



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ELABORACIÓN DE UN MODELO DE DIFUSOR DE AIRE PARA TRATAMIENT-
TO DE AGUAS

Autor

Julio César Rondal Balseca

Año
2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ELABORACIÓN DE UN MODELO DE DIFUSOR DE AIRE PARA
TRATAMIENTO DE AGUAS

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor Guía
MSc. Yasser Alejandro González Romero

Autor
Julio César Rondal Balseca

Año
2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Elaboración de un modelo de difusor de aire para tratamiento de aguas, a través de reuniones periódicas con el estudiante Julio César Rondal Balseca, en el semestre 2018 – 1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación."

Yasser Alejandro González Romero
Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental
C.I. 0703737627

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Elaboración de un modelo de difusor de aire para tratamiento de aguas, del estudiante Julio César Rondal Balseca, en el semestre 2018 – 1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Santiago Daniel Piedra Burgos
Master of Science in Hydro Science and Engineering
C.I. 1715384150

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Julio César Rondal Balseca

C.I. 1715980676

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente el apoyo de mi familia; mi padre y mi madre ejemplo de esfuerzo y sacrificio; mi hermana compañera de anécdotas; Ing. Alejandro González por su firme compromiso y apoyo en el proceso de titulación.

DEDICATORIA

A mi familia. Bolívar, espíritu sublime y libre, que siempre ha sido y será mi mentor de vida. Julia, mi admiración ferviente por ti me inspiro en este proyecto. Les debo todo lo que ahora soy. Gabriela, amiga incondicional. Jackie, mi artemisa, gracias te doy por el constante apoyo que me brindas en los momentos más difíciles.

RESUMEN

Dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), el proceso de aireación promueve la oxidación biológica ejecutada por microorganismos aeróbicos, degradando la materia orgánica soluble y suspendida. Este proceso se puede observar en lagunas facultativas, clarificadores secundarios y especialmente en lodos activados. La aireación se realiza por medio de difusores de aire en el fondo del tanque de aireación, estimulando la agitación y mezcla del fluido. El objetivo de este estudio es construir un modelo de difusor de aire para tratamiento de aguas. Empezando por el diseño, construcción y evaluación. Para el diseño se plantearon dos difusores tipo domo, con placas de acrílico con diferentes diámetros de orificios (2 y 4 mm) y diámetro de burbuja fina (2 mm). Luego se imprimió el difusor en 3D. En la evaluación se utilizó la norma DIN En 12555-15 2003, para determinar el coeficiente o tasa de transferencia de oxígeno, en el tanque de aireación. En el diseño experimental se estableció un nulo (manguera sin difusor). Se evaluaron los difusores y la manguera a tres alturas de agua (0.8, 1.6 y 2.4 m). Teniendo un diseño experimental con 9 tratamientos (27 unidades experimentales). Estadísticamente no existió una diferencia significativa entre los datos de la tasa de transferencia de oxígeno. Sin embargo, la placa 2 presentó diferencias máximas de tiempo en alcanzar una concentración de 8 mg/l, con respecto a la manguera. Se determinó a condiciones ambientales, datos como: la concentración de sulfito de sodio, tiempo de duración y el tiempo de saturación de agua. Se confirmó a partir de Shapiro-Wilks, que los datos de la tasa de transferencia de oxígeno presentan una distribución uniforme. Se pudo concluir que, a mayor altura de agua o profundidad del difusor, mayor tasa de transferencia de oxígeno debido a que las burbujas presentan un tiempo de residencia mayor.

Palabras clave: Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), tasa o coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$), difusor de aire.

ABSTRACT

Within a wastewater treatment plant (WWTP), the aeration process promotes the biological oxidation carried out by aerobic microorganisms, degrading the soluble and suspended organic matter. This process can be observed in facultative lagoons and especially in activated sludge processes. The aeration is carried out by means of air diffusers at the bottom of the aeration tank, stimulating the agitation and mixing of the fluid. The aim of this study is to build a model of air diffuser for waste water treatment. Starting with design, construction and evaluation of an air diffuser. For the design, two dome type diffusers were proposed, with acrylic plates with different hole diameters (2 and 4 mm) and fine bubble diameter (2 mm). Then the diffuser was printed in 3D. During the evaluation, DIN EN 12555-15 2003 was used to determine the coefficient or oxygen transfer rate in the aeration tank. In the experimental design, a null was established (hose without diffuser). The diffusers and the hose were evaluated at three water heights (0.8, 1.6 and 2.4 m). Having an experimental design with 9 treatments (27 experimental units). Statistically there was no significant difference between the oxygen transfer rate data. However, plate 2 showed maximum differences of time in reaching a concentration of 8 mg / l, unlike the hose. Environmental conditions were determined, such as: the concentration of sodium sulfite, the dilution time and the water saturation time. It was confirmed from Shapiro-Wilks that the data on the oxygen transfer rate have a uniform distribution. It could be concluded that, the longer water depth, the higher rate of oxygen transfer because of the residence bubble time.

Key words: Wastewater treatment plant (WWTP), rate or oxygen transfer coefficient ($K_L a$), air diffuser.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	1
2. Alcance	3
3. Justificación	3
4. Objetivos.....	4
4.1 Objetivo General.....	4
4.2 Objetivos Específicos	4
2. Marco Teórico.....	5
1. Aguas Residuales	5
2. Tratamientos de aguas residuales.....	6
2.1 Tratamiento secundario.....	6
3. Sistema de Aireación.....	6
3.1 Transferencia de oxígeno en agua	6
3.2 Efecto de la temperatura en la transferencia de oxígeno.....	7
3.3 Efecto de la geometría del tanque y la intensidad de mezcla	8
3.4 Tipos de Sistemas de Aireación	9
4. Oxígeno Disuelto	13
5. Modelos de Diseño	14
3. Metodología.....	18
1. Diseño.....	18
1.1 Cálculo y Dimensionamiento	18
2. Construcción.....	21

2.1	Placas de los difusores	21
2.2	Modelado	23
2.3	Impresión 3D.....	26
3.	Evaluación	30
3.1	Tanque de aireación.....	30
3.2	Armado del sistema de aireación	31
3.3	Transferencia de oxígeno en agua limpia	32
3.4	Diseño Experimental	38
4.	Resultados y Análisis	41
1.	Diseño.....	41
1.1	Cálculo y Dimensionamiento	41
2.	Construcción.....	43
2.1	Modelado	47
3.	Evaluación	51
3.1	Transferencia de oxígeno en agua	52
3.1.4	Oxígeno Disuelto.....	56
3.1.5	Determinación de la tasa de transferencia de oxígeno en agua limpia.....	62
3.2	Análisis estadístico.....	66
3.2.1	Comprobación de supuestos para aplicación de pruebas paramétricas	66
3.2.2	Pruebas no paramétricas	71
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	74
5.1	Conclusiones.....	74
5.2	Recomendaciones	76

REFERENCIAS..... 77

ANEXOS..... 89

1. Introducción

1. Antecedentes

Las aguas residuales son generadas a partir de fuentes industriales, comerciales o actividades domésticas. Estas descargas líquidas presentan características como: sólidos suspendidos y sedimentables, materia orgánica biodegradable, nutrientes, organismos patógenos, residuos de detergentes, trazas de metales, entre otros que representan efectos negativos sobre el medio (Kiefer, 2016, p. 6). Frente a ello, es necesario el tratamiento de aguas residuales previo a la descarga al medio ambiente, con ayuda de procesos químicos, físicos y biológicos que ayudan a remoción de contaminantes presentes en el agua residual (Mohammed y Elbably, 2016, p. 3).

Una planta de tratamiento (PTAR), abarca un conjunto de operaciones unitarias que facilitan el tratamiento de aguas residuales (Kordrostami, 2015, p. 14). En general una PTAR, está dividida en tres etapas: preliminar o pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. La remoción física o sedimentación se realiza en el tratamiento primario y secundario, que puede ser complementado por el tratamiento terciario el cual es un proceso avanzado para desechos especiales, para su posterior descarga en el cuerpo receptor (HDHS y Ed, 2014, p. 5).

Como primer paso, el pretratamiento consiste en remoción de sólidos de gran tamaño como papel, plástico o cualquier otro material que puede influir sobre el tratamiento siguiente (DEC, 2015, p. 22). Además, de controlar el flujo entrada como también evitar la proliferación de vectores como moscas y olores que puedan afectar la salud pública. Esta etapa incluye el uso de pantallas, cribas, rejillas que ayudan a la remoción de sólidos de granulometría gruesa (OVIVO, 2012, p. 10).

