

Textos Básicos

TEXTO A

SISTEMAS DE AIREACION POR CHORROS

Edición 2.024

Autor: Carlos Alberto Páez Martínez

Tabla de Contenido

A-1. FUNDAMENTOS DE LA AIREACIÓN DEL AGUA	2
A-2. SISTEMAS DE AIREACION EXISTENTES	7
A-2.1. Aireación por Burbujas	7
A-2.2. Aireación por Equipos Mecánicos.....	9
A-3. AIREACION POR CHORROS EMERGIDOS.....	12
A-4. AIREACION POR BOQUILLAS DE TUBO TRANSVERSAL.....	29
A-5. EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE AIREACION.....	53

A-1. **FUNDAMENTOS DE LA AIREACIÓN DEL AGUA**

La aireación tiene como función suministrar el oxígeno disuelto que se necesitan en los procesos aeróbicos que se realizan en las plantas de tratamiento del agua, y para el desarrollo de las especies acuáticas a cultivar en estanques de acuicultura. Hay numerosos sistemas de aireación del agua, que generalmente se basan en la introducción de burbujas de aire o de oxígeno puro en el agua. Debido a la teoría de difusión de gases, allí se produce una transferencia del oxígeno contenido en el aire al agua a través de la interfaz entre ellos. Esta transferencia es directamente proporcional al área de dicha interfase, la cual aumenta cuando se tiene un mayor caudal de aire, y cuando las burbujas son inyectadas a mayor profundidad tiene menor diámetro. Esto último es muy importante, puesto que con burbujas más finas se tiene mayor área de interfase agua - aire, y además estas burbujas ascienden más lentamente, lo cual prolonga su tiempo que permanencia en el agua. La tasa de transferencia del oxígeno en el agua OTR (Oxygen Transfer Rate) es función de la diferencia de la concentración de oxígeno entre el aire y el agua C_t-C , y del área de la superficie A de la interfaz entre éstas.

$$OTR = KI \times A \times (C_t-C) = K_{La} \times (C_t-C) \quad \text{Ecuación A-1}$$

El área de A de la interface aire – agua depende del caudal de aire introducido al agua, de la profundidad donde se inyecta, y del tamaño de las burbujas. La constante K_{La} es el coeficiente de transferencia de masas, que está determinada por el equipo de aireación utilizado, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_{La} = OTR/(C_t-C)$$

El parámetro SOTR (Standard Oxygen Transfer Rate) establece la tasa de transferencia de oxígeno de los equipos de aireación que ocurre en condiciones estándar, o sea en agua pura a una temperatura de 20 °C, altitud a nivel del mar, y con una distribución homogénea del oxígeno en el volumen aireado. El SOTR se calcula de acuerdo a los equipos utilizados de aireación y a su instalación en el tanque. Para calcular la transferencia de oxígeno para las condiciones reales en el terreno AOTR (Actual Oxygen Transfer Rate), se multiplica el valor de la SOTR por un factor N, que tiene en cuenta los parámetros que afectan dicha transferencia¹.

$$AOTR = N \times SOTR \quad \text{Ecuación A-2}$$

Donde:

AOTR (Actual Oxygen Transfer Rate): Tasa de transferencia de O₂ en Condiciones Reales en el sitio (Actuales) en KgO₂/h.

¹ Metcalf & Eddy. "Wastewater Engineering. Treatment and Reuse". Mc Graw Hill. 4^a Edición, 2.003.

SOTR (Standard Oxygen Transfer Rate): Tasa de transferencia de O₂ en Condiciones Estándar (nivel del mar, temperatura de 20 °C, y distribución homogénea del oxígeno en el volumen aireado) en KgO₂/h.

N es el Factor Transferencia de Oxígeno en Condiciones Reales, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$N = \alpha \times F \times \left(\frac{\beta \times Cst - Cl}{Cs20} \right) \times 1.024^{(t-20)} \quad \text{Ecuación A-3}$$

.F: Factor de falla (fouling factor) que se debe al deterioro de la capacidad de transferencia de oxígeno del dispositivo de aireación, y se refiere especialmente a los difusores de burbuja que se tratan en el Numeral A-2.1.

α: Factor de Corrección de Transferencia de O₂ para aguas residuales, considerando el sistema de aireación y las condiciones de tanque. El factor α depende de la intensidad de mezcla o turbulencia que genera el sistema de aireación, y de la geometría del tanque. Este factor aumenta si el oxígeno se difunde eficientemente en todo el volumen, y se reduce si se presentan zonas muertas. En ocasiones se combinan α y F como un solo factor αF², que tiene un valor entre 0.3 y 1. Algunos autores consideran que el parámetro que debe tenerse en cuenta para medir la transferencia de O₂ en un sistema de aireación es el producto α x SOTR, que se conoce en la literatura científica como αSOTR³.

β: Factor de corrección por salinidad y tensión superficial del agua. El valor de β tiene en cuenta las variaciones en la solubilidad del oxígeno en el agua, las cuales se deben al contenido de elementos tales como surfactantes, sales y sólidos suspendidos. Este parámetro oscila entre 0.70 y 0.98, y se recomienda un valor de 0.95 para aguas residuales domésticas (Metcalf & Eddy. Ref. A-1).

t: Temperatura del agua

Cst: Concentración de saturación de O₂ en el agua en el terreno, que depende de la altitud y de su temperatura, y que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Cst = C_{TA} \times \frac{Pt + Phe}{Pt} \quad \text{Ecuación A-4}$$

Donde C_{TA} es la concentración de saturación en agua clara con temperatura T y a la altitud A del terreno, Pt es la presión atmosférica en el terreno, y Phe es la mitad de la presión hidrostática a la profundidad donde entra el aire del equipo de aireación.

² Water Environment Federation WEF. "Liquid Stream Fundamentals: Aeration Design. Fact Sheet". 2.017 https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-024-mrrdc-lsf-aeration-design_final.pdf

³ M. K. Stenstrom and D. Rosso, "Aeration", University of California – Los Angeles, 2.010. <https://www.coursehero.com/file/18666353/Aeration/>

Cl: Concentración de oxígeno disuelto a mantener en el tanque, que se establece en el diseño. En el tratamiento de aguas residuales, Cl generalmente oscila entre 0.5 y 2 mg/L. Los valores menores se utilizan en procesos de nitrificación parcial (ver Numeral C-1.3). En el caso de estanques se acuicultura, Cl tiene valores del orden de 4 mg/L, puesto que es necesario suministrar también el oxígeno que consumen los peces o camarones.

Cs₂₀: Concentración de saturación de O₂ en el agua al nivel del mar y a 20°C.

La ecuación para calcular la transferencia de oxígeno AOTR de un sistema de aireación tiene variables difíciles de estimar. Entre ellas está α , que depende de la geometría del tanque, del sistema de aireación empleado, y de su disposición dentro de éste. También es el caso del parámetro β , que depende de los elementos que contiene el agua. Esto ha sido analizado por Ingrid Fändriks⁴, quien concluye que existe gran incertidumbre sobre estas variables, que afectan severamente el cálculo de la AOTR mediante la Ecuación A-2. Por lo tanto, para la determinación la tasa de transferencia de oxígeno real en el sitio AOTR, es recomendable realizar ensayos de campo en tanques o estanques provistos de un equipo de aireación, lo cual se haría en condiciones de operación reales, tales como las características del agua y del clima, y la presencia de los bioportadores y de la biomasa en dichas estructuras.

Para ello se propone el ensayo que se describe a continuación. Este ensayo se inicia luego de un periodo de aireación del tanque, cuando la concentración de oxígeno se ha estabilizado en un valor máximo C_m . En estas condiciones, la transferencia de oxígeno AOTR iguala el consumo total por parte de los organismos dentro del estanque $V \times OUR$, donde OUR (en inglés Oxygen Uptake Rate) es la tasa de consumo de O₂ por unidad de volumen por parte de microorganismos, y V el volumen del tanque.

Luego se suspende la aireación, con lo cual el valor de la transferencia AOTR es cero. Por lo tanto, la tasa de consumo de oxígeno OUR por parte de los organismos iguala la tasa de caída en la concentración de éste dC/dt . Al multiplicar estos dos parámetros por el volumen de agua V se obtiene la transferencia de oxígeno AOTR, de modo que este parámetro se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$AOTR(C_m) = V \times OUR(C_m) = -V \times dC/dt \quad \text{Ecuación A-5}$$

Este valor es válido solo para la concentración de oxígeno máxima C_m que se obtiene con el equipo de aireación. Para hallar el valor de la AOTR en función de la concentración C de O₂, se mantiene suspendida la aireación, produciendo un periodo de desoxigenación. Como se aprecia en la curva de desoxigenación de la siguiente figura, el consumo de oxígeno OUR es máximo cuando se tiene una concentración de oxígeno C_m , y disminuye cuando esta concentración C se reduce debido a la adaptación los organismos a la falta de oxígeno. La pendiente de la gráfica de desoxigenación obtenida experimentalmente, que registra la

⁴ Ingrid Fändriks. "Alternative Methods for Evaluation of Oxygen Transfer Performance in Clean Water". Uppsala University. 2.011. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:415577/FULLTEXT01.pdf>

reducción de O_2 debido al consumo de los organismos, nos da el valor de OUR en función de C .

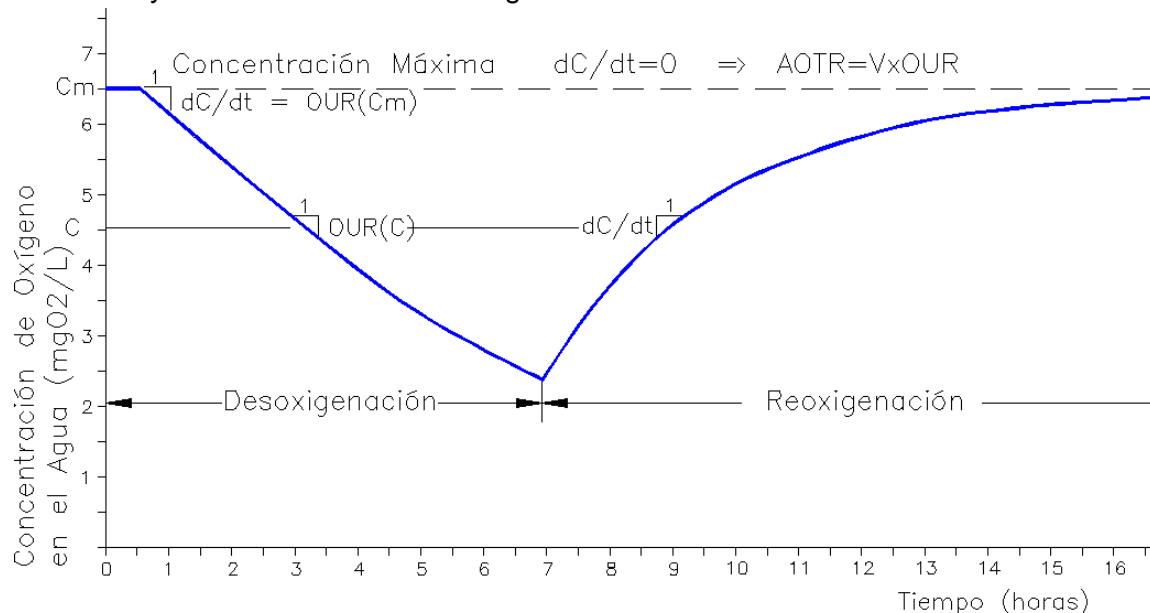
En los estanques de acuicultura con bioflócs, la carga de peces o camarones supera los 9.5 Kg/m³ al final de las fases de alevinos levante o engorde, mientras que la biomasa máxima correspondiente a bioflócs es de hasta 500 gr/m³. Entonces se considera que la biomasa está representada esencialmente por peces y camarones, los cuales se distribuyen de forma relativamente uniforme en el estanque, y por lo tanto el consumo de oxígeno varía poco en todo el volumen de agua del estanque.

Luego de este proceso de desoxigenación puede tenerse un proceso de reoxigenación, en el cual se reactiva la aireación, y la concentración de oxígeno evoluciona como se indica en la Figura A-1. En este proceso, parte de este oxígeno es consumido por los organismos presentes en el agua a una tasa OUR , y el resto se traduce en un aumento en la concentración de oxígeno C a una tasa dC/dt . Al multiplicar la suma de estas tasas por el volumen de agua V del tanque, se obtiene la transferencia de oxígeno $AOTR$ para una concentración C de éste, como si indica en la siguiente ecuación:

$$AOTR(C) = V \times (OUR(C) + dC/dt(C)) \quad \text{Ecuación A-6}$$

Con la aireación, la concentración de oxígeno aumenta hasta llegar a un máximo en el cual la transferencia iguala el consumo CO por parte de los microorganismos, entonces dicho CO iguala el valor de $V \times OUR$, que equivale a $AOTR$.

Figura A-1 – Ensayo para la Determinación In Situ de la Transferencia de Oxígeno $AOTR$ y la Tasa Consumo de Oxígeno OUR en Condiciones del Terreno



Es importante tener en cuenta que en la reoxigenación se asume que la concentración de oxígeno C es uniforme en todo el tanque, lo cual solo ocurre cuando se tienen sistemas de

aireación con alta capacidad de mezcla, que distribuyan adecuadamente el oxígeno en un volumen de agua, tales como los sistemas de aireación por chorro que se describen en los capítulos A-3 y A-4. Los ensayos *in situ* para calcular la transferencia de oxígeno de los equipos de aireación son muy importantes de las zonas tropicales con climas cálidos templados, pues en estas zonas se presentan las mayores necesidades insatisfechas de tratamiento de aguas. En estas zonas también se puede cultivar la caña de azúcar, que es un insumo fundamental para la acuicultura, y para la planta de tratamiento de aguas residuales PINC que se presentan en el Numeral C-5.5. Con esta planta se puede secuestrar cantidades importantes de carbono atmosférico, y además recuperar ecosistemas forestales.

En el caso de procesos de nitrificación con bioportadores, según Jamal Ali Kawan et al (Ref. C-20) más del 90% de la biomasa contenida en el tanque corresponde a la capa de biopelícula que recubre la superficie de los bioportadores. Por lo tanto, el consumo de oxígeno se produce esencialmente en dicha biopelícula. En este caso, este consumo de oxígeno es proporcional a la superficie útil de bioportadores Sbp , a la tasa de remoción de NH_4 en los bioportadores $SARR$ (Surface Area Removal Rate) en $g/m^2 \cdot \text{día}$, y al factor de consumo de oxígeno Fco , que indica el consumo de O_2 por gramo de nitrógeno amoniacal NH_4 removido, el cual depende del tipo de nitrificación. Entonces, el consumo total del reactor se calcula con la siguiente ecuación.

$$CO = Fco \times SARR \times Sbp \quad \text{Ecuación A-7}$$

En los sistemas de aireación, este consumo debe ser inferior a la transferencia de oxígeno AOTR (Actual Oxygen Transfer Rate).

De acuerdo al Capítulo C-1, Fco es de 4.71 gr $O_2/gr\ NH_4$ en procesos de nitrificación heterótrofa, de 4.57 gr $O_2/gr\ NH_4$ en procesos de nitrificación completa, y de 3.43 gr $O_2/gr\ NH_4$ en procesos de nitrificación parcial. El valor de $SARR$ es función del oxígeno disuelto, y se determina en la Tabla C-1 de Harlan H. Bengtson (Ref. C-24).

Estos procesos de nitrificación se emplean en los Reactores Secuenciales de Biopelícula RSB que se tratan en el Capítulo D-2. Allí la aireación se hace por tandas con etapas de aireación con procesos de biopelícula de lecho móvil, y de reposo con decantación de lodos, y salida del efluente a través de un filtro flotante formado por los bioportadores, donde hay un proceso de biopelícula de lecho fijo. Luego de cada periodo de reposo, la concentración de oxígeno en el agua C_l es baja. Al reiniciarse la aireación se produce una transferencia de oxígeno, que es proporcional a la diferencia $\beta \times Cst - Cl$ entre la concentración de saturación Cst y la del agua Cl (Ecuación A-3). Esta diferencia se va reduciendo a medida que aumenta Cl , lo cual reduce la tasa de transferencia de oxígeno. En los cálculos de la capacidad de la aireación, se recomienda tener en cuenta la concentración de oxígeno final de esta fase, con la cual se sobreestima el valor de la AOTR requerida, y se le da una importante seguridad al diseño.

Cuando se interrumpe la aireación en los RSB, los bioportadores suben rápidamente a la superficie, formando un filtro flotante, y el agua sale a través de ese filtro. En este momento, el reactor funciona como un sistema de biopelícula de lecho fijo, donde la biomasa contenida en los bioportadores comienza a consumir el oxígeno del agua que fluye a través de ese filtro. La aireación en los RSB funciona en forma intermitente, pero el desarrollo de la biopelícula y el consumo de oxígeno se realiza en forma continua.

La turbulencia generada por la aireación tiene una función adicional, que es mantener los bioportadores o bioflócs en suspensión dentro de los tanques o estanques, lo cual permite poner en contacto la biopelícula que se desarrolla sobre éstos, con el oxígeno y con los nutrientes que contiene el agua, facilitando así el intercambio de masas necesario para el desarrollo de dicha biopelícula, como se explica en el capítulo C-2.

La aireación mediante boquillas de tubo transversal se aplica al caso de los estanques para acuicultura descritos en el Texto B, y en la planta Pincta que se trata en el Numeral C-4.4, que busca incorporar los nutrientes que contaminan el agua en la cadena trófica acuática. Estas boquillas están dispuestas radialmente, con el objeto de que los chorros introduzcan el oxígeno y lo distribuyan adecuadamente en estanques circulares, y que además mantengan en suspensión los bioflócs. Estos bioflócs consisten en vegetales degradados donde se desarrollan biopelículas, que sirven para alimentar peces y camarones.

La aireación mediante chorros emergidos se emplea en sistemas de biopelícula de lecho móvil, donde se utilizan bioportadores plásticos flotantes. Como se explica en el Capítulo A-3, la interacción entre los chorros y los bioportadores permite optimizar la transferencia de oxígeno en un gran volumen de agua, y el desarrollo de la biopelícula que asimila los contaminantes.

A-2. SISTEMAS DE AIREACION EXISTENTES

A-2.1. Aireación por Burbujas

Esta aireación se realiza inyectando aire a través de difusores sumergidos en el agua, los cuales tienen orificios por donde sale este aire hacia el agua en forma de burbujas. El aire es impulsado a través de los difusores mediante sopladores, que son equipos electromecánicos que utilizan diversas metodologías para suministrar un caudal de aire a la presión que se requiere para superar la presión hidrostática en los difusores.

Para esta aireación se utilizan burbujas finas y gruesas, cuyos diámetros están determinados por el tamaño de los poros de los difusores. Las primeras tienen menos de 3 mm de diámetro y las segundas son mayores de este valor. En ocasiones se utiliza la categoría de burbuja media para aquellas que tienen un diámetro promedio de 3 mm, y que se producen usualmente mediante mangueras porosas.

La mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno SOTR la tienen los difusores de burbuja fina, debido a que éstas tienen una mayor área de interfase aire-agua, y a que ascienden muy lentamente en el agua, y por lo tanto tienen un mayor tiempo de contacto con dicha

agua. Sin embargo, debido a este último efecto, no generan la turbulencia suficiente para mantener en suspensión los bioportadores en procesos de biopelícula que se tratan en los Textos C y D. Según la Tabla A-4 del Capítulo A-5 sobre las eficiencias en la transferencia de oxígeno de los principales dispositivos, la eficiencia energética en condiciones standard en la aireación con burbuja fina oscila entre 1.2 y 2 kg O₂/kW·h, en la burbuja media entre 1 y 1.6, y en la burbuja gruesa entre 0.6 y 1.2 (WEF, Ref. A-2).

La eficiencia en la transferencia de oxígeno mediante difusore de burbujas es proporcional a la profundidad de dichos difusores, y por esta razón, este sistema de aireación es más apropiado para cuerpos de agua de mayor profundidad. La Tasa de Transferencia de O₂ en Condiciones Standard SOTR es función del caudal de oxígeno que sale por los difusores, del tiempo que el aire permanece en el agua, que es proporcional a la profundidad de aireación, y de la eficiencia en la transferencia, que depende del tamaño de las burbujas. El SOTR (Standard Oxygen Transfer Rate) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{SOTR (Kg O}_2\text{/hora)} = Q_a \times CO_x \times Pa \times E \quad \text{Ecuación A-8}$$

Donde:

Q_a: Caudal de aire a la presión del nivel del mar en m³/h.

CO_x: Contenido de oxígeno al nivel del mar, el cual se estima en 0,25 Kg/m³, que corresponde a su densidad del aire de 1,20 Kg/m³, multiplicada por el porcentaje de oxígeno en este sitio, que es de 20,90%.

Pa: Profundidad de los difusores de burbujas en metros

E: eficiencia en la transferencia de oxígeno al agua por metro de profundidad en condiciones standard

El valor se SOTR se multiplica por el factor N (ver Ecuación A-2), para obtener la tasa de transferencia de oxígeno en el sitio AOTR (Actual Oxygen Transfer Rate). En una guía de aireación de Sanitaire⁵ se estima que en el caso de la burbuja fina, la transferencia de O₂ es aproximadamente de 2% del oxígeno disponible en el aire por pie de profundidad del difusor, o sea que el valor de E es de 6.56% por metro de profundidad. En el caso de la burbuja gruesa, esta transferencia se reduce en cerca de 0.75%. La potencia de los sopladores requeridos para la aireación se calcula mediante la Ecuación A-24 del Capítulo A-4.

Las burbujas tienden a formar una columna sobre los difusores. En esta columna se concentra la transferencia de oxígeno, el cual no se difunde adecuadamente hacia las zonas aledañas. La aireación con burbujas finas tiene mayor eficiencia cuando los difusores cubren completamente el fondo (Ref. A-3), pero esto genera un proceso de flotación sobre

⁵ Sanitaire. "DIFFUSED AERATION DESIGN GUIDE".

<https://www.webpages.uidaho.edu/CE431/Handouts/Sanitaire%20Diffused%20Air%20Design%20Guide.pdf>

los bioportadores, que impide que se mezclan con el agua. Para lograr mayor eficiencia energética en los procesos de biopelícula, y lograr las condiciones de mezcla que requieren, en ocasiones se combina la aireación con burbuja fina con mezcladores mecánicos, los cuales generan corrientes que dispersan las burbujas en el tanque. También existe la posibilidad de combinar los difusores de burbuja con venturis u otros sistemas de aireación por chorros, que también dispersan las burbujas en grandes volúmenes de agua. La aireación mediante burbuja gruesa genera mayor turbulencia, y aunque es menos eficiente, resulta una alternativa bastante utilizada en los sistemas de biopelícula.

