de la invención también tienen su aplicación en la recuperación de cuerpos de agua naturales que presenten problemas de eutrofización. Las medidas usuales para la recuperación de los cuerpos de agua eutrofizados consisten controlar la afluencia de aguas residuales a éstos, y en remover el nitrógeno, fósforo y otros nutrientes de las corrientes afluentes mediante sistemas de tratamiento de aguas. También se ha experimentado con el retiro los lodos del fondo de los cuerpos de agua, y la remoción de la biomasa vegetal y animal, pero estas medidas son costosas e ineficientes.

A continuación, se resume el estado de la técnica respecto al sistema de aireación propuesto en la invención. De acuerdo a los importantes estudios que se han realizado desde 1.966, la transferencia de oxígeno mediante chorros emergidos (en inglés 'plunging jets') tiene una eficiencia energética bastante alta, similar a la de las mejores tecnologías de aireación existente.

La aireación mediante chorros emergidos ha sido estudiada en forma científica por Afzal Ahmed (1.974) y Jan Van De Donk (1.981), quienes establecieron las ecuaciones que permiten calcular la transferencia de oxígeno, y analizaron los factores que la afectan. Entre sus conclusiones se encuentra que dicha transferencia se mejora con la concentración de biomasa y de sólidos suspendidos, y que este sistema de aireación es más robusto y menos problemático que el de burbuja, donde los difusores tienden a obstruirse.

Otro estudio importante fue realizado en sistemas de biopelícula con difusores de burbujas por Maria Piculell. (2.013) en la Universidad Lund en Suecia, donde se establece que la eficiencia en la transferencia de oxígeno mejora con el aumento en la proporción de bioportadores en el tanque, y que la aireación con burbujas finas no generaba las condiciones de mezcla adecuadas, y por lo tanto debía utilizarse burbujas gruesas, que tienen eficiencia en transferencia de oxígeno bastante inferior.

El sistema de aireación utilizado en la invención se basa en las conclusiones anteriores. Además, se realizaron ensayos experimentales y análisis teóricos, en los cuales se encontró que se produce una interacción entre los chorros y los bioportadores flotantes, que genera burbujas finas y mejora la capacidad de mezcla, lo cual permite superar las limitaciones de los reactores estudiados por Maria Puculell.

#### **d) DESCRIPCION DE LA INVENCION**

La invención consiste en un conjunto formado por un sistema de bombeo, que toma el agua de la laguna a través de una manguera perforada, y la distribuye en varios reactores flotantes ubicados a su alrededor en forma de chorros emergidos, utilizando para ello una parrilla de tuberías perforadas ubicada sobre la cámara del reactor.

Los reactores contienen bioportadores plásticos, donde se llevan a cabo la nitrificación de los compuestos amoniacales mediante el proceso de biopelícula de lecho móvil. En este proceso, se desarrolla sobre las superficies protegidas de los bioportadores una biomasa compuesta por bacterias que asimilan el nitrógeno, el carbono y otros nutrientes. Esta biomasa se erosiona periódicamente formando lodos aeróbicos, los cuales salen del reactor junto con el agua a través de las paredes y del fondo hechos en malla, la cual retiene a los bioportadores.

La asimilación del nitrógeno amoniacal en el reactor genera una biomasa. En el caso de las lagunas de oxidación, esta biomasa se desnitrifica en las condiciones anaeróbicas del fondo de la laguna. Este proceso genera nitrógeno gaseoso que sale hacia la atmósfera. Los compuestos de carbono descomponen anaeróbicamente allí para

producir metano, que también sale a la atmósfera. Estos dos gases no generan olores muy desagradables.

La manguera de succión estará suspendida a una altura sobre el fondo. La zona bajo la manguera se encuentra en condiciones anaeróbicas, y allí se descomponen tanto las aguas residuales que entran a la laguna, como los lodos que caen desde los reactores flotantes. Mientras tanto, en la zona sobre la manguera de succión se presenta una zona aeróbica debida a la recirculación a gran escala producida por el bombeo entre la manguera de succión y los reactores.