Posterior a ello el tratamiento primario tiene como objetivo reducir los sólidos sedimentables, grasas y aceites por medio de procesos de decantación, sedimentación, filtración o coagulación química. Permitiendo la separación de la fase sólida y líquida en el agua residual eliminando los sólidos orgánicos, así como cualquier material flotante (Naidoo y Olaniran, 2013, p. 256). En esta etapa, es común el uso de tanques de sedimentación, clarificadores primarios y cribas, donde se generan lodos que deberán ser recolectados y tratados (Lozano et al., 2014, p. 16).

El tratamiento secundario remueve materia orgánica del agua residual mediante el tratamiento biológico con procesos de aireación para promover la oxidación biológica realizada por microorganismos aeróbicos que degradan la materia orgánica soluble y suspendida representada como DBO₅, DQO y color (CRD, 2016, p. 9; Saunders y Visser, 2015, p. 2). Existen varias tecnologías aplicadas a este tratamiento como son: lagunas aireadas, lagunas facultativas, filtros percoladores, lechos sumergidos y principalmente lodos activados (Regional District of Nanaimo, 2017, p. 3).

Por último, el tratamiento terciario es la etapa final en una PTAR, por lo cual cumple la función de pulido de los efluentes antes de ser descargados o reutilizados (Seif y Malak, 2013, p. 3). Se basa en la remoción de compuestos inorgánicos (nitrógeno, fósforo), compuestos tóxicos, material en suspensión residual y microorganismos patógenos como coliformes fecales, *Streptococcus*, *Salmonella sp.* Y los virus entéricos que no se eliminan en tratamientos previos. Con ayuda de tecnologías como filtración por membrana, infiltración, percolación, carbón activado, desinfección (Drechsel, Qadir, y Wichelns, 2015, p. 20).

El proceso de aireación se puede realizar por medio de difusores de aire que se ubican al fondo del tanque de aireación. Estos promueven la agitación y mezcla del líquido y por lo tanto el contacto entre los microorganismos y el sustrato, lo que ayuda al tratamiento del agua residual (Viegas, 2016, p. 6).

Existen diferentes tipos de difusores en el mercado: difusores de domo, disco, membrana y panel que se utilizan en plantas de tratamiento de aguas residuales (Atia, Fahmy, Ahmed, y Dorrah, 2012, p. 285).

2. Alcance

Diseño, construcción y evaluación de dos tipos de difusores de aire en agua a escala laboratorio. Como primer punto se realizó el diseño de los difusores por medio de ecuaciones, obteniendo las dimensiones respectivas. Posteriormente, se modeló el difusor en Inventor. Una vez realizado el modelado se procedió a la etapa de construcción, donde el difusor se imprimió en 3D, tomando en cuenta los parámetros de diseño. Por último, se evaluaron los dos tipos de difusores. Obteniendo como resultado el coeficiente o tasa de transferencia de oxígeno.

3. Justificación

Los difusores aportan oxígeno entre 22 a 32% en agua limpia (Hebert, 2017, p. 9). Debido a que este tipo de sistema produce una gran área de transferencia entre el líquido y el gas ya que el diámetro de burbuja fina se encuentra en un rango de 2 a 5 mm (Fleming, 2014, p. 13) . El tiempo que la burbuja toma en llegar a la superficie es un factor importante ya que a mayor tiempo mayor es la transferencia de oxígeno. Como también, a mayor profundidad la eficiencia de transferencia se incrementa (Wiggins y Manager, 2015, p. 57).

Además, Nadayil (2015, p. 11) ha demostrado que un sistema de aireación difusa puede reducir concentraciones de contaminantes como DQO, DBO₅ y turbidez en 94.05%, 94.17%, 33.57% respectivamente. A diferentes tiempos (24, 48 y 72 horas). Confirmando que este tipo de sistema aporta con oxígeno permitiendo la degradación de materia orgánica (Skoczko, Piekutin, y Malinowski, 2015, p. 22).

Existen varias ventajas que presentan este tipo de sistema entre las cuales se encuentran (Nesc, 2013, p. 5):

- Mezcla y aeración perfecta en tanques de aireación
- Fácil de operar
- Fácil de instalar
- Adaptabilidad a diferentes tipos de aguas residuales
- Resultados eficientes a corto plazo
- Ahorro de consumo de energía

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Construir un modelo de difusor de aire para tratamiento de aguas

4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar dos difusores de aire.
- Construir dos difusores de aire.
- Evaluar oxígeno disuelto en agua.

2. Marco Teórico

1. Aguas Residuales

Las descargas sin tratamiento generadas por varias actividades ponen en riesgo regiones urbanas e industriales alrededor del mundo, principalmente en países en vías de desarrollo. Las actividades de mayor impacto son antropogénicas que en la actualidad afectan la calidad del agua y los cuerpos hídricos que atraviesan las áreas urbanas (Araujo et al., 2017, p. 6). A partir de diferentes actividades, se generan aguas residuales como: aguas residuales domésticas, aguas residuales de instituciones, aguas residuales de industrias, infiltración en alcantarillado, lixiviados, aguas residuales de tanques sépticos (Kujawa-roeleveld, 2012, p. 36). El agua residual sin un previo tratamiento presenta contaminantes orgánicos, que pueden causar enfermedades en la salud humana, los ecosistemas acuáticos y la seguridad alimentaria de comunidades cercanas a áreas afectadas (EPA, 2015, p. 15).

El agua residual está compuesta aproximadamente por 99% de agua y 1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos que pueden variar según las diferentes actividades. Algunas de estas actividades vierten aguas residuales con nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), agroquímicos procedentes de las actividades intensivas agrícolas y desechos de animales que pueden acelerar la eutrofización de los ecosistemas marinos e incrementar la contaminación de las aguas subterráneas (WWAP, 2016, p. 6). La contaminación presente en el agua se puede medir a partir de características como: Oxígeno disuelto, Turbidez, DBO₅, DQO, pH, entre otros (Wisconsin Department of Natural Resources, 2016, p. 10). Pese a esto, el manejo de las aguas de descarga generalmente recibe menor apoyo social y político a comparación del abastecimiento de agua para consumo humano (UN-WWAP, 2015, p. 21).

2. Tratamientos de aguas residuales

Se han creado plantas de tratamiento que tiene como objetivo eliminar sustancias no disueltas y disueltas presentes en el agua residual (Kollmann et al., 2017, p. 120). Una planta de tratamiento está compuesta por tratamientos primarios, secundarios y terciarios que ayudan a reducir los niveles de contaminación a niveles aceptables para la posterior descarga de las aguas residuales. Varias técnicas fisicoquímicas como la sedimentación, filtración, flotación, aireación, coagulación han sido estudiadas para el tratamiento de aguas residuales (Surti, 2016, p. 708).

2.1 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario es un proceso de tratamiento biológico aeróbico usado para eliminar materia orgánica disuelta y coloidal biodegradable. Este proceso se desarrolla en presencia de oxígeno por medio de microorganismos aeróbicos. Los mismos que se alimentan de los sólidos orgánicos presentes en el agua residual y los convierten en una masa biológica o celular que posteriormente puede ser removida (NYWEA, 2014, p. 4). Existen diferentes tipos de procesos secundarios que se pueden emplear, pero el más común es el proceso de lodos activados donde el oxígeno es proporcionado en un tanque de aireación. El fluido presente en el tanque se mezcla mediante dispositivos de aireación, que suministran oxígeno a la suspensión biológica. Los dispositivos comúnmente utilizados incluyen sopladores o blowers, difusores de aire sumergidos y aireadores mecánicos (Ugya y Ajibade, 2016, p. 6).

3. Sistema de Aireación

3.1 Transferencia de oxígeno en agua

La transferencia de oxígeno se utiliza para observar el comportamiento cinético del oxígeno, entre un líquido y gas. Siendo efectiva para el diseño de sistemas

de aireación. En relación al modelo de Lewis y Whitman (Chavez, 2014, p. 26), se puede determinar el tamaño de este sistema (ecuación 1 y 2).

(Ecuación 1)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a * (C_s - C)$$

(Ecuación 2)

$$C = (C_s - C_o) \exp(-K_L a * t)$$

Donde:

C = Concentración de oxígeno disuelto (mg/l)

C_s = Concentración de equilibrio de oxígeno disuelto (mg/l)

C_o = Concentración de oxígeno inicial (mg/l)

K_La = Coeficiente de transferencia de oxígeno (/h)

t = Tiempo (h)

El oxígeno puede suministrarse mediante burbujas de aire o de oxígeno puro introducidas en el agua, por medio de varios dispositivos de aireación, para crear interfaces de gas-líquido adicionales que ayudan el tratamiento del agua (Al-Ahmady, 2012, p. 2). Las burbujas de aire o de oxígeno se liberan a profundidad produciendo una burbuja libre que viaja desde el fondo del tanque hacia la superficie del agua. A medida que la pluma de aire avanza arrastra agua, causando la circulación vertical y la extensión lateral de la misma (Kutty et al., 2012, p. 416). El coeficiente de transferencia de masa de oxígeno en agua se determina mediante $K_L a$ y se considera como un indicador de la tasa de transferencia de oxígeno.