La aireación con burbujas finas y medias es muy útil en procesos de floculación dentro del tratamiento primario químicamente asistido TPQA, que se utilizan para remover la turbiedad, puesto que genera corrientes ascendentes suaves dentro del agua, rodeadas de corrientes descendentes, como se indica en los capítulos D-4 y D-5. Este efecto promueve la aglomeración eficiente de los sólidos suspendidos en forma de flóculos que tienden a decantarse, a la vez que produce una transferencia de oxígeno útil en la remoción de carga orgánica.

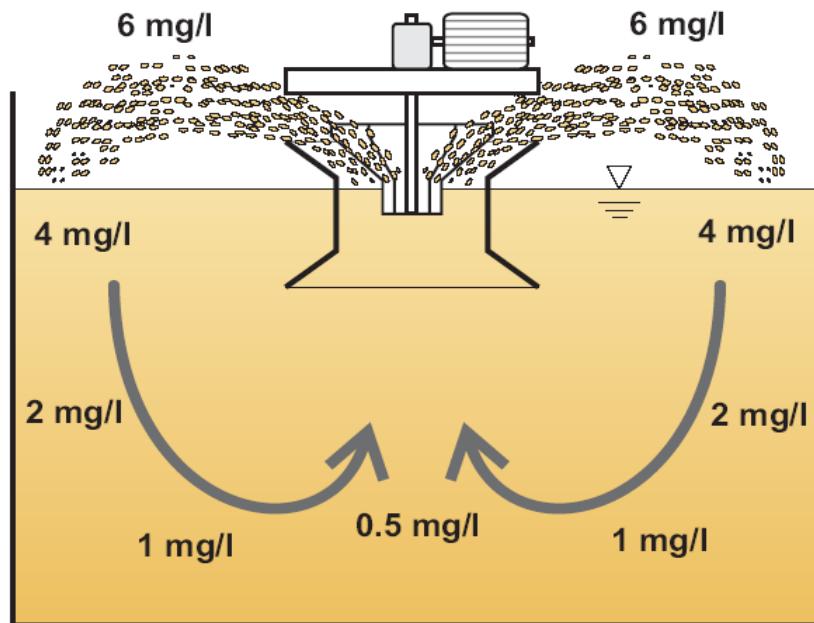
En los sistemas de aireación con difusores de burbujas, la tasa de transferencia de oxígeno en condiciones reales AOTR (Actual Oxygen Transfer Rate) se encuentra afectada por varios factores. Uno de ellos es el factor α de la Ecuación A-3, que depende de la intensidad de mezcla y turbulencia que genere el sistema de aireación, los cuales contribuyen a incrementar la tasa de transferencia. Según la guía de Sanitaire (Ref. A-5), el valor de α en la aireación por burbuja fina se estima de entre 0.5 y 0.6, debido a su baja capacidad de mezcla, mientras que en sistemas de venturi alcanza valores del orden de 0.95 (Mazzei, Ref. A-17).

Otro parámetro a tener en cuenta en la aireación mediante burbujas es el factor de falla F de la Ecuación A-3. Este parámetro mide la reducción de la eficiencia en la transferencia de oxígeno debido al taponamiento y deterioro de los difusores de burbuja, la cual aumenta con tiempo de funcionamiento. Su valor varía entre 1 y 0.5 según la edad de los difusores (WEF, Ref. A-2).

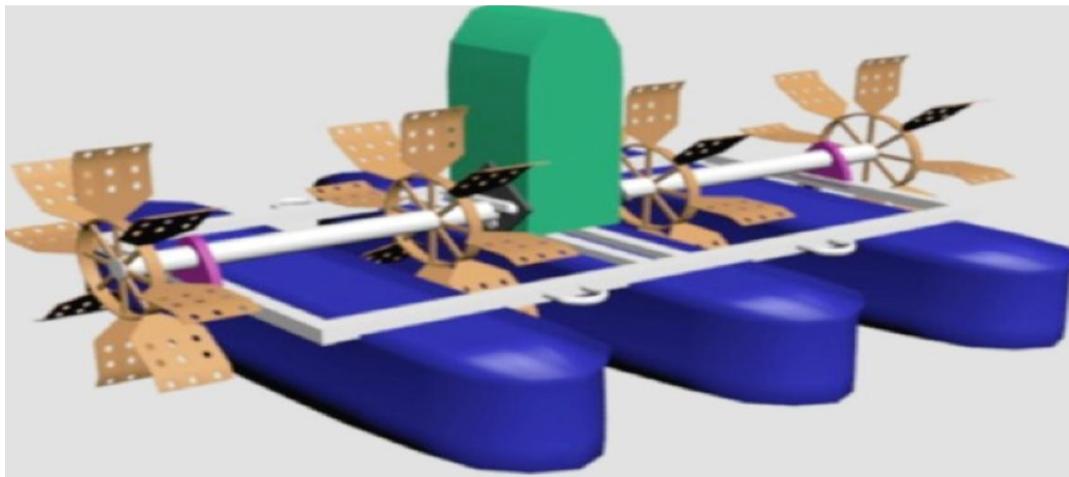
A-2.2. Aireación por Equipos Mecánicos

Los equipos mecánicos de aireación se clasifican en dos tipos. Por una parte, están los equipos de superficie, los cuales tienen un sistema que acciona un dispositivo para agitar el agua superficial, como es el caso de los aireadores de paletas y tipo splash. Mientras las paletas impulsan el agua hacia adelante, en los splash el agua es impulsada hacia arriba. La eficiencia energética SOTE de estos equipos es bastante buena (Ver Tabla A-5 del Capítulo A-5), y tienen costos bajos. Sin embargo, estos equipos producen una mezcla que generalmente no alcanzan hasta el fondo. Por consiguiente, tienen una limitada capacidad de mantener los bioportadores y los bioflócs en suspensión, lo cual es importante en los procesos de tratamiento con biopelículas y en plantas de acuicultura. Otro factor limitante es que el rotor y las paletas giran a gran velocidad, lo cual puede desintegrar las biopelículas sobre los bioportadores y los bioflócs, generando turbiedad, y además afectar las especies acuáticas cultivadas en los estanques de acuicultura.

Figura A-2 Aireador de Tipo Splash



Fuente: M. K. Stenstrom and D. Rosso, "Aeration". Ref. A-3. Figura A-3. Aireador de Tipo Paletas



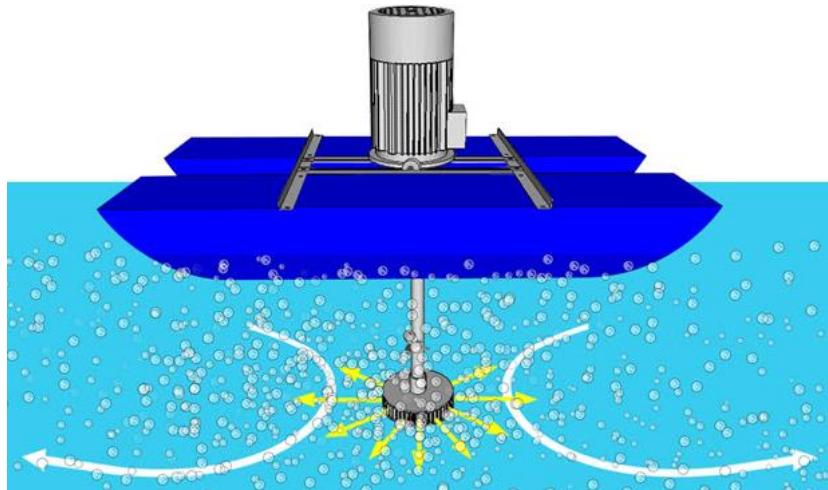
Fuente:

https://www.researchgate.net/publication/313909309_EFFECT_OF_ROTATIONAL_SPEEDS_OF_PADDLE_WHEEL_AERATOR_ON_AERATION_COST/link/58af9d9e92851cf7ae890118/download

El segundo tipo son los aireadores que pueden hacer llegar las burbujas a mayor profundidad, y por lo tanto tienen una capacidad de mezcla superior a la de los equipos anteriores. Uno de ellos es el aireador de turbina, que tiene un rotor de eje vertical sumergido a cierta profundidad, cuya rotación crea una fuerza centrífuga que impulsa al agua con burbujas hacia abajo, mientras que en su centro se produce un vacío que facilita la entrada de aire desde la superficie a través de un tubo. Este aireador, que se aprecia en

la siguiente figura, tiene efectos menos agresivos sobre la integridad de los bioflócs y las especies menores, pero la profundidad a la que llegan las burbujas es limitada.

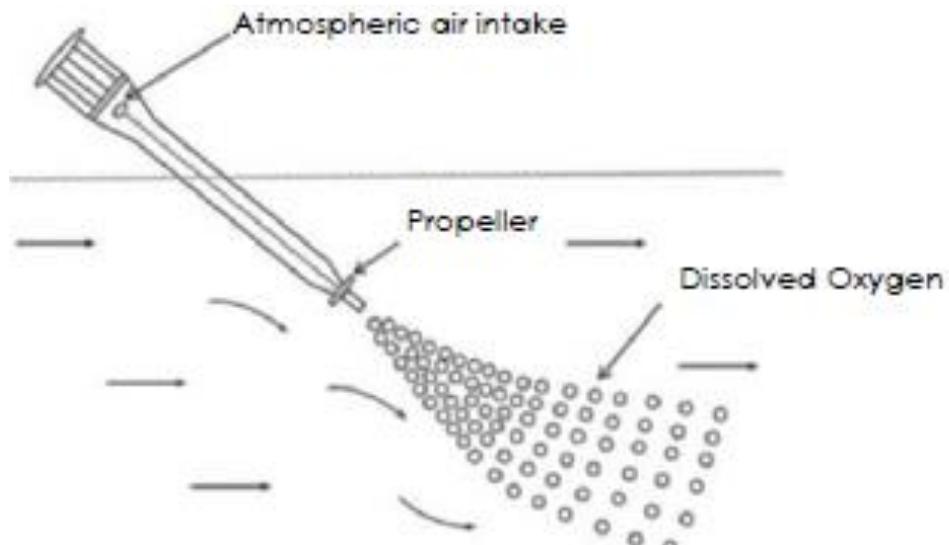
Figura A-4. Aireador de Tipo Turbina



Fuente: O2 Turbine Aerator. <https://www.2lua.vn/project/o2-turbine-aerator.html?hl=en>

También se encuentran los aireadores aspiradores helicoidales que se muestra en la siguiente figura, los cuales tienen un motor ubicado sobre el nivel del agua, que hace girar un eje inclinado en cuyo extremo se encuentra una hélice que impulsa el agua, generando un chorro inclinado que arrastra aire desde la superficie a través de un tubo, y lo divide en burbujas finas. La rotación de la hélice puede afectar los bioflócs y las especies acuáticas.

Figura A-5. Aireador Aspirador Helicoidal

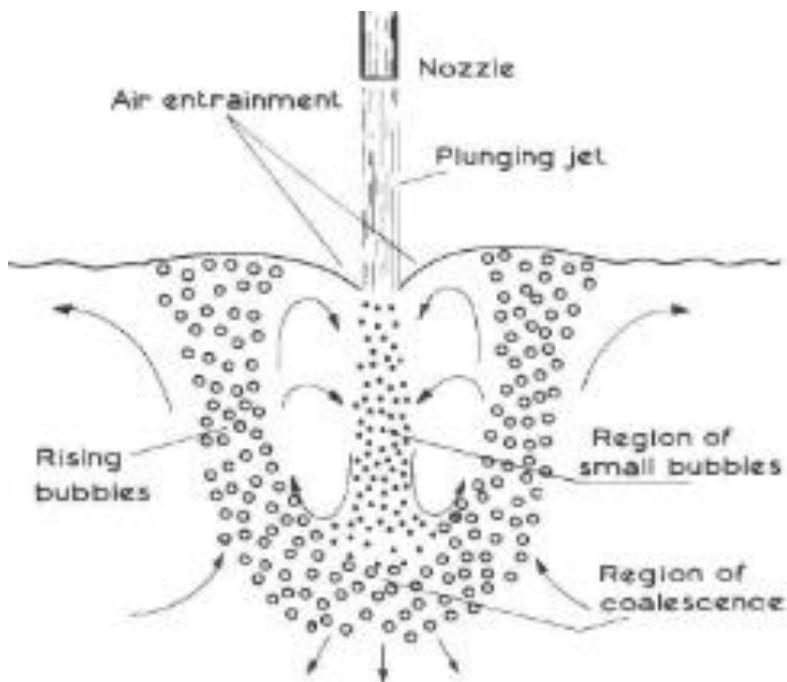


Fuente: Water Environment Federation. "Fact Sheet. Liquid Stream Fundamentals: Aeration Design". Ref. A-2.

A-3. AIREACION POR CHORROS EMERGIDOS

En los sistemas de biopelícula, la aireación se realiza tradicionalmente mediante equipos tales como los difusores de burbujas, o sistemas tipo venturi. Recientemente se ha desarrollado el sistema de aireación por chorros emergidos, en inglés ‘plunging jets’, que con medios sencillos logran transferencias de oxígeno al agua tan eficientes energéticamente como las mejores tecnologías actuales. En estudios realizados por Afzal Ahmed (1.974)⁶ y Jan Van De Donk (1.981)⁷ se analizó en forma bastante completa la aireación mediante chorros emergidos, y los parámetros y elementos que intervienen en la transferencia de oxígeno. En ellos se indican las ventajas que tiene este sistema de aireación respecto a los existentes. En un estudio realizado posteriormente por Andrzej Bin (1.993)⁸, se establecen ecuaciones más precisas para calcular la transferencia de oxígeno y otros parámetros importantes de los chorros emergidos. En la siguiente figura del estudio de Van De Donk se ilustra la aireación por un chorro emergido.

Figura A-6. Vistas del Chorro Emergido a) Esquema



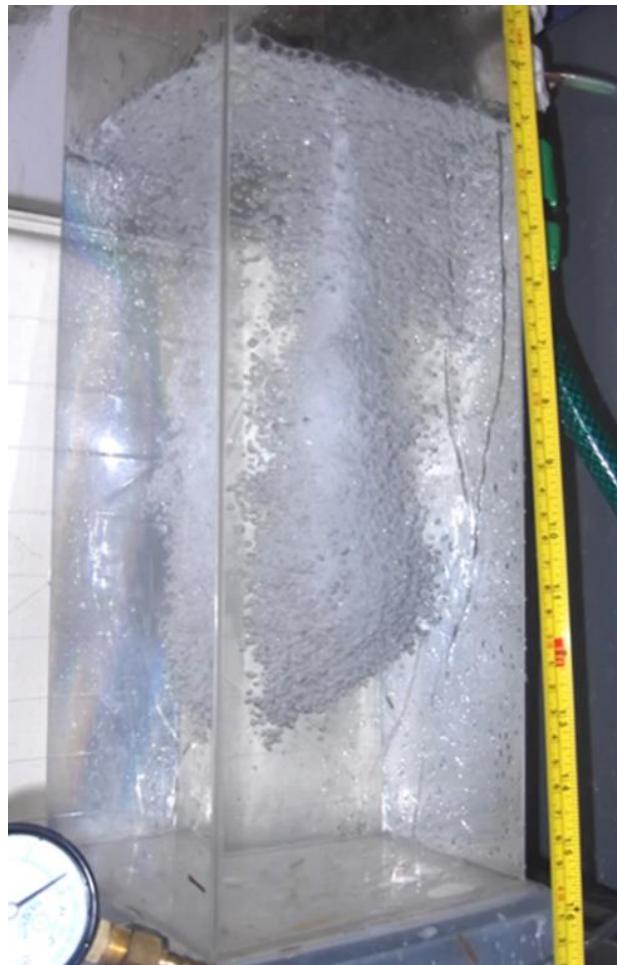
Fuente: Jan Van De Donk, Ref. A-7, 1.981

⁶ Afzal Ahmed. “Aeration by Plunging Liquid Jet”. Tesis Doctoral de Loughborough University or Technology. 1.974. <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/7911>

⁷ Jan Van De Donk . “Water Aeration with Plunging Jets”. Delft University of Technology.1.981 <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A816de895-4533-4770-9def-b3687c738cbe>

⁸ Andrzej Bin. “Review Article Number 43 - Gas Entrainment by Plunging Liquid Jets”. Chemical Engineering Science, Vol. 48, No. 21. 1.993. https://www.researchgate.net/profile/A_Bin2/publication/257118097_Gas_Entrainment_by_Plunging_Liquid_Jets/links/54ab078e0cf25c4c472f723c/Gas-Entrainment-by-Plunging-Liquid-Jets.pdf

b) Fotografía



Andrzej Bin establece la siguiente ecuación para la eficiencia de la transferencia de oxígeno de un sistema de aireación por chorros (Ecuación No 84, Ref. A-8):

$$\text{SOTE} = 1.89 \times Ph^{-0.29} \times dn^{0.20} \times Lj^{0.20} \quad \text{Ecuación A-9}$$

Donde:

SOTE (KgO₂/kW·h): Eficiencia en la transferencia de O₂ en Condiciones Estándar, en inglés Standard Oxygen Transfer Efficiency.

Ph (kW): Potencia hidráulica de los chorros

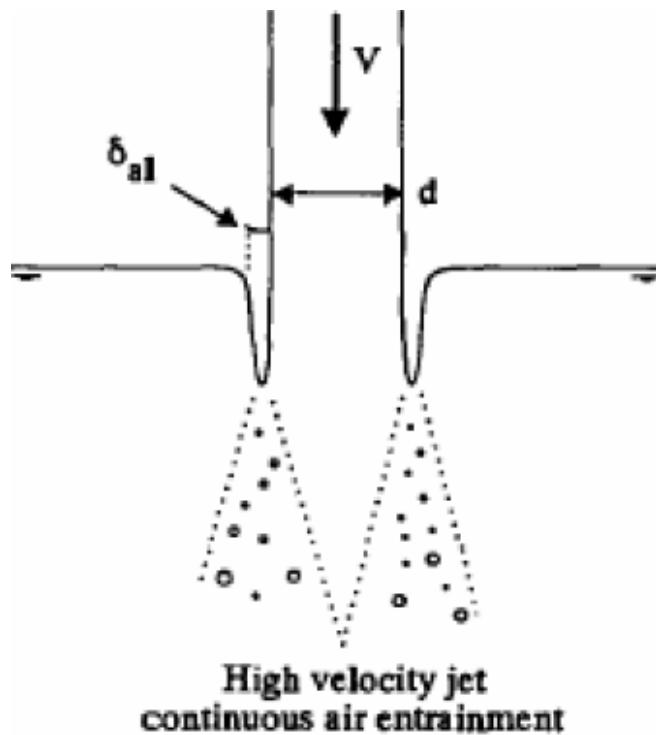
dn (m): Diámetro de la perforación

Lj (m): Longitud del chorro

En los chorros emergidos con velocidades superiores a 5 m/s, se produce un mecanismo de introducción de aire al agua, y que se presenta en la siguiente Figura A-7 a). En ese caso el chorro arrastra al interior de ésta una capa de aire adyacente a su superficie, como

se aprecia en dicha figura. Este fenómeno fue estudiado por Chanson, H.y Cummings P. D.⁹, quienes indican que este flujo de aire es continuo, y produce burbujas finas, con diámetros menores de 3 mm. Según este estudio, el arrastre de la capa de aire por parte del chorro se facilita cuando hay rugosidad en la superficie de éste.

Figuras A-7 a). Entrada de Capa de Aire al Agua en Chorros de Alta Velocidad



Fuente: Chanson, H. y Cummings, P.D. (Ref. A-9).

Otro mecanismo que facilita la entrada de aire en el agua es realizado por las rugosidades que se forman en la superficie del chorro, las cuales arrastran más aire, aumentando así la transferencia de oxígeno.

