

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Evaluación del efecto del caudal de agua en
la tasa de transferencia de oxígeno de
aeradores Venturi**

Jesus Miguel Robles Rete

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

Asesor:

PhD. José Vladimir Cornejo Tueros

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la vida y guiarme a lo largo de mi carrera.

Le doy gracias a mis padres Jesús y Elena por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi hermano Adrian, por ser parte importante de mi vida.

DEDICATORIA

Para mi abuelo Doroteo Duran, quien fue un maestro y compañero, porque siempre me enseñó a ser perseverante. Aunque hoy no pueda abrazarlo físicamente, lo abrazo con el alma.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE	5
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema	14
1.1.1. Planteamiento del problema	14
1.1.2. Formulación del problema	15
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. Importancia e justificaciones	16
1.3.1. Justificación social	16
1.3.2. Justificación económica	17
1.3.3. Justificación teórica	17

1.3.4.	Justificación metodológica.....	17
1.3.5.	Justificación práctica	18
1.4.	Hipótesis y variables	18
1.4.1.	Hipótesis general	18
1.4.2.	Hipótesis específicas	18
1.4.3.	Operacionalización de las variables.....	19

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de la investigación	19
2.1.1.	Antecedentes internacionales	19
2.1.2.	Antecedentes nacionales	22
2.2.	Bases teóricas.....	24
2.2.1.	Importancia de la oxigenación de aguas residuales en su biodepuración	24
2.2.2.	Mecanismo de transferencia de masa de oxígeno en agua.....	24
2.2.3.	Tasa de transferencia de oxígeno	30
2.2.4.	Concentración de saturación de oxígeno disuelto	32
2.2.5.	Solubilidad de oxígeno en agua	34
2.2.6.	Elementos utilizados para oxigenar aguas residuales por aireación	36
2.2.7.	Principio de Bernoulli aplicado a los tubos Venturi para la oxigenación.....	38
2.3.	Definición de términos básicos	42

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1.	Método, tipo y nivel de la investigación	44
3.1.1.	Método de la investigación.....	44
3.1.2.	Tipo de investigación.....	44
3.1.3.	Nivel de investigación.....	45
3.2.	Diseño de la investigación	45
3.3.	Población y muestra.....	47
3.3.1.	Población.....	47

3.3.2. Muestra	47
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	47

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados obtenidos de las pruebas experimentales	51
4.2. Resultados del tratamiento y análisis de datos.....	52
4.1.1. Prueba de hipótesis	55
4.1.2. Discusión de resultados.....	56
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transferencia del gas al líquido	25
Figura 2. Perfil lineal de concentración de oxígeno	28
Figura 3. Relación lineal $\ln C_s - CL$ versus $(t_2 - t_1)$.....	30
Figura 4. Desviación a la Ley de Henry	34
Figura 5. Esquema básico de un tubo Venturi.	39
Figura 6. Oxigenación de agua con un tubo Venturi.	40
Figura 7. Unidad experimental de oxigenación de agua con un tubo Venturi.	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Concentración de oxígeno disuelto respecto a la temperatura del agua.....	32
Tabla 2. Constantes de Henry para los gases.	33
Tabla 3. Propiedades físicas del agua a distintas temperaturas.	35
Tabla 4. Niveles de las variables manipuladas.	46
Tabla 5. Diseño de los experimentos.	46
Tabla 6. Característica de tubos Venturi.....	46
Tabla 7. Datos básicos obtenidos de los experimentos.....	51
Tabla 8. Resultados de C_{sat} y KLa	52
Tabla 9. Flujos de aire aspirados en cada ensayo.	54
Tabla 10. Análisis de varianza de un solo factor (Tubo Venturi de $\frac{1}{2}$ pulgada).....	55
Tabla 11. Análisis de varianza de un solo factor (Tubo Venturi de $\frac{3}{4}$ pulgada).....	55
Tabla 12. Análisis de varianza de un solo factor (Tubo Venturi de 1 pulgada).....	55

RESUMEN

Esta investigación se orientó con el objetivo principal de explicar el efecto que ejerce el caudal de agua circulante por tubos Venturi, en la tasa de transferencia de oxígeno que este elemento presenta en la aireación de agua a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Huancayo. Para tal efecto, se sometieron a prueba, de manera independiente, tres tubos Venturi en la aireación de agua desoxigenada con bisulfito de sodio. El aparato experimental que se utilizó para las pruebas de oxigenación permitió la oxigenación de agua en un modo continuo. Los diámetros nominales de los tubos Venturi que se probaron fueron de $\frac{1}{2}$ pulgada, $\frac{3}{4}$ de pulgada y 1 pulgada. Los niveles de caudal a los que se realizaron los experimentos fueron de 4, 6 y 8 L/min para el de $\frac{1}{2}$ pulgada; De 8, 10 y 12 L/min para el de $\frac{3}{4}$ de pulgada y de 16, 20 y 24 L/min para el de 1 pulgada. Para la evaluación del efecto en la tasa de transferencia de oxígeno, se utilizó el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) que también es un indicador del desempeño de aireadores de agua. Con los resultados obtenidos se concluyó que, el efecto del caudal sobre el K_{La} en cada tubo Venturi es significativo. Además, se observó una relación lineal entre ambas variables, en los rangos: de 4 a 8 L/min para el tubo Venturi de $\frac{1}{2}$ pulgada; de 8 a 12 L/min para el tubo Venturi de $\frac{3}{4}$ pulgada y de 16 a 24 L/min para el de 1 pulgada. De modo que, a medida que el caudal de líquido a través de los tubos Venturi se incrementa, la tasa de transferencia de oxígeno, también.

Palabras clave: transferencia de oxígeno, tubo Venturi, aireación, caudal

ABSTRACT

This research was oriented on the main objective of explaining the effect exerted by the flow of circulating water through Venturi tubes, in the oxygen transfer rate that this element presents in the aeration of water in the atmospheric conditions of the city of Huancayo. For this purpose, they were tested; independently, three Venturi tubes, in the aeration of deoxygenated water with sodium bisulfite. The experimental apparatus that was used for the oxygenation tests includes the oxygenation of water in continuous mode, but not in batches. The nominal diameters of the Venturi tubes that were tested were $\frac{1}{2}$ inch, $\frac{3}{4}$ inch and 1 inch. And, it was experimented at three different flow levels, which were: 4, 6 and 8 L / min for the $\frac{1}{2}$ inch. 8, 10 and 12 L/min for the $\frac{3}{4}$ -inch and 16, 20 and 24 L / min for the 1-inch. For the evaluation of the effect on the oxygen transfer rate, the oxygen transfer coefficient (KLa) was used, which is also an indicator of the performance of water aerators. With the results obtained, it is concluded that the effect of the flow on the KLa in each Venturi tube is significant. Furthermore, there is a linear relationship between both variables, so that; In the range of flow rate evaluated for each Venturi tube, as the flow rate of liquid through the Venturi tubes increases, the rate of oxygen transfer also increases.

Keywords: oxygen transfer, Venturi tube, aeration, flow rate

INTRODUCCIÓN

El tratamiento biológico aerobio de aguas residuales, llevadas a cabo en estaciones depuradoras, denominado también proceso de fangos activados, requiere del suministro de oxígeno al líquido que se somete a depuración; conocido también como licor de mezcla. Los dispositivos, aparatos o sistemas que permiten realizar tal aporte de oxígeno son diversos. Entre los más comunes tenemos, son los difusores de burbujas de aire. El sistema de oxigenación debe estar en la capacidad de abastecer la demanda de oxígeno que las bacterias aerobias necesitan para su respiración en el catabolismo, y con ello, permitir que permanezcan en actividad. Pero, pese a lo simple que aparenta ser la operación de oxigenación, los costos que demanda en una planta depuradora de aguas residuales convencional ascienden entre el 45 a 75% del costo energético total. (1) Según (3) demuestra que, al realizar un análisis energético detallado en una planta depuradora de agua residual, siempre encuentra la oportunidad de ahorrar energía, principalmente en la operación de aireación.

Entre los modos posibles que se pueden seguir para lograr ahorros en los costos energéticos, se encuentra la reducción de energía empleada en los dispositivos o aparatos que se utiliza en el proceso de depuración de aguas; en particular, en la aireación; o favoreciendo la cogeneración (5). El primer modo está referido al reemplazo de equipos por otros más eficientes energéticamente; así como la aplicación de un sistema de control que regule el funcionamiento de los aparatos a las necesidades del proceso de depuración. El segundo modo está orientado al uso de energías renovables o fomentando la aplicación de la tecnología de depuración anaerobia.

Es común, sobre todo en plantas depuradoras de aguas de tamaños mediano a pequeños que, las capacidades de los equipos instalados se encuentren sobredimensionados. Además, para asegurar la agitación de la mezcla en el reactor biológico, se empleen a los difusores de aire del sistema de aireación, y que se pudo comprobar que es una práctica ineficiente

energéticamente. (7) Por ello, en plantas de tratamiento pequeñas, sugiere el uso de equipos menos costosos, como aquellos que aprovechan el efecto Venturi (9). Estos dispositivos constan de un tubo con una bifurcación a la atmosfera, cuya sección transversal disminuye hasta una zona denominada garganta, para luego aumentar, hasta alcanzar su sección original. La bifurcación se encuentra en la garganta y la reducción y aumento de la sección es gradual. Un fluido, al pasar por la reducción, experimenta el efecto “Venturi”, donde se observa un aumento de su velocidad y una disminución de su presión por debajo de la presión atmosférica; permitiendo aspirar aire atmosférico y mezclar con el licor que puede fluir a un reactor biológico. (11) Según (13) , los dispositivos de aireación por efecto “Venturi” son más eficientes, dado que, la bomba que impulsa el líquido requiere menor potencia para su funcionamiento; comparados con los soplantes convencionales.

De todo lo mencionado, dado que en la revisión de la literatura especializada no se encuentra información sobre la aplicación de tubos Venturi en la oxigenación de aguas a las condiciones atmosféricas de Huancayo, la investigación que se desarrolla, se enfoca a evaluar el desempeño que muestran los tubos Venturi en la transferencia de oxígeno a las condiciones de presión y temperatura de esta localidad. Según ello, el informe contiene en el capítulo I el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, la hipótesis y la operacionalización de variables. En el capítulo II, se encuentra la revisión bibliográfica de los antecedentes y fundamentos teóricos. En el capítulo III, la metodología que se adoptó. En el capítulo IV, los resultados y su discusión. Finalmente, se exponen las conclusiones a las que se arribó.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

La oxigenación de aguas residuales es un aspecto muy importante dentro del tratamiento de aguas en plantas depuradoras. A pesar de la simplicidad del fenómeno de transferencia de oxígeno, constituye la operación que más gasto demanda dentro de las plantas de tratamiento aerobias. Para realizar la oxigenación, en la actualidad, se dispone de diversos aparatos que permiten la oxigenación de aguas residuales. Cada una presenta particularidades, con ventajas y desventajas a nivel técnico, operativo y económico. Para ocasionar la transferencia del oxígeno atmosférico al agua, simplemente basta poner en contacto al aire con el agua. Pero, dado el bajo coeficiente de difusión que el oxígeno disuelto tiene en el agua; entonces, se debe reducir la resistencia que el oxígeno experimenta en la fase líquida, mediante un movimiento global del líquido, por cualquier medio que provoque turbulencia. Realizar todo ello, conlleva a invertir energía en el proceso de depuración de aguas; lo que genera, inversión de dinero. A pesar de la simplicidad de la operación de oxigenación, investigadores manifiestan que, las averiguaciones en oxigenación de aguas residuales se hacen interesantes, pues con ello se busca encontrar y tener alternativas de mecanismos y aparatos que puedan realizar una operación más eficiente y barata. En la literatura se encuentra que, entre los aparatos oxigenadores económicos, el tubo Venturi es el más recomendable por los bajos costos de operación y mantenimiento que requieren.

De acuerdo con ello, y con la información especializada disponible, en esta oportunidad se propone realizar el estudio de diferentes tubos Venturi para oxigenar

agua a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Huancayo; con el fin de evaluar y comparar sus desempeños, además de disponer de una alternativa de aireadores para ser utilizado en el tratamiento de aguas residuales en las condiciones de esta localidad.

1.1.2. Formulación del problema

A. Problema general

¿Cómo es el efecto en la tasa de transferencia de oxígeno, que ejerce el caudal de agua circulante por tubos Venturi, a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Huancayo?

B. Problemas específicos

- ¿Cuánto es el coeficiente de transferencia de oxígeno que presentan los oxigenadores por efecto Venturi, a diferentes caudales de agua?
- ¿Cómo se relaciona el coeficiente de transferencia de oxígeno con el caudal de agua en cada tubo Venturi?
- ¿Es significativa la influencia del caudal de agua en la tasa de oxigenación con los tubos Venturi?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Explicar el efecto en la tasa de transferencia de oxígeno, que ejerce el caudal de agua circulante por tubos Venturi, a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Huancayo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar los coeficientes de transferencia de oxígeno, que presentan los oxigenadores por efecto Venturi, a diferentes caudales de agua.

- Establecer la relación entre el coeficiente de transferencia de oxígeno con el caudal de agua en cada tubo Venturi.
- Evaluar la significancia de la influencia del caudal de agua en la tasa de oxigenación con los tubos Venturi.

1.3. Importancia e justificaciones

La importancia de esta investigación recae, principalmente, en la generación de conocimiento científico dentro de la aireación de aguas mediante dispositivos poco convencionales que ofrecen ventajas económicas. Además, un aspecto que contribuye a esta importancia son los datos que se recaban son a las condiciones de presión y temperatura ambiental de Huancayo, lugar con condiciones en las que se dispone de muy poca información técnica, para poder implementar y proponer otras alternativas de oxigenación de aguas.