El agua que sale de los reactores puede ser nuevamente captada por la manguera de succión y procesada en éstos, generándose así una serie de circuitos que mantienen la capa superior de la laguna en condiciones aeróbicas, controlando las emisiones de olores que produce la digestión anaeróbica del fondo.

A continuación, se resumen los procesos de tratamiento en lagunas de oxidación provistas de conjuntos de reactores propuestos en la invención.

1. Las aguas residuales crudas que entran van hacia el fondo, debido a su mayor densidad, donde se encuentra la zona anaeróbica. Allí tiene lugar la remoción eficiente del carbono, puesto el volumen de esta zona generalmente es bastante grande, y por lo tanto el tiempo de retención. Este proceso reduce la relación C/N del agua que va al reactor, lo cual hace más eficientes los procesos de nitrificación allí.
2. El agua, que asciende desde la zona anaeróbica, es succionada por la bomba a través de manguera perforada suspendida sobre ésta, e inyectada en los reactores flotantes a través de la parrilla de tuberías perforadas. Los chorros oxigenan el agua y la mezclan con los bioportadores, haciendo que el carbono, el nitrógeno amoniacal y otros nutrientes sean asimilados por la biopelícula formada sobre ellos.
3. El lodo procedente de la erosión de la biopelícula sale de los reactores a través de las paredes y el fondo, que están hechas con malla, y se sedimenta en el fondo de la laguna. Allí el nitrógeno se desnitrifica y el carbono se digiere anaeróbicamente. Estos procesos generan metano y el nitrógeno gaseoso, que salen a la atmósfera sin causar olores importantes.
4. Gran parte del agua que sale del reactor es captada nuevamente por la tubería de succión de la bomba, y recirculada hacia éste, donde se repite el proceso anterior. El resto sale como efluente de la planta.
5. Los lodos estabilizados se acumulan en el fondo, donde son removidos con una periodicidad que se estima en más de 10 años. La mayor parte de los lodos se acumula en las entradas de la laguna, donde se recomienda colocar una dársena que pueda ser limpiada periódicamente mediante retroexcavadoras. Esta limpieza resulta relativamente económica y no interrumpe el funcionamiento de la planta.

En el caso la aplicación de la invención a la recuperación de cuerpos de agua eutrofizados, la manguera de succión del sistema de bombeo se coloca sobre el fondo, con el objeto de mantener toda el agua en condiciones aeróbicas. Los lodos aeróbicos que salen de dichos reactores son ricos en proteínas, y se convierten en alimento para la cadena trófica, la cual incluye zooplancton, crustáceos, peces, y demás fauna superior. Además, los conjuntos de reactores proporcionarían el oxígeno que necesita la fauna piscícola, y controlarían el amoníaco que podría intoxicarla.

De acuerdo a los análisis teóricos y a los ensayos experimentales realizados para la invención, al chocar los chorros con los bioportadores flotantes, se genera una interacción entre ellos. Dicha interacción reduce el tamaño de burbujas que se generan,

y aumenta su dispersión y el tiempo de retención en el agua. Esto incrementa sustancialmente el área de la interfase aire-agua, la transferencia de oxígeno, y por lo tanto la eficiencia energética del sistema de aireación, respecto a sistemas de chorros emergidos correspondientes al estado de la técnica. Los estudios consultados y los ensayos realizados indican que éstos últimos forman una columna compacta de burbujas, que no se dispersan horizontalmente como ocurre cuando hay presencia de bioportadores flotantes.

El diseño de los bioportadores juega un papel muy importante en los procesos de biopelícula. Para la invención se diseñaron bioportadores formados por tubos cortos de polipropileno, con extremos cortados a 45°, que generan un flujo a través de éste cuando ascienden en el agua, que facilita el contacto de ésta con la biopelícula que se desarrolla en su interior. Estos bioportadores tienen una densidad ligeramente menor a la del agua que les permiten flotar, y ubicarse en la parte superior del tanque.

#### **e) DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS**

Figura 1 – Vista del corte longitudinal del reactor flotante, de su instalación en una laguna de oxidación, y de las conexiones con una bomba sumergible.