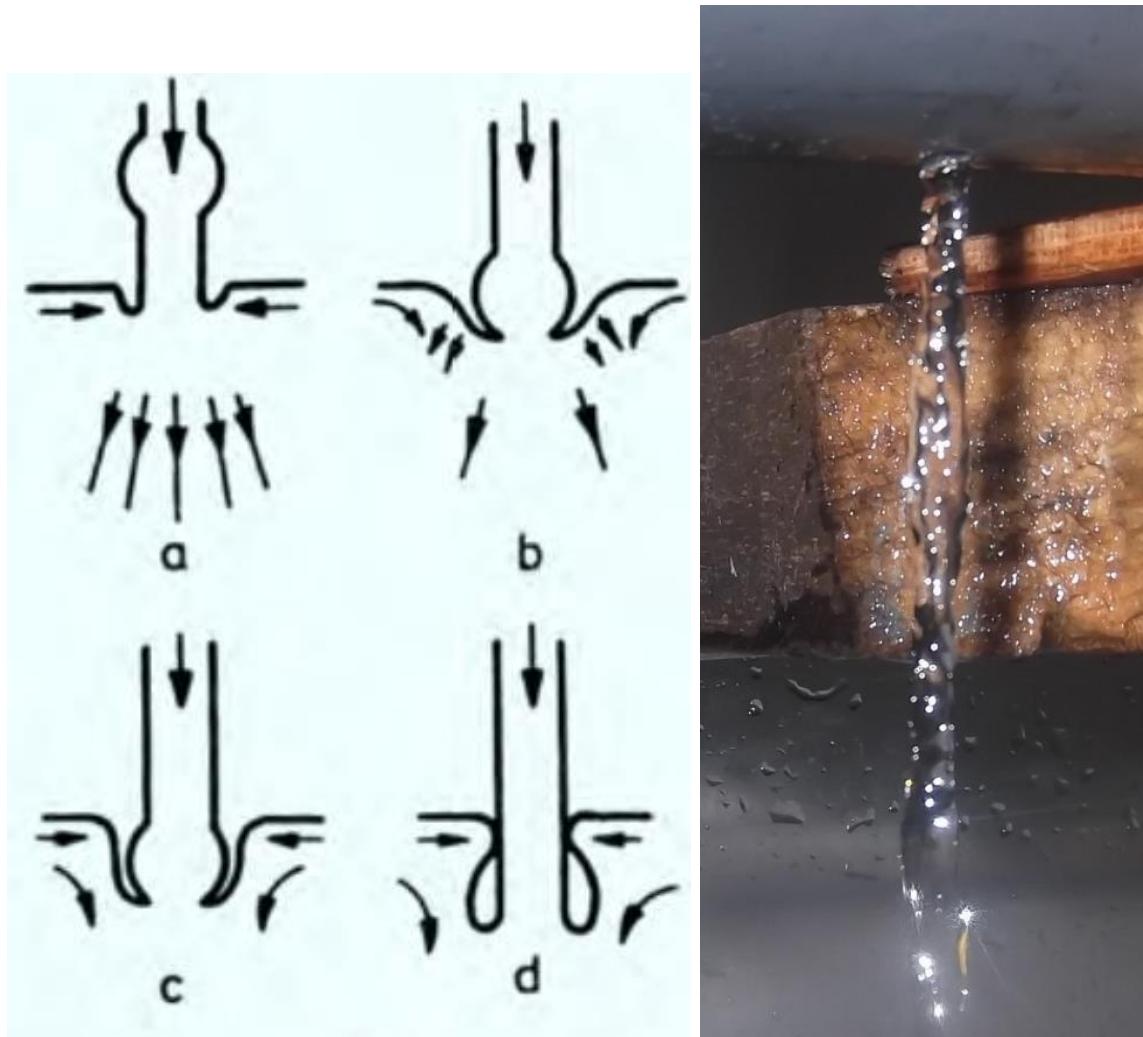
La longitud del chorro afecta la trasferencia de oxígeno debido a que su superficie se vuelve más rugosa en la medida que se aparta del orificio, y esas rugosidades ayudan a introducir aire dentro del agua. Sin embargo, en los ensayos realizados se comprobó que los chorros hechos con tuberías de PVC tenían una alta rugosidad inmediatamente salen de la perforación. Esto se explica por el hecho de que la pared de la tubería de PVC presión de $\frac{3}{4}$ ", que se recomienda para las parrillas de aireación, tiene un espesor de 2.4 mm, mientras que el diámetro del orificio es de $1/8$ ", o sea 3.17 mm. Por lo tanto, dicho orificio tiene la forma de un tubo corto, donde se produce una vena contracta. Dicha vena ocasiona bajas

⁹Chanson, H. y Cummings, P.D. "An Experimental Study on Air Carryunder due to Plunging Liquid Jet - Discussion." International Journal of Multiphase Flow, 1994.

<https://core.ac.uk/download/14982971.pdf>

presiones a la salida del chorro, que distorsionan su superficie, como se puede apreciar en la siguiente Figura A-7 b). Allí se muestra el mecanismo de entrada de aire debido a las rugosidades según el documento de Andrzej Bin, y el aspecto de un chorro emergido producido en una perforación de 1/8" en un tubo de PVC, donde se aprecian las rugosidades en el chorro.

Figuras A-7 b) Efecto de Rugosidades en el Chorro, y Aspecto del Chorro en una Tubería de PVC con una Perforación de 1/8"



Fuente: Andrzej Bin. (Ref. A-8)

Para obtener tasa de transferencia de oxígeno SOTR de cada chorro, se multiplica la eficiencia en la transferencia de oxígeno SOTE, calculada con la Ecuación A-9, por la potencia hidráulica del chorro Ph:

$$\text{SOTR}_c (\text{kgO}_2/\text{hora}) = \text{Ph} \times \text{SOTE} \quad \text{Ecuación A-10}$$

La potencia hidráulica del chorro en kilovatios se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ph (\text{kW}) = 9.81 \times Q(\text{m}^3/\text{sg}) \times hv(\text{m}) \quad \text{Ecuación A-11}$$

Donde Q el caudal del chorro y hv es la cabeza de velocidad de su flujo. Todos los valores de SOTE y de SOTRc mencionados se refieren a las condiciones estándar, o sea que la transferencia de oxígeno ocurre en agua pura a una temperatura de 20°C, a nivel del mar, y se tiene una distribución homogénea del oxígeno en el volumen aireado. Para obtener la transferencia total de oxígeno del sistema de aireación en condiciones de terreno AOTR, se multiplica el valor de SOTRc de cada chorro por el número de chorros n , y por el factor de corrección de transferencia de oxígeno N , calculado con la Ecuación A-3.

$$AOTR (\text{kgO}_2/\text{hora}) = n \times \text{SOTRc} \times N \quad \text{Ecuación A-12}$$

El cálculo de la transferencia de oxígeno por chorros emergidos a partir de las ecuaciones anteriores se encuentra en la Tabla A-2 a). Cuando se introducen bioportadores en el tanque de aireación se producen una serie de efectos muy importantes que incrementan sustancialmente la transferencia de oxígeno. En ensayos realizados se observaron los siguientes efectos:

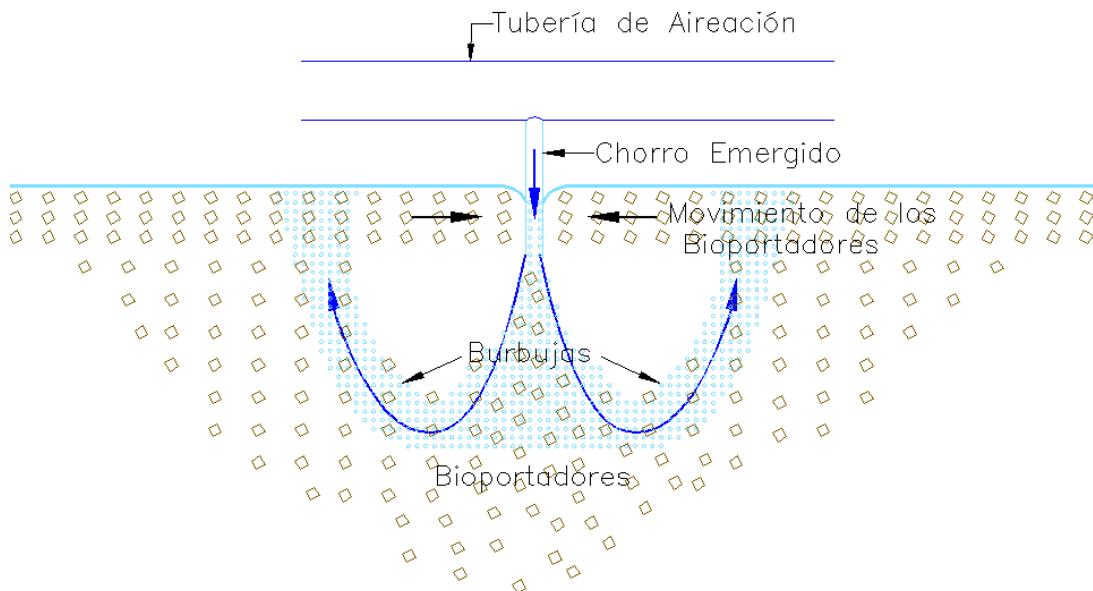
- Los chorros emergidos salen a gran velocidad, y al chocar con los bioportadores los dispersan en un gran volumen de agua, como se observa en las figuras A-8 y A-9. Esto genera una turbulencia que mezcla las burbujas y el oxígeno trasferido en dicho el volumen.
- Se aumenta el tiempo de permanencia de las burbujas en el agua, debido a que los bioportadores forman una capa que obstruye el ascenso de las burbujas hacia la superficie.

Los cálculos de los sistemas de aireación por chorros emergidos, con y sin bioportadores, es encuentran en los archivos en Excel ubicados en el Texto A.

En los ensayos realizados se observó que luego de ser impulsados por los chorros emergidos, los bioportadores se dispersan y luego ascienden lentamente hasta la superficie, formando una capa flotante. Posteriormente éstos se aproximan al chorro donde son impulsados nuevamente hacia abajo. De este modo, los bioportadores tienen un movimiento rotatorio que dura cierto tiempo, y cada vez que pasan bajo el chorro sufren un importante lavado que remueve el exceso de biopelícula, lo cual evita la obstrucción de las cámaras de los bioportadores. Este lavado también es necesario para el control del espesor de la biopelícula, como se indica en el Numeral C-2.3.

En la fotografía de la Figura A-6 b) se observa que cuando no hay bioportadores, los chorros emergidos forman una columna compacta de burbujas, y por lo tanto se produce el fenómeno de coalescencia, por el cual las burbujas se unen para formar burbujas gruesas que ascienden rápidamente, lo cual reduce la transferencia de oxígeno. Con los bioportadores se evita este fenómeno.

Figura A-8. Interacción entre los Chorros Emergidos y los Bioportadores



La interacción entre los chorros emergidos se aprecia en las siguientes imágenes de los ensayos realizados, donde se observa que dichos chorros dispersan a los bioportadores en todo el volumen de la cámara, debido al impulso que les imprimen, y a que la densidad de éstos es ligeramente menor que la del agua, lo cual les confiere bastante movilidad.

Figura A-9. Fotografías de los Bioportadores aireados mediante Chorros Emergidos



En la primera fotografía se aprecia la capa de bioportadores en condiciones de reposo, y en la segunda la penetración de éstos debido a la acción de los chorros.

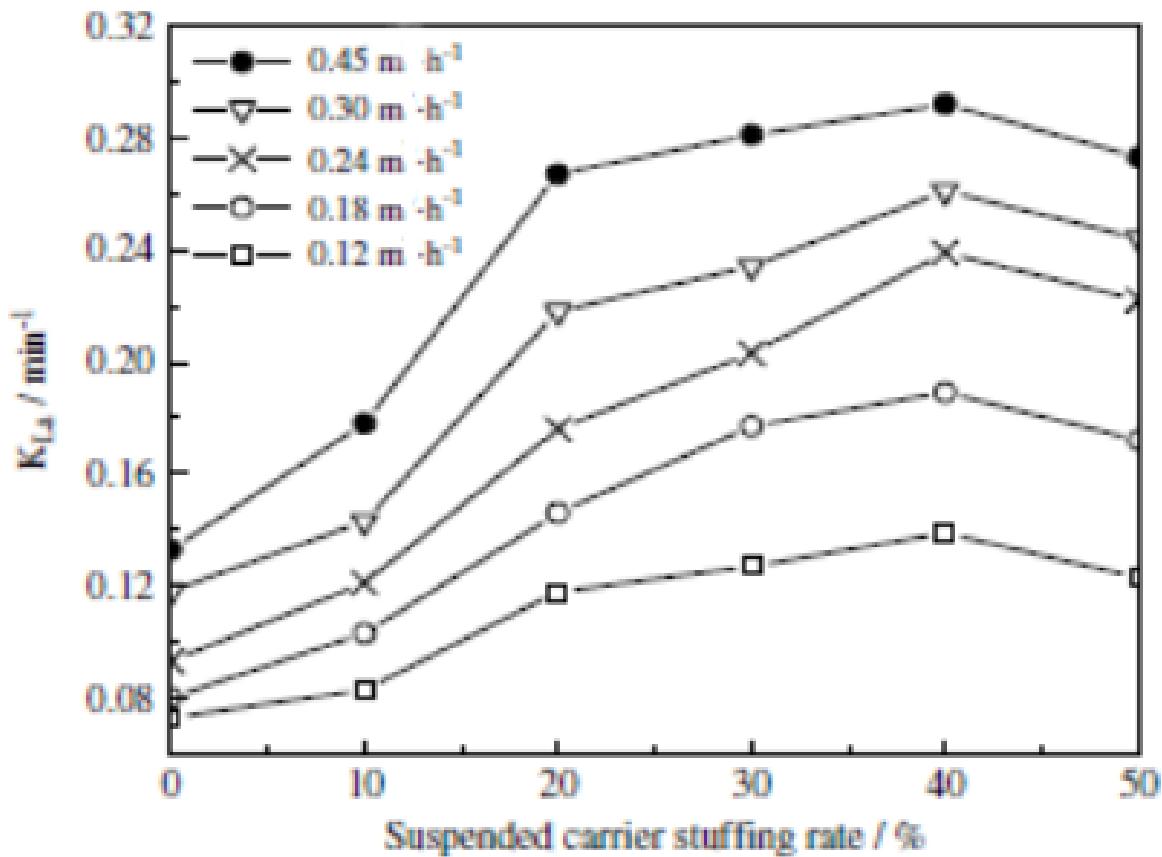
El considerable aumento de la eficiencia en la transferencia de oxígeno debido a la presencia de bioportadores en el tanque de aireación, es tratado en un estudio realizado por Jie Yin Jing¹⁰. Este aumento se atribuye a que el movimiento de los bioportadores ocasionado por la turbulencia fragmenta las burbujas, y que la trayectoria de éstas es más sinuosa, incrementando así su permanencia en el agua. Este efecto se muestra en la siguiente gráfica, donde se relaciona el valor del coeficiente de transferencia de masas K_{La} , (ver Ecuación A-1), con la proporción del volumen de bioportadores en el tanque, y con la intensidad de aireación U_g . Esta intensidad se calcula como el caudal de aire en m^3/s , dividido por el área del reactor en m^2 .

Para tener en cuenta en los cálculos el aumento de la transferencia de O_2 , se multiplica la AOTR calculada con la Ecuación A-12 por un Factor de Mayoración por Bioportadores FMB. Este factor es igual a la relación entre el del coeficiente de transferencia de masas K_{La} con bioportadores, y el que se tiene sin bioportadores. De acuerdo a la Figura A-10, cuando los bioportadores ocupan entre el 20 y el 50% de volumen del tanque o de la zona aireada, el factor FMB es superior a 2. El llenado óptimo de bioportadores es del 40% de volumen. En la Tabla A-1 a continuación se encuentran los valores de FMB para este caso. Allí se observa que cuando la intensidad de la aireación supera 0.18 m/h, el factor FMB es superior a 2. Por lo tanto se recomienda adoptar este valor para los cálculos de la Ecuación A-15.

Cuando solo se requiere realizar procesos de aireación y no de biopelícula, y considerando el alto costo de los bioportadores, se recomienda un llenado de mínimo el 20%, con el cual se logra una la eficiencia es adecuada, siempre y cuando la intensidad de la aireación sea superior a 0.24 m/h. Por lo tanto aquí también se adopta un FMB de 2. El cálculo de esta intensidad se explica a continuación.

¹⁰ Jie Yin Jing et al. "Carrier Effects on Oxygen Mass Transfer Behavior in a Moving Bed Biofilm Reactor". Curtin University of Technology. 2.009.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/api.302>

Figura A-10. Coeficiente de Transferencia de Masas K_{La} en Función de la Proporción de Bioportadores en el Agua, y de la Intensidad de Aireación en m/hora.



Fuente: Jie Yin Jing et al. (Ref. A-10).

Tabla A-1

Cálculos del Factor de Mayoración por Bioportadores FMB en Función de la Intensidad de Aireación según Figura Anterior, para un Llenado del 40%

Intensidad de Aireación m/hora	Coeficiente de Transferencia de Tasas K_{la} 1/min		Factor de Mayoración por Bioportadores FMB
	Sin Bioportadores	Con 40% de Bioportadores	
0,45	0,134	0,296	2,21
0,30	0,107	0,258	2,41
0,24	0,095	0,24	2,53
0,18	0,08	0,192	2,40
0,12	0,072	0,135	1,88

Fuente: Jie Yin Jing et al. (Ref. A-10).

En los cálculos de aireación por chorros emergidos de las Tablas A-2 a), b) y c), que corresponden a tratamientos de agua usuales, se encuentra que las intensidades de aireación tienen valores de 1.11 m/h , que son muy superiores a 0.18 m/h. Para calcular la intensidad de la aireación se debe estimar el caudal de aire introducido al agua Qa, que se puede calcular como el caudal de agua Qw multiplicado por la relación Qa/Qw. Esta relación se puede calcular mediante la siguiente ecuación de Andrzej Bin (Ecuación No 37, Ref. A-8).

$$Q_a/Q_w = 0.04 \times Fr_j^{0.28} \times (L_j/d_n)^{0.4} \quad \text{Ecuación A-13}$$

Donde Lj es la longitud del chorro y Frj es el número de Froude de éste, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Fr_j = V_j / (g \times d_n)^{0.5} \quad \text{Ecuación A-14}$$

Donde Vj es la velocidad en el chorro en m/s, dn su diámetro en metros, y g la gravedad en m/s².

Jie Yin Jing et al. (Ref. A-10) indica que la perdida de eficiencia en la transferencia de O₂ cuando el volumen de bioportadores supera el 40% del tanque, se debe a que éstos quedan inmovilizados, puesto que la aireación con burbuja fina no tiene la capacidad de moverlos, y por lo tanto no se tienen los efectos anotados anteriormente. En el caso de la aireación con chorros emergidos esto no ocurre, debido a que estos chorros dispersan los bioportadores y las burbujas en un gran volumen de agua, donde se tiene turbulencia adecuada, como se muestra en las figuras A-8 y A-9 anteriores. Por esta razón, se considera con la aireación por chorros emergidos, la alta eficiencia en la transferencia de O₂ se puede mantener con porcentajes de bioportadores mayores al 50% del volumen del reactor. En los diseños de aireación por chorros emergidos se recomienda que se adopte

un valor de FMB de 2, cuando se tienen volúmenes de bioportadores correspondientes a entre 20 a 60% del tanque, o de la zona aireada. Dicha zona se determina como el volumen del tanque que llega hasta la profundidad H_a definida por la Ecuación A-17. Mona Chaali¹¹ et al indica que normalmente éstos constituyen entre el 60 y el 70% del volumen del agua contenida en el tanque.

Para estimar la transferencia oxígeno se multiplica el valor de AOTR obtenido en la Ecuación A-12 por el Factor de Mayoración por Bioportadores FMB. Por lo tanto, cuando se tiene una aireación con chorros emergidos en un tanque con bioportadores, la ecuación para calcular la transferencia de oxígeno queda de la siguiente forma:

$$\text{AOTR (kgO}_2/\text{hora)} = \text{FMB} \times n \times \text{SOTRc} \times N \quad \text{Ecuación A-15}$$

Donde SOTRc es la transferencia de O_2 en condiciones estándar para cada chorro emergido, calculada con la Ecuación A-10, n es el número de chorros., y N es el Factor Transferencia de Oxígeno en Condiciones Reales, que se calcula con Ecuación A-3.

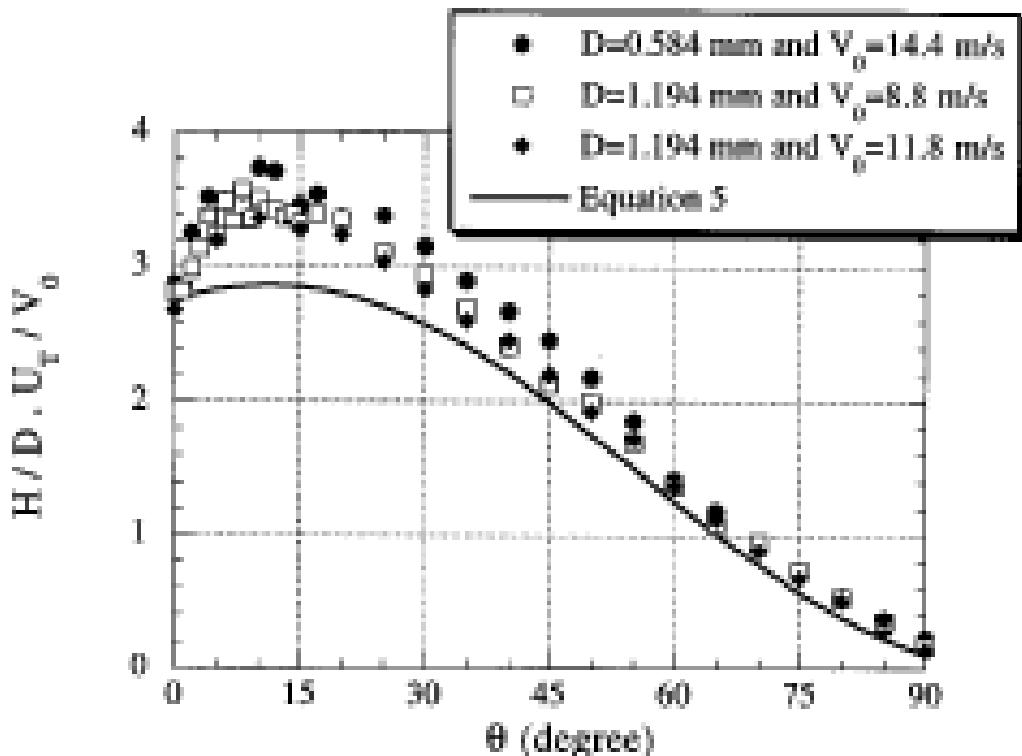
En el caso de aireación con chorros emergidos, se tienen dos factores que pueden aumentar la transferencia de oxígeno al agua respecto a los cálculos recomendados anteriormente. El primero es la dispersión de los bioportadores cuando son impactado por los chorros que tienen gran velocidad. Estos bioportadores arrastran las burbujas y el agua oxigenada y las mezclan en un gran volumen. El segundo factor es la retención de burbujas en la capa de bioportadores que se observa en la figura A-8. Lo cual aumenta el tiempo de contacto de éstas con el agua. Estos fenómenos se han observado en ensayos realizados.

La transferencia de oxígeno también puede aumentar mediante la inclinación del chorro. De acuerdo con un estudio realizado por Christophe Clanet y Juan C. Lasheras¹², las burbujas que ascienden realizan una fuerza de arrastre hacia arriba sobre el chorro, lo cual reduce su penetración en el agua. Este efecto se reduce si se le da una inclinación al chorro, de tal manera que éste se aparte de la corriente ascendente generada por las burbujas. En la siguiente gráfica se relaciona la penetración H de las burbujas con la inclinación del chorro θ , donde se observa que la penetración máxima del chorro ocurre cuando éste tiene un ángulo de 12° con la vertical. En este caso, el aumento en la profundidad de penetración de las burbujas es de 4.8%, lo cual se traduce en un aumento de la permanencia de éstas en el agua, y de la transferencia de oxígeno. En la gráfica, D es el diámetro del chorro, U_t es la velocidad ascendente de las burbujas, y V_o es la velocidad del chorro. Estos parámetros permanecen constantes con la variación de la inclinación del chorro θ .