1.3.1. Justificación social

Esta investigación se justifica socialmente ya que con los resultados que se obtuvieron, se cuenta con alternativas que permiten ser utilizados en sistemas reales de aireación de aguas en la acuicultura y en la depuración de aguas contaminadas por el método aerobio en la localidad de Huancayo. Pues, como es de conocimiento, actualmente las aguas residuales que se generan diariamente en esta ciudad son vertidos sin previo tratamiento a los ríos, ocasionando un impacto negativo. Entonces, disponer de información técnica que contribuya a la comprensión y a la promoción de la implementación con plantas depuradoras pequeñas, medianas y grandes; beneficiará a la población huancaína y los distritos donde no cuenten con unidades de tratamiento de aguas. De este modo, se mejorará la calidad de vida de los pobladores y se reducirá el impacto negativo al medio ambiente que en la actualidad se deteriora muy rápidamente.

1.3.2. Justificación económica

En el aspecto económico, con los resultados y conocimiento generado, respecto a la velocidad de transferencia de oxígeno y el buen desempeño que tienen los tubos Venturi en la oxigenación de aguas a las condiciones ambientales de Huancayo, permite utilizarlo como elemento de sistema de aireación de bajo costo de operación comparado con otros dispositivos. Los tubos Venturi representan una alternativa atractiva para disminuir los costos que demanda la aireación de aguas y consecuentemente los costos de operación de una planta de tratamiento u oxigenación de agua.

1.3.3. Justificación teórica

Con esta investigación, en el rango de valores de caudal experimentado, se logró obtener una relación entre el coeficiente de transferencia de oxígeno y el caudal de agua que circula por el tubo Venturi. Esta relación es de interés especial para el dimensionamiento de las unidades de aireación, así como la demanda de energía de las bombas que impulsarán el líquido a través de los tubos Venturi. Antes de esta investigación, no se disponía de información cuantitativa de los coeficientes de transferencia de oxígeno y su relación con el caudal a las condiciones de presión y temperatura ambiental de Huancayo, lo cual contribuye al conocimiento científico en temas de aireación.

1.3.4. Justificación metodológica

En el aspecto metodológico, en esta investigación se desarrolló una metodología diferente para calcular el coeficiente de transferencia de oxígeno. Esta metodología permite realizar la evaluación de este parámetro de oxigenación en sistemas continuos, diferentes a los sistemas por lotes en un solo tanque. De acuerdo a esto, se presenta como una alternativa diferente a los comúnmente encontrados en la literatura.

1.3.5. Justificación práctica

Los dispositivos aireadores que se propuso investigar son tubos Venturi que, según la literatura especializada, presentan más ventajas comparadas con otros sistemas de oxigenación. Es por esta razón que, con esta investigación se ofrece una nueva alternativa metodológica para la aireación de aguas a las condiciones medioambientales de esta localidad, en relación a los otros elementos o dispositivos comúnmente usados, como son los difusores de burbujas de aire.

1.4. Hipótesis y variables

1.4.1. Hipótesis general

A medida que el caudal de agua circulante por los tubos Venturi se incrementa, la tasa de transferencia de oxígeno también se incrementa.

1.4.2. Hipótesis nula

A medida que el caudal de agua circulante por los tubos Venturi se incrementa, no existe ninguna modificación en la tasa de transferencia de oxígeno.

1.4.3. Hipótesis alterna

A medida que el caudal de agua circulante por los tubos Venturi se incrementa, la tasa de transferencia de oxígeno disminuye.

1.4.4. Hipótesis específicas

- a. Los coeficientes de transferencia de oxígeno que presentan los tubos de aeración por efecto Venturi; a diferentes caudales de agua, son mayores a 0.1 min^{-1} .
- b. La relación que existe entre el coeficiente de transferencia de oxígeno con el caudal de agua, en cada tubo Venturi es lineal.
- c. La influencia del caudal de agua en la tasa de oxigenación de los tubos Venturi es significativa a un nivel de confianza del 95%.

1.4.5. Operacionalización de las variables

- **Variable independiente**

Caudal de agua

Tipo de tubo Venturi

- **Variable dependiente**

Tasa de transferencia de oxígeno

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Artículo titulado: *Determination of standard oxygen transfer rate in venturi aeration system.* Los investigadores (2) tuvieron como objetivo general determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno a diferentes tasas de descarga a través de un sistema de aireación Venturi. Para ello, utilizaron los siguientes materiales y métodos: que adoptaron fueron, realizaron pruebas experimentales a escala de laboratorio y utilizaron dos tamaños de Venturi; una con una longitud de garganta de 40 mm y otra de 80 mm. Las tasas de descarga al que operaron fueron de 0.50, 0.58 y 0.67 L/s para la circulación de 200 L de agua en circuito cerrado. Con sus mediciones llegaron a las siguientes conclusiones: el coeficiente de transferencia de oxígeno incrementa proporcionalmente con la tasa de descarga. Determinaron que, el coeficiente de transferencia de oxígeno se incrementó en un 31% y un 55% a los 40 y 80 mm de longitud de garganta respectivamente, con el aumento de la descarga. Observaron también que, la eficiencia de la aireación aumenta con la tasa de descarga creciente, para el tamaño máximo de la longitud de la garganta. Obtuvieron los valores máximos

de SOTR los cuales fueron 0.0035, 0.0041 y 0.0050 kgO₂/h a una descarga de 0.50, 0.58 y 0.67 L/s respectivamente para 40 mm de longitud de la garganta. Y, para la longitud de garganta de 80 mm, los valores de SOTR varían de 0.0042, 0.0062 y 0.0091 kgO₂/h a una descarga creciente de 0.50, 0.58 y 0.67 L/s respectivamente.

Artículo titulado: *Impact of varying throat diameter in the venturi system on the aeration efficiency.* Los autores (4) desarrollaron esta investigación cuyo objetivo principal fue evaluar el efecto de las características geométricas sobre la eficiencia de aireación en el sistema Venturi. Para conseguir este objetivo, los materiales y métodos que adoptaron consistieron en la realización de pruebas experimentales de oxigenación de agua con tubos Venturi que construyeron con tres diámetros de garganta diferentes (dt) 10, 12.50 y 15 mm, y tres diámetros de orificios de entrada de aire (ds) diferentes: 3, 5 y 8 mm también con cinco puntos de venteo de ángulos diferentes (β) 7°, 10°, 15°, 21°, y 25° con estabilización del ángulo de entrada a 7°. El diámetro de entrada y salida (D) fue constante en todos los experimentos y consto de 25 mm. La longitud de la garganta (Lt) también en todos los experimentos fue constante e igual a 8 mm. Con los resultados que obtuvieron, concluyeron lo siguiente: el diámetro de la garganta del tubo Venturi afecta la eficiencia de la aireación. Y los mejores resultados fueron dados para la relación entre (Q_{aire} / Q_{agua}) = 92% con ángulo de salida de 25° en el caso de (dt = 0.4 y ds = 0.32 y Lt/D = 0.32). finalmente desarrollaron ecuaciones empíricas para los tubos Venturi que relacionan el flujo de aire y el flujo de agua a las longitudes y diámetros de garganta y ángulos de salidas Venturi y los diámetros de orificios de entrada de aire y números de Reynolds.

Artículo titulado: *An experimental study to evaluate the efficacy of air entrainment holes on the throat of a venturi aeration system.* Los investigadores (3), desarrollaron esta investigación con el objetivo principal de evaluar la eficacia de los

orificios en la garganta de un Venturi en el arrastre de aire para la oxigenación de agua. Para tal efecto, los materiales y métodos que adoptaron fueron, fundamentalmente la realización de experimentos de aireación de agua, donde se utilizaron tubos Venturi con diferentes longitudes de garganta (L_t) de 20, 40, 60, 80 y 100 mm; y variando el número de orificios de aire según la longitud de la garganta. En todos los casos, mantuvieron constante el diámetro de los orificios de aire con un valor de 2 mm. Obtuvieron como resultado los coeficientes de transferencia de oxígeno más altos para longitudes de garganta de 20, 40, 60, 80 y 100 mm fueron de 0.497 h^{-1} , 0.756 h^{-1} , 1.045 h^{-1} , 0.627 h^{-1} y 1.072 h^{-1} , respectivamente, con el número máximo de orificios de aire. La eficiencia de aireación estándar máxima fue de $1.25 \times 10^{-2} \text{ kgO}_2 / \text{kWh}$ para una longitud de garganta de 100 mm con el número máximo de orificios de aire. con estos resultados llegaron a las conclusiones que, la eficiencia de la aireación aumenta con un número creciente de aire por los agujeros, además tanto las características del Venturi como la longitud de la garganta, el número de orificios de aire y la distribución de los orificios de aire en la sección de la garganta, son factores clave que controlan el rendimiento del sistema de aireación Venturi.

Artículo titulado: *Performance evaluation of Venturi aeration sytem.* Los investigadores (8), desarrollaron esta investigación que tuvo como objetivo principal determinar los efectos de varios parámetros geométricos sobre el rendimiento de aireación Venturi. El sistema de aireación mediante tubos Venturi son muy eficientes para incrementar la cantidad de oxígeno disuelto en el agua a tratar. Los autores realizaron la optimización de diferentes parámetros geométricos del sistema Venturi. Aplicaron la técnica adimensional para que puedan hallar el rendimiento óptimo de los parámetros geométricos del sistema de aireación Venturi. Entre los parámetros geométricos tuvieron en cuenta la longitud de garganta (t_l), número de orificios (N) y

ángulos convergentes y divergentes (α y β). Los autores realizaron la experimentación haciendo uso de un tanque de 1124 L de capacidad con unas dimensiones de 105 cm de ancho y largo, 102 cm de profundidad. La experimentación lo desarrollaron con una velocidad de flujo constante de agua y este fue de 1.096 m/s con una longitud de garganta de $t_f = 20-100$ mm, con un número de orificios que fue de $N = 1-17$ y con ángulos convergentes y divergentes de α y $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ y 25° .

2.1.2. Antecedentes nacionales

Tesis titulada: *Efecto del tamaño de burbuja de aire, en la eficiencia de difusores para transferir oxígeno al agua.* El investigador (10), desarrolló esta indagación con objetivo general evaluar la influencia del tamaño de burbuja de aire, de un aparato de oxigenación de agua, en la eficiencia de transferencia de oxígeno (ETO), con métodos que consistieron en el análisis y evaluación de datos obtenidos de pruebas experimentales de oxigenación, agua desoxigenada, a la presión atmosférica de 520 mmHg. Sometió a prueba dos tipos de difusores, uno de burbuja fina y otro de burbuja gruesa, cada una de ellas sometidas a un flujo de aire de 3, 9 y 15 L/min a condiciones normales. El tamaño de burbuja y su distribución lo observó mediante imágenes fotográficas. Con las mediciones experimentales calculó el K_{LA} , cuyos valores, para flujos de aire antes mencionados, son 0.186, 0.279 y 0.359 min^{-1} respectivamente; en el caso del difusor de burbujas finas y 0.034, 0.063 y 0.107 min^{-1} en el caso del difusor de burbuja gruesa. La temperatura promedio de sus muestras de agua en las que realizó las pruebas; a los mismos flujos de aire, fueron 15.5 °C, 14.9 °C y 16.3 °C. con esto llegó a la conclusión que, el impacto del tamaño de burbuja, en la ETO, es el que ejerce un efecto bastante significativo. Además la ETO se incrementa cuando el tamaño de burbuja disminuye a un mismo nivel de flujo de aire en el difusor de burbuja fina y en difusor de burbuja gruesa.

Tesis titulada : *Evaluación de la concentración de oxígeno con difusores de burbuja fina y gruesa en el tratamiento de aguas residuales domésticas.* El investigador (12), desarrolló la indagación que tuvo como objetivo general evaluar el efecto de la profundidad de sumergencia y el tipo de difusor en la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento de aguas residuales domésticas de origen sintético. El autor de esta investigación designó a la distancia vertical desde el difusor hasta la superficie del líquido del módulo experimental como la profundidad de sumergencia. En esta investigación se utilizaron dos diferentes difusores de aire, como el difusor de burbuja fina y el de burbuja gruesa, y estos fueron trabajados a diferentes profundidades de sumergencia. El investigador evaluó este efecto con el coeficiente de transferencia de oxígeno, que se encuentra en la literatura de la teoría de la doble película, en donde se describe el fenómeno de la transferencia de oxígeno a líquidos mediante la aireación. El autor trabajó a condiciones atmosféricas de presión y temperatura de la ciudad de Huancayo. Con los datos obtenidos en la experimentación el autor determinó los coeficientes de transferencia de oxígeno, las profundidades de sumergencia que trabajó el autor fueron 35cm, 70cm y 105cm. Los resultados que se obtuvieron para el difusor de burbuja fina fueron de 21 min^{-1} , 0.24 min^{-1} y 0.24 min^{-1} a las profundidades de sumergencia que se mencionó anteriormente y para el difusor de burbuja gruesa 0.049 min^{-1} , 0.046 min^{-1} y 0.048 min^{-1} a las mismas profundidades de sumergencia. Se concluyó que, cuando la profundidad de sumergencia se eleva para cada tipo de difusor, el coeficiente de transferencia de oxígeno se incrementa, pero no con mucha significancia.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Importancia de la oxigenación de aguas residuales en su biodepuración

En los últimos años, la importancia del proceso de oxigenación de aguas residuales ha sido mayor, esto se debe a que la oxigenación es un proceso de suma importancia en el tratamiento de aguas residuales, pues ayuda a las aguas residuales a depurar los microorganismos existentes en el agua contaminada. Debido a ello, diversos investigadores analizaron diferentes sistemas de aireación que sean eficientes y hagan uso de menos energía. Por lo tanto, diferentes investigadores establecieron metodologías innovadoras que evalúan la eficiencia de transferencia de oxígeno, y estas permiten hacer una comparación con otros tipos de sistemas.(14)

Como mencionamos anteriormente, el proceso de oxigenación en las aguas residuales es de mucha significancia. La inyección de aire al agua contaminada genera la biodegradación aeróbica de contaminantes existentes en el agua a tratar (15). La asociación del aire con el agua se puede realizar por diferentes sistemas. Los sistemas de aireación son las más usadas para la asociación del aire con el agua, pero el uso de sistemas de aireación en el proceso de oxigenación para el tratamiento de aguas residuales utiliza mucha energía. Dado a ellos se están analizando otros tipos de aireación para el ahorro del uso energético.(16)

2.2.2. Mecanismo de transferencia de masa de oxígeno en agua.

En general, el mecanismo de transferencia de masa de oxígeno, se entiende como el conjunto de etapas o subprocesos, que en este caso las moléculas de oxígeno tienen que pasar, para llegar a disolverse de una fase gaseosa a otra líquida. Para describir este mecanismo de transferencia, se debe observar la figura 1, donde se tiene dos fases: una gaseosa que contiene moléculas de oxígeno y otra fase líquida, donde se

disolverá las moléculas de oxígeno. La transferencia de oxígeno se dará cuando entran en contacto ambas fases, gaseosa y líquida. Adicional a ello, cuando el líquido aún no se encuentra saturado del gas. Entonces, si se cumple esta última condición, existirá un gradiente de concentración de oxígeno, lo cual será la fuerza impulsora que provocará la transferencia del oxígeno (17). En general, al entrar en contacto el aire con el agua se inicia el intercambio continuo de moléculas de oxígeno (18). Una teoría que explica de manera satisfactoria el mecanismo de transferencia de oxígeno, bastante conocida, se denomina teoría de la doble película, fue propuesta por Lewis y Whitman. Esta teoría, fundamenta su explicación mediante dos películas imaginarias que se encuentran contiguas en la interfase líquido-gas, tal como se esquematiza en la siguiente figura.

