

## **a) TÍTULO**

Boquilla para Inyección de Aire en Procesos de Oxigenación del Agua

## **b) SECTOR TECNOLÓGICO**

Esta invención está relacionada con la ingeniería mecánica aplicada a procesos de aireación utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales y en estanques de piscicultura.

## **c) TECNOLOGÍA ANTERIOR**

La boquilla que la invención propone funciona en forma similar a un venturi. El venturi es un conducto en el cual se introduce una contracción, en donde se aumenta la velocidad del fluido y se reduce su presión, de acuerdo a la primera ley de termodinámica de Bernoulli para flujos no compresibles. Esta presión cae por debajo de la presión atmosférica, lo cual permite introducir aire en este punto, el cual usualmente entra a través de perforaciones practicadas en la pared del conducto. Luego de la contracción, la presión aumenta al desacelerarse el flujo.

El aire introducido en el venturi se mezcla con el agua debido a la turbulencia que se genera hacia aguas abajo de la contracción, produciendo burbujas finas, que luego salen junto con el flujo hacia un tanque de aireación, donde se produce una transferencia de oxígeno al agua. Algunos de los principales factores que promueven esta transferencia son la relación entre los caudales de aire y de agua, y el área de la interface aire – agua, la cual es función del diámetro de las burbujas y el tiempo de permanencia de éstas en el agua. Este tiempo está determinado principalmente por la profundidad que alcanzan las burbujas y por su velocidad ascensional, que a su vez es función de su diámetro.

Para impulsar el flujo a través de los venturis se utilizan con frecuencia bombas centrífugas corrientes, que además recirculan el agua de los tanques de aireación. Las principales ventajas que ofrecen los sistemas de aireación mediante venturis son sus bajos costos, y las escasas labores de mantenimiento requeridas, puesto que no tienen partes móviles.

La mayor limitación en el empleo de venturis en procesos de aireación del agua había sido las bajas eficiencias en la transferencia de oxígeno respecto a las demás tecnologías. Sin embargo, recientes estudios y desarrollos tecnológicos han permitido que éstos sean competitivos en este aspecto.

En los primeros venturis el flujo de aire entraba por agujeros de área en la pared en la garganta, donde el agua fluye a alta velocidad, y por lo tanto tiene gran momento de inercia. El aire que entra a la garganta necesita cambiar la dirección del agua, para lo cual requiere cierta presión, pero dicho aire se encuentra limitado a la presión atmosférica. Al aumentar el caudal y la velocidad en el venturi, se aumenta dicho momento, y el aire tiene mayores restricciones para ingresar. Según los estudios realizados por Ahmet Baylar (2.009 y 2.010) y Fadzai Kadzinga (2.015), al aumentar el caudal en el venturi, la proporción de aire en el agua tiende a disminuir a partir de cierto punto, lo mismo que la eficiencia en la transferencia de oxígeno. Esto limita el uso de estos venturis en la aireación del agua. De acuerdo a los estudios mencionados, el área de los agujeros de entrada de aire también afecta la eficiencia en la transferencia de oxígeno.

Para superar estas limitaciones y mejorar la eficiencia en la transferencia de oxígeno, en los actuales venturis comerciales el aire entra a través de una cámara situada alrededor de garganta del venturi, de tal forma que toda la periferia del chorro está en contacto con el aire. De esta forma, el flujo de aire ya no interfiere con el flujo del agua como ocurre en el caso del venturi tradicional. Esto permite que los caudales de aire alcancen valores similares a los del agua. Sobre este tipo de venturis existen las siguientes patentes:

- Patente número US 3846292 A, solicitada por Kimberly Clark Co, publicada el 5 de noviembre de 1974
- Patente número US4162970 A, solicitada por Bayer Aktiengesellschaft, publicada el 31 de julio de 1979
- Patente número US4587064 A, solicitada por Albert Blum, publicada el 6 de mayo de 1986
- Patente número US5169293 A, solicitada por Inax Corporation, publicada el 8 de diciembre de 1992
- Patente número EP0523498 A1, solicitada por Inax Corporation, publicada el 20 de enero de 1993
- Patente número US5520856 A, solicitada por The Boc Group Plc, publicada el 28 de mayo de 1996

Estos venturis tienen nombres comerciales tales como boquillas mezcladoras, eyectores de chorro de agua o inyectoras, y se emplean tanto para aireación del agua, como para para mezclarla con diversos gases o líquidos.