¹¹ Mona Chaali et. al. "Review on the advances of nitrifying biofilm reactors and their removal rates in wastewater treatment". <http://espace.inrs.ca/7279/1/P3339.pdf>

¹² Christophe Clanet y Juan C. Lasheras. "Depth of penetration of bubbles entrained by a plunging water jet". Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California, 1.997. https://www.researchgate.net/publication/200522645_Depth_of_penetration_of_bubbles_entrained_by_a_plunging_water_jet

Figura A-11. Relación entre la Inclinación θ del chorro y la Penetración H de las Burbujas



Fuente. Christophe Clanet y Juan C. Lasheras. Figura No 4. Ref. A-12

En las parrillas de aireación se recomienda que los ramales de un costado tengan una inclinación opuesta a los del otro, de modo que se genere un movimiento rotatorio en el agua. Este movimiento hace que se aumente la dispersión de las burbujas en el tanque, y que se produzca un lavado periódico de los bioportadores debido a que se tendría un movimiento circular de la superficie donde se ubican. Esto es importante para controlar el espesor de la biopelícula, como se explica en el Numeral C-2.3.

La penetración H_c de las burbujas en chorros verticales puede calcularse mediante la siguiente ecuación 3.47 de Van De Donk (Ref. A-7):

$$H_c = 2,4 \times (v_n \times d_n)^{0.66}$$

El valor de H_c se multiplica por un factor de 1.048 cuando el chorro se inclina 12°, y la ecuación queda de la siguiente forma:

$$H_c = 2,52 \times (v_n \times d_n)^{0.66} \quad \text{Ecuación A-16}$$

Se considera que la zona aireada por los chorros emergidos corresponde a la profundidad H_a a la que penetran los bioportadores impulsados por los chorros. Según ensayos realizados, esta profundidad H_a es aproximadamente la suma de la altura de la capa de bioportadores en las condiciones de reposo H_b , más penetración del chorro H_c , establecida por la ecuación anterior. Esto se explica porque inicialmente los bioportadores están en

contacto, y al recibir el impacto de los chorros trasmiten el impulso a los que están en la parte inferior de la cara, que se encuentran a una profundidad H_b , de modo que estos llegan hasta una profundidad equivalente a dicha profundidad, más la profundidad del chorro H_c .

$$H_a = H_b + H_c \quad \text{Ecuación A-17}$$

Se recomienda adicionar nanopartículas de magnetita en el polipropileno con que se fabrican los bioportadores, con el objeto de elevar el peso específico del polipropileno de 0.91 a 0.95. Con esto se reduce considerablemente la fuerza de flotación sobre los bioportadores, lo cual hace que se sumerjan a mayores profundidades. Esto produce una mayor profundidad de penetración de los bioportadores y de las burbujas, y facilita la mezcla del agua oxigenada con un mayor volumen de agua, lo cual produce un incremento en la transferencia de oxígeno. Los composites como el polipropileno, adicionados con nanopartículas de magnetita, adquieren propiedades hidrofílicas que facilitan la adhesión de las bacterias y otros microorganismos que conforman las biopelículas. Los fundamentos de esta tecnología y su aplicación en la remoción de bacterias, se explica en un documento de Aneela Hameed et al¹³. La utilización de las nanopartículas de magnetita en los bioportadores ha sido bastante exitosa, como lo indica el artículo de Youli Zhu¹⁴.

Con velocidades en los chorros de 10 m/s, se tendrían cabezas de velocidad de alrededor de 5.10 m, y para producirlos se requieren cabezas de bombeo bastante bajas. En el mercado existen bombas adecuadas que proporcionan estas cabezas, las cuales tienen diámetros de 4 a 6" y velocidades rotacionales de 1.150 a 1.750 rpm, que pueden tener eficiencias energéticas del más de 80% para caudales de 15 a 20 Lps. En los cálculos de las Tablas A-2 b) y c) sobre la aireación mediante chorros emergidos en tanques con bioportadores, se asumieron velocidades de 10 m/sg. En esos cálculos se estima una eficiencia energética en condiciones standard es de 2.74 Kg O₂/KW-hora, que se eleva a 5.48 Kg O₂/KW-hora cuando hay presencia de bioportadores en el tanque.

Se ha diseñado una parrilla estandarizada para la aireación de tanques mediante chorros emergidos, que se presenta en la siguiente figura. Esta parrilla consiste en una tubería central con ramales de tuberías perforadas. Dicha parrilla está soportada por una platina cuyos extremos se fijan a los muros del tanque. Las perforaciones producen chorros inclinados a 12° con la vertical para aumentar la transferencia de oxígeno. La dirección de los chorros a un costado de la parrilla es contraria a las del otro costado, de tal manera que se forma un flujo rotatorio en el tanque que facilita el lavado periódico de los bioportadores.

La parrilla de aireación por chorros emergidos tiene 18 ramales con 3 orificios cada uno, para un total de 54 orificios. Se recomienda que el diámetro de éstos sea de 1/8", puesto

¹³ Aneela Hameed et al. "Review Article - Magnetite (Fe₃O₄) - Synthesis, Functionalization and its Application". International Journal of Food and Allied Sciences, 2.017.

<https://ijfaas.com/index.php/ijfaas/article/view/97>

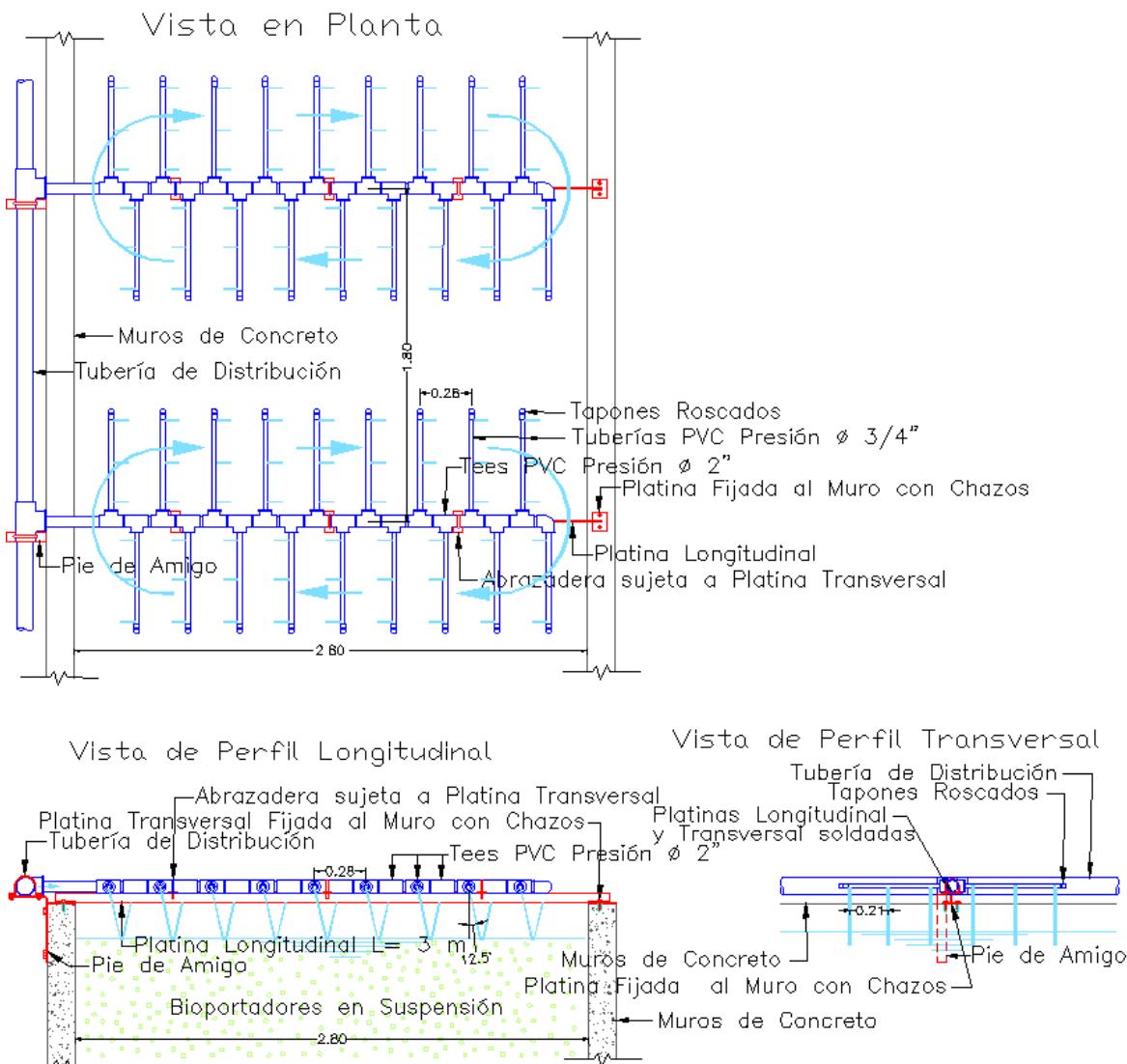
¹⁴ Youli Zhu. "Preparation and characterization of a new hydrophilic and biocompatible magnetic polypropylene carrier used in wastewater treatment".

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2017.1365940>

que valores menores generan posibles obstrucciones, y valores mayores implican perdidas de eficiencia energética. Para la limpieza de los orificios, los ramales tienen en su extremo un tapón roscado, que al retirarse produce un chorro que remueve elementos que pudieran obstruirlos. En el cálculo de la parrilla de aireación, que se presenta en las Tablas A-2, se asumieron condiciones de clima medio a 1.000 msnm y temperatura del agua de 25°C. En el caso de procesos de nitrificación donde se utilizan bioportadores, se asumieron concentraciones de oxígeno disuelto a la salida del proceso de aireación de 3 mg/L en el caso de nitrificación completa, y de 1.6 mg/L en el caso de nitrificación parcial, las cuales son consideradas típicas. Según los cálculos, para la concentración en el agua de 3 mg/L, la transferencia de oxígeno estimada de la parrilla es de 0.34 kg de oxígeno por hora, pero cuando dicha concentración se reduce a 1.6 mg/L, la transferencia por parrilla aumenta a 0.45 KgO₂/hora, como se aprecia en las Tablas A-2 b) y c) a continuación. Esto se debe al aumento del Factor de Transferencia de N de 0.49 a 0.66, el cual es función de la diferencia entre la concentración de saturación de oxígeno CsTA , y la concentración de salida de éste que se ha especificado.

La aireación los chorros emergidos es muy apropiada para realizar procesos de biopelícula con bioportadores flotantes, con el objeto de remover nitrógeno amoniacal mediante la nitrificación. Debido a la escasa penetración de los chorros, los procesos de trasferencia de oxígeno y mezcla quedan confinados a la capa superior de agua. De esta forma, es posible tener tanques profundos en los cuales se tenga un proceso aeróbico en la partes superior, y un proceso anaeróbico o anóxico en la parte inferior, como ocurre con la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales presentadas en este sitio web. A continuación se encuentran los diseños y cálculos de las parrillas. Se recomienda que se tengan líneas de parrillas en las cuales la separación entre ellas sea superior a 1.80 m, y el ancho del tanque, o la separación entre líneas, sea de 2.80 m, lo cual corresponde a la distancia entre los apoyos de la parrilla. como se muestra en la figura a continuación. Esto facilita el desplazamiento de las personas entre dichas parrillas.

Figura A-12. Detalles de las Parrillas de Aireación por Chorros Emergidos



Tablas A-2 – Transferencia de Oxígeno para Parrilla de Aireación por Chorros Emergidos

a) Sistema de Aireación sin Bioportadores

Condiciones de la Parrilla		
Concentración de OD a la salida	Cl	3,00 mg/L
Velocidad en Chorros	V	10,00 m/s
Cabeza de Velocidad	hv	5,10 m
Chorros por Ramal		3 u
No de Ramales		18 u
No de Chorros	n	54 u
Diámetro de Orificio	1/8"	3,18 mm
Área de Flujo por Perforación		7,91 mm ²
Coeficiente de Descarga	Cd	0,58
Caudal por Chorro		0,05 Lps
Caudal por Parrilla	Q	2,48 Lps
Ancho del Tanque		2,80 m
Separación entre Parrillas	Minino 1,8 m	2,20 m
Área de Zona Aireada		6,16 m ²
Transferencia de Oxígeno por Parrilla		
Altitud		1.000 msnm
Temperatura	T°C	25 oC
Presión a Nivel del Mar	P	101,33 kPa
Factor de Presión		-0,11
Presión en el Sitio	Pt	90,35 kPa
Salinidad del Agua		0,00 gr/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura	C _{sT}	8,24 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura y Altitud	C _{sTA}	7,35 mg/L
Penetración de las Burbujas Calculada	H _c	0,26 m
Altura de la Capa de Bioportadores	H _b	0,30 m
Profundidad de la Aireación	H _a	0,56 m 5,47 kPa
Concentración de Saturación de O ₂ en el Terreno	C _{sT}	7,57 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para 20 °C a nivel del mar	C _{s20}	9,08 mg/L
Potencia Hidráulica por Chorro	P _h	0,0023 Kw
Longitud Media del Chorro	L _i	0,30 m
Eficiencia Energética del Chorro en Condiciones Estándar	SOTE	2,74 KgO ₂ /kW-h
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estandar por Chorro en Tanque	SOTR _c	0,0063 Kg O ₂ /h
Factor de Corrección por Salinidad y Tensión Superficial	β	0,95
Factor de Corrección de Transferencia de O ₂ para Aguas Residuales	α	0,95
Factor Tranferencia de O ₂ en Condiciones Reales	N	0,49
Tasa de Transferencia de Oxígeno por Aireación por Parrilla	AOTR	0,17 KgO ₂ /hora
No de Froude del Chorro	F _{rj}	56,69
Relación Caudal de Aire/Caudal de Agua	Q _a /Q _w	0,76
Caudal de Aire		6,82 m ³ /h
Intensidad de la Aireación		1,11 m/hora
Tasa de Transferencia de O ₂ por Litro de Agua		0,0007 grO ₂ /L
Coeficiente de Transferencia de Masas	K _{la}	0,15 1/min

b) Sistema de Aireación Completa con Bioportadores

Transferencia de Oxígeno por Parrilla en Condiciones de Aireación Completa		
Condiciones de la Parrilla		
Concentración de OD a la salida	Cl	3,00 mg/L
Velocidad en Chorros	V	10,00 m/s
Cabeza de Velocidad	hv	5,10 m
Chorros por Ramal		3 u
No de Ramales		18 u
No de Chorros	n	54 u
Diámetro de Orificio	1/8"	3,18 mm
Área de Flujo por Perforación		7,91 mm ²
Coeficiente de Descarga	Cd	0,58
Caudal por Chorro		0,05 Lps
Caudal por Parrilla	Q	2,48 Lps
Ancho del Tanque		2,80 m
Separación entre Parrillas	Minino 1,8 m	2,20 m
Área de Zona Aireada		6,16 m ²
Transferencia de Oxígeno por Parrilla		
Altitud		1.000 msnm
Temperatura	T°C	25 oC
Presión a Nivel del Mar	P	101,33 kPa
Factor de Presión		-0,11
Presión en el Sitio	Pt	90,35 kPa
Salinidad del Agua		0,00 gr/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura	C _{sT}	8,24 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura y Altitud	C _{sTA}	7,35 mg/L
Penetración de las Burbujas Calculada	H _c	0,26 m
Proporción Óptima de Bioportadores en Zona Aireada	% Biop	40%
Proporción de Bioportadores en Zona Aireada		40%
Altura de la Capa de Bioportadores	H _b	0,17 m
Profundidad de la Aireación	H _a	0,43 m 4,22 kPa
Concentración de Saturación de O ₂ en el Terreno	C _{sT}	7,52 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para 20 °C a nivel del mar	C _{s20}	9,08 mg/L
Potencia Hidráulica por Chorro	P _h	0,0023 Kw
Longitud Media del Chorro	L _i	0,30 m
Eficiencia Energética del Chorro en Condiciones Estándar sin Bioportadores	SOTE	2,74 KgO ₂ /kW-h
Factor de Mayoración por Efecto de Bioportadores	F _{MB}	2,00
Eficiencia Energética del Chorro en Condiciones Estándar en Tanque con Bioportadores	SOTE	5,48 KgO ₂ /kW-h
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estandar por Chorro en Tanque con Bioportadores	SOTR _c	0,0126 Kg O ₂ /h
Factor de Corrección por Salinidad y Tensión Superficial	β	0,95
Factor de Corrección de Transferencia de O ₂ para Aguas Residuales	α	0,95
Factor Tranferencia de O ₂ en Condiciones Reales	N	0,49
Tasa de Transferencia de Oxígeno por Aireación por Parrilla	AOTR	0,33 KgO ₂ /hora
No de Froude del Chorro	F _{rj}	56,69
Relación Caudal de Aire/Caudal de Agua	Q _a /Q _w	0,76
Caudal de Aire		6,82 m ³ /h
Intensidad de la Aireación	Cumple	1,11 m/hora
Tasa de Transferencia de O ₂ por Litro de Agua		0,0014 grO ₂ /L
Coeficiente de Transferencia de Masas	K _{la}	0,31 1/min

c) Sistema de Aireación Parcial con Bioportadores

Transferencia de Oxígeno por Parrilla en Condiciones de Aireación Parcial		
Condiciones de la Parrilla		
Concentración de OD a la salida	Cl	1,60 mg/L
Velocidad en Chorros	V	10,00 m/s
Cabeza de Velocidad	hv	5,10 m
Chorros por Ramal		3 u
No de Ramales		18 u
No de Chorros	n	54 u
Diámetro de Orificio	1/8"	3,18 mm
Área de Flujo por Perforación		7,91 mm ²
Coeficiente de Descarga	Cd	0,58
Caudal por Chorro		0,05 Lps
Caudal por Parrilla	Q	2,48 Lps
Ancho del Tanque		2,80 m
Separación entre Parrillas	Minimo 1,8 m	2,20 m
Área de Zona Aireada		6,16 m ²
Transferencia de Oxígeno por Parrilla		
Altitud		1.000 msnm
Temperatura	T°C	25 oC
Presión a Nivel del Mar	P	101,33 kPa
Factor de Presión		-0,11
Presión en el Sitio	Pt	90,35 kPa
Salinidad del Agua		0,00 gr/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura	C _{sT}	8,24 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura y Altitud	C _{sTA}	7,35 mg/L
Penetración de las Burbujas Calculada	H _c	0,2586 m
Proporción Óptima de Bioportadores en Zona Aireada	% Biop	40%
Proporción de Bioportadores en Zona Aireada		40%
Altura de la Capa de Bioportadores	H _b	0,17 m
Profundidad de la Aireación	H _a	0,43 m
		4,22 kPa
Concentración de Saturación de O ₂ en el Terreno	C _{sT}	7,52 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para 20 °C a nivel del mar	C _{s20}	9,08 mg/L
Potencia Hidráulica por Chorro	P _h	0,0023 Kw
Longitud del Chorro	L _i	0,30 m
Eficiencia Energética del Chorro en Condiciones Estándar sin Bioportadores	SOTE	2,74 KgO ₂ /kW·h

Factor de Mayoración por Efecto de Bioportadores	FMB	2,0
Eficiencia Energética del Chorro en Condiciones Estándar	SOTE	5,48 KgO ₂ /kW·h
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estandar por Chorro	SOTR _c	0,0126 Kg O ₂ /h
Factor de Corrección por Salinidad y Tensión Superficial	β	0,95
Factor de Corrección de Transferencia de O ₂ para Aguas Residuales	α	0,95
Factor Tranferencia de O ₂ en Condiciones Reales	N	0,65
Tasa de Transferencia de Oxígeno por Parrilla	AOTR	0,44 KgO ₂ /hora
No de Froude del Chorro	F _{rj}	56,69
Relación Caudal de Aire/Caudal de Agua	Q _a /Q _w	0,76
Caudal de Aire		6,82 m ³ /h
Intensidad de la Aireación	Cumple	1,11 m/hora
Tasa de Transferencia de O ₂ por Litro de Agua		0,0014 grO ₂ /L
Coeficiente de Transferencia de Masas	K _{la}	0,58 1/min

A-4. AIREACION POR BOQUILLAS DE TUBO TRANSVERSAL

Para la aireación de los estanques se ha desarrollado una boquilla de tubo transversal, la cual contiene dos venturis unidos que pueden funcionar sin necesidad de presurizar el aire mediante sopladores, pero que también pueden ser presurizados para airear estanques de mayor profundidad. Este sistema tiene ventajas importantes sobre otros sistemas de aireación, debido a su eficiencia energética en la transferencia de oxígeno, a la mejora en la distribución de éste en el tanque, y a su bajo costo. Es muy apropiado para estanques de acuicultura, debido a su capacidad de mantener los bioflócs en suspensión, los cuales tienen densidad mayor a la del agua.