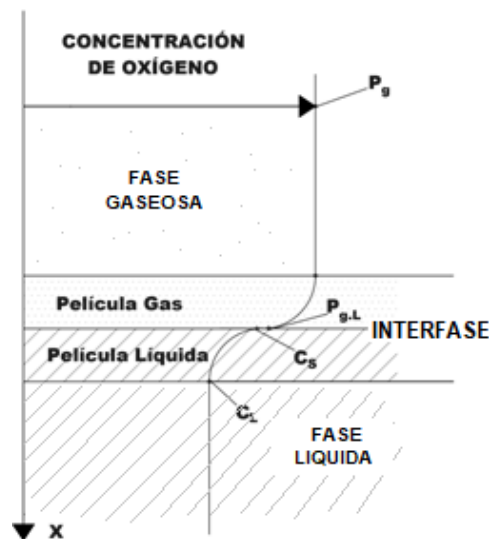


Figura 1. Transferencia del gas al líquido

Fuente: (19)

De acuerdo a esta figura P_g , es la presión parcial de la sustancia gaseosa en la fase gaseosa; $P_{g,L}$ es la presión parcial del gas en la interfase gas-líquido; C_s , es la concentración de saturación de la sustancia gaseosa en la interfase y C_L es la concentración de la sustancia gaseosa en el medio líquido

Mediante este mecanismo de la doble película, se explica la transferencia de diversas sustancias gaseosas a medios líquidos, donde las moléculas gaseosas de la fase

gas tienen que atravesar y vencer las resistencias que ofrecen las dos películas para transferirse a la fase líquida. Lógicamente, cada sustancia presenta un comportamiento particular con relación a la velocidad con la que se transfieren. Para el caso de la disolución de oxígeno en agua, Lewis y Whitman, después del análisis del fenómeno de transferencia, encontraron que, la película que ofrece mayor resistencia a la transferencia de oxígeno, es la película líquida. Considerando despreciable la resistencia que ofrece la película gaseosa. De acuerdo a ello, muchos investigadores en temas de oxigenación de agua, afirman que la película líquida es aquella que determina la velocidad de transferencia o es la limitante del fenómeno. Esto debido al coeficiente de difusión que tiene el oxígeno en el aire y el agua. Se pudo observar como resultado que, el oxígeno se desplaza con mucha mayor movilidad en el aire que en el agua, encontrándose así a una concentración de equilibrio.

Según el mecanismo de la doble película, también se considera que el agua en la zona de la interfase se satura velozmente con oxígeno al entrar en contacto con el aire, encontrándose así a una concentración de equilibrio según la temperatura de la película líquida. Por otro lado, al interior de la película líquida, el oxígeno se traslada por difusión molecular hacia la masa de agua. Entonces, de acuerdo a lo mencionado y según la figura (1), la velocidad de transferencia de oxígeno a través de la película líquida se expresa con la ecuación siguiente:

$$\frac{d_m}{d_t} = -D \cdot A \cdot \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

Donde:

$\frac{d_m}{d_t}$: Velocidad de transferencia de O₂ en la película líquida (mg/h).

D : Coeficiente de difusión molecular del oxígeno en la película líquida (m²/h).

A : Área de transferencia (m^2).

C : Concentración de oxígeno disuelto en la película líquida (mg/m^3).

x : Distancia desde la interfase líquido – gas, al interior de la película.

$\frac{dC}{dx}$: Gradiente de concentración de oxígeno en la película líquida.

La velocidad de transferencia de oxígeno descrita por la ecuación 1 (20), será aplicable cuando las propiedades de todo el sistema (densidad de la película líquida, difusividad del oxígeno, temperatura, presión del gas en la fase gaseosa) permanezcan constantes en el tiempo.

También, Whitman y Lewis, consideran que, la gradiente de concentración de oxígeno en la película líquida es lineal de acuerdo a lo siguiente:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C_L - C_s}{e_l} \quad (2)$$

Donde:

C_L : Concentración de oxígeno disuelto al final de la película líquida (mg/L). También se puede decir que es la concentración de oxígeno disuelto en la masa de líquido.

C_s : Concentración de saturación del oxígeno en la interfase. Al inicio de la película líquida. (mg/L).

e_l : Espesor de la película líquida.

De acuerdo a la explicación del mecanismo, la figura 1; para el caso de la transferencia de oxígeno en agua, se modifica del siguiente modo:

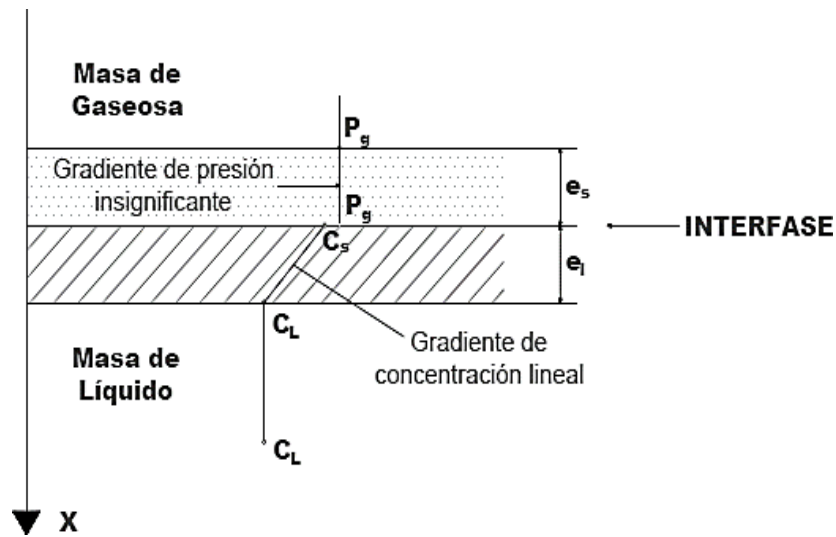


Figura 2. Perfil lineal de concentración de oxígeno

Fuente: Elaboración propia

Introduciendo la ecuación 2 en 1y agrupando términos se tiene

$$N = \frac{dm}{dt} = -K_L \cdot A \cdot (C_L - C_s) \quad (3)$$

Donde:

N : Velocidad de transferencia de oxígeno (mg/h).

K_L : Coeficiente de película líquida para el oxígeno.

En un recipiente que contiene agua que se desea oxigenar, el oxígeno que se transfiere al líquido, a una velocidad $\frac{dm}{dt}$, que también es igual al incremento de la masa de oxígeno disuelto en volumen global de agua; es decir: $V \frac{dC_L}{dt}$ En este caso V , viene a ser el volumen total de agua donde se disuelve el oxígeno mediante un sistema de oxigenación particular. Entonces:

$$\frac{dC_L}{dt} = -K_L a (C_L - C_s) \quad (4)$$

Donde:

a : área interfacial volumétrica (m^2/m^3)

$K_L a$: Coeficiente de transferencia global de oxígeno (h^{-1}).

La solución analítica de la ecuación 4, mediante la integración, genera la ecuación 6. Para tal efecto, las condiciones de frontera que se consideran son para $t=t_1$, $C_L=C_0$ y para $t=t_2$ mayor que t_1 , $C_L=C_L$, de la siguiente manera:

$$\int_{C_0}^{C_L} \frac{dC_L}{C_s - C_L} = \int_{t_1}^{t_2} K_L \cdot a \cdot dt \quad (5)$$

$$C_L = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_L a (t_2 - t_1)} \quad (6)$$

Con la ecuación 6, es posible estimar en función al tiempo de oxigenación, los valores de la concentración de oxígeno disuelto en la masa global de líquido C_L , conociendo el $K_L a$.

Por otro lado, si el objetivo es calcular el $K_L a$, que presenta un sistema de oxigenación de agua, es necesario disponer de datos experimentales de C_L y tiempo. Además, la ecuación 6 se debe acomodar de acuerdo a la ecuación 7 para el cálculo mediante método gráfico o a la ecuación 8 para el cálculo de modo analítico.

$$\ln(C_s - C_L) = \ln(C_s - C_0) - K_L \cdot a \cdot (t_2 - t_1) \quad (7)$$

$$K_L \cdot a = \frac{\ln(C_s - C_0) - \ln(C_s - C_L)}{(t_2 - t_1)} \quad (8)$$

La figura 3 se genera después de acomodar los datos de acuerdo a la ecuación 7, donde la pendiente negativa de la gráfica obtenida de la ecuación lineal por regresión

simple, es $K_L a$. En esta figura se puede observar ello, graficando $\ln(C_s - C_L)$ versus $(t_2 - t_1)$.

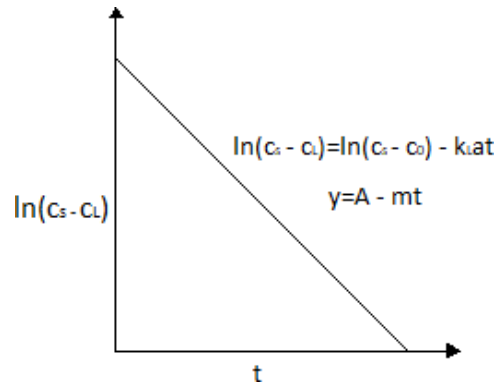


Figura 3. Relación lineal $\ln(C_s - C_L)$ versus $(t_2 - t_1)$

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Tasa de transferencia de oxígeno

Llegado a este punto, ya se tiene los elementos suficientes para definir la tasa de transferencia de oxígeno. Según la bibliografía técnica (22), se define como la masa de oxígeno que se disuelve en un volumen de agua por unidad de tiempo, a determinadas condiciones de temperatura del líquido, presión atmosférica, velocidad de gas, potencia y concentración de oxígeno disuelto. Esta definición, matemáticamente, esta expresada por la ecuación 4. Analizando esta ecuación, la tasa de transferencia de oxígeno dependerá K_{La} , C_L y C_s . El K_{La} es uno de los parámetros más utilizado para caracterizar del desempeño de un aireador de agua o agua residual, a ciertas condiciones de operación. Entre otros parámetros que se usan para caracterizar el desempeño de los sistemas de oxigenación de agua, se cuenta con la eficiencia de aireación y la eficiencia de transferencia de oxígeno (22). Entonces, para los fines de esta investigación, se utilizará el K_{La} como medida indirecta de la tasa de transferencia de oxígeno.

Según las normas de (22) las pruebas experimentales para determinar K_{La} se realiza con agua potable. Pero, para cálculos de demanda de oxígeno y requerimientos

en el diseño de un sistema de aireación de aguas residuales, es importante disponer del K_{La} para el agua residual con que se va oxigenar. De las mediciones prácticas que realizaron los investigadores, observaron que la concentración de saturación del oxígeno en el agua se modifica con la presencia de sólidos disueltos en el agua. Del mismo modo, esta variación se observa con los K_{La} del agua potable y del agua residual. Para estos casos se tiene las siguientes relaciones:

$$\beta = \frac{C_{sr}}{C_s} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{K_{La \text{ agua residual (20}^\circ\text{C)}}}{K_{La \text{ agua potable (20}^\circ\text{C)}} \quad (10)$$

Factores que afectan el K_{La}

Según (21) entre los factores que repercuten en el coeficiente global de transferencia de oxígeno, a continuación, se detalla algunos de estos factores.

1. **Factor equipo.** En relación a este aspecto, se refiere a los elementos que se utilizan para lograr el contacto entre el aire y el agua. Los detalles particulares que ejercen un efecto sobre el K_{La} son tipo de elemento de oxigenación (difusores, contactores circulares, aireadores de superficie, tubos Venturi y, otros), densidad y distribución de elementos instalados para la oxigenación, profundidad de sumergencia de instalación, antigüedad del elemento oxigenador, geometría del tanque de aireación y régimen de flujo (22)
2. **Factor operación.** Entre los factores de operación, se puede mencionar al tiempo de retención del agua en el recipiente de aireación, el nivel de nitrificación, la presión atmosférica y el deterioro de los elementos de aireación.