3.2 Efecto de la temperatura en la transferencia de oxígeno

La temperatura del agua tiene influencia sobre el proceso de aireación, ya que a elevadas temperaturas resulta en una menor solubilidad de oxígeno que

conlleva a una menor fuerza motriz, por lo tanto, a una menor tasa de transferencia de oxígeno (Vogelaar, Klapwijk, Van Lier, y Rulkens, 2000, p. 3). Sin embargo, se presenta una relación directa, entre la temperatura y la velocidad de difusión de oxígeno. Mientras que la viscosidad del líquido y la tensión superficial disminuyen. Estos efectos, dan como resultado que el valor de $K_L a$ aumente y que pueda compensar la menor fuerza motriz (Henkel, 2012, p. 31). El factor teta para difusores de aireación es de 1.024 (Mamani, 2015).

(Ecuación 3)

$$K_L a_{(T)} = K_L a_{(20^\circ\text{C})} \theta^{T-20}$$

Donde:

$K_L a_{(T)}$ = Coeficiente de transferencia de oxígeno a temperatura óptima

θ = Factor de corrección de la temperatura

T = Temperatura del agua (°C)

3.3 Efecto de la geometría del tanque y la intensidad de mezcla

La eficiencia de transferencia de oxígeno depende de varios factores, entre ellos la geometría del tanque, que es utilizado para contener el agua mientras se mezcla con el gas. La aireación se realiza en tanques de forma cilíndrica, pero la geometría de estos tanques cilíndricos puede variar dependiendo del tipo de agua residual (Wason, Purhoit, Dehon, y Magee, 2012, p. 12). También se utilizan formas cuadradas o rectangulares de manera limitada y con objetivos especiales. El estudio de Rao, Kumar, y Patel (2007, p. 28) ha demostrado que el proceso de aireación en tanques cuadrados es efectivo con duraciones cortas, presentando altos coeficientes de transferencia de oxígeno. Mientras que, desde el punto de vista del requerimiento de potencia, los tanques de aireación circular presentan mayor eficiencia energética, por lo cual se presentan como una de las mejores opciones económicas (Nadayil et al., 2015, p. 13).

3.4 Tipos de Sistemas de Aireación

Los sistemas de aireación se dividen en dos categorías principales: aireación mecánica y aireación difusa. Dentro de las dos categorías existen diferentes diseños y características de operación (UADC, 2015, p. 17). Cada categoría de aireador tiene ventajas y desventajas como también factores que influyen en la selección del aireador como son: consumo de energía, simplicidad de operación, tiempo de vida, costo del equipo, requerimiento de mantenimiento, compatibilidad con equipos y tanques existentes, condiciones meteorológicas, requerimiento y disponibilidad de espacio físico, experiencia de operación (Jenkins, 2014, p. 16).

3.4.1 Sistemas de aire difuso

En este tipo de sistemas, el aire es proporcionado desde el fondo del tanque de aireación en forma de burbujas de aire. Dependiendo del tamaño de burbuja, el sistema se clasifica en sistema difusor de aire de burbuja fina o burbuja gruesa (Alkhalidi, Al Ba'ba'a, y Amano, 2016, p. 3). La difusión de burbuja fina es una forma de aireación donde el aire es introducido en el agua residual, en forma de pequeñas burbujas aportando con oxígeno al líquido, por medio de dispositivos de aireación (Mendez y Rodriguez, 2014, p. 4).

3.4.1.1 Difusores

Los difusores de aire son dispositivos comúnmente utilizados para transferir oxígeno en el tratamiento de aguas residuales, ya que incrementan la concentración de oxígeno disuelto y promueven la circulación de agua. El aporte de oxígeno se realiza mediante la creación de burbujas que promueven la mezcla, la distribución del oxígeno disuelto y el procesamiento microbiano de materia suelta y en suspensión. Es necesario tener en cuenta el control del tamaño y la distribución de las burbujas ya que es esencial para aumentar la eficiencia del proceso de aireación (Noble et al., 2016, p. 7). Las burbujas de

aire gruesas generan una mejor mezcla dentro del tanque de tratamiento de aguas residuales. Mientras que las burbujas finas generan una mayor área de contacto entre el agua y la burbuja. Como también, presentan un tiempo de residencia en el agua mayor a comparación de la burbuja gruesa, lo cual conduce a mayor transferencia de oxígeno (Miletta, Amano, Alkhalidi, y Li, 2012, p. 2). El tamaño de burbuja es importante ya que el sistema de aireación consume en promedio del 50 a 70% de la energía de una PTAR. Por lo cual, es conveniente optimizar el consumo de energía aumentando la eficiencia de transferencia de oxígeno de los difusores de aire (PHED, 2014, p. 12).

a) Tipos de difusores

Existen tres categorías de difusores: Difusores porosos o poro fino, Difusores no porosos y por último sopladores o blowers (Chemtronics, 2013, p. 2). Como se pueden observar a continuación en la tabla 1.

Tabla 1

Tipos de difusores con eficiencias de transferencia de oxígeno y la descripción.

Tipo de difusor	Eficiencia de transferencia de oxígeno	Descripción
Poroso		
Domo	Alta	Difusor de cerámica en forma de domo montado sobre una línea de distribución de aire en el suelo del tanque de aireación.
Disco	Alta	Disco de cerámica montado sobre una línea de distribución de aire en el suelo del tanque de aireación.
Membrana	Alta	Membrana porosa y flexible establecida en un disco que a la

		vez se encuentra montado sobre la línea de distribución de aire.
Panel	Muy Alta	Panel rectangular con una membrana perforada flexible de plástico.
No Porosos		
Orificio	Bajo	Dispositivo normalmente construido de plástico moldeado y montado sobre una línea de distribución de aire.
Tubo ranurado	Bajo	Tubo de acero inoxidable con perforaciones y ranuras, montado en el fondo del tanque.
Tubo estático	Bajo	Tubo colocado de manera vertical montado en el fondo del tanque de aireación y funciona como una bomba de aire-elevación.
Sopladores o blowers		

Adaptado de Kumar, 2012, p. 14.

i. Difusores Porosos

Los difusores porosos o de burbuja fina están constituidos por varios materiales y se han fabricado en forma de cúpula, placa tubo y disco, sin embargo, el dispositivo que se utiliza con mayor frecuencia en la actualidad es el difusor en forma de disco (Magnus Arnell, 2016, p. 44).

Los difusores de disco presentan características geométricas únicas como su diámetro que puede variar de 3.54 cm hasta los 7.87 cm. Presentando, además

un grosor en un rango de 1.9 a 19 cm. Los difusores de domo comúnmente circulares construidos por compuestos de aluminio, presentan diámetros en un rango de 18 cm a 3.8 cm (SANITAIRE, 2013, p. 17). Estos se encuentran montados sobre placas que cumplen con una función de base y se encuentran conectados a tuberías de aire ,al fondo del tanque de aireación (Amano, Alkhalidi, Bryar, y Alwayel, 2012, p. 3). Como también, este tipo de difusores pueden estar constituidos por materiales cerámicos porosos, que incrementar la eficiencia para el tratamiento de aguas. Pero este tipo de materiales trae consigo problemas en la operación ya que se taponan rápidamente. Por lo cual es necesario un alto flujo de aire, que pueda retener el polvo, oxido y otros factores que puedan alterar su funcionamiento (Roman, 2015, p. 316).

Los materiales de membrana incluyen propileno dímero, EPDM sus siglas en inglés, el cual es el más utilizado en el proceso de tratamiento de aguas, así como también otros materiales como uretano y silicona (Larson, 2012, p. 12). Este tipo de material presentan ciertas características como son: resistencia a altas temperatura, altos costos operativos y posible obstrucción de los orificios (Mulinix, 2014, p. 22).

ii. Difusores No Porosos

Existe gran variedad de difusores no porosos en la actualidad. Estos producen burbujas más grandes que los difusores porosos, por lo cual tienen como resultado una menor eficiencia de transferencia de oxígeno (Syazwan, 2015, p. 7). La aplicación de este tipo de difusores se realiza en varios proceso de tratamientos de aguas residuales entre ellos tenemos: tanques de aireación, tanques de equalización y digestores aeróbicos (Liu, Li, y Zhang, 2012, p. 16).