La técnica de aireación por venturi fue estudiada por Ahmet Baylar¹⁵ y Fadzai Kadzinga¹⁶. El venturi es un conducto en el cual se introduce una contracción, en donde se aumenta la velocidad V del fluido y se reduce su presión P, de acuerdo con el principio de Bernoulli para flujos no comprensibles. En la contracción, dicha presión cae por debajo de la presión atmosférica, lo cual permite introducir aire al agua. Luego de la contracción, la presión aumenta al desacelerarse el flujo, y la turbulencia que se produce allí genera burbujas, que luego se mezclan con un gran volumen de agua debido a la acción del chorro en el tanque de aireación. El tiempo que permanecen estas burbujas en el agua aumenta cuando las burbujas tienen escaso diámetro y alcanzan mayores profundidades. Estas dos cosas redundan en mayor permanencia de éstas en el agua, y por lo tanto en una mayor transferencia de oxígeno al agua. En la figura siguiente se presenta un venturi tradicional, en la cual se tiene una cabeza hidráulica H, que está definida por la siguiente ecuación:

$$H = h_1 + V_1^2/2g$$

Donde h_1 es la cabeza de presión en la tubería y V_1 es la velocidad en ella, y g la gravedad. El venturi introduce la contracción que aumenta sustancialmente la velocidad a un valor de V_2 , manteniendo la misma cabeza hidráulica, puesto que en la aceleración del flujo no se producen pérdidas.

$$H = V_2^2/2g - h_2$$

En la ecuación anterior h_2 tiene un valor negativo, puesto que para que entre aire, la presión al interior del venturi debe ser inferior a la presión atmosférica, como se observa en la siguiente figura. La disminución Δh en la presión del agua sigue la siguiente ecuación:

¹⁵ A. Baylar, M. Cihan et alt. "Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using Fluent V6.2". Association for Scientific Research. Firat University, Turquía.2.2009.

https://www.researchgate.net/publication/228681439_Numerical_Modeling_of_Venturi_Flows_for_Determining_Air_Injection_Rates_Using_Fluent_V62

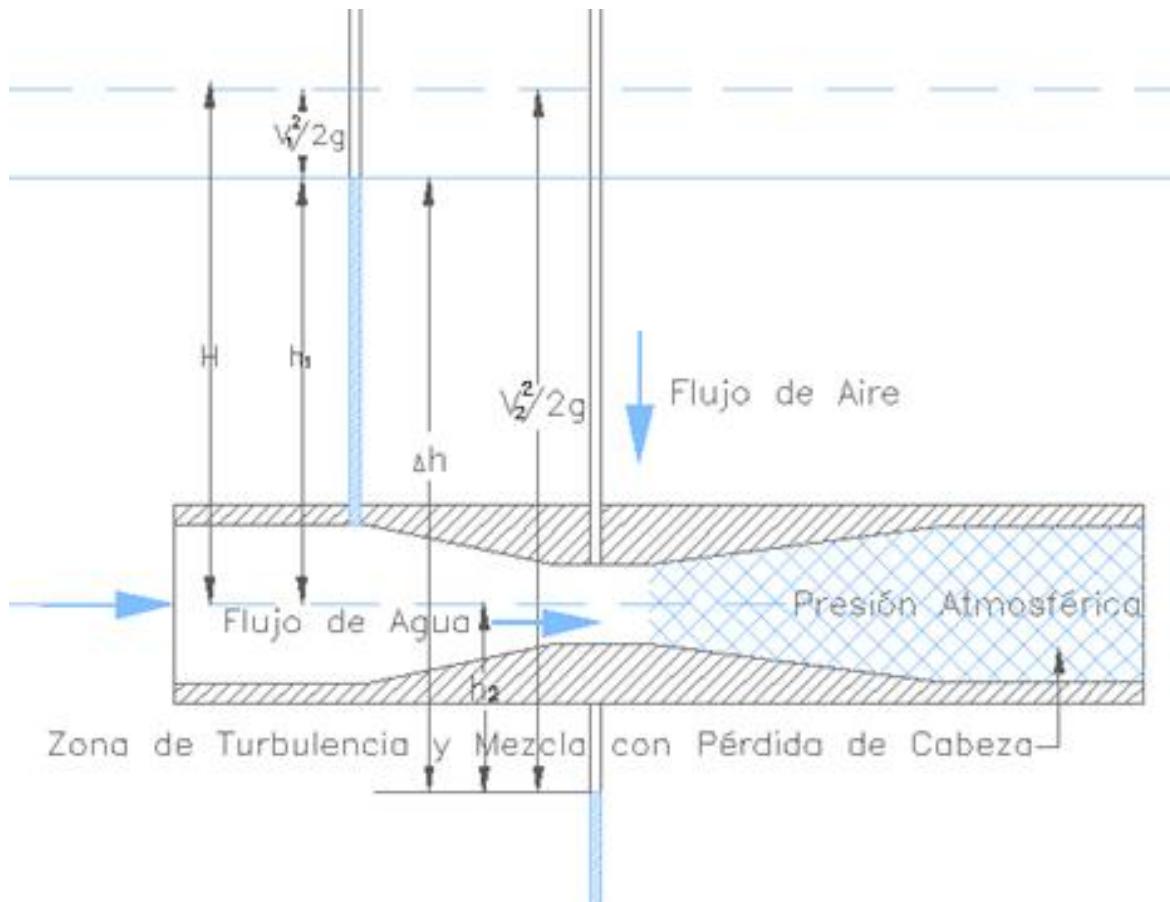
¹⁶ Fadzai Kadzinga. "Venturi Aeration of Bioreactors". Thesis for the degree of Master of Science in Engineering. University of Cape Town. 2.2015.

https://open.uct.ac.za/bitstream/item/14660/thesis_ebe_2015_kadzinga_f.pdf?sequence=1

$$\Delta h = h_1 + h_2 = V_2^2/2g - V_1^2/2g$$

Luego de la garganta, la velocidad del flujo retorna a la que tenía antes del venturi, y se produce una desaceleración del flujo, en la cual gran parte de la cabeza de velocidad se pierde. Esta pérdida de energía es ocasionada por los efectos de turbulencia y mezcla, los cuales facilitan la fragmentación del aire en burbujas, y la transferencia al agua del oxígeno que contienen.

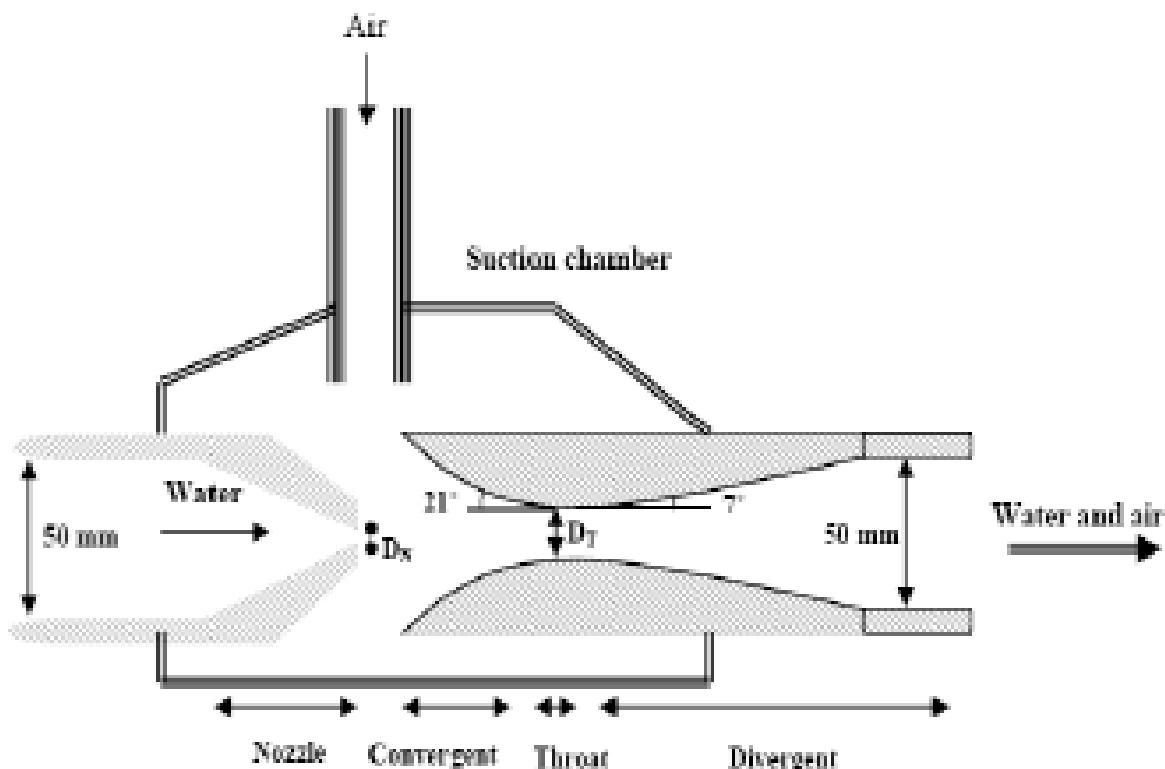
Figura A-13. Aireación con Venturi Sumergido no Presurizado



En los venturis para aireación actuales, el chorro se ubica dentro de la cámara con aire, con el objeto de maximizar el caudal de aire captado por el flujo, como se aprecia en la Figura A-14 a continuación, tomada del estudio de M.R. Ghomi et al (Ref. A-19). Normalmente, el aire que entra a la cámara se presuriza mediante sopladores, con el fin de que se pueda colocar el venturi a mayor profundidad. Esto favorece la permanencia de las burbujas en el agua y la transferencia de oxígeno, y por lo tanto facilita la aireación de tanques profundos. Los chorros que salen de los venturis tienen buena capacidad de mezcla, lo cual se traduce en un valor alto del factor α de la Ecuación A-3, que es directamente proporcional a la transferencia de oxígeno en el sitio AOTR. De acuerdo con estudios realizados por la firma

Mazzei¹⁷, el valor de α para los venturis es de 0.95, que es bastante superior a los valores para la aireación por burbuja fina, la cual oscila entre 0.4 y 0.8 (Metcalf & Eddy Ref. A-1). Esto se debe a que estas burbujas forman una columna sobre el difusor que no genera un efecto de mezcla con el agua del reactor, mientras que el venturi produce un chorro horizontal o inclinado, que mezcla las burbujas en un gran volumen de agua. El estudio de Mazzei se realizó en aguas con alta concentración de sólidos suspendidos, como es el caso de los sistemas de biopelículas y bioflócs.

Figura A-14. Esquema del Venturi ensayado por M.R. Ghomi et al, que es similar a los diseños utilizados actualmente



Fuente: M.R. Ghomi et al, Ref. A-19

La boquilla de tubo transversal está formada por un tubo principal que conduce el agua. Este tubo está atravesado cerca de su entrada por un tubo transversal por donde entra el aire. El tubo transversal genera una contracción en la sección de flujo en el tubo principal, y lo divide en dos chorros, que funcionan como dos venturis, como se observa en la Figura A-17, y se detalla en la Figura A-23. La contracción en el flujo del tubo principal ocasiona la caída de presión en este sitio, que facilita la entrada de aire a través de una ranura practicada en el costado de aguas abajo del tubo transversal. El tubo principal tiene sección

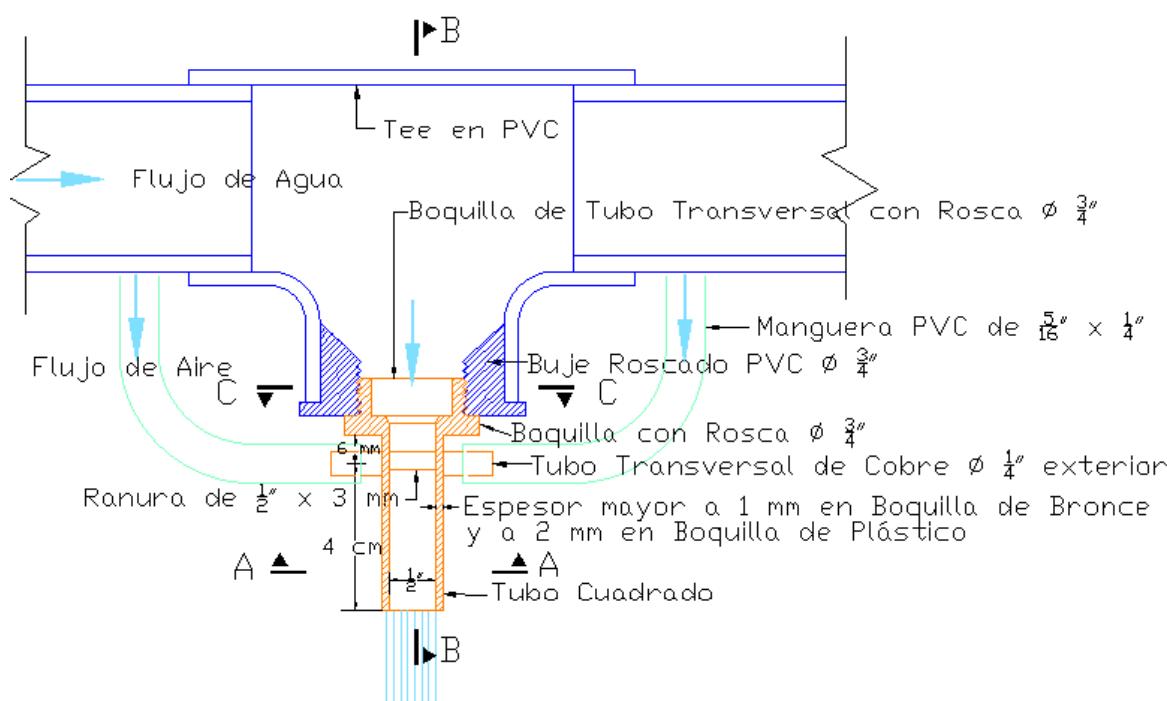
¹⁷ Mazzei Aeration. "Process (dirty) Water Aeration System Efficiency Test Results Butler County/Louisville WWTP Sludge Digester Tank". 2.006.

cuadrada, de modo que los chorros se distribuyen uniformemente a lo largo de la ranura, lo cual facilita la posterior mezcla del aire con el agua.

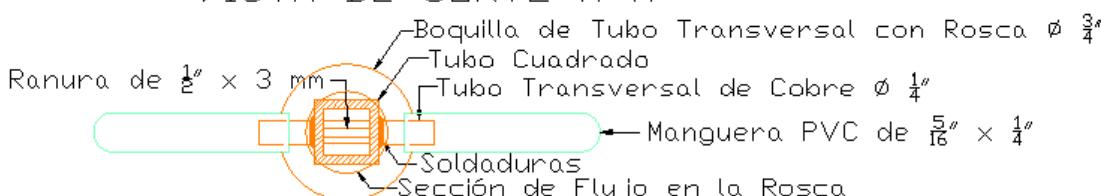
Luego de la contracción causada por el tubo transversal, se produce una expansión abrupta. El vacío que se presenta allí incrementa del caudal de aire que entra en este sitio, que es dividido en burbujas finas gracias a las fuerzas cortantes, y a los vórtices que genera la expansión que ocurre hacia aguas abajo del tubo transversal. Estas burbujas se mezclan con el agua y salen hacia el tanque de aireación, donde son dispersadas en un volumen bastante grande de agua. En las siguientes figuras se muestran diseños de la boquilla de tubo transversal hechas en bronce o en plástico, y su instalación. Para aumentar la profundidad de las burbujas, se recomienda que la boquilla se oriente hacia abajo a 45°.

Figura A-15. Diseño de la Boquilla de Tubo Transversal en Bronce

VISTA DE CÓRTE FRONTEL



VISTA DE CÓRTE A-A



VISTA DE CÓRTE C-C

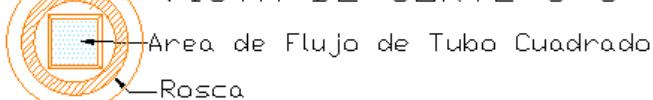


Figura A-16. Diseño de la Boquilla de Tubo Transversal en Plástico

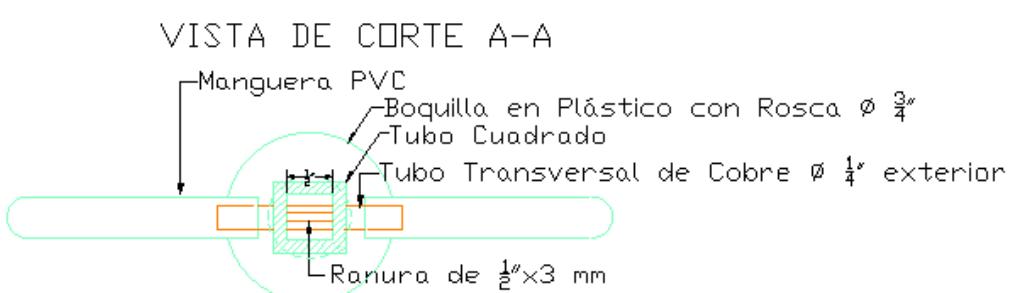
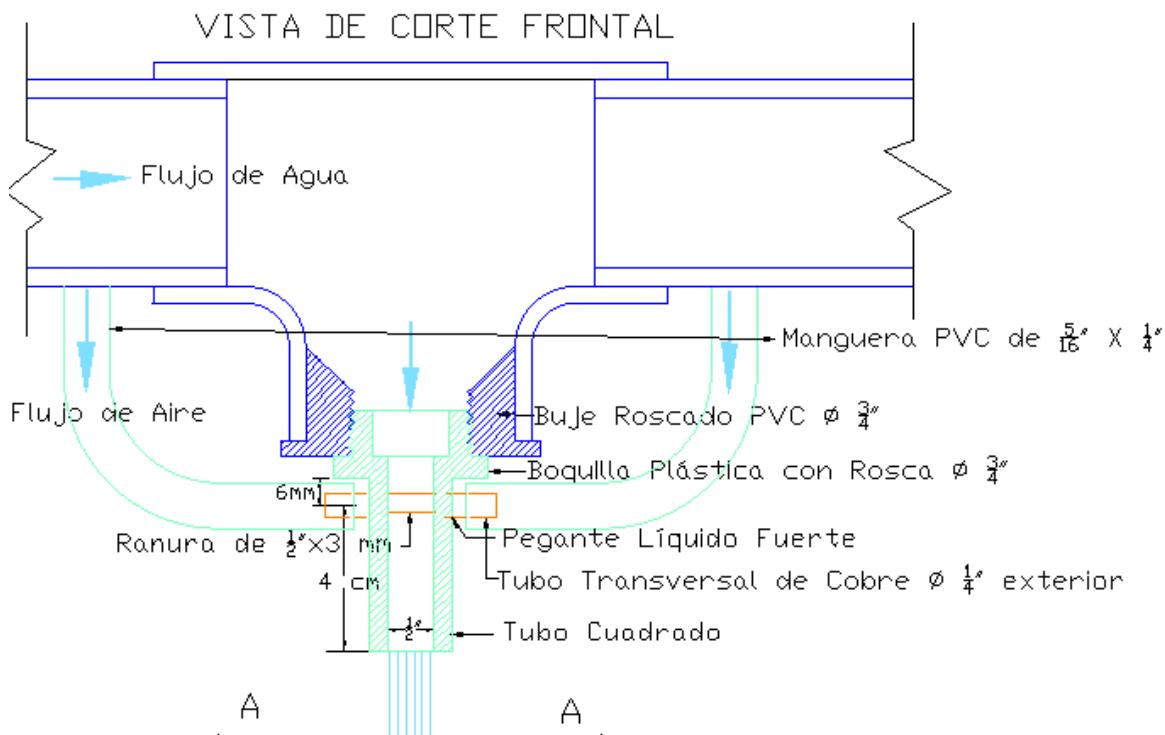
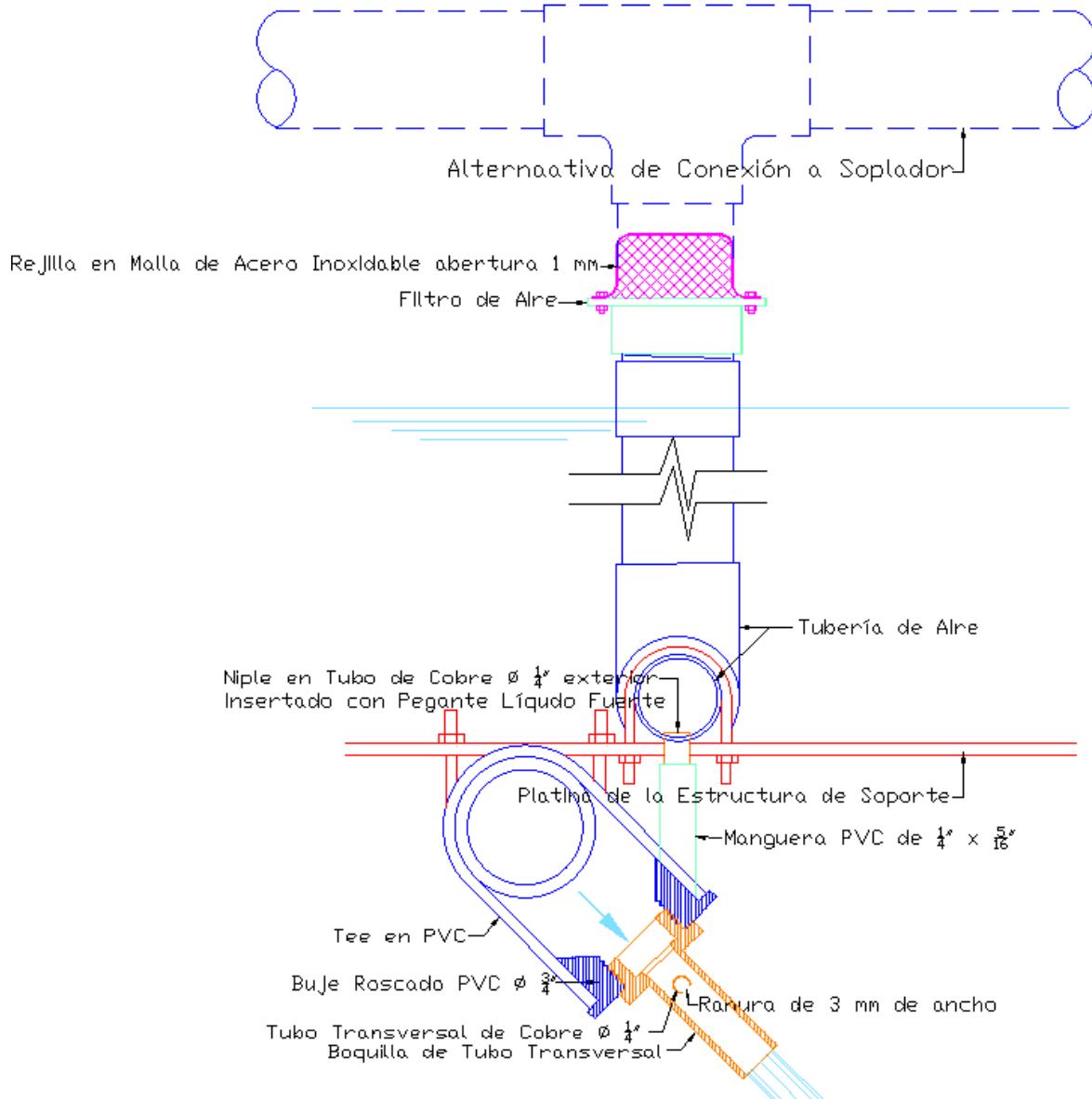


Figura A-17. Instalación de la Boquilla de Tubo Transversal



El tubo transversal es de cobre y tiene un diámetro exterior de $\frac{1}{4}$ ". La ranura en éste se puede hacer practicando un corte de unos 2 mm de profundidad mediante una rueda de esmeril o disco de desbaste de de $\frac{1}{2}$ " de grosor, o con dos discos planos pegados de $\frac{1}{4}$ ", y luego se abre la ranura de unos 3 mm de ancho mediante una lámina de acero con punta triangular con ángulo de 60° , sujetada con un mango. Este tubo transversal se inserta en la boquilla, y se unen con soldadura o un pegante líquido fuerte. Las conexiones para el suministro de airea a dicho tubo se hacen mediante mangueras de PVC transparentes con diámetro interior de $\frac{1}{4}$ ", que se conectan al tubo de aire de PVC mediante niples hechos con tubería de cobre de $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Estos niples se insertan en la tubería de aireación de PVC, colocando pegante líquido fuerte sobre el extremo de éstos antes de insertarlos.