Figura 2 - Vista en planta del reactor flotante

Figura 3 – Vista del corte transversal del reactor flotante

Figura 4 – Vista del corte longitudinal de un bioportador y del flujo a través de éste.

#### **f) DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION**

El reactor comprende una cámara flotante, sobre la cual se encuentra la parrilla de aireación compuesta por tuberías perforadas (1), de la cual salen chorros (2) hacia la cámara, que oxigenan el agua y ponen en suspensión los bioportadores contenidos en ella (3). La parrilla de aireación esta sujeta a dos perfiles ubicados sobre la cámara (4).

La cámara es una estructura desarmable, que está conformada en sus costados anterior y posterior por paneles de poliuretano rígido, que actúan como flotadores (5), y en sus costados laterales por dos marcos metálicos hechos con ángulos de hierro (6) forrados en malla (7).

Los paneles de poliuretano tendrán una de sus caras revestida por lámina metálica, en cuyos bordes se fijarán los ángulos verticales (8), a los cuales se atornillan los paneles metálicos forrados en malla que constituyen los costados laterales. El fondo estará formado por un marco hecho en ángulos de hierro y forrado en malla (9), que descansa en las aletas de los ángulos inferiores de los costados laterales.

La parrilla de aireación comprende una tubería principal que va sobre el eje del reactor, de la cual se desprenden los tubos perforados. La conexión de estos tubos se hace mediante uniones roscadas, que permiten la extracción y limpieza de éstos en caso de que se presenten obstrucciones en las perforaciones. La parrilla de aireación se conecta mediante una unión universal a la manguera (10) que sale del múltiple de distribución (11) de la bomba sumergible (12). También existe la posibilidad de utilizar una bomba emergida ubicada en la margen de la laguna, o en una estructura flotante.

La succión de la bomba sumergible se conecta a una cruz bridada hecha en hierro fundido (13). La brida inferior de la cruz se encuentra atornillada a una plancha de hierro (14) para darle estabilidad al módulo de bombeo. Dicha plancha tendrá asas en sus esquinas, a las cuales se amarran cuerdas provistas de flotadores (15), que servirán para facilitar la colocación o reubicación de dicho módulo.

Sobre el múltiple donde se conectan las mangueras que van hacia los reactores, se coloca la caja para las conexiones eléctricas y de control de la bomba (16). La caja eléctrica debe estar a una altura superior al del nivel máximo de la laguna, y se fija al múltiple mediante dos tornillos en U.

Los extremos de la manguera de succión de la bomba (17) se conectan a las bridas de los costados de la cruz. Esta manguera se amarra a flotadores (18) que la mantienen a cierta altura sobre el fondo. Estos flotadores estarán hechos con un recorte rectangular de panel de espuma de poliuretano rígido, que tendrá la cara inferior revestida en lámina metálica o plástica. A esta lámina se fija un asa donde se ata la cuerda que sostiene la tubería perforada.

Para ubicar la manguera dentro de la laguna, se amarra a bloques de anclaje hechos en concreto (19), que también estarán atados a flotadores para facilitar su ubicación y manipulación. Estos bloques tendrán asas empotradas hechas con barras de hierro dobladas en forma de U, en las cuales se amarrarán las cuerdas.

La manguera de succión recomendada es conocida comercialmente como tubería corrugada de drenaje, la cual tiene perforaciones rectangulares alargadas ubicadas en el fondo de ranuras, de modo que las partículas gruesas quedan retenidas sobre dichas ranuras y no pueden obstruir las perforaciones.

El circuito formado por el bombeo entre los reactores y la manguera busca generar condiciones aeróbicas en la zona sobre ésta, mientras que la zona bajo la manguera se mantiene en condiciones anaeróbicas. Si se quiere tener todo el cuerpo de agua en condiciones aeróbicas, como es el caso de la recuperación de cuerpos de agua naturales, no se le colocan flotadores a la manguera de succión, y ésta quedaría sobre el fondo.

En caso de utilizarse una bomba centrífuga emergida ubicada sobre la margen de la laguna o sobre un soporte flotante, se colocará una válvula de retención en la succión.