En el tubo estático, el cual pertenece a un este grupo de difusores no porosos, puede variar su longitud de 0.6 a 1.26 m (Sekizawa et al., 2016, p. 54). Tomando en cuenta que internamente los tubos están equipados por placas de deflexión colocadas aleatoriamente para incrementar el contacto del aire con el

agua residual. La distribución de los tubos estáticos se realiza en un patrón de cobertura en el suelo en forma de rejilla (Dalida, 2015, p. 2).

iii. Sopladores o Blowers

En una PTAR, los sopladores deben suministrar una amplia gama de flujos de aire con un rango de presión estrecho, bajo condiciones ambientales que varían (Aerzen, 2012, p. 8). Tomando en cuenta que una desventaja notoria en este tipo de sistema de aireación es que un solo soplador o blower puede satisfacer únicamente un conjunto particular de condiciones de operación de manera eficiente (Kumar, 2012, p. 19). Por lo cual en una PTAR, se debe considerar disposiciones técnicas en el diseño del sistema de sopladores, ya que es necesario satisfacer una variada gama de flujos de aire y presiones (Abergeldie, 2014, p. 9).

4. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (OD), es uno de los indicadores más importantes de calidad de agua y la capacidad de soporte de vida en el agua. (Alliance, 2014, p. 5). El OD puede ingresar a cuerpos de agua naturales típicamente en la superficie donde sucede un intercambio entre la atmósfera y el agua. Como también se puede distribuir y aportar oxígeno mediante sistemas de oxígeno que generan burbujas de gas de diferentes tamaños (Dramm, 2015, p. 3).

La disponibilidad de oxígeno durante un tiempo está influenciada por sustancias químicas presentes en el agua, procesos biológicos, presión atmosférica, temperatura y salinidad (Li, Wei, Chen, Li, y Zhang, 2015, p. 4). Por ello es complicado monitorear el contenido de OD con todos los factores externos, sin embargo, el método de medición debe tomar en cuenta factores de compensación. El equipo de medición determina la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto presente en el agua residual (Lewis, 2012, p. 13).

5. Modelos de Diseño

Existen estudios relacionados con el diseño de difusores de aire. Como por ejemplo Hanotu, Bandulasena, y Zimmerman, (2017, p. 368), menciona que hay dos parámetros de diseño importantes como son: el volumen de la cámara y el diámetro del orificio de entrada. Debido a que el diámetro y la altura de la cámara afectan a la caída de presión dentro de la cámara y por consiguiente a la distribución del fluido. En este diseño se distribuyen los orificios en forma de alabes para mejorar la distribución del aire. Presenta un orificio de entrada de 5 mm de diámetro. Las dimensiones de la cámara son las siguientes: 50 mm de diámetro, 15 mm de altura, 6.5 mm de distancia entre orificios, 15 mm de distancia entre el centro del difusor y el ultimo orificio. La configuración de la cámara consta de alabes radiales que miden ~ 8 mm de longitud, ~ 3.5 mm de ancho, 4 mm de profundidad. Por último, el diámetro de los orificios es de 2 mm (figura 1).

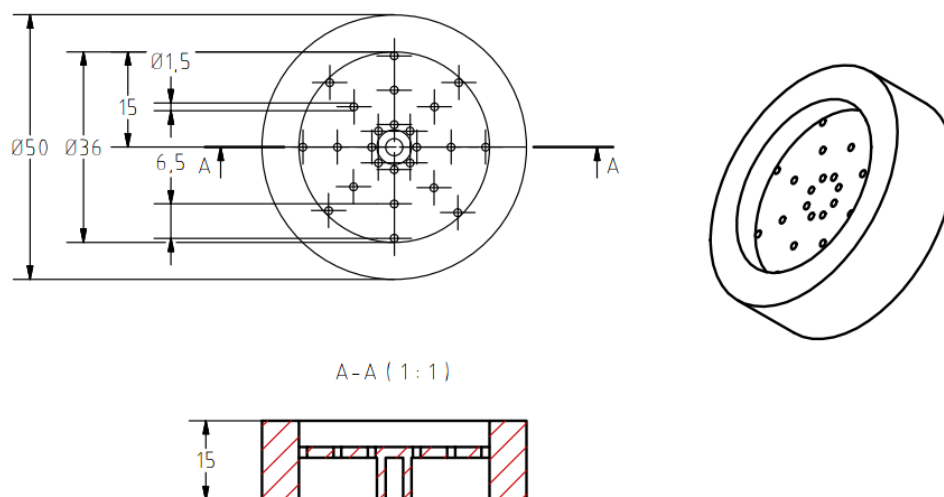


Figura 1. Diseño de difusor de aire 1. Se detallan las dimensiones del difusor de aire en milímetros.

Adaptado de Hanotu et al., 2017, p. 368

Por otra parte, Kulkarni, Badgandi, y Joshi, (2012, p. 1614) presenta un diseño tomando en cuenta la distribución del aire a través de los orificios del difusor.

Que dependen de la energía cinética del gas de entrada (presión y cinética), las pérdidas a lo largo de la tubería que alimenta al difusor y la geometría de los orificios (tamaño, número, ubicación, etc.). El diseño presenta una circunferencia en la parte superior del difusor, donde se encuentran ubicados los orificios. El diámetro de esta circunferencia varía de 80 a 100 cm. Los orificios del difusor presentan diámetros que varían de 2 mm, 4 mm y 6 mm de diámetro. Con un total de 37 orificios ubicados en la parte circular (figura 2).

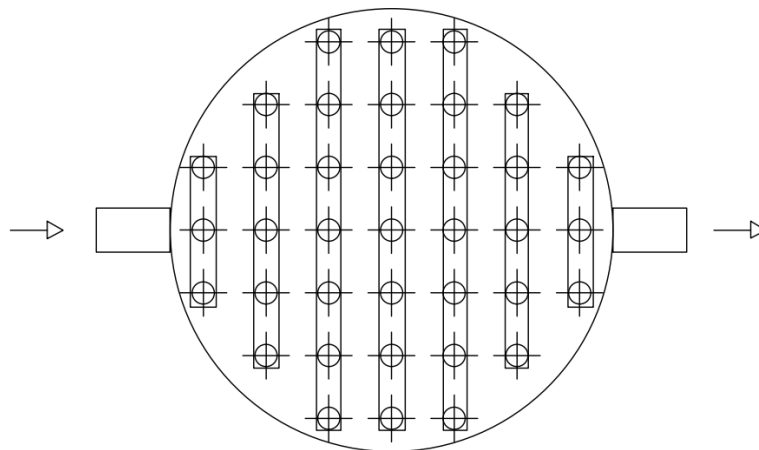


Figura 2. Diseño del difusor de aire 2. Se muestra la geometría del difusor de aire, compuesto por una línea que alimenta a los orificios de salida.

Adaptado de Kulkarni et al., 2012, p. 1614

Como también, un estudio realizado por Kemoun (2013, p. 1199) hace hincapié en el efecto del diseño del difusor de aire (densidad de orificios) y de la forma de difusor. En este estudio se presentan dos diseños. El primer diseño de difusor presenta 15.2 cm de altura y 19 cm de diámetro. Con un total de 42 orificios que presentan un diámetro de 6.36 mm cada uno de ellos. En la parte inferior derecha se dejó un 10% del área total de la sección transversal del difusor libre. Este diseño se puede observar en la figura 3. El segundo diseño propuesto difiere en la forma del difusor ya que presenta distribuciones laterales donde se encuentran los orificios. El difusor presenta 19.05 cm de diámetro con una línea principal con un diámetro de 9.5 mm y 10 distribuciones laterales separadas cada 3 cm y con una longitud de 6.7 cm. Los orificios se

encuentran distribuidos en las distribuciones laterales cada 3.8 cm. Presentando un total de 40 orificios de 3.2 mm de diámetro (figura 4).

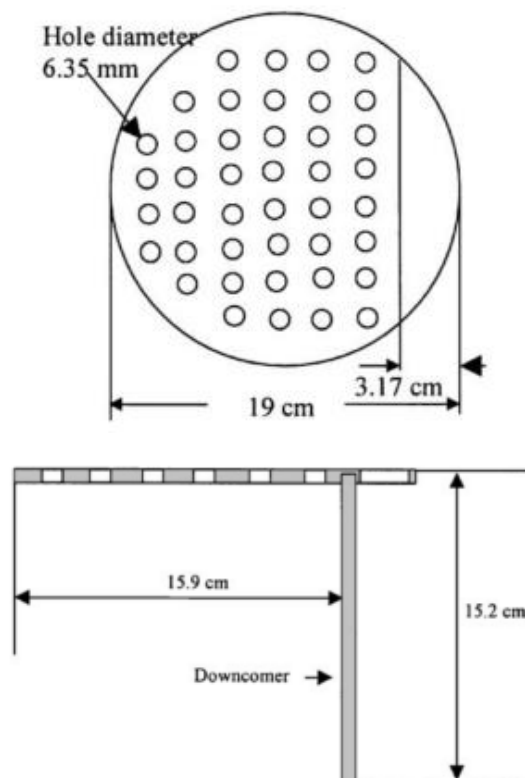


Figura 3. Diseño del difusor de aire 3. Se describe el diseño del difusor de aire y sus dimensiones.