3. Características del agua. En este aspecto, se presenta principalmente a la temperatura del agua, la presencia de los detergentes y los sólidos disueltos como los suspendidos (23).

2.2.4. Concentración de saturación de oxígeno disuelto

La concentración de saturación de oxígeno se define como la máxima cantidad de oxígeno que se puede encontrar disuelto en un fluido a una temperatura y presión determinada (24). La unidad de medida más usual es el miligramo por litro (mg/L) o conocido también como partes por millón (ppm). Un factor que afecta la concentración de saturación de oxígeno disuelto es la temperatura. Esto se refiere a que, si la temperatura del agua se incrementa, se disuelve menos cantidad de oxígeno. Este efecto se puede apreciar en la tabla 1, para una presión atmosférica de 760 mmHg (25). Otro factor que afecta la concentración de saturación es la presión atmosférica del aire; a medida que la presión se incrementa, la concentración de saturación, también.

Tabla 1. Concentración de oxígeno disuelto respecto a la temperatura del agua

Temperatura °C	OD (mg/L)	Temperatura °C	OD (mg/L)
0	14.16	18	9.18
1	13.77	19	9.01
2	13.40	20	8.84
3	13.05	21	8.68
4	12.70	22	8.53
5	12.37	23	8.38
6	12.06	24	8.25
7	11.76	25	8.11
8	11.47	26	7.99
9	11.19	27	7.86
10	10.92	28	7.75
11	10.67	29	7.64
12	10.43	30	7.53
13	10.20	31	7.42
14	9.98	32	7.32
15	9.76	33	7.22
16	9.56	34	7.13
17	9.37	35	7.04

Fuente: (26)

La ley de Henry

Esta ley, bastante conocida y clásica, establece una relación matemática entre la concentración de saturación de un gas disuelto en un líquido y la presión que posee en fase gaseosa. La relación matemática es el siguiente:

$$C_{sat,gas} = H \times p_{gas} \quad (11)$$

Donde:

$C_{sat,gas}$: Concentración de saturación del gas disuelto en el líquido (mg/L).

p_{gas} : Presión parcial del gas (atm).

H : Constante de Henry.

Esta relación se cumplirá cuando se haya logrado alcanzar el equilibrio del sistema líquido-gas. Es decir, cuando la temperatura y la presión está en equilibrio, la concentración de saturación del gas disuelto en el líquido es proporcional a la presión parcial del gas que está en contacto con el líquido. La ley de Henry, generalmente, se utiliza en gases con mayor trascendencia que están presentes en las aguas residuales (26). En la siguiente tabla se presenta las constantes de Henry para algunos gases más comunes.

Tabla 2. Constantes de Henry para los gases.

Gas	H (mol/L atm)
O ₂	1.28 x 10 ⁻³
CO ₂	3.38 x 10 ⁻²
H ₂	7.90 x 10 ⁻⁴
CH ₄	1.34 x 10 ⁻³
N ₂	6.48 x 10 ⁻⁴
NO	2.00 x 10 ⁻⁴

Fuente: (27)

La ecuación 11 describe satisfactoriamente la situación de equilibrio en disolución de gases poco solubles, donde se considera que las disoluciones son ideales. Pero, cuando la presión se incrementa notablemente, esta ecuación presenta desviaciones, alejándose de la idealidad y manifestando un comportamiento no lineal. En la figura 4 se observa la desviación del comportamiento lineal.

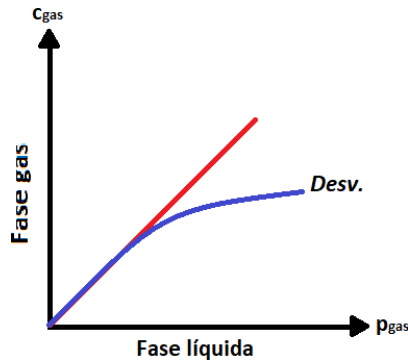


Figura 4. Desviación a la Ley de Henry

Fuente: (28)

2.2.5. Solubilidad de oxígeno en agua

En la bibliografía, es común encontrar el término solubilidad de un gas en un líquido. Este término lo emplean indistintamente, y está referido a la concentración de saturación, que ya se explicó en el apartado anterior. Para el caso particular del gas oxígeno que se disuelve en el agua, también es aplicable la ecuación 11. Pues, es posible calcular su concentración de saturación o su solubilidad, conociendo la presión parcial en equilibrio y la constante de Henry para las condiciones a las que se encuentra. Pero, siempre debe tomarse en consideración las limitaciones que ofrece.

Existe, en la bibliografía, otras relaciones que permiten calcular la solubilidad del oxígeno en agua, a diferentes condiciones de presión y temperatura a la que se encuentra. Uno de ellos es el propuesto por Benson y Krause (29), pero la limitación presenta es la aplicación solo para presión atmosférica de 101.3 kN/m² y es un modelo empírico. Otro modelo, recientemente propuesto en estos últimos años, y verificado

por (30), es la denominada ley de solubilidad de oxígeno. Según los autores, este modelo es del tipo mecanicista. Presenta un carácter más general y menos limitaciones comparado con la ley de Henry, pues incluye en su formulación, la temperatura y las propiedades físicas de los fluidos que participan en el equilibrio líquido-gas. La ley de la solubilidad de oxígeno en agua, denominado también, de la quinta potencia de temperatura; se expresa matemáticamente de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$C_{sat} = K \times \frac{P_s}{T^5 \times E \times \rho} \quad (12)$$

Donde:

C_{sat} : Concentración de saturación de oxígeno disuelto. (mg/L)

K : Constante de proporcionalidad (43.4)

P_s : presión de saturación en equilibrio (atm).

T : Es la milésima parte de la temperatura en K ($T/1000$)

E : Módulo de elasticidad del agua a la temperatura del líquido. (kN/m²)

ρ : Densidad del agua. (kg/m³)

En la siguiente tabla, se muestra la concentración de saturación de oxígeno y la densidad agua a diferentes temperaturas para una presión atmosférica de 760 mmHg.

Tabla 3. Propiedades físicas del agua a distintas temperaturas.

T	$C_s(T)$	ρ
°C	mg/L	kg/m ³
0	14.62	999.8
5	12.77	1000
10	11.29	999.7
15	10.08	999.1
20	9.09	998.2
25	8.26	997
30	7.56	995.7
40	6.41	992.2
50	5.49	988
60	4.71	983.2

Fuente: (31)

2.2.6. Elementos utilizados para oxigenar aguas residuales por aireación

Tal como menciona en el libro de (32) “En el campo del tratamiento de las aguas residuales, la aplicación más común de la transferencia de gases consiste en la transferencia de oxígeno en los tratamientos biológicos secundarios”. Pero, como se mencionó anteriormente, el oxígeno presenta un bajo coeficiente de difusión en el agua, y ello ocasiona que la transferencia a la fase líquida ofrezca mayor dificultad al fenómeno de solubilización de este gas. Una de las formas que comúnmente se aplica para incrementar la velocidad de transferencia de oxígeno es generar un área interfacial mayor, para satisfacer la demanda de oxígeno que requiere un tratamiento aerobio en particular. Esto se hace posible mediante la adopción de elementos destinados a la aireación del agua para oxigenación. Entre los elementos o sistemas de uso más frecuente se tienen a los siguientes:

1. Oxigenación con difusores.

Para (33) los difusores se seleccionaban en dos tipos: difusores de burbuja fina y difusores de burbuja gruesa. Para una mejor transferencia de oxígeno se hace uso de los difusores de burbuja fina. Actualmente se clasifican los difusores según las características físicas de los equipos, y lo categorizaron en tres categorías principales.

Difusores porosos

Este tipo de difusores son más conocidos como difusores de poro fino, estos los podemos encontrar en diferentes formas y estructuras. Con respecto a las formas, tenemos a los difusores de placa, domo, disco de tubo, y, en cuanto a la estructura, podemos encontrar de cerámica, plásticos porosos y membranas perforadas. Las ventajas de este tipo de difusores es que exhiben eficiencias de transferencia de oxígeno elevadas.(34)

Difusores no porosos

Los difusores no porosos generan burbujas con un mayor diámetro, debido a ello, tiene un menor rendimiento de aireación. las ventajas que presenta este difusor es que generan menos costo de mantenimiento y no necesitan de una limpieza. En este tipo de difusor se encuentran al difusor de burbuja gruesa, bien en forma de disco o de forma tubular.(35)

Otros sistemas de difusión

En otros sistemas de difusión, encontramos a los difusores de chorro y difusores de aspiración. El aireado de chorro combina la dilución de aire y el bombeo de líquido; el difusor por aireación consta de una bomba de aspiración que funciona con un motor.

2. Aireadores Mecánicos

Los aireadores mecánicos se clasifican de acuerdo a las características de diseño y su funcionamiento, aireadores de eje vertical y aireadores de eje horizontal. (36)

Aireadores mecánicos sumergidos de eje vertical

Los aireadores mecánicos se fundamentan en la agitación brusca de la superficie del agua para una mejor transferencia de oxígeno. Con este tipo de aireadores, se puede inyectar oxígeno puro al agua residual por difusión en el flujo descendente. De estos tipos de aireadores, su potencia varía desde 0.75 kW hasta 100 kW.

Aireadores mecánicos de eje horizontal

Los aireadores mecánicos de eje superficial cuentan con una estructura similar al aireador Kessener de cepillo, este elemento mencionado

anteriormente es utilizado para fomentar la circulación del agua y aireación en canales de oxidación. Las potencias típicas para este tipo de aireadores varían entre 0.1 y 0.75 kW/disco.

3. Tubos Venturi

Los tubos Venturi son dispositivos que fueron diseñados para la medición de la velocidad del fluido con el efecto Venturi. La velocidad del fluido se determina con la velocidad antes del estrechamiento y determinando la diferencia de presiones. La determinación de la velocidad de un fluido se genera mediante un tubo formado por dos secciones cónicas entrelazadas por un tubo estrecho, por donde el fluido circula consecuentemente a una velocidad mayor. Con la ayuda de un tubo vertical en forma de U, enlazado a la región ancha y la canalización, se puede medir la presión en el tubo Venturi. (37)

2.2.7. Principio de Bernoulli aplicado a los tubos Venturi para la oxigenación

Mediante este principio, se explica el comportamiento que muestra un fluido al desplazarse a lo largo de un tubo cuya sección disminuye y aumenta de manera gradual. Este principio fue descrito por Daniel Bernoulli en su obra conocida como *Hidrodinámica* en 1738, donde hace mención que: “La energía total por unidad de volumen de un fluido incompresible animado de movimiento estacionario es constante”. (38)

El principio de Bernoulli, expresado matemáticamente, para el flujo de un fluido entre dos puntos de una corriente, es el siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 = \text{constante} \quad (13)$$

Esta ecuación representa que la carga total que posee el fluido en las posiciones 1 y 2 son iguales. El término de carga total está referido a la suma de la carga por presión, carga por velocidad y carga por elevación que tiene el fluido. Con la ecuación 13, se puede entender con mayor facilidad que, si la velocidad del fluido aumenta en el punto 2, manteniendo constante la elevación Z ; entonces, la presión en este punto debe disminuir.

Para ampliar la explicación, consideremos una tubería que posea una forma tal que su diámetro disminuya de manera gradual y luego aumente hasta alcanzar el diámetro original, de manera semejante al tubo Venturi, según la siguiente figura:

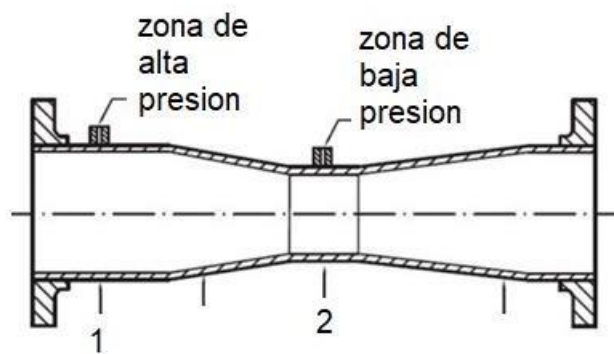


Figura 5. Esquema básico de un tubo Venturi.

Fuente: (38)

De acuerdo a esta figura y también con la ecuación 14, la zona 2 será de baja presión. Esto se puede demostrar aplicando en la ecuación de Bernoulli el balance de masa del fluido a través de la tubería, entre las zonas 1 y 2.

Del balance de masa, para un fluido incompresible como el agua, que fluye a caudal constante, se tendrá que el flujo de masa en los dos puntos es constante:

$$\text{flujo másico}_1 = \text{flujo másico}_2 \quad (14)$$

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (15)$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (16)$$

Incorporando esta última ecuación a la ecuación 13 y ordenándolo:

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho v_1^2 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \right]}{2} \quad (17)$$

Con la ecuación 17, se entiende que la presión en la zona 2 es menor que en la zona 1, pues el diámetro de la tubería en la zona 2 es menor que en la zona 1. Con esto queda demostrado que la presión disminuye.

En la oxigenación de aguas residuales con aire, mediante un tubo Venturi, el fenómeno que se observa es la disminución de la presión del fluido en la zona 2 (garganta) cuando el aire fluye del exterior hacia esta corriente líquida, mezclándose y disolviéndose; dado que, al continuar con el flujo de la mezcla a través del tubo, la presión aumenta hasta alcanzar su valor cercano al de ingreso. Debido a esto se generan pequeñas burbujas, donde se manifiesta la transferencia de masa de oxígeno del aire al agua. Para ilustrar de manera gráfica, tenemos la siguiente figura.