Los reactores se arman uniendo mediante tornillos los paneles metálicos forrados en malla que forman los costados laterales, con los ángulos verticales adosados a los paneles de poliuretano. Luego se coloca el panel del fondo, que descansa sobre las aletas de los ángulos inferiores de los paneles laterales, y se atornillan los dos perfiles metálicos transversales a la parte superior de estos paneles. Por último, se atornilla la parrilla de aireación a dichos perfiles mediante abrazaderas.

Una vez ubicado el reactor en la laguna, se amarra a bloques de anclaje, se conecta a la manguera que viene del múltiple ubicado a la salida de la bomba, y se colocan los bioportadores dentro de éste.

Para el diseño de los bioportadores se tuvieron en cuenta los siguientes requisitos:

- Los bioportadores se deben flotar con el agua en reposo, y mantener en suspensión durante la aireación, de tal forma que alcancen una buena distribución en el reactor en las condiciones de turbulencia generadas en este proceso. Para ello es importante que tengan densidad ligeramente inferior a la del agua, y una forma que maximice las fuerzas de arrastre respecto a su peso sumergido.

- Los bioportadores deben ofrecer la mayor cantidad de área protegida por unidad de volumen para maximizar la cantidad de biomasa que albergan, lo cual es necesario en tanques de dimensiones limitadas.
- El material del bioportador debe ser resistente ante la degradación biológica o física.
- El costo de los bioportadores debe ser minimizado, pues tiene un peso importante en el costo total de los sistemas de tratamiento.

Los bioportadores de la invención son esencialmente tubos cortos de polipropileno similares a pitillos, con cortes paralelos a 45° realizados en los extremos, formando una especie de aletas, como se pueden ver en la figura 4. Debido a su flotabilidad, el bioportador tiende a ascender, y se produce movimiento relativo del agua respecto al bioportador hacia abajo (20). De acuerdo a las leyes de la hidrodinámica, sobre la aleta cóncava que queda hacia abajo (21) se presenta un aumento importante en la presión, mientras que en el otro extremo del bioportador, bajo la aleta convexa que queda arriba (22) hay una reducción de la presión. De esta forma se crea un gradiente de presión entre los dos extremos del bioportador que induce un flujo a través de éste (23). Este flujo facilita el contacto del agua contaminada con la biomasa que se desarrolla en las paredes internas del bioportador.

El polipropileno a utilizar en los bioportadores es un material con alta resistencia mecánica, que no se vería afectado por la abrasión ni por la degradación biológica. Ese material tiene una densidad entre 0.90 y 0.91 gr/cm<sup>3</sup>. El grosor de las paredes es aproximadamente 0.15 mm, similar al de los pitillos, lo cual es bastante inferior al de los bioportadores existentes en el mercado. Con este grosor, se tiene una relación bastante reducida entre el peso sumergido del bioportador y las fuerzas de arrastre a que se ve sometido. Por lo tanto, con bajo grado de turbulencia se pueden poner los bioportadores en suspensión en un gran volumen de agua. Lo anterior fue comprobado en los ensayos realizados.

El escaso grosor de las paredes de los bioportadores también contribuye a la reducción de sus costos. Estos pueden ser elaborados en extrusoras para fabricar pitillos, que son suministradas por muchos fabricantes a precios económicos.

Uno de los parámetros importantes de los bioportadores es el área específica, o sea el área protegida por metro cúbico de bioportadores. Al reducir su diámetro, se aumenta dicha área específica. Si embargo esta reducción tiene un límite, puesto que conlleva el riesgo de taponamiento de la cámara interna por un crecimiento excesivo de la biopelícula, especialmente cuando hay una alta carga orgánica. Por lo tanto, el diámetro del bioportador deberá ajustarse a este parámetro.

De acuerdo a los ensayos realizados para la presente invención, el chorro penetra en el agua a gran velocidad arrastrando aire debido a su rugosidad. Estos chorros impactan contra los bioportadores flotantes, y se produce una dispersión de este aire, en forma de burbujas de un tamaño menor que el que ocurriría si no hubiera presencia de dichos bioportadores.