Adaptado de Kemoun et al., 2013, p. 1199

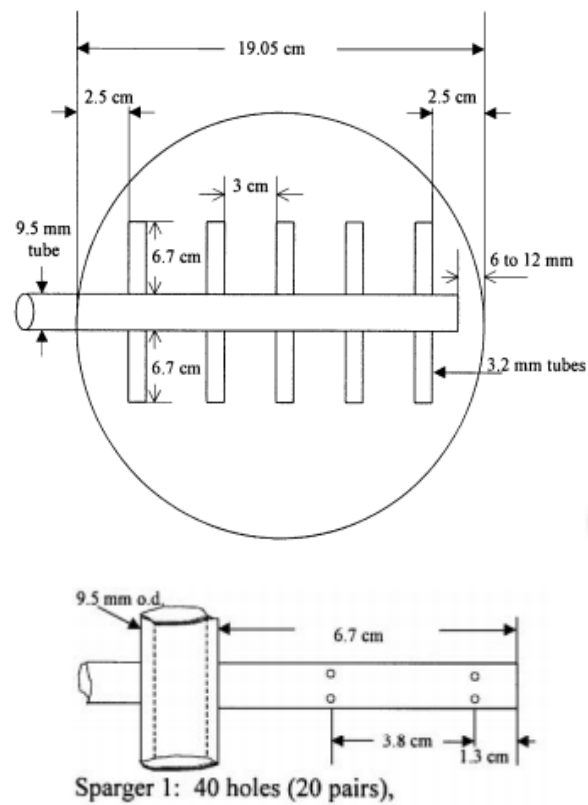


Figura 4. Diseño del difusor de aire 4. Diseño del difusor de aire con una línea de distribución principal y 10 secundarias que abastecen a los orificios de salida dispuestos a una distancia establecida.

Adaptado de Kemoun et al., 2013, p. 1199

3. Metodología

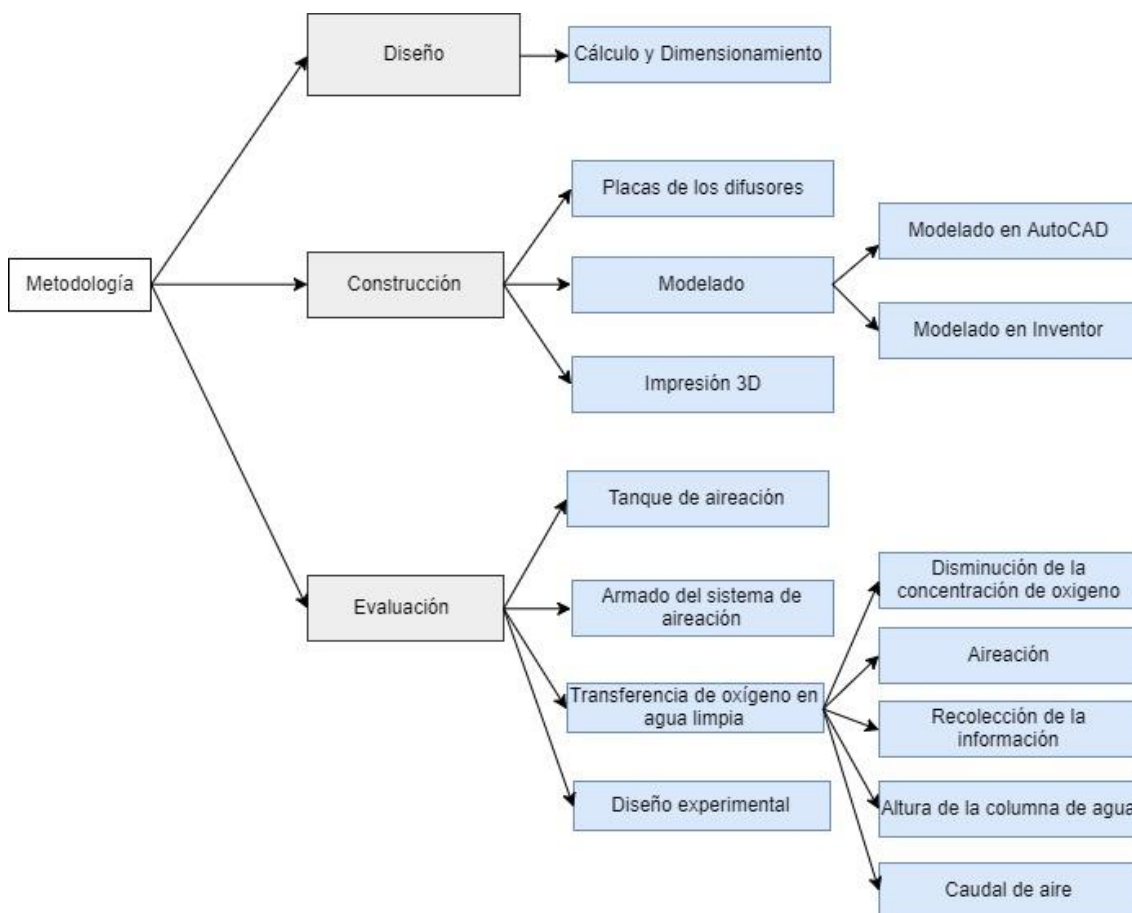


Figura 5. Metodología. Etapas de la metodología a ser desarrolladas.

1. Diseño

1.1 Cálculo y Dimensionamiento

En base a modelos previos (Hanotu et al., 2017, p. 368; Kemoun et al., 2013, p. 1199; Kulkarni et al., 2012, p. 1614), se tomaron en cuenta varios parámetros necesarios para el diseño del difusor de aire. Entre ellos, la presión absoluta presente en la columna de agua (ecuación 5), que llega a influir sobre la temperatura adiabática (ecuación 6) y por ende en la temperatura y densidad del gas (ecuación 7 y 8). A partir de las variables de diseño se llegó a

determinar el diámetro del orificio (ecuación 9), frecuencia de formación de burbujas (ecuación 10) y número de orificios en cada una de las placas de los difusores (ecuación 11).

(Ecuación 4)

$$P_{H2O} = \rho * g * h$$

Donde:

P_{H2O} = Presión hidrostática del agua (Pa)

ρ = Densidad del agua (1000 kg/m³)

g = Gravedad (9.8 m/s)

h = Altura de la columna de agua (2.4 m)

(Ecuación 5)

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{H2O}$$

Donde:

P_{abs} = Presión absoluta (psi)

P_{atm} = Presión atmosférica (10.51 psi)

P_{H2O} = Presión hidrostática del agua (psi)

(Ecuación 6)

$$\Delta T_{ad} = \frac{T_{amb}}{n} \left[\left(\frac{P_{abs}}{P_{atm}} \right)^{0.283} - 1 \right]$$

Donde:

ΔT_{ad} = Temperatura adiabática (°C)

T_{amb} = Temperatura promedio del ambiente (°K)

n = Eficiencia del compresor de aire (0.8)

P_{abs} = Presión absoluta (psi)

P_{atm} = Presión atmosférica (psi)

(Ecuación 7)

$$T_g = T_{amb} + \Delta T_{ad}$$

Donde:

 T_g = Temperatura salida del gas (°C) T_{amb} = Temperatura promedio del ambiente (°C) ΔT_{ad} = Temperatura adiabática (°C)

(Ecuación 8)

$$\rho_g = \frac{1.293}{1 + 0.00367 * T_g} \left(\frac{H}{76} \right)$$

Donde:

 ρ_g = Densidad del gas (Kg/m³) H = Presión absoluta (cm Hg) T_g = Temperatura del gas (°C)

(Ecuación 9)

$$d_o = \frac{(d_b)^3 * g * (\rho_l - \rho_g)}{6 * \sigma}$$

Donde:

 d_o = Diámetro del orificio (m) d_b = Diámetro de la burbuja (m) g = Gravedad (9.8 m/s) ρ_l = Densidad del agua (1000 kg/m³) ρ_g = Densidad del gas (kg/m³) σ = Tensión superficial (N/m)

(Ecuación 10)

$$f = \frac{Q}{\frac{\pi * (d_b)^3}{6}}$$

Donde:

f = Frecuencia de formación de burbuja (s^{-1})

Q = Caudal de aire (m^3/s)

d_b = Diámetro de la burbuja (m)

(Ecuación 11)

$$N = \left(\frac{0.7 * Dt}{d_0} \right)$$

Donde:

N = Número de orificios

Dt = Diámetro tubería (mm)

d_0 = Diámetro del orificio (mm)

2. Construcción

Una vez realizado el cálculo para el dimensionamiento del difusor. Se recolectó toda información necesaria para dar paso a la etapa de construcción. Empezando por las placas de los difusores, modelado y finalmente la impresión en 3D. Se construyó una sola cámara del difusor. Y dos placas con diferentes parámetros como son: número y dimensiones de los orificios presentes en estas.