Desarrollos tecnológicos recientes permiten alimentar la boquilla con aire a presión mediante sopladores. Esto representa un importante avance, puesto el flujo de aire ejerce una fuerza de arrastre sobre el chorro de agua, y no trata de obstruirlo, como es el caso de los venturis originales. Con estos sistemas se han alcanzado eficiencias en las transferencias de oxígeno que superan los 3 Kg de oxígeno por kilovatio hora, superiores a la mayoría de las tecnologías de aireación actualmente empleadas, pero implica importantes costos adicionales.

En todos los desarrollos tecnológicos encontrados en el estado de la técnica, el ducto de entrada del agua se encuentra ubicado dentro de la cámara de entrada de aire. La boquilla propuesta en la invención se diferencia de dichos desarrollos esencialmente en que el aire entra por la parte interior del chorro, a través de una abertura en un tubo transversal, el cual divide el flujo de agua, y por lo tanto funciona como dos venturis de menor diámetro, que son más eficientes energéticamente. Además, en los bordes de la abertura en el tubo transversal por donde sale el aire, se crean unos vórtices que ayudan a fragmentar las burbujas y mezclarlas con el agua. Todo esto hace a dicha boquilla competitiva es los aspectos de eficiencia energética. Además, los costos de fabricación de la boquilla de la invención serían mucho menores al de las boquillas existentes en el mercado.

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

La invención consiste en una boquilla que tiene como función oxigenar el agua utilizando el efecto venturi. Esta boquilla consiste esencialmente en un tubo por donde fluye el agua, y de un tubo que atraviesa el anterior cerca a la entrada, por donde entra el aire. Este tubo transversal genera una contracción sobre el primero, ocasionando una caída en la presión del agua en este punto, que facilita la salida del aire hacia el agua a través de una abertura practicada en el costado de aguas abajo del tubo. En los bordes de dicha abertura se genera una turbulencia, ocasionada por la ampliación súbita de la sección de flujo que ocurre hacia aguas abajo del tubo. Dicha turbulencia tiene la forma de vórtices, que dividen en aire que entra por la abertura en forma de burbujas finas, y las mezclan con el agua. Estas burbujas

son introducidas por chorro en el cuerpo de agua donde sale, y mezcladas allí produciendo una transferencia de oxígeno a ésta.

Para el diseño de la boquilla de la invención, se analizaron los principales factores que inciden en su desempeño en los procesos de tratamiento biológico aeróbico del agua y de piscicultura, donde sería empleada. Los aspectos más importantes que se tuvieron en cuenta son la eficiencia energética en la transferencia de oxígeno, y la capacidad de mezcla en los tanques de agua donde se realiza el proceso de aireación. También se consideraron los costos de la boquilla, y los riesgos de obstrucción de los conductos de agua y aire por partículas.

El desarrollo de la invención se basó en la revisión de diversos estudios sobre los venturis utilizados en procesos de aireación del agua, en ensayos realizados con la boquilla propuesta, y en análisis de los fenómenos observados en los ensayos, o reportados en los estudios consultados.

En los estudios realizados por Baylar (2.009 y 2.010) y otros autores, se encontraron los siguientes factores que afectan la eficiencia en la transferencia de oxígeno, con base en los cuales se realizó la invención.