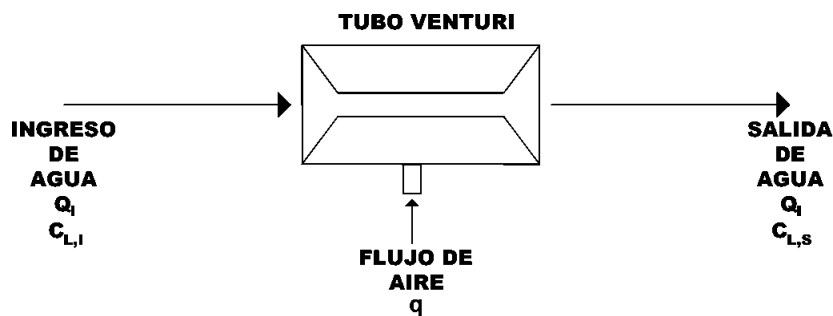


Figura 6. Oxigenación de agua con un tubo Venturi.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a esto, el balance de masa de oxígeno en el tubo Venturi, para un flujo permanente del líquido, sería del modo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{rapidez de} & & \text{rapidez de} & & \text{rapidez de} \\ (\text{transferencia}) & = & (\text{salida de}) & - & (\text{ingreso de}) \\ \text{de oxígeno} & & \text{oxígeno} & & \text{oxígeno} \end{aligned} \quad (18)$$

Considerando que el tubo Venturi se encuentra instalado en un solo tanque; de modo que, el líquido contenido en un tanque es impulsado por la bomba hacia el tubo Venturi luego de oxigenarse. El líquido se descarga y retorna al mismo tanque. Entonces; de acuerdo a ello, el volumen V de líquido se oxigena durante un tiempo t en el tanque, en el que la concentración de oxígeno disuelto se varía desde un nivel inicial $C_{L,I}$ hasta otro nivel final $C_{L,S}$. Este análisis se realiza con el fin de introducir el $K_L a$ que es un parámetro de desempeño del tubo Venturi y es el que se utiliza para esta investigación.

$$K_L a \int_0^t (C_{sat} - C_L) dt = Q_S C_{L,S} - Q_I C_{L,I} \quad (19)$$

Donde:

$C_{L,I}$, Concentración de oxígeno disuelto al ingreso del tubo Venturi (mg/L)

$C_{L,S}$, Concentración de oxígeno disuelto a la salida del tubo Venturi (mg/L)

Q_I , Caudal de agua al ingreso del tubo Venturi (L/min)

Q_S , Caudal de agua a la salida del tubo Venturi (L/min)

La integral de la ecuación 19 representa la cantidad de oxígeno que se disolvió en el agua con volumen V, durante un tiempo t.

Según la figura 6 y, también como la operación de oxigenación, se realizará con dos tanques donde los caudales de ingreso y salida son iguales: $Q_I=Q_S$. Entonces:

$$K_L a \int_0^t (C_{sat} - C_L) dt = C_{L,S} - C_{L,I} \quad (20)$$

El término entre paréntesis dentro de la integral, se puede reemplazar con un equivalente de la ecuación 6:

$$K_L a \int_0^t (C_{sat} - C_{L,I}) e^{-K_L a t} dt = C_{L,S} - C_{L,I} \quad (21)$$

Desarrollando la ecuación 21 y despejando $K_L a$:

$$K_L a = -\frac{Q}{V} \ln \left[\frac{C_{sat} - C_{L,S}}{C_{sat} - C_{L,I}} \right] \quad (21)$$

La ecuación 21 es la que se aplica para calcular el coeficiente de transferencia de oxígeno que caracteriza como parámetro de desempeño de la rapidez de transferencia de oxígeno para los tubos Venturi que se sometan a prueba, según las condiciones de operación que se establezca en los experimentos.

2.3. Definición de términos básicos

Oxigenación de agua

La oxigenación de agua es una operación que permite la disolución de oxígeno, que se encuentra en fase gaseosa, en agua en fase líquida. El oxígeno que se emplea puede proceder de fuentes a alta pureza o del aire atmosférico.

Tasa de transferencia de oxígeno

Es la velocidad con que se transfiere el oxígeno gaseoso a un medio líquido como el agua. Para el caso de la oxigenación con aire atmosférico utilizando elementos de aireación, indirectamente se estima con el coeficiente de transferencia de oxígeno.

Tubo Venturi

Es un dispositivo que cuenta con una sección estrecha, denominado garganta, donde un fluido, al fluir a elevadas velocidades, reduce su presión. Este fenómeno se

aprovecha para aspirar gases u otros fluidos, mediante una corriente en la garganta y mezclarlos.

Caudal

El caudal es la cantidad de fluido que se desplaza con la sección del ducto por unidad de tiempo. Frecuentemente se reconoce como el flujo volumétrico o volumen que se desplaza por un área dada en unidad de tiempo.

Difusor de aire

Los difusores de aire son dispositivos que generan burbujas de aire en agua y permiten con ello la oxigenación de aguas. Los difusores de aire son empleados comúnmente en procesos de tratamiento de aguas residuales y la acuicultura.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método, tipo y nivel de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

Esta investigación aplicó el método científico. Sobre este, en la bibliografía, lo describen como aquel método donde se aplica una serie de procedimientos de tipo lógico y experimental, debidamente controlados, con el fin de verificar una hipótesis (39). Las experiencias son replicables. En términos generales, las etapas que se desarrollaron en esta investigación, de acuerdo al método científico fueron la identificación y formulación del problema, luego con la información y conocimiento disponible se formuló la hipótesis. Seguido a esto, con los datos obtenidos de los experimentos prácticos de oxigenación de agua con los tubos Venturi, se realizó la prueba para demostración de la hipótesis formulada. En las pruebas de experimentación, se manipuló el tipo de tubo Venturi y el caudal para observar el efecto en la tasa de transferencia de oxígeno. Por ello, dentro del método científico, el método específico fue el experimental.

3.1.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicada. En las referencias bibliográficas, definen a este tipo de investigación, como aquella que está orientada a una acción de solucionar problemas utilizando conocimientos básicos, y no al desarrollo de una teoría. También, a este tipo de investigación lo denominan práctica o empírica y “se caracteriza por buscar la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren” (39)

3.1.3. Nivel de investigación

Esta investigación presenta un nivel explicativo; dado que, según las respuestas que se propone a los problemas general y específico que se formularon, explican la influencia y relación del flujo de agua sobre la tasa de transferencia de oxígeno en cada tipo de tubo Venturi que se llevó a prueba; lo cual, va más allá de una descripción del fenómeno de transferencia de oxígeno mediante estos dispositivos. Para respaldar lo mencionado, entre varios autores que coinciden con este nivel de investigación en la bibliografía, se tiene a (40) e indican que: “Los estudios explicativos no finalizan en la descripción de características, fenómenos o de establecer relaciones entre conceptos, los estudios explicativos están llamados a responder a las causas de los eventos, sucesos y fenómenos físicos o sociales”

3.2. Diseño de la investigación

El plan estratégico o diseño que permitió obtener los datos de interés para la evaluación y análisis, a fin de responder a las preguntas formuladas en esta investigación, es el diseño experimental. Según la literatura, este diseño está orientado a establecer relaciones de causa efecto entre factores o variables independientes y dependientes; para ello, los grupos o muestras experimentales son sometidos a manipulaciones de modo intencional por parte del investigador, con el propósito de realizar observaciones o mediciones en su comportamiento, como efecto. En esta investigación, fueron sometidos a prueba tres tubos Venturi para oxigenación de muestras de agua, previamente desoxigenada, a las condiciones medioambientales de Huancayo. Las pruebas se realizaron de manera independiente con cada tubo Venturi a tres niveles caudal. Estos niveles de caudal en cada tubo Venturi fueron diferentes, pues al realizar las prepruebas con cada uno de ellos, se observó que los caudales mínimos de agua, al

que eran capaces de succionar aire fueron diferentes. Entonces los niveles de variables son:

Tabla 4. Niveles de las variables manipuladas.

Tipo de tubo Venturi (Variable independiente 1)	Niveles de caudal (variable independiente 2)		
	Bajo (-)	Medio (0)	Alto (+)
A	4 L/min	6 L/min	8 L/min
B	8 L/min	10 L/min	12 L/min
C	16 L/min	20 L/min	24 L/min

Fuente: Elaboración propia

Las pruebas experimentales que se desarrollaron a cada nivel de caudal con cada tubo Venturi fueron tres y, del siguiente modo:

Tabla 5. Diseño de los experimentos.

VARIABLES INDEPENDIENTES		RESPUESTA		
TIPO DE TUBO VENTURI	CAUDAL DE AGUA (L/min)	TASA DE TRANSFERENCIA DE OXIGENO (K _L a)		
		I	II	II
A	4			
A	6			
A	8			
B	8			
B	10			
B	12			
C	16			
C	20			
C	24			

Fuente: Elaboración propia

Se debe indicar que los tipos de tubos Venturi se diferencian por el diámetro nominal que poseen para el ingreso y salida de fluido. En este caso fueron:

Tabla 6. Característica de tubos Venturi.

Tipo de tubo Venturi	Diámetro nominal
A	½ pulgada
B	¾ pulgada
C	1 pulgada

Fuente: Elaboración propia

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Según (41) la población es “un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”. Debe entenderse que la población no solamente está conformada por personas, sino de aquellos elementos, objetos o unidades que serán caso de estudio e investigación. De acuerdo a ello, la población que se definió para esta investigación fue el agua potable desoxigenada por el método químico de bisulfito de sodio y que se encuentra a la presión y temperatura atmosférica de la localidad de Huancayo.

3.3.2. Muestra

La porción que se obtuvo de la población como muestra son 540 L de agua con las características que se indicó. Los datos de interés se obtuvieron de 27 experimentos que se llevaron a cabo en una unidad aireación agua empleando tubo Venturi. En cada experimento se utilizó 20 L de agua.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Entre los aparatos e instrumentos que se utilizaron para realizar las pruebas experimentales, se tienen a:

- Una unidad de aireación de agua que emplea el principio de Bernoulli para la oxigenación.
- Tubos Venturi de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, y 1 pulgada de diámetro nominal.
- Balanza de precisión
- Vasos de precipitado de 500 mL
- Reactivos químicos.

La unidad de aireación con los elementos que la componen se muestra en la figura siguiente:

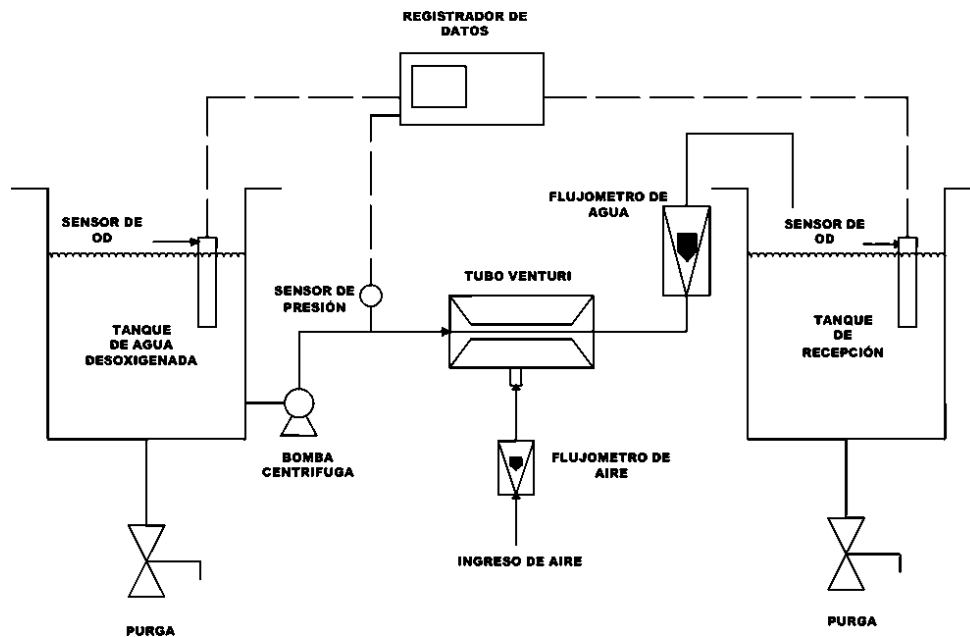


Figura 7. Unidad experimental de oxigenación de agua con un tubo Venturi.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a esta figura, los componentes principales son:

El tubo Venturi es el elemento que permite la transferencia de oxígeno del aire al agua aprovechando el principio de Bernoulli. El material del cual está elaborado es polimérico. Cada tubo tiene dimensiones específicas, las cuales se encuentran en un esquema en los anexos

El tanque de agua desoxigenada es un recipiente de acrílico reforzado con acero inoxidable con dimensiones de 30cm x30 cm x 50cm. Posee una capacidad total en volumen de 50 L y tiene previsto puntos de instalación de sensor de temperatura y oxígeno disuelto.

El tanque de recepción es un recipiente de plástico de forma circular. Las dimensiones que posee son 27 cm de diámetro y 34 cm de altura

La electrobomba centrífuga es el que impulsa el líquido, cediéndole energía necesaria, para que circule por las tuberías atravesando el tubo Venturi. El motor de la bomba es de 1.2 HP de corriente trifásica de 220 V. Para que funcione la corriente eléctrica se contó con un variador de frecuencia, el que permitió regular la velocidad de giro del motor y con ello trasladar el caudal de agua a través del circuito.

El sensor de oxígeno disuelto es el instrumento de medición que permitió calcular la concentración de oxígeno disuelto en el agua contenida en los tanques de agua desoxigenada y de recepción. Presenta un rango de medición de 0 a 20 ppm y el principio físico en que se basa es el fenómeno de fluorescencia óptica de un material en presencia de oxígeno disuelto en el agua. Además de medir, transmite mediante señal eléctrica de 4 a 20 mA al registrador de datos.