2.1 Placas de los difusores

En total se construyeron dos placas de acrílico. Tomando en cuenta el diámetro total de la circunferencia, número y diámetro de los orificios.

Se cortó a laser el acrílico de acuerdo con los parámetros previamente mencionados. Se comprobó que tengan las mediciones establecidas. Con ayuda de patrones de alambre y luego con galgas de medición para radio de alambre circular.

Como primer paso se midió el radio de los orificios con ayuda de los patrones. Se introdujeron éstos en los orificios y se procuró que encaje, ya que tienen medidas estandarizadas (figura 6). Luego, se insertaron éstos en la galga (figura 7), obteniendo el radio de los orificios. Finalmente se transformaron los valores de radio a diámetro, para verificar el corte a laser realizado previamente en las placas.



Figura 6. Patrones de alambre. Cumple la función de medir el radio de los orificios en las placas.



Figura 7. Galga de medición para radio de alambre circular.

2.2 Modelado

Para la etapa de modelado de los difusores, se tomó en cuenta el diámetro y número de orificios presentes en las placas. Como primer paso se modeló en AutoCAD (base para el modelado) y finalmente en Inventor.

2.2.1 Modelado en AutoCAD

Se realizaron dos modelados en AutoCAD, para el diseño del difusor de aire. Cada uno de ellos presentó un cambio en el diseño, en base al funcionamiento del difusor y adaptabilidad en el sistema de aireación.

2.2.1.1 Primer Modelado

Esta etapa se orientó primordialmente al diseño estructural de la cámara del difusor. Tomando en cuenta los requerimientos necesarios para la implementación del mismo. Como también, piezas complementarias como son: entrada de aire y placa.

Se modeló una placa de 90 mm de diámetro y 4 mm de espesor (figura 8). Que se encontró en la parte superior interna de la cámara.



Figura 8. Acotamiento y modelado de la placa. Vista lateral. Representación de dimensiones en milímetros. Primer modelado en AutoCAD de la placa.

Como se puede observar la cámara del difusor presenta 30 mm de altura. Con una altura total de 40 mm. Y una diferencia de 10 mm de altura como base y soporte para su posterior funcionamiento. Para el ingreso del aire se estableció una entrada al costado de la cámara con 12.7 mm de diámetro externo, 8.7 mm

de diámetro interno y 35 mm de largo (figura 9 y 10). Tomando en cuenta el diámetro de las conexiones de aire 12 mm.

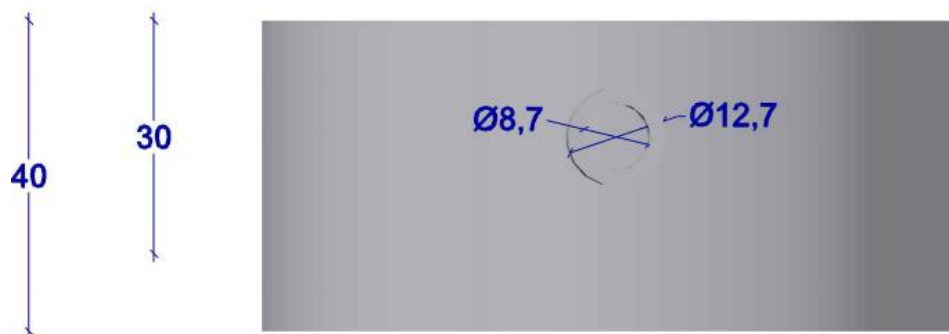


Figura 9. Acotamiento cámara del difusor. Vista lateral. Representación de dimensiones en milímetros. Primer modelado en AutoCAD de la cámara del difusor de aire.

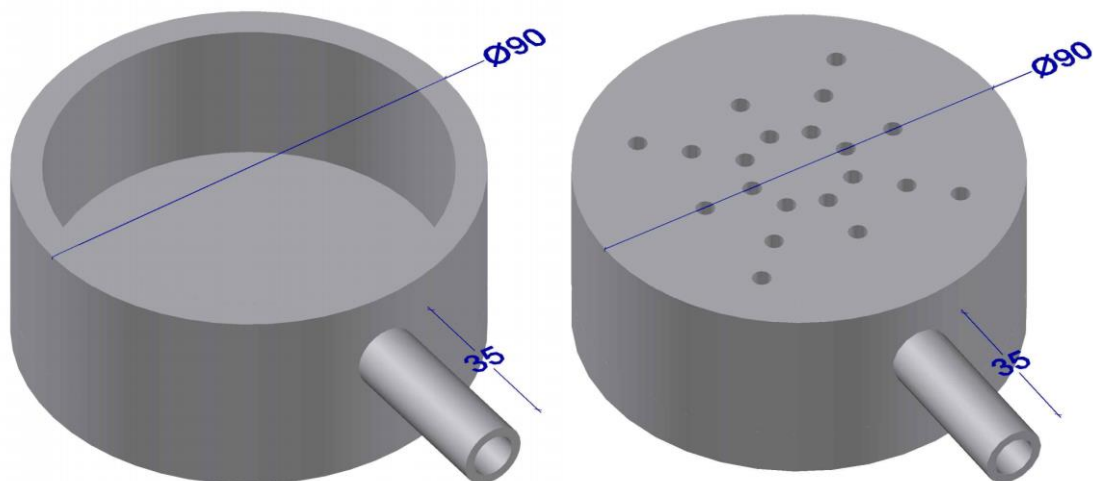


Figura 10. Modelado del difusor. Vista superior. Representación de dimensiones en milímetros. Primer modelado en AutoCAD del difusor.

2.2.1.2 Segundo Modelado

Fue necesario un segundo modelado, para cubrir características no existentes en el modelado previo. Se realizaron modificaciones para mantener hermética

la cámara de aire y un mecanismo de anclaje del difusor con respecto a la base de soporte del mismo. Las dimensiones de la placa se mantuvieron iguales que en el primer modelado; 4 mm de espesor y 90 mm de diámetro (figura 11).



Figura 11. Acotamiento y modelado de la placa. Vista lateral. Representación de dimensiones en milímetros. Segundo modelado en AutoCAD de la placa.

La cámara presentó 30 mm de altura y una altura total del difusor de 40 mm. Existió una diferencia en la cámara del difusor, a comparación del modelado anterior. Se modeló una base en la parte inferior que presentó 120 mm de diámetro (figura 12).

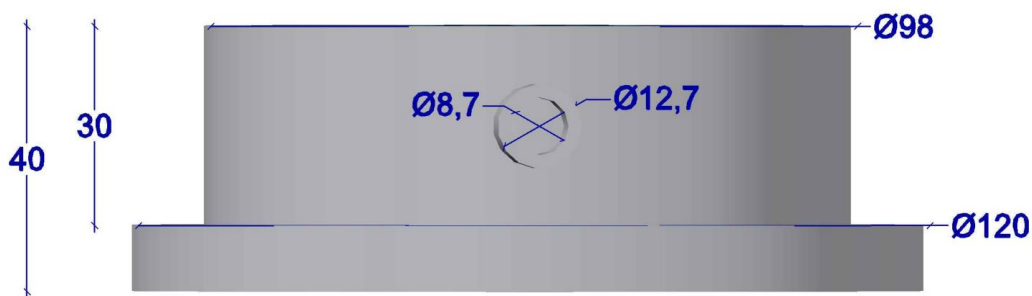


Figura 12. Acotamiento cámara del difusor. Vista lateral. Representación de dimensiones en milímetros. Segundo modelado en AutoCAD de la cámara del difusor de aire.

Se modeló una estructura de soporte para el difusor con 11 mm de ancho y 10 mm de alto. Además, se ubicaron 4 orificios de 5 mm de diámetro, que mantendrán al difusor adherido a la base de soporte de PVC (figura 13).