Según esos estudios, entre menor sea el diámetro de la garganta del venturi, mayor es su eficiencia energética. En el caso de la invención, el flujo de agua de la boquilla está dividida por el tubo transversal en dos chorros, y la boquilla funciona como 2 venturis con grosores inferiores a los que generalmente tienen los venturis existentes.

Otro de los aspectos tuvo en cuenta para el desarrollo de la invención fue la distribución de la intensidad de la turbulencia. En un modelo numérico de un venturi convencional desarrollado por Baylar (2.009), se observa que la turbulencia se inicia en las entradas de aire a través de las paredes ubicadas en la garganta, y se propaga hacia aguas abajo por la periferia de la sección del flujo. En la parte central de dicha sección no se generan turbulencias importantes ni hay presencia de burbujas, y por lo tanto allí la transferencia de oxígeno es escasa.

En la boquilla de la invención se mejora sustancialmente esta situación, puesto que el aire entra por la parte central de la sección de flujo a través del tubo transversal, mediante una abertura practicada en su costado de aguas abajo que cubre todo el ancho de la sección, de tal forma que se distribuye mejor en todo el flujo. Además, a lo largo de los bordes de la abertura por donde sale el aire se generan vórtices, que facilitan la generación de burbujas finas y su mezcla con el flujo. En los ensayos realizados con prototipos de la boquilla, se observó una gran densidad de burbujas finas a la salida, que confirma la hipótesis anterior.

El chorro sale de la boquilla a alta velocidad, puesto que el caudal de agua se incrementa con el caudal de aire, e introduce dichas burbujas a una profundidad importante en el tanque de aireación. Allí las burbujas permanecen bastante tiempo debido a su escasa velocidad ascensional ocasionada por su reducido diámetro, el cual también aumenta el área de la interface aire - agua. Estos factores incrementan sustancialmente la transferencia de oxígeno.

La boquilla de la invención resulta relativamente económica, y además puede funcionar sin la inyección de aire a presión o con ésta. Esto último se hace conectando mediante mangueras los extremos del tubo transversal con un soplador, lo cual permite colocar la boquilla a mayor profundidad para airear tanques de mayor altura. El aire que se inyecta a presión irá en la misma dirección del flujo de agua, de modo que tendría un efecto de arrastre sobre éste, incrementando su velocidad y por lo tanto la transferencia de oxígeno.

En caso de que la boquilla funcione sin presurización, el aire entra a través de filtros flotantes conectados a los extremos del tubo transversal. Dichos filtros facilitan la toma de

aire desde la atmosfera e impiden la entrada de partículas que puedan obstruir el tubo transversal.

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

Figura 1 –Vista del corte longitudinal de la boquilla de la invención, de su conexión a la tubería de alimentación por donde entra el agua, y de los filtros flotantes a través de los cuales entra el aire.

Figura 2 – Vista en detalle de un corte longitudinal de la boquilla, girado 90° respecto al corte de la figura 1, donde se indican los flujos de agua y de aire.

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

En la Figura 1 se observa que la boquilla se encuentra ubicada bajo el nivel del agua (1), y está formada por un tubo (2) que conduce el flujo de agua, el cual se conectan a la tubería de alimentación mediante una reducción roscada (3). Inmediatamente después de la reducción, este tubo se encuentra atravesado por un tubo transversal (4), por el cual se introduce el aire en el agua, aprovechando baja en la presión hidráulica producida por la obstrucción que ocasiona el tubo de aire en el flujo. El aire sale del tubo trasversal por una abertura (5) ubicada sobre su costado de aguas abajo. En este punto se produce una turbulencia ocasionada por la expansión abrupta de la sección de flujo de agua, que divide el caudal de aire en burbujas finas. La boquilla se conecta mediante un buje roscado (6) a la tubería de alimentación (7).

Los extremos del tubo transversal pueden conectarse mediante mangueras (8) a filtros flotantes, por donde entra el aire desde la atmósfera. Estos filtros facilitan la entrada de aire a la boquilla que se encuentre sumergida, y evitan la entrada de agua y de partículas que pueden obstruirla.