De acuerdo con la literatura técnica sobre venturis, la eficiencia en la transferencia de oxígeno aumenta con la cantidad de aire introducido hasta un punto óptimo, y luego descende. Este descenso se debe a que el exceso de aire genera burbujas de mayor tamaño debido a la coalescencia, o sea la unión entre ellas, lo cual reduce la interfaz aire – agua, y aumenta la velocidad ascensional de las burbujas y por lo tanto su permanencia en el agua. El exceso de aire también disminuye la penetración del chorro en el agua, debido al arrastre hacia arriba que ocasionan las burbujas gruesas. Estos efectos se observan en la Figura A-18 a) mostrada a continuación.

Figura A-18. Funcionamiento de Boquilla de Tubo Transversal Variando el Caudal de Aire



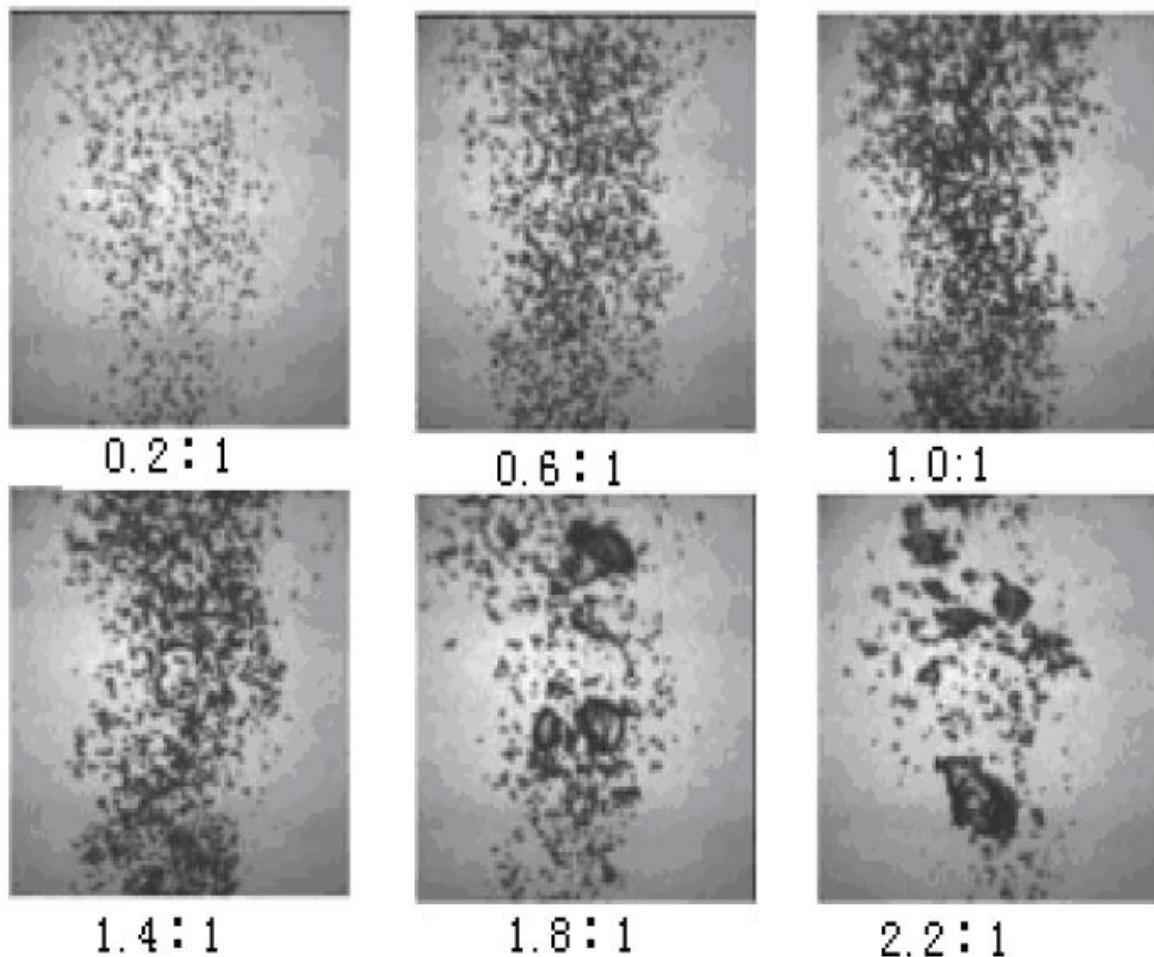
a) Boquilla con Exceso de Aire

b) Boquilla con Caudal de Aire Restringido

Como se observa en la figura anterior a), cuando hay exceso de aire, las burbujas forman una columna estrecha y de menor profundidad, donde la coalescencia forma grandes burbujas que ascienden rápidamente. En la figura b) se aprecia que cuando el caudal de aire se restringe a un valor cercano al óptimo, las burbujas son finas, y cubren una mayor profundidad y volumen de agua.

En el estudio de Chunsheng Lei et al (Ref. A-21), se encontró que al aumentar la relación entre caudal de aire y el de agua, se incrementa la cantidad de burbujas, y por lo tanto la eficiencia SOTE. Sin embargo, a partir de una relación de 0.60 entre caudales de aire y de agua, se genera gran coalescencia entre las burbujas, que se unen para formar burbujas mayores, lo cual reduce la SOTE. Este fenómeno se observa en la siguiente figura. En la Figura A-24 de Chunsheng Lei et al se presenta la relación entre caudales de aire y de agua, en la Eficiencia en la Transferencia de Oxígeno SOTE.

Figura A-19. Burbujas Generadas en Función de Relación entre Caudal de Aire y de Agua



Fuente: Chunsheng Lei et al (Ref. A-21, Figura 3)

La cantidad de aire introducido por la boquilla de tubo transversal disminuye al aumentar la profundidad a la cual se coloca dicha boquilla, puesto que esto incrementa la presión del agua allí. Por lo tanto, existe una la profundidad de la boquilla con la cual se consigue una caudal de aire igual al 60% de caudal de agua, lo cual optimiza su transferencia de oxígeno al agua.

En los venturis antiguos, donde la entrada de aire se hace mediante una perforación a través de la pared en garganta, la profundidad óptima es del orden de 40 cm, según Chunying Dong et al¹⁸. En estudios realizados por M.R Ghomi et al¹⁹ sobre un diseño más avanzado, donde el chorro está dentro de una cámara de aire que aumenta la entrada de éste, se encontró que la profundidad optima es de 60 cm.

En el caso del venturi de tubo transversal, éste produce una obstrucción abrupta, que implica una caída pronunciada de la presión hacia aguas abajo, en el punto donde entra el aire. Este efecto produce un aumento en el caudal de aire que entra al agua. Para restringir este caudal al 60% del caudal de agua, se deberá tener una profundidad óptima mayor. Para el diseño se asumió en forma preliminar una profundidad de 70 cm, la cual se mide desde la entrada de los tubos transversales a la boquilla hasta la superficie del agua. Si se asume que la altura de la boquilla sobre el fondo debe ser mayor de 0.30 m para facilitar el desarrollo del chorro, entonces la altura máxima de la aireación con boquillas sin presión sería de poco más de 1 m.

En la Tabla 5.2 de Fadzai Kadzinga (Ref. A-16) se observa que al aumentar el caudal en un venturi, la relación entre los caudales de agua Q_w y del aire Q_a que entran a éste se mantiene relativamente constante, en alrededor de 60%. A esta conclusión también se llegó en el estudio de Chunsheng Lei et al (Ref. A-21), donde se encontró que la relación óptima entre el caudal de aire y el de agua de alrededor del 60% para cualquier profundidad, como se aprecia en la Figura A-24. Esto indica que una boquilla ubicada a la profundidad óptima mantiene su alta eficiencia en la transferencia de oxígeno para cualquier caudal. En el caso de las boquillas de tubo transversal presurizadas, la relación Q_a/Q_w se obtiene ajustando el caudal suministrado por el soplador, como se indica en la Tabla A-4.

En la planta Pincta, y en otras donde se utiliza la aireación mediante boquillas presurizadas, para el bombeo de agua hacia éstas se utilizan varias bombas, pero para el suministro de aire comprimido solo se utiliza un soplador. Entonces, para tener una relación entre los suministros de aire y de agua de 60% se pueden tener dos opciones. La primera es ajustar el suministro de aire variando la profundidad del estanque y de las boquillas, según la curva

¹⁸ Chunying Dong, C., Zhu, J., Wu, X. & Miller, C. F. "Aeration efficiency influenced by venturi aerator arrangement, liquid flow rate and depth of diffusing pipes". Environmental Technology. 2.012.
https://www.researchgate.net/publication/230614439_Aeration_efficiency_influenced_by_venturi_aerator_arrangement_liquid_flow_rate_and_depth_of_diffusing_pipes

¹⁹ M.R. Ghomi M. Sohrabnejad & M.R. Ovissipour. "An experimental study of nozzle diameters, aeration depths and angles on standard aeration efficiency (SAE) in a venturi aerator". IWA Publishing. Water Practice & Technology. Vol 4, Issue 3. <https://doi.org/10.2166/wpt.2009.043>

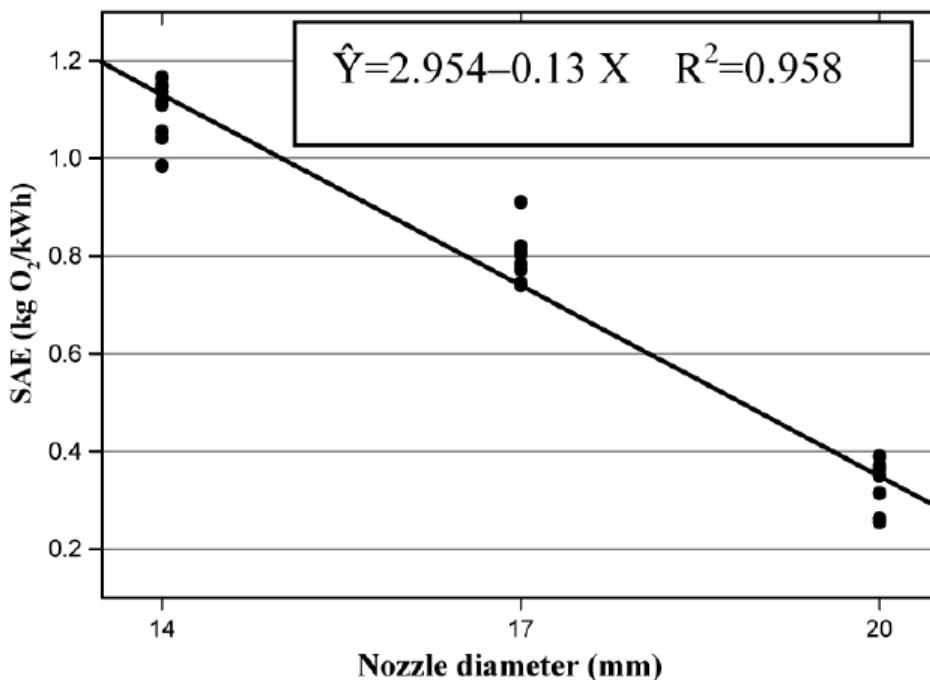
de calibración del soplador. La otra opción es ajustar el caudal de agua variando el número de boquillas, que está determinado por la cantidad de boquillas por línea de bombeo, o por el número de estas líneas.

Ghomí et al estableció la siguiente ecuación para la relación entre el diámetro D del venturi en milímetros, y la eficiencia energética SOTE (Standard Oxygen Transfer Efficiency), que también se llama SAE (Standard Aeration Efficiency).

$$\text{SOTE (kgO}_2/\text{kW}\cdot\text{h}) = 2.954 - 0.13 \times D \text{ (mm)} \quad \text{Ecuación A-18}$$

Esta relación se observa en la Figura A-20 a continuación. La Ecuación A-18 se realizó para el venturi mostrado en la Figura A-15, ubicado a una profundidad de 60 cm, que fueron los valores promedios utilizados en los ensayos. El ella no se tuvo en cuenta las influencias del aumento recomendado de la profundidad a 70 cm, que incrementan la transferencia de oxígeno. En la Figura A-20 a continuación se observa que la mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno se tienen para diámetros menores, y que esta eficiencia cae rápidamente al aumentar el diámetro.

Figura A-20. Correlación entre el Diámetro del Venturi D y el SOTE o SAE



Fuente: M.R. Ghomi et al, Ref. A-19

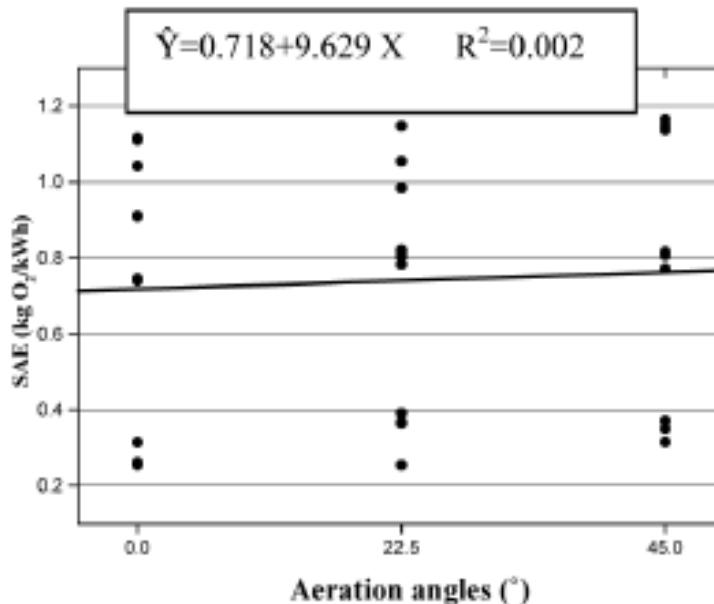
En los ensayos realizados por M.R. Ghomi et al (Ref. A-19) se estudiaron venturis con diámetros entre 14 y 17 mm, y la mayor eficiencia, que fue de 1.166 Kg O₂/kW·h, se obtuvo para el venturi de 14 mm con inclinación de 45° y ubicado a 60 cm de profundidad. El venturi de tubo transversal consta de un tubo principal de sección cuadrada, que tiene lados de 12.7 mm y conduce el agua, el cual es atravesado por un tubo de cobre de ¼" de

diámetro que conduce el aire. A los lados de este tubo se forman dos gargantas con un ancho de solo 3.18 mm, y un largo de 12.7. En estas condiciones se logra una eficiencia SOTE muy superior al ensayado por M.R. Ghomi et al, que se presenta en la Figura A-14, el cual corresponde a los venturis que usualmente se utilizan actualmente.

Para el diseño se considera adoptar un valor de D equivalente. Se considera que la transferencia de oxígeno es proporcional al perímetro de chorro πD , a través del cual se produce en contacto entre el agua y el aire. Por lo tanto, lo fundamental es mantener la relación entre éste valor, y el área seccional del chorro $\pi D^2/4$. Esta relación de $4/D$ en el caso del chorro circular. En el caso de la boquilla de sección cuadrada, con gargantas de longitud L y altura H, se tiene un perímetro de $2xL$, y un área seccional de LxH , y por lo tanto la relación entre ellas es de $2/H$. Igualando estas expresiones, se tiene que el diámetro D equivale a $2xH$. En los cálculos realizados, se encuentra que la eficiencia de la boquilla para condiciones estándar SOTE es bastante mayor que la de las tecnologías actuales, como se observa en la Tabla A-5.

El estudio de M.R. Ghomi et al también estableció las relaciones de la profundidad y la inclinación del venturi, con la eficiencia SOTE (SAE), las cuales se muestran en la siguiente figura. Allí se observa que inclinando el venturi a 45° se obtiene una eficiencia en la transferencia de O_2 adicional. Para optimizar la transferencia de energía y las condiciones de mezcla, las boquillas de tubo transversal tendrán una inclinación de 45° hacia abajo, y además una profundidad de 70 cm como se mencionó anteriormente.

Figura A-21. Correlación entre la Profundidad y la Inclinación del Venturi, y SOTE o SAE



Correlation between aeration angles and SAE

Fuente: M.R. Ghomi et al (Ref. A-19).

Las ecuaciones presentadas en las gráficas de la Figuras A-21 corresponden al diámetro medio de la Figura A-20, que es de 17 mm, para el cual el SAE es de 0.744 kgO₂/kW-h. Según estas gráficas, la relación entre los valores de SOTE (SAE) para profundidades de 40 cm y de 60 cm es de 1.035, y entre inclinaciones de 45° y de 22.5° es de 1.021. El producto de estos factores es de 1.057, o sea que con la profundidad y la inclinación previstas para las boquillas, es posible aumentar en 5.7% la eficiencia en la transferencia de oxígeno calculada en la Ecuación A-18. Considerando la incertidumbre que existe en la aplicación del estudio de M. R. Ghomi et al a las boquillas de tubo transversal, se recomienda no tener en cuenta este factor, y aplicar la Ecuación A-18 en el cálculo de la eficiencia en la transferencia de O₂ SOTE. Para obtener tasa de transferencia de oxígeno SOTR, se multiplica el valor del SOTE, por la potencia hidráulica de los chorros Ph:

$$\text{SOTR (kgO}_2\text{/hora)} = \text{Ph} \times \text{SOTE} \quad \text{Ecuación A-19}$$

La potencia hidráulica en kilovatios se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Ph (kW)} = 9.81 \times Q \times (Vt^2/2g) \quad \text{Ecuación A-20}$$

Donde Q es el caudal por la boquilla en m³/sg, Vt es la velocidad en la garganta en m/sg, y g la aceleración de la gravedad. El valor de SOTR se multiplica por el Factor de Corrección de Transferencia de Oxígeno N para obtener la transferencia de oxígeno en condiciones de terreno AOTR.

$$\text{AOTR (kgO}_2\text{/hora)} = \text{SOTR} \times N \quad \text{Ecuación A-21}$$

Los venturis de cámara de succión existentes en el mercado tienen diámetros generalmente superiores de 1", y si se utilizaran sin presión aportada por sopladores, el valor de la eficiencia SOTE a una profundidad de 1 m sería del orden de 0.2 kgO₂/kW-h. Por esta razón no se usan en los estanques de baja profundidad utilizados en acuicultura. Estos venturis se emplean para airear tanques con profundidades mayores de 1 m, tales como los empleados en acuicultura, en donde se obtienen eficiencias adecuadas.

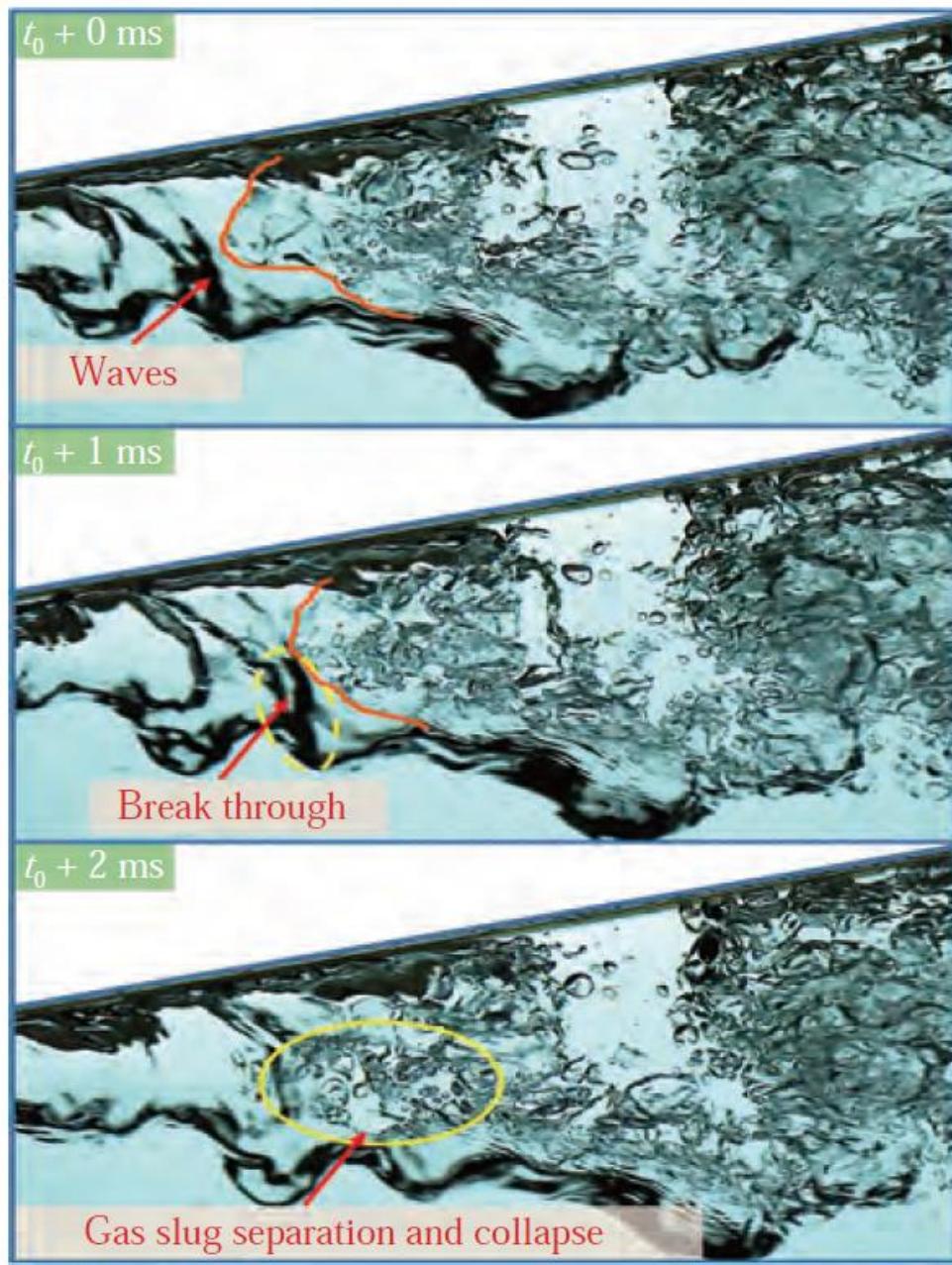
Según los estudios de Fadzai Kadzinga (Ref. A-16), el factor que determina la introducción de aire en el agua, es la fuerza cortante que ejerce ésta sobre dicho aire, la cual se realiza en el perímetro del chorro. En los venturis, las burbujas producidas son más finas cuando los esfuerzos cortantes son mayores (Fadzai Kadzinga, sección 5.2.3, Ref. A-16). En la boquilla se produce un gran esfuerzo cortante a todo lo largo tubo trasversal, entre el agua que sale de la garganta a alta velocidad, y el aire que sale por la ranura, lo cual permite producir gran cantidad de burbujas finas. En un documento de Jian Huang et al²⁰ se explica la forma en la que se generan burbujas finas en venturis de sección rectangular que tienen una expansión abrupta. En este proceso tienen un papel fundamental los vórtices ocasionados por un retroceso del agua, los cuales no ocurren en los venturis tradicionales, que generalmente tienen una expansión gradual. En expansiones abruptas los vórtices son

²⁰ Jian Huang et al. "A visualized study of interfacial behavior of air–water two-phase flow in a rectangular Venturi channel". Theoretical & Applied Mechanics Letters. Elsevier. 2.018.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095034918302010>

más grandes y giran a mayor velocidad, lo cual se traduce en la producción de burbujas más pequeñas. En la figura a continuación se presenta este fenómeno. Allí se puede apreciar como una onda se transforma en un vórtice, en el cual se presenta el colapso de las masas de aire, generando así las pequeñas burbujas que se aprecian en la imagen resaltada con la línea amarilla.