El rotámetro de aire es el instrumento que permitió medir el flujo de aire que aspira el tubo Venturi. Presenta un rango de 0 a 8 L/min a condiciones normales (20 °C y 1 atm)

El rotámetro de agua es el instrumento que se empleó para medir el caudal de agua y con ello regular al caudal que se requería en los experimentos. Presenta un rango de 0 a 40 L/min

El transmisor de presión Este instrumento permitió medir la presión del líquido a la entrada del tubo Venturi y también transmitir, mediante una señal eléctrica en un rango de 4 a 20 mA estandarizada, hacia el registrador de datos. Presenta un rango de 0 a 6 bar y para su funcionamiento requiere de una fuente de corriente continua de 24 voltios.

El registrador e indicador de datos, con este instrumento se hizo posible la indicación de las mediciones que realizaron los sensores de temperatura, presión y oxígeno disuelto. También tiene la función de registrar esos datos, pero en esta

oportunidad la configuración que se le realizó al instrumento fue solo para que cumpla la función de indicador.

En relación a las técnicas que permitieron la recolección de datos, se recurrió a las pruebas experimentales de oxigenación por aireación de agua con la unidad antes descrita. Las muestras de agua sometidas a ensayo se prepararon adicionando bisulfito de sodio y catalizador de cloruro de cobalto al volumen de agua requerida en cada ensayo. Para esto, se midió la concentración de oxígeno disuelto en el agua potable y conjuntamente con el volumen a preparar se calculó la cantidad de bisulfito y cloruro de cobalto que se adicionó. De estas pruebas experimentales se obtuvieron datos básicos; los cuales fueron:

- Concentración de oxígeno disuelto en la corriente de agua que ingresa al tubo Venturi ($C_{L,i}$)
- Concentración de oxígeno disuelto en la corriente de agua que sale del tubo Venturi $C_{L,s}$
- Caudal de agua que fluye a través del tubo Venturi (Q)
- Volumen de líquido que ocupa la sección del tubo Venturi donde se realiza la mezcla u oxigenación.

La tasa de transferencia de oxígeno que se obtuvo para cada situación experimental fue mediante el cálculo, con la ecuación deducida de K_{La} y se empleó los datos básicos de los experimentos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados obtenidos de las pruebas experimentales

De acuerdo a la estrategia que se formuló en esta investigación, los datos obtenidos en las pruebas experimentales son los que se tiene a continuación:

Tabla 7. Datos básicos obtenidos de los experimentos.

TIPO DE VENTURI (pulg)	CAUDAL DE AGUA (L/min)	FREC. (Hz)	TEMP. (°C)	CAUDAL DE AIRE (L/min)	PRESION DE INGRESO (bar)	VOLUMEN AGUA (L)	C _{L,I} (mg/L)	C _{L,S} (mg/L)
1/2	4	25	17.25	1.5	0.796	10.2	0.187	4.488
1/2	4	25	17.22	1.5	0.766	10.0	0.187	4.278
1/2	4	25	17.22	1.5	0.774	10.1	0.187	4.248
1/2	6	33	17.26	3.25	1.355	10.1	0.137	4.753
1/2	6	33	17.23	3.25	1.340	10.0	0.137	4.765
1/2	6	33	17.22	3.25	1.347	10.0	0.137	4.761
1/2	8	40	17.22	4.75	1.958	10.0	0.137	5.233
1/2	8	40	17.22	4.75	1.952	10.1	0.137	5.211
1/2	8	40	17.22	4.75	1.960	10.1	0.137	5.209
3/4	8	18.6	16.469	1.25	0.435	10.3	0.148	3.595
3/4	8	18.6	16.458	1.25	0.427	10.0	0.148	3.357
3/4	8	18.6	16.462	1.25	0.433	10.1	0.148	3.351
3/4	10	21	16.372	2.25	0.544	10.0	0.168	3.504
3/4	10	21	16.37	2.25	0.543	10.0	0.168	3.456
3/4	10	21	16.371	2.25	0.543	10.0	0.168	3.445
3/4	12	25.2	16.33	3.25	0.732	10.5	0.168	3.893
3/4	12	25.2	16.33	3.25	0.704	10.0	0.168	3.908
3/4	12	25.2	16.4	3.25	0.716	10.0	0.168	3.901
1	16	15	16.48	1	0.250	20.0	0.168	2.034
1	16	15	16.49	1	0.246	20.1	0.168	2.042
1	16	15	16.47	1	0.249	20.0	0.168	2.021
1	20	17.5	16.49	1.75	0.343	20.3	0.192	2.231
1	20	17.5	16.49	1.75	0.337	20.1	0.192	2.239
1	20	17.5	16.49	1.75	0.339	20.0	0.192	2.236
1	24	20.4	16.48	2.35	0.468	20.0	0.168	2.508
1	24	20.4	16.48	2.35	0.457	20.1	0.168	2.491
1	24	20.4	16.48	2.35	0.46	20.0	0.168	2.513

Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede ver en esta tabla, se modificó los caudales de agua que fluyen en cada tipo de tubo Venturi. Para ello, se tuvo que regular la frecuencia de la corriente eléctrica que se suministró al motor eléctrico de la electrobomba. A los respectivos caudales ensayados, en todos los casos se encuentra que, la presión de ingreso de agua al tubo Venturi también aumenta, del mismo modo sucede con el caudal de aire que aspira el tubo Venturi, ocasionando que la concentración de oxígeno disuelto de agua en la corriente de salida también aumente. Es muy importante este último efecto, pues permite indicar que los tubos Venturi podrán transferir más oxígeno al agua a caudales elevados.

4.2. Resultados del tratamiento y análisis de datos

Los resultados que se llegaron a obtener después de realizar los cálculos de la concentración de saturación de oxígeno disuelto y el K_{La} , para cada caso experimental, se muestra en la tabla 8. La ecuación 12 permitió calcular la C_{sat} , mientras que la ecuación 21 K_{La} . Para el caso de C_{sat} se utilizó las propiedades físicas del agua tales como densidad y su módulo de elasticidad a la correspondiente temperatura que se encontraba en cada experimento.

Tabla 8. Resultados de C_{sat} y K_{La}

Tipo De Venturi	Q (L/min)	C_{sat} (mg/L)	K_{La} (min^{-1})	Tipo De Venturi	Q (L/min)	C_{sat} (mg/L)	K_{La} (min^{-1})	Tipo De Venturi	Q (L/min)	C_{sat} (mg/L)	K_{La} (min^{-1})
1/2	4	6.6079	0.4346	3/4	8	6.7205	0.5773	1	16	6.7189	0.2682
1/2	4	6.6122	0.4050	3/4	8	6.7221	0.5357	1	16	6.7174	0.2683
1/2	4	6.6122	0.3960	3/4	8	6.7215	0.5291	1	16	6.7203	0.2659
1/2	6	6.6065	0.7426	3/4	10	6.7346	0.7093	1	20	6.7174	0.3691
1/2	6	6.6108	0.7529	3/4	10	6.7349	0.6945	1	20	6.7174	0.3746
1/2	6	6.6122	0.7513	3/4	10	6.7348	0.6912	1	20	6.7174	0.3758
1/2	8	6.6122	1.2372	3/4	12	6.7408	0.9559	1	24	6.7189	0.5303
1/2	8	6.6122	1.2124	3/4	12	6.7408	1.0100	1	24	6.7189	0.5229
1/2	8	6.6122	1.2113	3/4	12	6.7305	1.0095	1	24	6.7189	0.5317

Fuente: *Elaboración propia*

Presentando los resultados de K_{La} de cada tubo Venturi en forma gráfica, se obtuvo la siguiente figura:

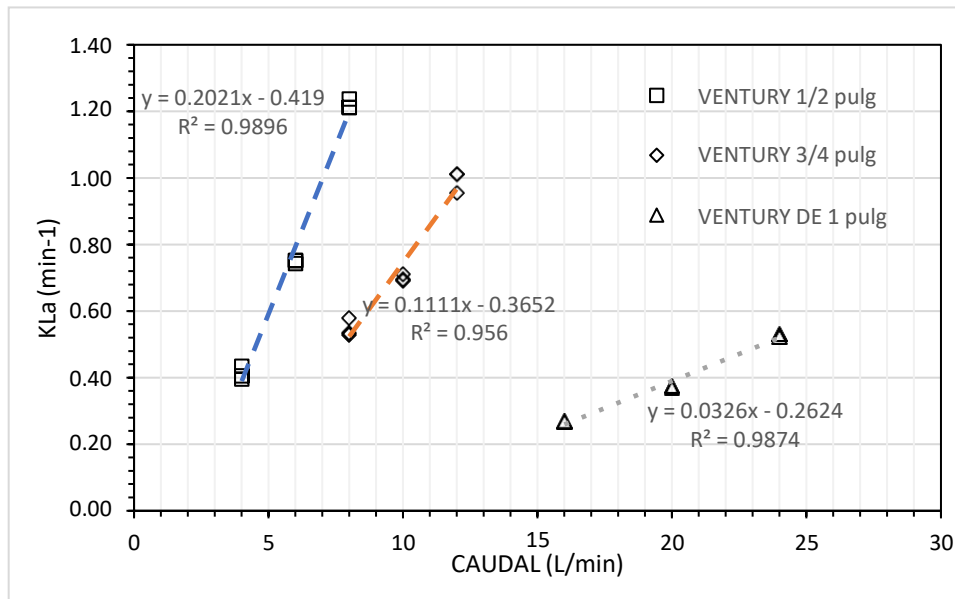


Figura 8. Resultados de K_{La} versus caudal de cada tipo de tubo Venturi.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a esta figura se observa que el K_{La} para cada tipo de tubo Venturi, va en aumento a medida que el caudal de agua se incrementa. Se cometería un error si se realiza comparaciones de los K_{La} de cada tubo; pues, los caudales con las que se experimentó son diferentes. Esta situación de experimentar las operaciones de oxigenación con caudales diferentes se generó a raíz de que cada tubo Venturi permitía aspirar un mínimo flujo de aire cuando el flujo de agua alcanzaba un nivel mínimo. Es decir, el caudal de agua mínimo en el que se observó la aspiración de aire con el tubo Venturi de $\frac{1}{2}$ pulgada fue cuando alcanzó los 3 L/min aproximadamente. Con el tubo Venturi de $\frac{3}{4}$ pulgada fue los 7 L/min y, con el tubo Venturi de 1 pulgada fue a los 14 L/min.

De acuerdo a los tres niveles de caudal experimentados, se puede decir que la variación que experimenta el K_{La} en cada tipo de tubo Venturi, en ese rango de caudales, es lineal. Pero se recomienda para evitar errores y ampliar el rango de caudales en cada tipo de tubo, realizar

las pruebas a más niveles con mayores caudales. Sobre todo, con los tubos de $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada, pues, en este caso no se realizó debido a las limitaciones que se tuvo con la capacidad de los dos recipientes que se muestran en el esquema del módulo experimental. Con las ecuaciones obtenidas mediante regresión lineal, que se muestran en la figura 8, se puede establecer: para el rango de caudales experimentado con cada tubo Venturi que, el incremento de K_{LA} es de 0.2021 unidades por cada incremento de 1L/min de caudal de agua en el caso del tubo Venturi de $\frac{1}{2}$ pulgada. De 0.1111 unidades de K_{LA} por cada 1 L/min de caudal de agua para el caso de $\frac{3}{4}$ pulgada y, de 0.0326 unidades de K_{LA} por cada 1 L/min de caudal de agua para el tubo Venturi de 1 pulgada.

En relación a los flujos de aire que cada tubo Venturi aspiró en los ensayos, se midieron los siguientes caudales a condiciones normales (C.N.).

Tabla 9. Flujos de aire aspirados en cada ensayo.

Tipo De Venturi	Q (L/min)	Caudal de aire (L/min. C.N.)	Tipo De Venturi	Q (L/min)	Caudal de aire (L/min. C.N.)	Tipo De Venturi	Q (L/min)	Caudal de aire (L/min. C.N.)
1/2	4	1.5	3/4	8	1.25	1	16	1
1/2	4	1.5	3/4	8	1.25	1	16	1
1/2	4	1.5	3/4	8	1.25	1	16	1
1/2	6	3.25	3/4	10	2.25	1	20	1.75
1/2	6	3.25	3/4	10	2.25	1	20	1.75
1/2	6	3.25	3/4	10	2.25	1	20	1.75
1/2	8	4.75	3/4	12	3.25	1	24	2.35
1/2	8	4.75	3/4	12	3.25	1	24	2.35
1/2	8	4.75	3/4	12	3.25	1	24	2.35

Fuente: *Elaboración propia*

De acuerdo a estas mediciones se verifica que, el flujo de aire aspirado va en aumento, si el flujo de agua a través del tubo Venturi se incrementa. Este fenómeno se explicó anteriormente con el principio de Bernoulli; pues, a medida que el caudal del líquido aumenta, su velocidad en la garganta del tubo Venturi aumenta. Consiguientemente, la presión del

líquido disminuye en esta zona, hasta alcanzar valores por debajo de la presión atmosférica (presiones de vacío). Por ello, en los instantes en que la presión disminuye a valores menores de la atmosférica, comienza la aspiración de aire. Esta diferencia de presión es la fuerza impulsora del flujo de aire que aspira cada tubo a las condiciones particulares que se ensayó. Entonces, a mayor caudal, mayor diferencia de presiones y mayor flujo de aire aspirado.