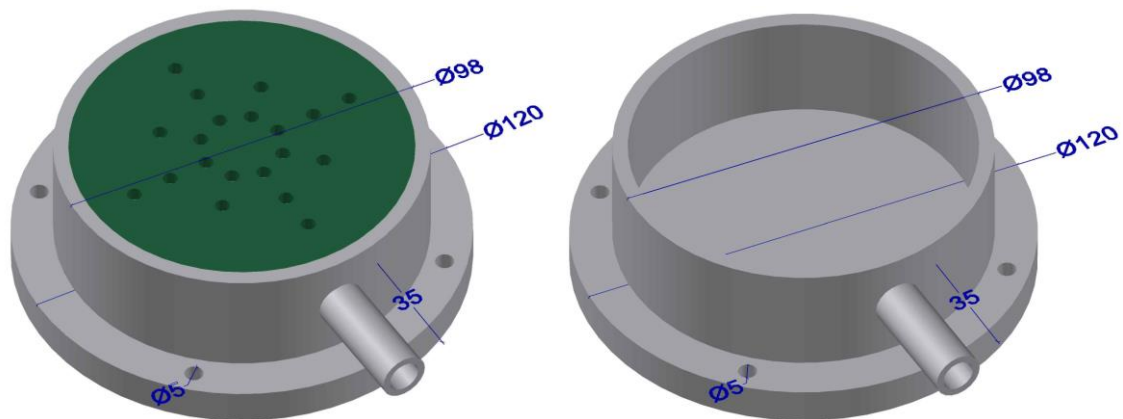


Figura 13. Modelado del difusor con la placa. Vista superior. Representación de dimensiones en milímetros. Segundo modelado en AutoCAD del difusor.

2.2.2 Modelado en Inventor

Se diseñó únicamente un difusor en Inventor con las siguientes estructuras: entrada de aire comprimido y cámara del difusor, en base al diseño de AutoCAD previamente desarrollado.

La entrada de aire se ubicó en la parte inferior del difusor. Con dimensiones menores a las conexiones de aire. La cámara presentó una forma circular con una base en la parte inferior. Cabe mencionar que las paredes del difusor; la unión entre la cámara y la entrada de aire se modelaron, de forma convexa. Además, se diseñó para que la cámara sea simétrica en cuanto a la base y la parte superior. Para este modelado, las placas no formaron parte de la cámara. Pese a ello, se diseñaron orificios para que sirvan como acople entre estas dos partes.

2.3 Impresión 3D

Como primer paso se adquirió filamento PLA (ácido poliláctico), que es la materia prima para poder construir el objeto requerido. Luego, se imprimió en una impresora Rostock máx. V3 tipo delta.



Figura 14. Filamento PLA. Materia prima para la impresión.

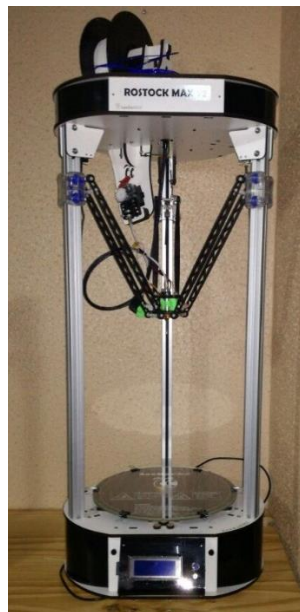


Figura 15. Impresora 3D Rostock máx. v3.

Posterior a ello, se ingresó el modelo de Inventor en la computadora por medio de un driver que vincula a este equipo con la impresora. Y se procedió a imprimir el difusor de aire. La impresión inició por la parte superior de la cámara del difusor ya que presenta mayor área que la entrada de aire. Brindando una base estructural para la impresora (figura 16). Siguiendo el proceso, se imprimieron las paredes de la cámara hasta llegar a la base y por último a la

entrada de aire (figura 17-20). Una vez culminada la impresión se retiraron las paredes internas de la cámara que sirvieron como soporte.

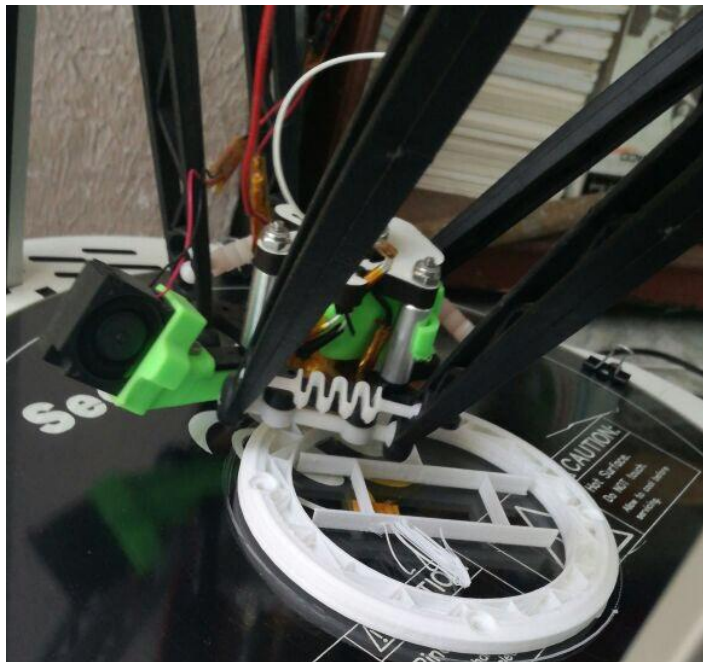


Figura 16. Impresión del difusor de aire. Inicio de la impresión por la parte superior del difusor.

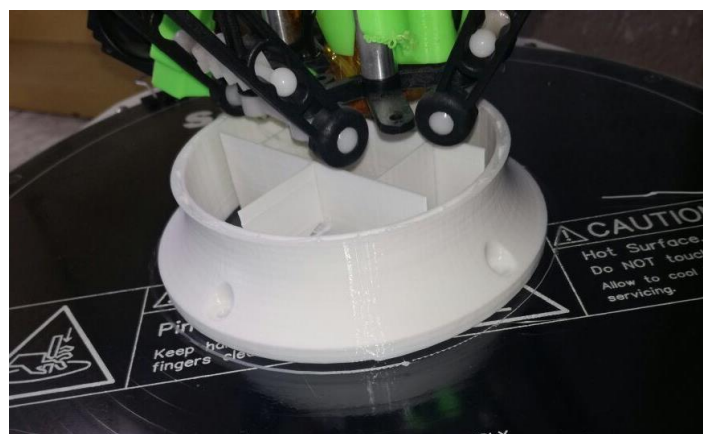


Figura 17. Impresión del difusor de aire. Impresión de las paredes del difusor.

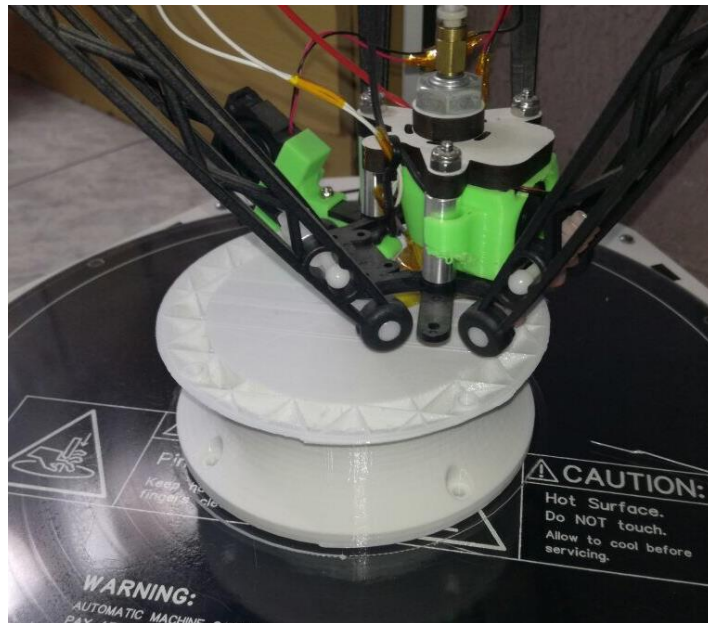


Figura 18. Impresión del difusor de aire. Impresión de la parte inferior. Sellado de la cámara del difusor.



Figura 19. Impresión del difusor de aire. Impresión de la entrada de aire.