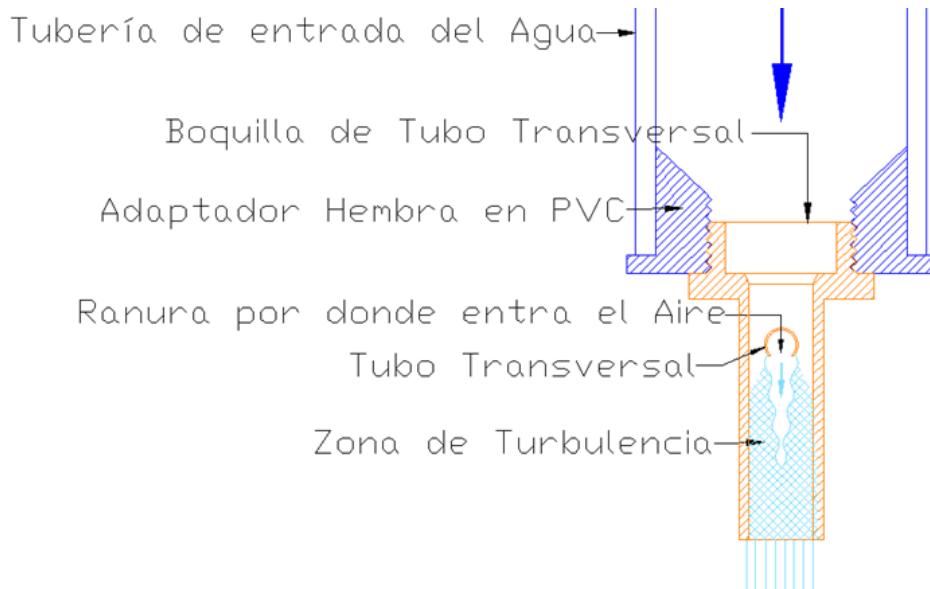
Figura A- 22. Formación de Burbujas Finas en la Expansión Abrupta de un Venturi de Sección Rectangular



Fuente: Jian Huang et al. (Ref. A-20)

El flujo que tendría la boquilla de tubo transversal se muestra en la siguiente figura.

Figura A -23. Flujo en la Boquilla de Tubo Transversal



Como se observa en la figura anterior, en la boquilla se forman dos venturis cuya garganta de 12.7 mm de largo (1/2"), y de solo 3.18 mm de ancho. Por lo tanto, hacia aguas abajo del tubo transversal, se generan dos grandes superficies de contacto entre el agua que sale a gran velocidad, y el aire que sale por la ranura del tubo trasversal. En estas áreas de contacto se producen la formación de burbujas finas como se muestra en las imágenes de la Figura A-22.

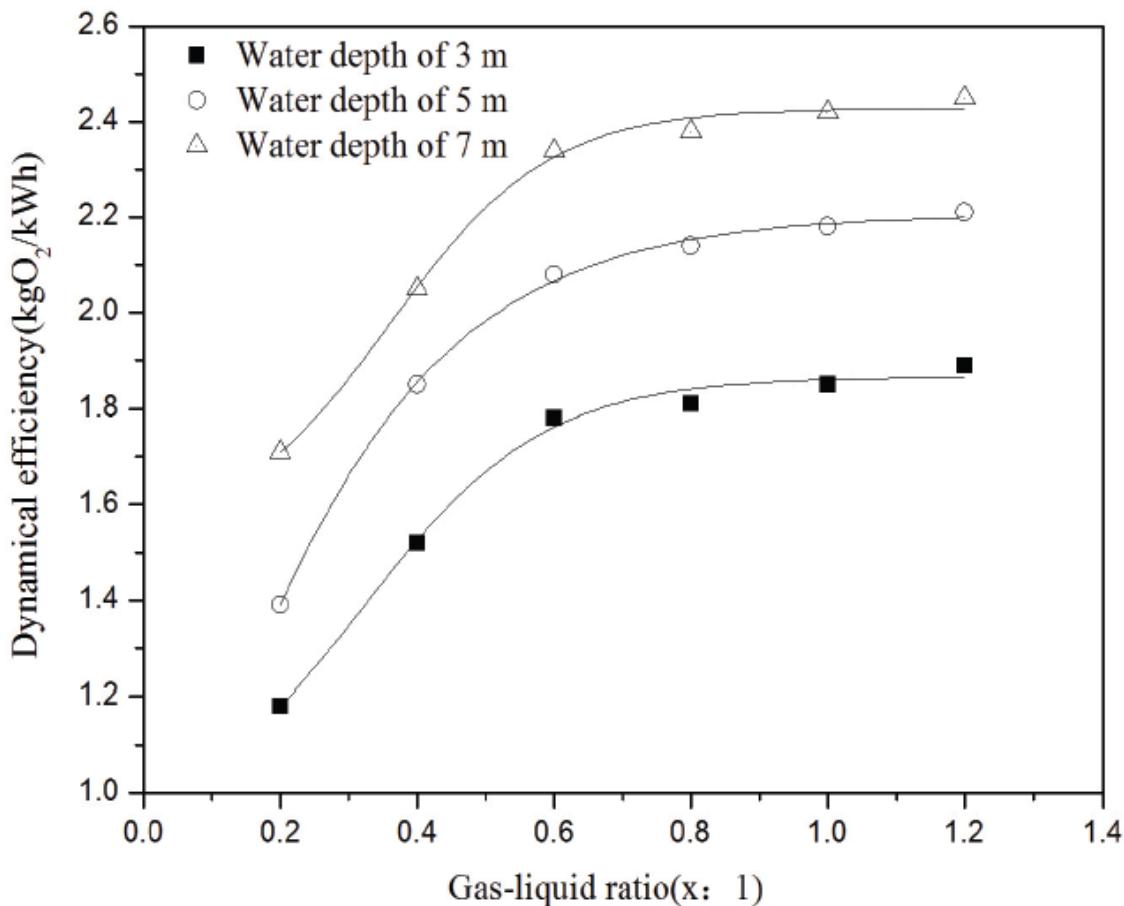
La información anterior se refiere a boquillas de tubo transversal no presurizadas, que pueden funcionar adecuadamente en tanques con profundidades máximas de hasta unos 1.2 m, tales como los estanques para acuicultura. Dichas boquillas se pueden presurizar mediante sopladores para facilitar la aireación de tanques más profundos. Un ejemplo de cálculo de aireación con boquillas de tubo transversal presurizado de presenta en la Tabla A-4, donde se encuentra que la eficiencia SOTE en condiciones standard pasa de 2.13 KgO₂/kW-h en una boquilla no presurizada, según la Tabla A-3, a 3.35 KgO₂/kW-h en una boquilla presurizada en un tanque de 3 m de profundidad, mientras que la tasa de transferencia de oxígeno en el sitio por cada parrilla pasa de 0.28 Kg O₂/hora con la boquilla no presurizada, a 0.53 con la boquilla presurizada. El aumento de la eficiencia energética con la profundidad se aprecia en la siguiente figura de Chunsheng Lei et al²¹. En la figura de Chunsheng Lei et tambien se observa que en los venturis, la relación óptima entre el

²¹ Chunsheng Lei et al. "Experimental study on the aeration oxygenation into printing and dyeing wastewater using jet aerator". Researchgate 2.015.

https://www.researchgate.net/publication/286776140_EXPERIMENTAL_STUDY_ON_THE_AERATION_OXYGENATION_INTO_PRINTING_AND_DYEING_WASTEWATER_USING_JET_AERATOR

caudal de aire y el de agua de alrededor del 60% para cualquier profundidad. Esta relación deberá tenerse en cuenta para el cálculo de caudal de aire de los sopladores que se utilizan en la aireación mediante boquillas presurizadas.

Figura A-24. Efecto de la Profundidad de la Boquilla y de la Relación entre Caudales de Aire y de Agua, en la Eficiencia en la Transferencia de Oxígeno SOTE



Fuente: Chunsheng Lei et al, Figura 4. Ref. A-21.

En la Tabla A-4 se presentan los cálculos de una parrilla de aireación con boquillas presurizadas. Allí asumió que se presentan dos procesos de aireación diferentes, y la transferencia de oxígeno es la suma de las que ocurren en los dos procesos. El primero es similar al que realiza la boquilla no presurizada, y que realiza el chorro que sale de la boquilla, el cual genera generas burbujas finas y las distribuye en un volumen de agua, realizando la aireación hasta una altura de 1 m. El cálculo de la tasa de trasferencia SOTR (Standard Oxygen Transfer Rate) se hace de acuerdo a la ecuación A-19. El segundo proceso ocurre en la capa de agua ubicada sobre la anterior, y es realizado por las burbujas que ascienden a través de esta capa agua, desde la altura de 1 m hasta la superficie. Este proceso es similar a la aireación por difusores, y se calcula de forma similar a ésta. En este caso, el cálculo de la tasa de trasferencia SOTR se hace de acuerdo a la ecuación A-8 de Capítulo A-2.1 para aireación mediante difusores de burbuja fina. El SOTR de la aireación

mediante boquillas de tubo transversal presurizadas corresponde a la suma de estos dos valores.

El aire presurizado por el soplador se suministran a las boquillas mediante tuberías que van adyacentes a las tuberías donde se encuentran las boquillas. Estas se conectan a la tubería de aire comprimido mediante mangueras de PVC transparente, que se conectan a niples de cobre de $5/16''$ x $1/4''$ insertados en el tubo de cobre con pegante líquido fuerte. El soplador y la bomba de recirculación que abastece la línea de aireación deben operar simultáneamente

La entrada del afluente al tanque de aireación se hace mediante una bomba que abastece una línea de boquillas, similar a las que hacen la recirculación, pero que toman el agua de un tanque de regulación, o de tanque Uasp Hibrido. Esta línea está ubicada en un costado del tanque de aireación, y en el costado opuesto se encuentra la salida del efluente, que se puede hacer a través de un muro rebosable, el cual entrega el agua a un canal que bordea el tanque. Con este sistema se produce un flujo topo pistón a través del tanque de aireación, que garantiza que toda el agua tenga un periodo de retención suficiente. En el corte transversal que se aprecia en la Figura A-25 b) se observa que la disposición de las boquillas, y de la tubería ranurada de succión, genera un movimiento del agua que permite distribuir las burbujas y el oxígeno en todo el volumen de agua del estanque.

En las siguientes figuras se presenta un sistema de aireación mediante boquillas presurizadas, que está constituido por un soplador que proporciona el aire comprimido, y varias bombas, cada una de las cuales abastece una línea de boquillas. Estas bombas realizan un proceso de recirculación a través de las boquillas, donde el agua es captada a través de una tubería con ranuras de $1/8''$ en su parte superior. En las boquillas, los chorros salen hacia abajo en un ángulo de 45° a la izquierda y derecha alternadamente, dispersando burbujas finas en esas direcciones. Posteriormente suben hacia la superficie arrastrando el agua hacia allí. Finalmente el agua es captada por la tubería ranurada que se encuentra encima de las boquillas. Esta trayectoria del flujo permite generar aireación y mezcla completa en todo el volumen de agua del tanque, lo que se traduce en una aireación muy eficiente. Estos efectos se observan en la Figura A-25 c) a continuación.

Figura A-25. Aireación mediante Boquillas de Tubo Transversal Presurizadas

Vista de Corte Longitudinal

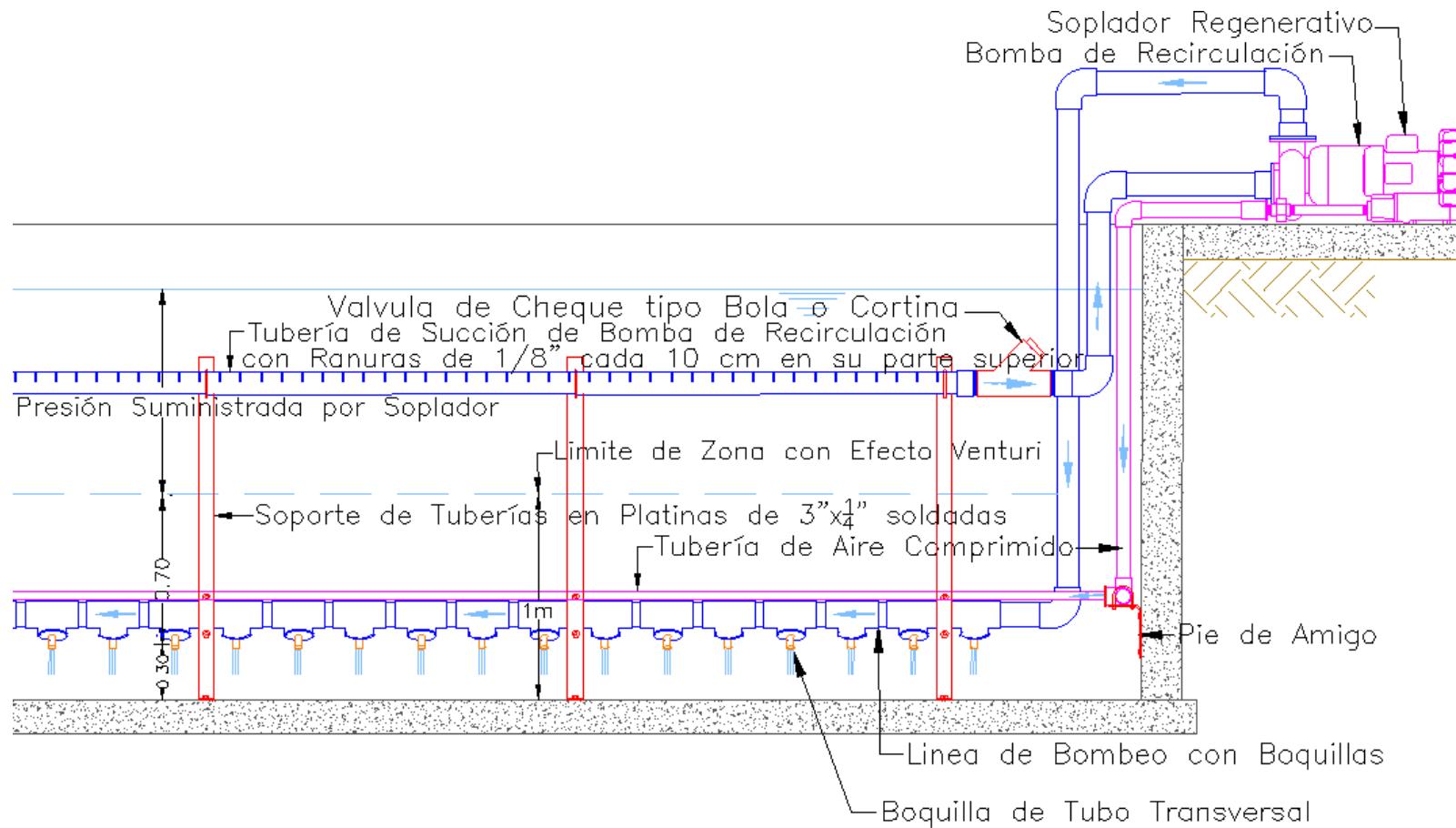
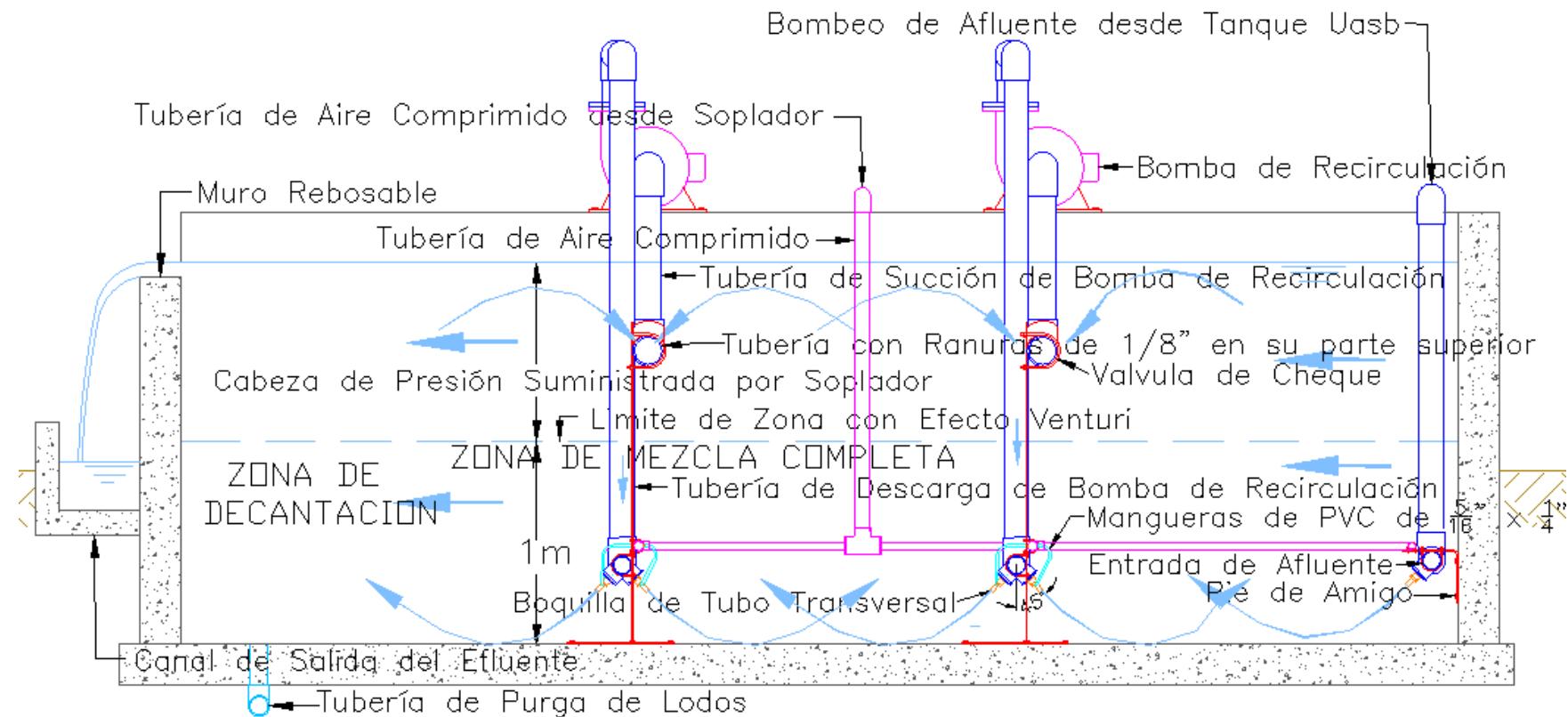
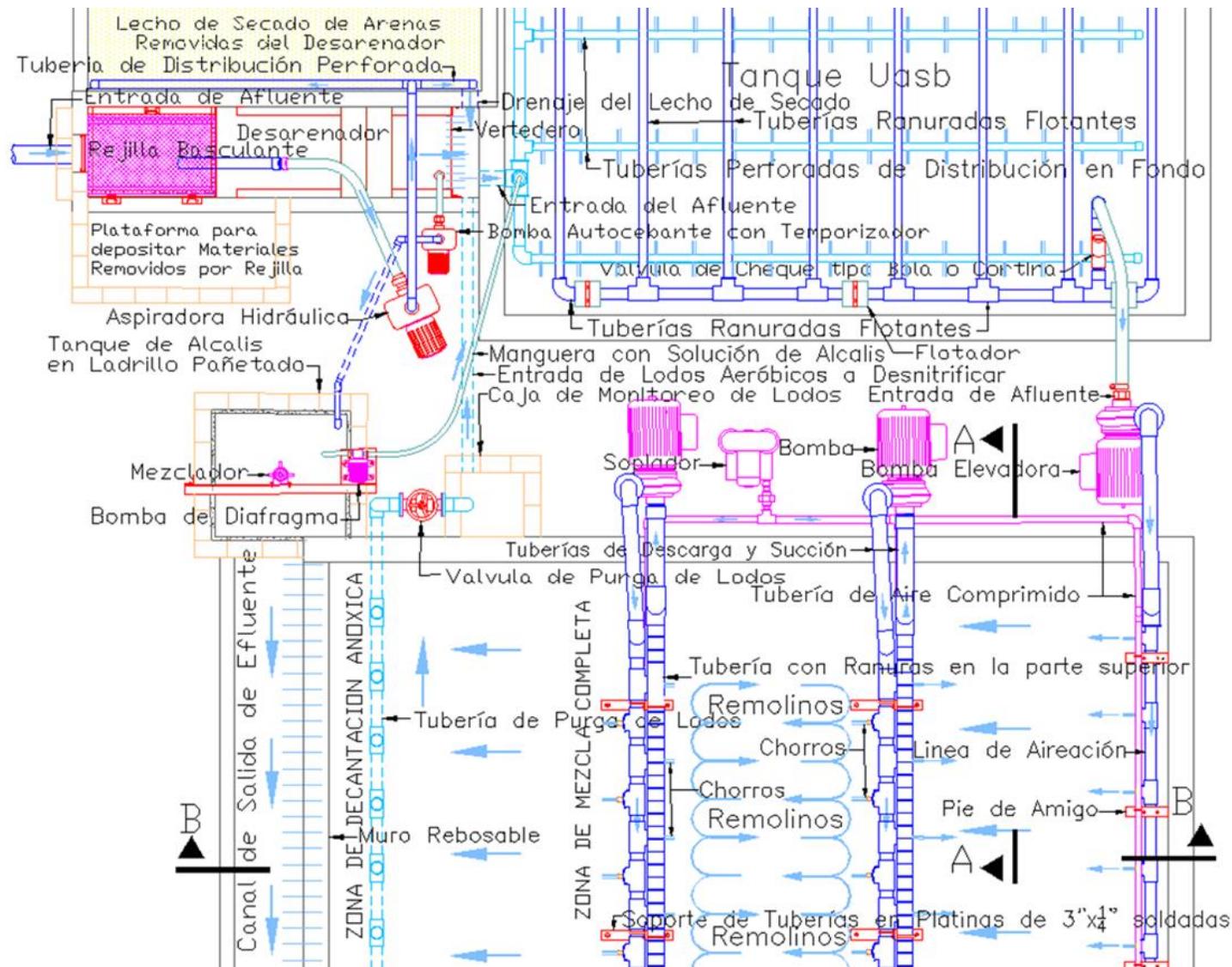


Figura A-25. Aireación mediante Boquillas de Tubo Transversal Presurizadas

b) Vista de Corte Transversal



c) Vista en Planta



En los sistemas de tratamiento continuos con boquillas presurizadas, como es el caso de la Planta de Lodos Activados que se trata en el Numeral C-1.5, los lodos que se generan en el tanque debido a los procesos de nitrificación autótrofa se pueden remover en una zona de decantación ubicada a continuación de la zona de mezcla completa del tanque de aireación. Estos lodos se extraen por gravedad hacia el tanque anaeróbico, aprovechando la altura del de aireación sobre el suelo. En dicho tanque ocurre la desnitrificación que convierte el nitrógeno amoniacial en nitrógeno gaseoso.