Los filtros flotantes están formados por una malla de forma cóncava (9), que se sujeta sobre un flotador de espuma de polietileno (10) utilizando una arandela (11) y unos tornillos (12). En su parte central, el flotador está atravesado por un tubo vertical (13), por donde el aire que entra a través de la malla sale por la manguera hacia el tubo transversal.

En la figura 2 se presenta en detalle el flujo en la boquilla, en el cual se observa que el tubo trasversal produce una contracción sobre el flujo de agua en la boquilla (14), en donde se reduce la presión, permitiendo la entrada de un flujo de aire a través de dicho tubo. Luego de la contracción se presentan unos vórtices (15), que mezclan el agua con el aire produciendo burbujas finas, las cuales son inyectadas a la cámara de aireación por el chorro que sale de la boquilla (16).

Con el objeto de disminuir las pérdidas de cabeza hidráulica en la tubería de alimentación, ésta deberá tener un diámetro de al menos 2 veces el del tubo de agua de la boquilla. La conexión entre ellos se hará mediante una reducción cónica con una transición redondeada en el empate con la tubería de alimentación. Con esto se evitan las altas velocidades y las turbulencias que ocasionan pérdidas de cabeza que afectan la eficiencia energética de la boquilla.

El tubo principal de la boquilla tendrá forma cilíndrica, con el objeto de aumentar la penetración de las burbujas en el tanque de aireación y propiciar las condiciones de mezcla

en éste, evitando la expansión que tienen muchos diseños comerciales, la cual reduce la velocidad de salida del chorro.

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

Los ensayos realizados con la salida de la boquilla ubicada sobre el nivel del agua muestran que se produce un arrastre de gran cantidad de aire en forma de burbujas gruesas, que penetran muy poco en el tanque, y tienen escasa eficiencia energética. Por lo tanto, se recomienda que salida de la boquilla quede siempre sumergida en el agua. El aire entra al tubo transversal de la boquilla mediante mangueras que se conectan ya sea a filtros flotantes o a un soplador.

Al aumentar la profundidad de la salida de la boquilla en el tanque, se incrementa la penetración de las burbujas. Según estudios consultados, las boquillas alimentadas por aire a la presión atmosférica no deben estar a más de 50 cm de profundidad, puesto que, de allí en adelante la presión del agua afecta notablemente la entrada de aire.

Los venturis orientados verticalmente tienen mayor eficiencia energética, puesto que introducen el aire a mayor profundidad en el agua, y aumentan la permanencia de las burbujas allí. Sin embargo, se recomienda que la boquilla tenga un pequeño ángulo con la vertical, con el objeto de generar un flujo rotatorio en el tanque similar al del zanjón de oxidación, produciendo un efecto de aireación secuencial que es importante para mejorar los procesos de tratamiento.

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

La invención consiste en dispositivos que se conectan a un sistema de bombeo para conformar un sistema de aireación. Estos sistemas serían utilizados principalmente en procesos de biopelícula para el tratamiento de aguas residuales, en donde se introducen bioportadores en el tanque de aireación. En estos tanques deben existir condiciones de turbulencia y de mezcla para mantener en suspensión los bioportadores, y para facilitar el contacto entre los contaminantes que contiene el agua, el oxígeno disuelto, y la biomasa que se desarrolla en dichos bioportadores. Con las boquillas de la invención es posible obtener dichas condiciones.

Dichas boquillas también se utilizarían en estanques de piscicultura con sistemas de bioflóculos, puesto que tienen capacidad tanto de oxigenar el agua, como de mantener los detritos en suspensión en estanques de alrededor de 1 metro de profundidad, facilitando la asimilación de los contaminantes alrededor de ellos para formar dichos bioflóculos, que se constituyen en alimento para las especies acuáticas.