Se observó además que el chorro transfería su momento de inercia a los bioportadores, que salían proyectados en todas direcciones, arrastrando y dispersando las burbujas en un mayor volumen de agua. En el caso de los chorros emergidos sin la presencia de bioportadores, las burbujas forman una columna de escasa anchura, que tiene menor capacidad de mezcla y de transferencia de oxígeno.

Posteriormente, las burbujas ascienden y son retenidas durante bastante tiempo por el filtro flotante de bioportadores que se forma en la superficie. Allí los bioportadores junto

con las burbujas avanzan lentamente hacia el chorro, y cuando se ubican bajo éste, son impulsados nuevamente hacia abajo, y el proceso se repite.

Los fenómenos anteriores de fragmentación, dispersión y retención de las burbujas ocasionados por los bioportadores flotantes, aumentan sustancialmente el área de la interfase aire-agua, la transferencia de oxígeno y la eficiencia energética de la aireación. De acuerdo al análisis del estado de la técnica, el chorro emergido simple tiene una eficiencia energética similar a la de las mejores tecnologías de aireación disponibles. Por consiguiente, se puede esperar que con dicha interacción entre los chorros emergidos y los bioportadores, el sistema de aireación propuesto en la invención resulte muy destacado en este aspecto.

### **Mejor manera de realizar la invención.**

La invención consiste en equipos que se pueden instalar en las lagunas de oxidación para aumentar su capacidad y mejorar el desempeño, y en cuerpos de agua naturales para recuperar sus condiciones ambientales.

Para la instalación de estos equipos en una laguna, inicialmente se ensambla el módulo de bombeo, formado por la bomba sumergible, la tubería de succión y su conexión con la bomba, la plancha de soporte, la tubería de descarga y el múltiple de distribución. Este módulo se lleva a su sitio en la laguna, utilizando para ello un catamarán formado por una plataforma de madera sobre dos botes inflables. Este conjunto se baja al fondo por el espacio entre los botes, utilizando las cuerdas con flotadores sujetadas a la plancha de soporte del módulo. Esas cuerdas se dejarán instaladas con el fin de facilitar una eventual reubicación o retiro del conjunto de reactores flotantes de la laguna.

El ensamble de cada reactor se hace en la orilla de la laguna, y posteriormente se desliza hacia ésta. Una vez en el agua, el reactor se remolca mediante el catamarán hasta la ubicación proyectada, se conecta mediante una manguera al múltiple de la bomba, y luego se amarra al bloque de anclaje de concreto. Este anclaje se hace al costado opuesto de la entrada de la manguera, de manera que la cuerda del anclaje quede coaxial con la manguera, limitando el movimiento del reactor.

Posteriormente se colocan los bioportadores dentro de los reactores. Una vez puesta en funcionamiento, la bomba sumergible recoge agua de la laguna a través de la manguera perforada de succión, y la inyecta en los reactores, generando los procesos de tratamiento y de recirculación a gran escala que han sido descritos.

Se recomienda que los reactores flotantes se dispongan en varias filas ubicadas a través del cuerpo de agua, y que sus mangueras de succión se amarren entre sí formando triángulos ubicados hacia aguas abajo, con el fin de que éstos intercepten gran parte del flujo y lo recirculen hacia los reactores. Esos amarres se atarían a bloques de anclaje ubicados hacia aguas abajo para mantener la posición del conjunto.

### **g) INDICACION DE LA APLICACIÓN INDUSTRIAL**

Los conjuntos de reactores flotantes de la invención tienen dos aplicaciones. La primera de ellas es aumentar la capacidad de tratamiento de aguas residuales de las lagunas de oxidación existentes o proyectadas, y mejorar su desempeño en otros aspectos.

La segunda aplicación es la recuperar cuerpos de agua eutrofizados. Los conjuntos de reactores aportan oxígeno al agua, y además transforman los contaminantes tales como la DBO<sub>5</sub>, el amoníaco y el fósforo en alimento que puede nutrir la cadena trófica.