4.1.1. Prueba de hipótesis

En esta parte se presenta la prueba de significancia que se realizó a fin de verificar el efecto del caudal del líquido sobre el K_{LA} de los tubos Venturi ensayado. Esta prueba consistió en el análisis de varianza de las medias del factor caudal. El número de niveles que tuvo este factor con las que se ensayó en cada tubo Venturi, como ya se indicó anteriormente, fueron tres. Entonces, este análisis se realizó de manera independiente para cada tubo Venturi, con los datos respectivos de K_{LA} de la tabla 8. Los resultados resumidos, se muestran en seguida:

Tabla 10. Análisis de varianza de un solo factor (Tubo Venturi de ½ pulgada).

Fuente de variación	suma de cuadrados	grados de libertad	cuadrado medio	Fo
Caudal	0.98936524	2	0.49468262	2271.53049
Error (dentro de tratamientos)	0.00130665	6	0.00021778	
Total	0.99067189	8		

Tabla 11. Análisis de varianza de un solo factor (Tubo Venturi de ¾ pulgada)

Fuente de variación	suma de cuadrados	grados de libertad	cuadrado medio	Fo
Caudal	0.30640916	2	0.15320458	263.540637
Error (dentro de tratamientos)	0.00348799	6	0.00058133	
Total	0.30989715	8		

Tabla 12. Análisis de varianza de un solo factor (Tubo Venturi de 1 pulgada)

Fuente de variación	suma de cuadrados	grados de libertad	cuadrado medio	Fo
Caudal	0.10327263	2	0.05163632	4175.54952
Error (dentro de tratamientos)	7.4198E-05	6	1.2366E-05	
Total	0.10334683	8		

De acuerdo a la bibliografía, el criterio que se aplicó para rechazar la hipótesis nula debe cumplir con la siguiente desigualdad:

$$F_o > F_{\alpha,G.L \text{ del factor},G.L \text{ del error}}$$

Donde, F_o es el indicador de distribución F observado y, $F_{\alpha,G.L \text{ del factor},G.L \text{ del error}}$ es el indicador estadístico obtenido de tablas de distribución de probabilidad F, a un nivel de significación α .

En este caso particular, se propone la hipótesis nula: las medias de los K_{La} obtenidos en cada tratamiento son iguales, o expresado de otro modo, que el efecto de los tratamientos a diferentes caudales es insignificante. De tablas de distribución se tiene que, $F(0.05,2,6) = 5.14$, realizando la verificación de la inecuación, se cumple la desigualdad, con los tres tubos Venturi. Por lo que se concluyó que, el caudal de líquido es un factor que afecta significativamente en el K_{La} y; en la tasa de transferencia de oxígeno, claro está, dentro del rango de caudales a las que se ensayó con cada tubo Venturi.

4.1.2. Discusión de resultados

A diferencia de los módulos experimentales que emplearon otros investigadores para determinar el K_{La} de los tubos Venturi, donde la oxigenación lo llevaron a cabo en un solo recipiente, en esta investigación se utilizó un módulo que utiliza dos recipientes, cuyo esquema se mostró en la figura 7. Tanto en las experiencias que llevaron a cabo con un recipiente, como en este caso de dos recipientes, el caudal de agua y de aire permanecieron constantes durante el tiempo que tardó la oxigenación. Los investigadores que utilizaron un solo recipiente, muestran la evolución de la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo, con lo que hacen posible el cálculo de K_{La} . En esta investigación, se observó que la concentración de oxígeno disuelto incrementa desde $C_{L,I}$ hasta de $C_{L,S}$ después de que el agua pase por el tubo Venturi y luego de aplicar un balance de oxígeno se calculó el K_{La} para cada caso. Es importante resaltar

la diferencia de configuraciones de los elementos que componen los módulos que se emplearon, pues ello también afecta en el desempeño de oxigenar agua con los tubos Venturi. Al realizar prepruebas de oxigenación en un solo tanque, con cada tubo Venturi, se observó que la temperatura del líquido fue aumentando. Este comportamiento se originó a raíz de que con la bomba se fue adicionando energía al agua durante la oxigenación, lo cual fue convertido en incremento de energía interna del líquido, por las caídas de presión se daban en el circuito de flujo. Esta fue la razón, por la que se decidió utilizar una configuración de dos recipientes para los experimentos, a fin de que la temperatura del líquido no se modifique notablemente.

De los resultados de K_{La} que se obtuvieron con cada tubo Venturi a las condiciones de presión atmosférica de esta localidad (520 mmHg), y las de operación de caudal que se indicaron, se encuentra un valor máximo de 1.2113 min^{-1} para el tubo Venturi de $\frac{1}{2}$ pulgada a 8 L/min. Esto no debe entenderse que es el mejor; sino que, para este tipo de tubo, a ese caudal, la oxigenación de agua será más rápida que en bajos caudales. Los otros tubos de $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada, presentan un máximo de K_{La} de 1.0095 min^{-1} y 0.5317 min^{-1} máximos a 12 L/min y 24 L/min respectivamente, estos valores se pueden elevar si se incrementa aún más el caudal, por ello es que se recomienda realizar pruebas a mayores niveles de caudal. Comparando con los resultados que obtuvieron los investigadores (2), quienes utilizaron tubos Venturi con un diámetro de garganta de 20 mm de diámetro y longitudes de garganta de 40 mm y 80 mm, encontraron también que, cuando el caudal de agua que circula por los tubos aumenta, el K_{La} también se incrementa. Los diámetros de garganta de los tubos Venturi utilizados en esta investigación son de 2mm, 2.8mm y 4.7mm para los diámetros nominales de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada respectivamente, tal como se indica en sus características de cada tubo Venturi en los anexos. Estas dimensiones son menores a los que presentan los tubos Venturi de los investigadores (2). Entre valores de K_{La} que obtuvieron los investigadores (2) para el tubo Venturi de 20mm de diámetro de garganta y 40 mm de longitud de garganta son de 2.1 h^{-1} , 2.4 h^{-1} y 2.6 h^{-1} a caudales

de 30 L/min, 34.8 L/min y 40.2 L/min respectivamente. Estos valores son bajos comparados con los que se obtuvo en esta investigación, la razón de estas diferencias radica en las configuraciones del equipo aireador y las condiciones de operación.

Por otro lado, comparando los K_{La} de los tubos Venturi en esta investigación, con los obtenidos por otros investigadores (5) y (6) que utilizaron difusores de burbuja fina a las mismas condiciones atmosféricas, se encuentra el mayor valor obtenido con difusores: 0.34 min^{-1} , un valor relativamente menor con relación a los máximos obtenidos para los tres tubos Venturi.

CONCLUSIONES

Se evaluó el efecto del caudal de agua sobre la tasa de transferencia de oxígeno mediante la variación de K_{La} ; del cual se concluye que, en el rango de caudal evaluado para cada tubo Venturi, a medida que el caudal de líquido a través de los tubos Venturi se incrementa, la tasa de transferencia de oxígeno, también.

Se determinó los K_{La} que presentan los tubos Venturi a las condiciones atmosféricas de la localidad de Huancayo, los cuales en promedio son:

Tubo Venturi de 1/2 pulg		Tubo Venturi de 3/4 pulg		Tubo Venturi de 1 pulg	
caudal L/min	K_{La} min-1	caudal L/min	K_{La} min-1	caudal L/min	K_{La} min-1
4	0.4119	8	0.5474	16	0.2675
6	0.7489	10	0.6984	20	0.3731
8	1.2203	12	0.9918	24	0.5283

Se estableció la relación matemática entre el coeficiente de transferencia de oxígeno y el caudal del agua a través de los tubos Venturi. Se concluye que, para los tres tubos Venturi, y en los niveles de caudal ensayados, la relación matemática es lineal.

Se evaluó la significancia de la influencia del caudal de agua en la tasa de oxigenación en cada tubo Venturi y, dentro de los caudales ensayados, se concluye que: el caudal de agua ejerce un efecto significativo positivo sobre el K_{La} ; y con ello, sobre la tasa de transferencia de oxígeno.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones en este tema de oxigenación de aguas mediante tubos Venturi, se recomienda:

- Realizar ensayos que permitan evaluar el K_{La} con más y mayores niveles de caudal de agua, a fin de establecer una relación matemática más general que permita maximizar el K_{La} en función al caudal.
- Evaluar la influencia de los factores, como el caudal y diámetro de la garganta de los tubos, sobre la muerte microbiana en procesos de depuración de aguas residuales reales con microorganismos reales. Así como su eficiencia energética de este sistema de oxigenación en procesos de mediano y gran tamaño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ROSSO, Diego, LARSON, Lory E. and STENSTROM, Michael K. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: State of the art. *Water Science and Technology*. 2008. Vol. 57, no. 7, p. 973–978. DOI 10.2166/wst.2008.218.
2. YADAV, Anamika, KUMAR, Avinash and SARKAR, Sudipto. Determination of Standard Oxygen Transfer Rate in Venturi Aeration System Determination of Standard Oxygen Transfer Rate in Venturi Aeration System. . 2021. DOI 10.1088/1757-899X/1017/1/012005.
3. FOLADORI, P., VACCARI, M. and VITALI, F. Energy audit in small wastewater treatment plants: Methodology, energy consumption indicators, and lessons learned. *Water Science and Technology*. 2015. Vol. 72, no. 6, p. 1007–1015. DOI 10.2166/wst.2015.306.
4. MAHMOUD, Ahmed Helmy and DARDEER, Mamdouh Ahmed. IMPACT OF VARYING THROAT DIAMETER IN THE VENTURI SYSTEM ON THE AERATION EFFICIENCY. . 2021. Vol. 16, no. 60, p. 579–594.
5. MACINTOSH, C., ASTALS, S., SEMBERA, C., ERTL, A., DREWES, J. E., JENSEN, P. D. and KOCH, K. Successful strategies for increasing energy self-sufficiency at Grüneck wastewater treatment plant in Germany by food waste co-digestion and improved aeration. *Applied Energy* [online]. 2019. Vol. 242, no. November 2018, p. 797–808. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.03.126. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.126>
6. YADAV, Anamika, KUMAR, Avinash and SARKAR, Sudipto. An experimental study

- to evaluate the efficacy of air entrainment holes on the throat of a venturi aeration system. . 2020.
7. FERRER POLO, José, AGUADO GARCÍA, Daniel, BARAT BAVIERA, Ramón, SERRALTA SEVILLA, Joaquín and LAPUENTE OJEDA, Enrique. Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid. Fundación Canal de Isabel II. 2017. P. 187.
 8. YADAV, Anamika, KUMAR, Avinash and SARKAR, Sudipto. Performance evaluation of venturi aeration system. *Aquacultural Engineering* [online]. 2021. Vol. 93, no. December 2020, p. 102156. DOI 10.1016/j.aquaeng.2021.102156. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102156>
 9. THERRIEN, Jean David, VANROLLEGHEM, Peter A. and DOREA, Caetano C. Characterization of the performance of venturi-based aeration devices for use in wastewater treatment in low-resource settings. *Water SA*. 2019. Vol. 45, no. 2, p. 251–258. DOI 10.4314/wsa.v45i2.12.
 10. POVIS, Arlitt Amy Lozano. EFECTO DE TRES TIPOS DE DIFUSORES DE AIRE COMPRIMIDO SOBRE LA CAPACIDAD DE OXIGENACIÓN EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS-HUANCAYO. Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado [online]. 2020. P. 10–11. Available from: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
 11. POLO, José Ferrer. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE AGUAS RESIDUALES José. 2007. ISBN 9781119130536.
 12. GRACIELA, Omonte Mendez Jessica. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OXIGENO CON DIFUSORES DE BURBUJA FINA Y GRUESA EN EL

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS. Universidad Nacional del Centro del Perú. 2020.

13. BAYLAR, Ahmet and OZKAN, Fahri. Applications of venturi principle to water aeration systems. *Environmental Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 6, no. 4, p. 341–357. DOI 10.1007/s10652-005-5664-9.
14. MEZA, Esteban Durán Herrera y Gerardo Rojas. Efecto de contaminantes sobre la transferencia de oxígeno en sistemas de aeración analizado mediante un modelo de dos zonas simplificado. *Ciencia y Tecnología (San José)*. 2006. Vol. 24, no. 2, p. 129–150.
15. LUNA, M. Estudio Del Tratamiento De Aireacion Prolongada Para Aguas Residuales. [online]. 2014. P. 1–115. Available from: [https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/216/1/Estudio de tratamiento de aireación prolongada para aguas residuales utilizando como matriz agua de mar_rees.pdf](https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/216/1/Estudio_de_tratamiento_de_aireacion_prolongada_para_aguas_residuales_utilizando_como_matriz_agua_de_mar_rees.pdf)
16. BUITRAGO, Gustavo, OTÁLVARO, Ángela M and DUARTE, Paola G. Evaluation of oxygen transfer in a conventional bioreactor with external aerator. [online]. 2013. Vol. XV, no. 2, p.106–114. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v15n2/v15n2a13.pdf>
17. CASEY, T J. *Unit Treatment Processes in Water and Wastewater Engineering*. . 2006. No. October.
18. KIM, Sang Yeob, GARCIA, Hector A., LOPEZ-VAZQUEZ, Carlos M., MILLIGAN, Chris, HERRERA, Aridai, MATOSIC, Marin, CURKO, Josip and BRDJANOVIC, Damir. Oxygen transfer performance of a supersaturated oxygen aeration system (SDOX) evaluated at high biomass concentrations. *Process Safety and Environmental*