En caso de la planta Pincta (Planta para la Incorporación de Nutrientes en la Cadena Trófica Acuática), que se trata en el Numeral C-4.4, las boquillas presurizadas se utilizan para desarrollar bioflócs, que alimentan especies acuáticas que se cultivan en el mismo tanque donde se hace la aireación. Por lo tanto la producción de lodos es reducida, puesto que la nitrificación heterótrofa produce bioflócs, que son consumidos por peces y por el zooplancton, que salen con el efluente. Este efluente sale a través de una escalera para peces hacia las corrientes naturales.

Para el cálculo de la tubería del soplador que conduce el aire comprimido, se utiliza la ecuación siguiente de Darcy-Weisbach:

$$hf = f \times \frac{L}{D} \times hv \quad \text{Ecuación A-22}$$

Donde:

hf = Pérdida de altura debida a la fricción en metros

D: Diámetro interno real de la tubería en metros

f = Coeficiente de fricción de Darcy, que se toma del diagrama de Moody. Este diagrama se encuentra en la Figura F-21 del Numeral F-5.1.

L = Longitud total de la tubería en metros

v = Velocidad media del flujo en metros por segundo

hv = Cabeza de velocidad, que se calcula con la siguiente ecuación

$$hv = \gamma \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación A-23}$$

Donde γ es la densidad del aire en Ton/m³. La densidad del aire a nivel del mar es de 1.20 Kg/m³, la cual se multiplica por la relación entre la presión del aire comprimido en el sitio, y la presión a nivel del mar para obtener dicha densidad.

Las perdidas hf en los accesorios se calculan como C x hv, donde C es el coeficiente de pérdidas, que es de 0.33 para codos de radio largo, 0.42 para codos de radio corto, 1.33 para tapas con salida lateral, y 2 para válvulas de compuerta, según la Tabla 5-29 de Metcalf & Eddy (Ref. A-1).

La potencia del soplador Pw en kW se calcula con la Ecuación 5-56a de Metcalf & Eddy (Ref. A-1), que es la siguiente:

$$Pw = \frac{w \times R \times T1}{29.7 \times n \times e} \left\{ \left(\frac{P2}{P1} \right)^{0.283} - 1 \right\} \quad \text{Ecuación A-24}$$

Donde:

w: Peso del flujo en Kg/s, que equivale al caudal de aire de entrada multiplicado por la densidad **de dicho aire g** en el sitio, en kg/m³.

R: Constante de ingeniería para el aire, que es de 8.314

T₁: Temperatura absoluta en grados Kelvin del aire

P₁ y P₂: Presiones de entrada y de salida

n: Constante con un valor de 0.283

e: Eficiencia energética del soplador, que usualmente tiene valores entre 0.7 y 0.9

El soplador debe suministrar el caudal de aire requerido por las boquillas, considerando que la relación entre caudales de agua y aire debe mantenerse cerca al 60%.

En la Tabla A-3 se presentan los cálculos de una boquilla de tubo transversal sin presión, similar a la que se utiliza en los estanques de acuicultura del Texto B. En la Tabla A-4 se encuentra el cálculo de una parrilla de boquillas de tubo transversa presurizadas, como la que se presenta en la Figura anterior A-25, que se emplea para airar un tanque de 3 m de profundidad para mantener concentraciones de oxígeno de 4 mg/L.

Estos cálculos se pueden realizar mediante los archivos en Excel Boquilla no presurizada.xls y Boquilla presurizada.xlsx ubicadas en el Texto A.

Tabla A-3. Aireación con Boquillas de Tubo Transversal no Presurizadas

Clasificación de la Información

Información de Entrada

Variables Principales de Entrada
Parámetros de Diseño Asumidos
Parámetros tomados de la Literatura Científica o Técnica
Información de Salida
Resultados Finales e Indicadores de Desempeño
Indicadores de Control
Parámetros y Datos de Diseño Calculados
Otros Cálculos

BOQUILLAS DE TUBO TRANSVERSAL NO PRESURIZADAS

Características del Sistema de Aireación

Profundidad del Estanque	1,00	m
Velocidad de Flujo en Garganta	Vt	8,00 m/s
Concentración de OD Media en el Estanque	Cl	4,00 mg/L
Cabeza de Velocidad en Garganta	hv	3,27 m
Caudal por Boquilla	Q	0,65 Lps
Potencia Hidráulica por Boquilla	Ph	0,021 Kw
No de Boquillas por Parrilla		16 u
Caudal por Parrilla		10,32 Lps
Transferencia de Oxígeno por Parrilla		
Altitud	1.000	msnm
Temperatura	T°C	25 oC
Area de Garganta		80,65 mm ²
Diámetro Equivalente de la Boquilla	D = 2*H	6,35 mm
Eficiencia en Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar	SOTE	2,13 Kg O ₂ /Kw-h
Potencia Hidráulica por Parrilla		0,33 kW
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar por Parrilla	SOTR	0,70 Kg O ₂ /hora
Presión a Nivel del Mar	P	101,33 kPa
Factor de Presión		-0,11
Presión en el Sitio	Pt	90,35 kPa
Salinidad del Agua		0,00 gr/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura	C _{sT}	8,24 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura y Altitud	C _{sTA}	7,35 mg/L
Profundidad de las Boquillas a 45°		0,70 m
Penetración Adicional del Chorro		0,30 m
Profundidad de Aireación		1,00 m
		9,80 kPa
Concentración de Saturación de O ₂ en el Terreno	C _{st}	7,75 mg/L
Factor de Corrección de Transferencia de O ₂	α	0,95
Factor de Corrección por Salinidad y Tensión Superficial	β	0,95
Saturación de O ₂ en Condiciones Standard (nivel del mar y 20°C)	C _{st}	9,08 mg/L
Factor Tranferencia de O ₂ en Condiciones Reales	N	0,396
Transferencia de Oxígeno en Condiciones de Terreno por Parrilla	AOTR	0,28 Kg O ₂ /hora

Tabla A-4. Aireación con Boquillas de Tubo Transversal Presurizadas

Datos de Entrada		
Concentración de OD en el Estanque	Cl	4,00 mg/L
Profundidad del Estanque		3,00 m
Velocidad de Flujo en la Garganta	Vt	8,00 m/s
No Total de Boquillas		16,00 u
Altitud		1.000 msnm
Temperatura	T°C	25 oC
Componente de Aireación por Boquillas de Tubo Transversal		
Altura de la Zona con Efecto Venturi		1,00 m
Salinidad del Agua		0,00 gr/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura	C _{sT}	8,24 mg/L
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura y Altitud	C _{sTA}	7,35 mg/L
Profundidad de las Boquillas a 45°		2,00 m
Penetración Adicional del Chorro		0,30 m
Profundidad de Aireación con Boquillas	Pa	2,30 m
	Phe	22,54 kPa
Concentración de Saturación de O ₂ en el Terreno	C _{st}	8,26 mg/L
Cabeza de Velocidad en Garganta	hv	3,27 m
Área de Flujo en Gargantas		80,65 mm ²
Caudal por Boquilla		0,65 Lps
Caudal Total de Recirculación		10,32 Lps
Potencia Hidráulica por Boquilla	Ph	0,021 Kw
Diámetro Equivalente de la Boquilla	D = 2*H	6,35 mm
Eficiencia en Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar	SOTE	2,13 Kg O ₂ /Kw-h
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar	SOTR	0,70 Kg O ₂ /hora
Factor de Corrección de Transferencia de O ₂ para Aguas Residuales	α	0,95
Tipo de Aguas a Tratar	Aguas Residuales Domésticas o Municipales	
Factor de Corrección por Salinidad y Tensión Superficial	β	0,95
Saturación de O ₂ en Condiciones Standard (nivel del mar y 20°)	C _{s20}	9,08 mg/L
Factor Transferencia de O ₂ en Condiciones Reales	N	0,454
Tasa de Transferencia de O ₂ en el Sitio por Boquillas	AOTR	0,32 Kg O ₂ /h
Cabeza de Velocidad en la Boquilla		3,27 m
Perdidas en Tubería de Succión		0,22 m
Perdidas en Tuberías de Aireación		0,38 m
Diferencia de Altura		1,20 m
Total Cabeza de Bombeo de Recirculación		5,06 m
Eficiencia de Bombeo		75%
Potencia de Bomba de Recirculación		0,68 Kw 0,92 HP

Componente de Aireación por Burbujas		
Factor de Corrección de Transferencia de O ₂ para Aguas Residuales	α	0,60
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura	C_{s_T}	8,24 mg/L
Factor de Presión		-0,11
Concentración de Saturación de O ₂ para Temperatura y Altitud	$C_{s_{TA}}$	7,35 mg/L
Factor Transferencia de O ₂ en Condiciones Reales	N	0,222
Eficiencia de Transferencia de O ₂ por m de Profundidad	E	6,56% por m
Eficiencia de Transferencia de O ₂		15,08%
Relación entre Caudal de Aire y de Agua	Q _a /Q _w	60%
Caudal de Aire de Compresores a la Profundidad	Q _a	6,19 Lps
Presión del Aire a la Altitud del Sitio	P _t	90,35 kPa 9,21 m.c.a.
Presión del Aire a la Profundidad de Aireación		11,51 m.c.a.
Caudal de Aire Descomprimido en el Sitio		7,74 Lps
Presión a Nivel del Mar	P _{nm}	101,33 kPa 10,34 m.c.a.
Caudal de Aire a la Presión de Nivel del Mar	Q _a	6,89 Lps
Densidad del Aire al Nivel del Mar		1,20 Kg/m ³
Porcentaje de Oxígeno al Nivel del Mar		20,90%
Contenido de Oxígeno al Nivel del Mar	C _{Ox}	0,25 Kg/m ³
Tasa de Flujo de Oxígeno Total en Condiciones Standard		6,25 Kg O ₂ /h
Tasa de Transferencia de O ₂ en Condiciones Standard	SOTR	0,94 Kg O ₂ /h
Tasa de Transferencia de O ₂ en el Sitio por Burbujas	AOTR	0,21 Kg O ₂ /h
Tasa de Transferencia de O ₂ por Efecto Venturi	AOTR	0,32 Kg O ₂ /h
Tasa de Transferencia de O ₂ Total en el Sitio	AOTR	0,53 Kg O ₂ /h
Tasa de Transferencia de O ₂ Total en el Sitio por Boquilla	AOTR	0,033 Kg O ₂ /h
Calculo del Soplador		
Perdidas de Cabeza en la Tubería de Aire Presurizado		0,02 m
Cabeza de Presión en Soplador		2,32 m 22,77 kPa
Densidad del Aire en el Sitio	γ	1,07 kg/m ³
Eficiencia del Soplador		80%
Potencia Total del Soplador		0,20 Kw
Potencia Hidráulica Aplicada por Soplador		0,16 kW
Potencia Hidráulica Aplicada por Boquillas		0,33 kW
Potencia Neta Total del Sistema de Aireación		0,49 Kw
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar por Boquillas	SOTR	0,70 Kg O ₂ /hora
Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar por Burbujas	SOTR	0,94 Kg O ₂ /hora
Eficiencia en Transferencia de O ₂ en Condiciones Estándar	SOTE	3,35 Kg O ₂ /Kw-h

A-5. EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE AIREACION

En la siguiente tabla se presentan las eficiencias en la transferencia de oxígeno en condiciones standard SOTE (Standard Oxygen Transfer Efficiency) de los dispositivos de aireación con las principales tecnologías existentes, y de las nuevas tecnologías de chorros emergidos y boquilla de turbo transversal que se presentan en este texto. La eficiencia en la transferencia de oxígeno en condiciones standard SOTE se estima con la Ecuación A-9 para los chorros emergidos, y con la Ecuación A-18 en el caso de las boquillas de tubo transversal.

Tabla A- 5

Eficiencias en la Transferencia de Oxígeno de los Principales Dispositivos

Sistema de Aireación	SOTE Eficiencia en la Transferencia de O₂ en Condiciones Estándar (kg O₂/kW*h)
Sistemas de Aireación por burbujas	
Burbuja fina	1,2 – 2,0
Burbuja media	1,0 - 1,6
Burbuja gruesa	0,6 – 1,2
Sistema tubular	1,2 -1,6
Chorro venturi sumergido	1,2 – 2,4
Chorro aspirador helicoidal	1, 5 – 2,5
Sistemas de Aireación Mecánica	
Eje vertical - Aireador superficial	1,2 – 2,7
Eje vertical - Aireador sumergido de turbina	1,2 – 2,0
Eje horizontal – Aireador superficial (cepillo)	1,0 – 2,0
Eje horizontal – Disco sumergido	1,2 – 2,4

Fuente: Resolución 0330 de 2,017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Tabla 37

Sistemas de Aireación por Chorros	
Chorros Emergidos en Tanque sin Bioportadores (ver Tabla A-2 a)	2,74
Chorros Emergidos en Tanque con Bioportadores (ver Tablas A-2 b) y A-2 c)	5,48
Boquilla de Tubo Transversal no Presurizada (ver Tabla A-3)	2,13
Boquilla de Tubo Transversal Presurizada (ver Tabla A-4)	3,35

Las eficiencias de las tecnologías existentes son similares a las indicadas por la agencia de los Estados Unidos Water Environment Federation WEF (Ref. A-2). En la tabla anterior se observa que las eficiencias de los chorros emergidos y la boquilla de tubo transversal es bastante competitiva respecto a dichas tecnologías.

Las bombas que se utilizan en la aireación por chorros sumergidos o boquillas de tubo transversal también recirculan del agua en las plantas a través del tanque de aireación, lo cual es muy importante para los procesos de tratamiento de aguas y acuicultura donde se utilizan. El consumo de energía pesa mucho en los costos de funcionamiento, y este consumo depende tanto de la eficiencia energética de los dispositivos de aireación, como de las bombas utilizadas para esta operación. Las bombas con mayor eficiencia son las centrífugas que tienen mayores caudales y menores velocidades rotacionales.

Además de la transferencia de oxígeno, con los chorros emergidos y las boquillas de tubo transversal bastante turbulencia, y además mantienen en suspensión los bioflócs en estanques de acuicultura, o los bioportadores en procesos de biopelícula. Estos efectos son fundamentales para lograr la eficiencia en la aireación y el desarrollo de las biopelículas. La aireación con burbujas finas tiene la mayor eficiencia en transferencia de oxígeno en condiciones estándar SOTE, pero no generan la turbulencia suficiente. Por esta razón, en ocasiones es conveniente complementarla con boquillas de tubo transversal, que además elevan el valor de α que determina la eficiencia energética AOTR. Las burbujas finas y medias también son bastante adecuadas para realizar la fase de floculación dentro de procesos TPQA descritos en los capítulos D-5 y D-6, debido a que producen un movimiento del agua apropiado para este propósito, a la vez que transfiere oxígeno al agua.

De acuerdo al documento de Andrea G. Capodaglio y Gustaf Olsson²², la energía empleada para tratamiento de aguas residuales representa del 30 a 50% de, total de la energía consumida por las empresas municipales, y alrededor del 1% de la energía consumida en el mundo. Por lo tanto, la eficiencia energética de las plantas de tratamiento es muy importante para reducir sus costos económicos y ambientales. En dicho documento se indica que actualmente el consumo de energía en el tratamiento de aguas residuales es de 20 a 45 kW/hora por habitante al año, y de 0.3 a 2.1 kW/hora por m³ de agua tratada. Los tratamientos propuestos en el presente sitio web tienen consumos menores de 0.097 kW-hora por m³, como se observa en la siguiente Tabla.

En la Tabla A-6 se comparan los consumos de energía en las plantas propuestas, con los correspondientes a los sistemas de tratamiento existentes, según un documento de Popi Christoforidou et al²³. En amarillo se resalta el desempeño de los sistemas de tratamiento

²² Andrea G. Capodaglio y Gustaf Olsson. "Energy Issues in Sustainable Urban Wastewater Management: Use, Demand Reduction and Recovery in the Urban Water Cycle". Sustainability. MDPI. 2.019. [sustainability-12-00266-v2 \(1\).pdf](https://www.mdpi.com/1420-0394/12/00266)

²³ Popi Christoforidou et al. "Energy Benchmarking and Optimization of Wastewater Treatment Plants in Greece". MDPI. Environmental Sciences Proceedings. 2.020 <https://www.mdpi.com/2673-4931/2/1/36>

desarrollados para la presente página web, y están aplicados al tratamiento de aguas residuales municipales.

Tabla A-6. Comparación del Consumo Específico de Energía entre Sistemas de Tratamiento

Tipo de Tratamiento	Consumo de Energía Específico kW-h/M3
Aireación Extendida	1,26
Lodos Activados Convencionales	0,88
Zanjones de Oxidación	0,75
Planta de Lodos Activados con Boquillas de Tubo Transversal Numeral C-1.5	0,132
Planta PINCH (Incorporación de Nutrientes en Compost Húmico) Numeral C-4.5	0,097
Planta PINCTA (Incorporación de Nutrientes en la Cadena Trófica Acuática) Numeral C-4.4	0,085
Planta MBBR Secuencial Capítulo D-2	0,077
Lagunas de Oxidación con Biorreactores Flotantes Capítulo C-3	0,063
Planta USA (UASB-Sharon-Anammox) Capítulo E-3	0,049
Planta PINBASA (Incorporación de Nutrientes en Biosólidos para Acondicionamiento de Suelos Acidos) Capítulo D-3	0,022

Nota: Se resaltan en amarillo las plantas propuestas en el presente sitio web

Fuente para sistemas tradicionales: Popi Christoforidou et al. (Ref. A-23)

En la tabla anterior se observa que la planta Pinbasa es la que tiene mejor desempeño energético, puesto que no realiza procesos de aireación, pero requiere grandes cantidades de cal, que implican costos de tratamiento importantes. La planta USA tiene el segundo mejor desempeño energético, pero se recomienda para aguas que tengan concentraciones

de nitrógeno amoniacal de más de 80 mg/L, puesto que con concentraciones menores el proceso Anammox que realiza se vuelve inestables. Los biorreactores flotantes permiten optimizar las lagunas de oxidación utilizadas para el tratamiento de aguas residuales municipales, con lo cual se obtienen un desempeño muy favorable con bajo costo y consumo de energía. También es importante destacar los grandes beneficios ambientales que tienen las plantas Pincta y Pinch, puesto que incorporan los nutrientes en la cadena trófica acuática y en biosólido útiles para la agricultura y la recuperación forestal. La planta Pinch también se destaca por facilitar el secuestro de grandes cantidades de carbono atmosférico. Esta planta también logra una excelente purificación del agua, la cual podría eventualmente ser reutilizada en el consumo humano

Todas las plantas fueron desarrolladas para operar en condiciones tropicales. La planta USA solo puede utilizarse en climas cálidos, debido a que el desarrollo de las bacterias Anammox que utiliza, se requieren temperaturas del agua mayores de 25°C. Las plantas Pinta y Pinch, dependen del cultivo de caña, que solo se cultiva en zonas tropicales. Esto último también ocurre con las plantas de acuicultura Parab.

Para los cálculos de los diversos tratamientos se asumieron los parámetros de calidad del agua que se encuentran en la siguiente Tabla, los cuales corresponden a aguas residuales municipales típicas del país.

Tabla A-7.

Características de las Aguas Residuales Típicas Asumidas en los Ejemplos de Cálculo

PARÁMETRO	VALOR	FUENTE
Concentración de DBO ₅ Afluente	220 mg DBO ₅ /L	RAS Titulo E, Tabla E 3-5
Producción de DBO ₅ per Cápita	52,14 grDBO5/día-hab	RAS Titulo E, Tabla E 3-5
Aporte de Agua Diario per Cápita	237 Lt/día	
Concentración de NH ₄ Afluente	40 mg NH ₄ /L	RAS Titulo E, Tabla E 3-5
Producción de NH ₄ per Cápita	9,48 grNH ₄ /día-hab	RAS Titulo E, Tabla E 3-5
Relación C/N en Aguas Residuales	5,50	
Concentración de Fósforo Total Afluente	8 mg P/L	RAS Titulo E, Tabla E 3-5
Relación C:N:P en Aguas Residuales	27,5:5:1	