- Protection [online]. 2020. Vol. 139, p. 171–181. DOI 10.1016/j.psep.2020.03.026.
Available from: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.026>
19. SHARMILA, V Godvin, BANU, J Rajesh, KIM, Sang-hyoun and KUMAR, Gopalakrishnan. ScienceDirect A review on evaluation of applied pretreatment methods of wastewater towards sustainable H₂ generation: Energy efficiency analysis. International Journal of Hydrogen Energy [online]. 2020. No. xxxx. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.01.081. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.081>
 20. LANDA, Andrea del Milagro Garcia. Aireador superficial de rotor con eje horizontal en aguas residuales industriales. . 2019.
 21. B., Hasan; Ryoichi S. A study of optimum aeration efficiency of a lab-scale air-diffused system. Water and Environment Journal. 2017. Vol. 31, no. 3, p. 432–439. DOI 10.1111/wej.12261.
 22. LI, Shuhong, ZHANG, Yongxin, ZHANG, Kai, LI, Xianliang, LI, Yang and ZHANG, Xiaosong. Study on performance of storage tanks in solar water heater system in charge and discharge progress. Energy Procedia [online]. 2014. Vol. 48, p. 384–393. DOI 10.1016/j.egypro.2014.02.045. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.045>
 23. GARCÍA S., Sergio, SANTIAGO G., Ruben, SÁNCHEZ L., Juan and THALASSO, Frederic. Medición del diámetro de burbuja en bioreactores. . 1992. Vol. 4, no. 1991, p. 2508.
 24. MUÑOZ, Hipólito, OROZCO, Saturnino, VERA, Andrea, SUÁREZ, Juan, GARCÍA, Edelmira, NERIA, Mercedes and JIMÉNEZ, José. Relación entre oxígeno disuelto,

- precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2015. Vol. 6, no. 5, p. 59–74.
25. GARRIDO-BASERBA, Manel, SOBHANI, Reza, ASVAPATHANAGUL, Pitiporn, MCCARTHY, Graham W., OLSON, Betty H., ODIZE, Victory, AL-OMARI, Ahmed, MURTHY, Sudhir, NIFONG, Andrea, GODWIN, Johnnie, BOTT, Charles B., STENSTROM, Michael K., SHAW, Andrew R. and ROSSO, Diego. Modelling the link amongst fine-pore diffuser fouling, oxygen transfer efficiency, and aeration energy intensity. *Water Research* [online]. 2017. Vol. 111, no. 2017, p. 127–139. DOI 10.1016/j.watres.2016.12.027. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.027>
 26. MENDEZ, Erika and RODRIGUEZ, Gustavo. Componentes y sistemas para el tratamiento biológico de las aguas residuales. *Ingeniería De Tratamiento De Aguas Residuales* [online]. 2014. P. 1–13. Available from: <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lodosactivados5.pdf>
 27. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. Variable Indicador Del Agua - Oxígeno disuelto en agua. Repositorio [online]. 2001. Available from: [https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-Oxigeno disuelto f.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-Oxigeno%20disuelto%20f.pdf)
 28. SEMINARIO, U. Disolución De Gases En Agua. Procesos Ácido Base Y Solubilidad. Seminario 1 [online]. 2007. Available from: https://www.ugr.es/~mota/QIA_SEMINARIO-1.pdf
http://www.ugr.es/~mota/QIA_SEMINARIO-1.pdf
 29. ASCE STANDARD. American Society of Civil Engineers Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water. 1852. ISBN 087262885X.

30. LEE, Johnny. Development of a model to determine mass transfer coefficient and oxygen solubility in bioreactors. *Heliyon* [online]. 2017. No. December 2016, p. e00248. DOI 10.1016/j.heliyon.2017.e00248. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00248>

31. GAMEZ SOTO, Guillermo. Tema 2: propiedades físicas de los fluidos. Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización [online]. 2012. Available from: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/fichero/2+-+PROPIEDADES+FÍSICAS+DE+LOS+FLUIDOS.pdf>

32. METCALF AND EDDY. *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. 1995. ISBN 0070416907. McGraw-Hill

33. RONZANO, E and DAPENA, J L. *Sistemas de Aeración*. [online]. 2016. Available from: http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/sistemas_aireacion.pdf ASPECTOS COMUNES A LOS DIVERSOS SISTEMAS

34. CARLOS ALEJANDRO MORAGA CRUZ. MEDICIÓN DE TAMAÑOS DE BURBUJAS MEDIANTE USO DE SONIDO Y SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE CURVAS DE COALESCENCIA PARA BURBUJAS GENERADAS EN UNA CELDA DE FLOTACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO. *Lincoln Arsyad* [online]. 2014. Vol. 3, no. 2, p. 1–46. Available from: <http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>

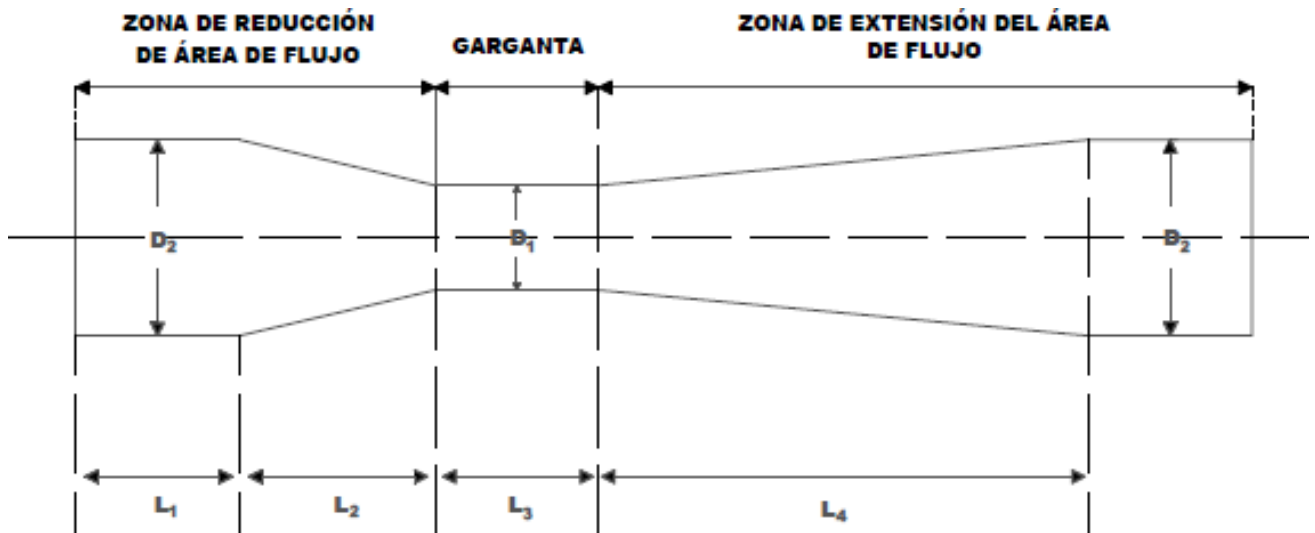
35. SIMÓN, Pedro, REGIONAL, Entidad, SANEAMIENTO, De, AGUAS, Depuración De, DE, Residuales and MURCIA, Región De. Transferencia de oxígeno : evaluación rápida de la eficiencia de los sistemas de aireación. . 2015. P. 92–101.

36. OSCAR ALEXIS JIMBO; JOSE LUIS ROA. Diseño y construcción de un sistema

- prototipo para oxigenación del agua mediante energía solar para la Laguna Daniel Álvarez de la Ciudad de Loja. . 2011.
37. CECILIA, MACASSI ALLASI Giuliana. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE NANOBURBUJEO EN EL TRATAMIENTO PARA REDUCIR LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN Biotecnología. . 2017.
 38. FERNANDEZ, Cisneros Paredes; Lazaro. Design and construction of a prototype Venturi meter for teaching purposes and application engineering engenharia de aplicação. . 2017. Vol. 2, no. 5, p. 1033–1056. DOI 10.23857/casedelpo.2017.2.5.may.1033-1056.
 39. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, COLLADO FERNÁNDEZ, Carlos and BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodologia de la Investigacion. Mexico, 2014.
 40. SANTAMARÍA, Edison Damián Cabezas Mejía; Diego Andrade Naranjo; Johana Torres. Introducción a la Metodologia de la Investigacion Científica. Ecuador : Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2018. ISBN 9789942765444.
 41. FIDIAS G. ARIAS. EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 6a EDICIÓN. Sexta edic. 2012. ISBN 9800785299.

ANEXOS

ANEXO 1: ESQUEMA TUBO VENTURI



ANEXO 2: TABLA DE DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LOS TUBOS

TUBO VENTURI	D_1	D_2	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1/2"	0.2cm	1.23cm	4.6cm	0.8cm	0.35cm	3.3cm	4.4cm
3/4"	0.28cm	1.33cm	3.7cm	1.7cm	0.9cm	4.7cm	3.1cm
1"	0.47cm	1.96cm	7.37cm	0.9cm	1.0cm	7.4cm	2.5cm

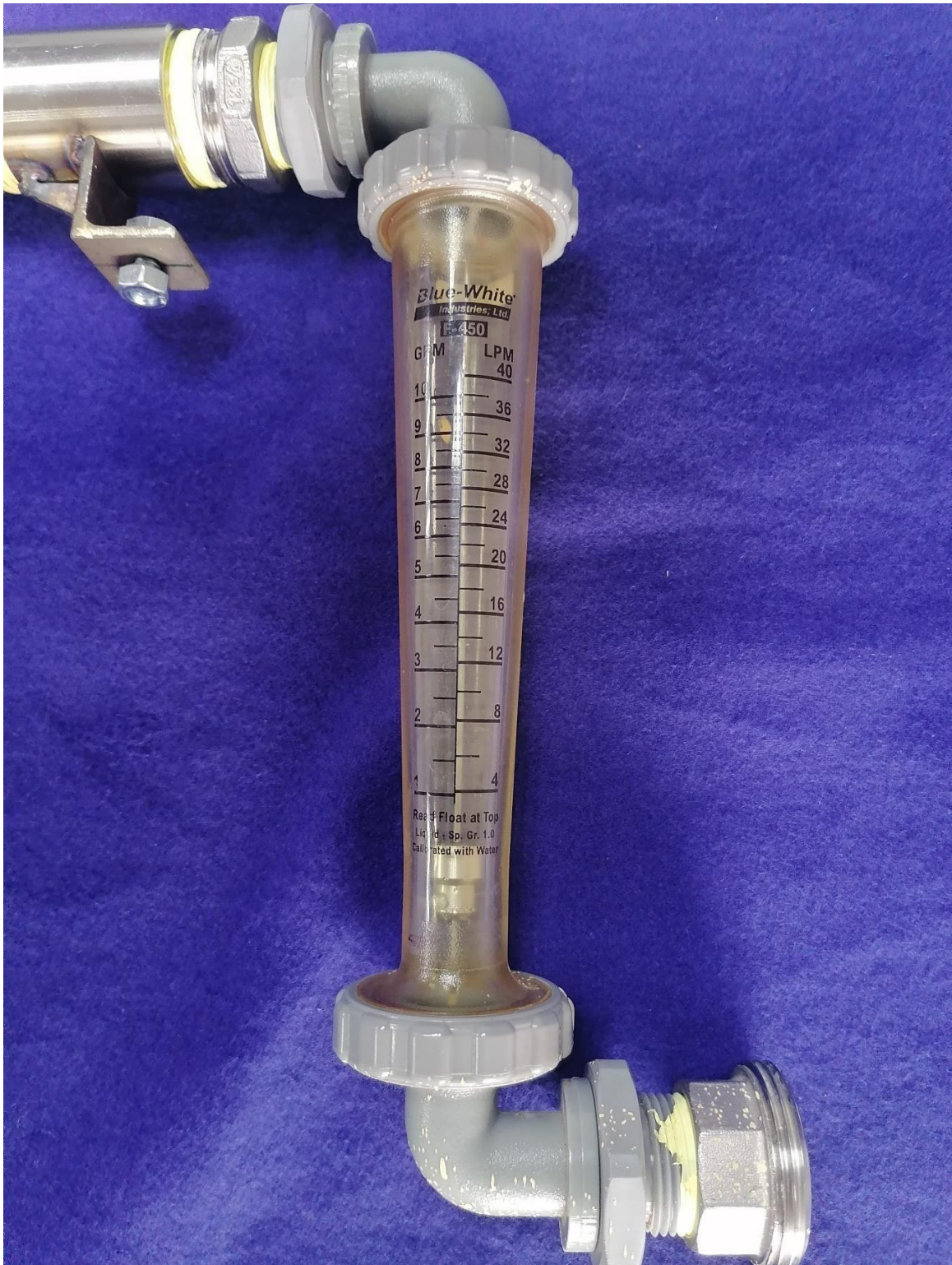
ANEXO 3: FOTOGRAFÍA DEL MODULO EXPERIMENTAL



ANEXO 4: FOTOGRAFÍA DEL REGISTRADOR DE DATOS



ANEXO 5: FOTOGRAFÍA DEL ROTÁMETRO PARA FLUJO DE AGUA



ANEXO 6: FOTOGRAFÍA DE LOS TUBOS VENTURI EMPLEADOS EN LOS EXPERIMENTOS



EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAUDAL DE AGUA EN LA TASA DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO DE AERADORES VENTURI

por Jesus Robles

Fecha de entrega: 16-feb-2022 06:32p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1764156853

Nombre del archivo: TESIS-ROBLES_RETE_JESUS_MIGUEL_1.docx (4.61M)

Total, de palabras: 14416

Total, de caracteres: 75106

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAUDAL DE AGUA EN LA TASA DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO DE AERADORES VENTURI

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

15%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

4%

Trabajo del estudiante

2

repositorio.continental.edu.pe

2%

Fuente de Internet

3

Submitted to Universidad Continental

2%

Trabajo del estudiante

4

renati.sunedu.gob.pe

1%

Fuente de Internet

5

hdl.handle.net

1%

Fuente de Internet

6

www.dspace.uce.edu.ec

1%

Fuente de Internet

7

I. Ivailova, J. J. Solís, A. Bes-Pia, D. Aguado. "Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno en procesos de fangos activados para optimizar la aireación", Ingeniería del agua, 2020

1%

Publicación