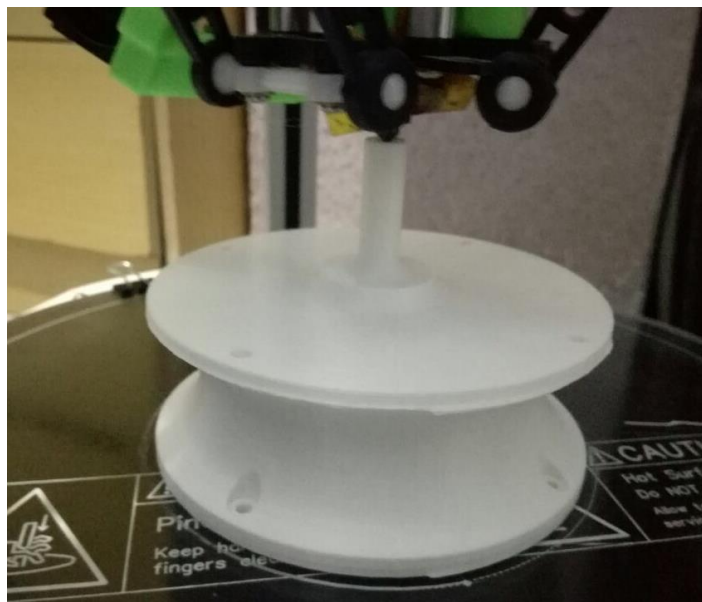


Figura 20. Impresión del difusor de aire. Final de la impresión por la parte inferior del difusor.

3. Evaluación

3.1 Tanque de aireación

Se optó por un tanque de PVC de geometría circular (Nadayil et al., 2015, p. 13). Con 3 m de altura y 20 cm de diámetro. Se instalaron todas las conexiones requeridas como son: línea de aire, base de soporte para el difusor, purga, medidor de columna de agua y ventanas.

Tabla 2

Dimensiones del tanque de aireación.

Dimensiones del tanque de aireación	
Altura	3 m
Diámetro	20 cm

El ingreso de aire hacia el difusor se realizó por medio de una manguera o línea de aire. Dentro de la tubería de 20 cm de diámetro, se conectó una

tubería de ½ pulgada de PVC. Por la cual ingresó la manguera hasta el difusor que se encontraba al fondo de la columna. Se instaló una base de PVC adherida al fondo de la columna, que cumplió la función de soporte para el difusor. Se instaló además una purga para descargar el agua utilizada.

Debido a que se requirió observar la altura del agua y su comportamiento, se instaló un medidor fuera de la columna de mayor diámetro, cumplimiento el principio de vasos comunicantes. Como también, 3 ventanas de acrílico transparente a 20 cm, 1.5 m y a 2 m de altura.

3.2 Armado del sistema de aireación

El sistema de conducción de aire inició directamente desde una línea proveniente del compresor que al final presentó una llave con válvula de ½ pulgada. Luego se conectó a una línea o manguera de aire, que transportó el fluido hasta el flujómetro de marca “New Flow” con un rango de 2 a 20 m^3/h , el cual permite regular el caudal de ingreso por medio de un mecanismo de cierre giratorio. El cuerpo del flujómetro está constituido por acrílico y en el centro se encuentra un flotador que indica el caudal que circula (figura 21).

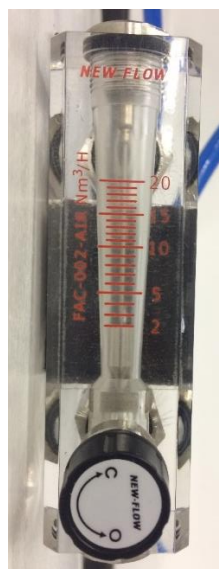


Figura 21. Flujómetro. Permite regular el caudal de aire de ingreso.

Posterior a ello, el flujómetro se conectó nuevamente a una manguera y por último al difusor, que se encontró dentro del tanque de aireación. Todas las conexiones fueron de ½ pulgada, como son: racores y manguera de aire. De igual manera los racores presentaron una entrada para manguera y otra para tubería de ½ pulgada a excepción del ultimo racor, el cual tiene dos entradas para línea de aire.

Sistema de aireación

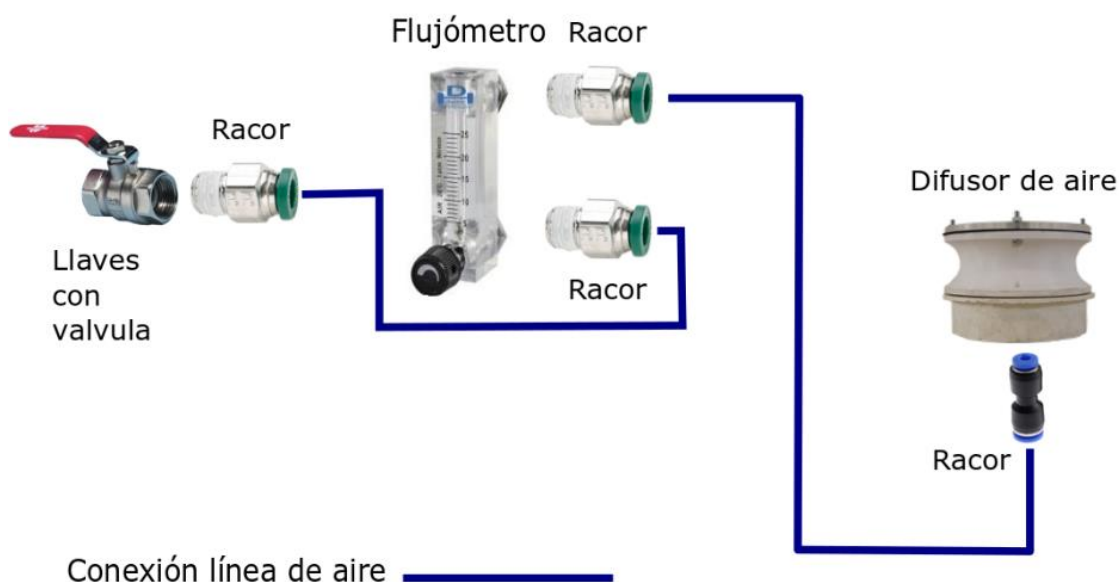


Figura 22. Sistema de aireación. Diagrama del sistema de aireación.

3.3 Transferencia de oxígeno en agua limpia

Para analizar la transferencia de oxígeno se utilizó la norma DIN EN 12555-15, 2003. La cual es una norma europea estandarizada que especifica las mediciones a realizarse para obtener la eficiencia y tasa de transferencia de oxígeno, para estados no estacionarios en sistemas de aireación en tanques de lodos activados cuando se llenan con agua limpia. Cabe recalcar que las mediciones se realizaron en agua limpia y posteriormente se determinó el coeficiente de transferencia de oxígeno. Mediante $K_L a$ se obtiene la tasa de transferencia de oxígeno (ecuación 12).

(Ecuación 12)

$$K_L a = 2.303 \frac{\log(C_{t1} - C_{t2})}{t_2 - t_1} (3600)$$

Donde:

C_{t1} = Concentración de oxígeno disuelto inicial (mg/l)

C_{t2} = Concentración inicial de oxígeno final (mg/l)

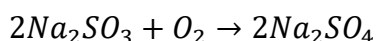
t_1 = Tiempo Inicial (s)

t_2 = Tiempo final (s)

KLa = Tasa de transferencia de oxígeno (/h)

La prueba de absorción de transferencia de oxígeno es la más común, mediante la cual la concentración de oxígeno disuelto presente en el agua disminuye por la adición de sulfito sódico. Ya que es un agente reductor que remueve el oxígeno de una solución, produciendo sulfato de sodio (ecuación 13). El producto de la reacción no afecta a la medición de la transferencia de oxígeno (Moradian, Delijani, y Koshky, 2013, p. 144).

(Ecuación 13)



Luego el líquido contenido en el tanque es aireado aproximadamente hasta la saturación de oxígeno en un lapso establecido. Durante la etapa de aireación se monitorizó y recolectó información para posteriormente determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno.

3.3.1 Disminución de la concentración de oxígeno

Para disminuir la concentración de oxígeno disuelto en agua, la norma establece que es necesario agregar 8 ppm de sulfito de sodio por cada 1 ppm de oxígeno, en forma disuelta o en polvo y esperar de 10 a 15 minutos para que la concentración sea 0 mg/l.

Como primer paso, se procedió a realizar la medición de la concentración inicial del agua limpia. Posteriormente, se calculó la relación másica entre el sulfito sódico y la concentración inicial. Para luego determinar la cantidad del reactivo a ser añadido en el tanque de aireación. Una vez añadido el sulfito de sodio, se esperó en un rango de 10 a 15 min para realizar la lectura de la concentración final, asegurándose de que este se disolviese en su totalidad.

3.3.2 Aireación

Se realizaron experimentaciones para determinar el tiempo de saturación en el agua. Se llenó la columna de agua hasta llegar a una altura de 2.4 m. Luego se aportó aire proveniente del compresor hacia el difusor que se encontraba dentro de la columna de agua. Determinando así el tiempo aproximado de saturación de oxígeno del agua. También, se aplicaron pruebas de fugas en el difusor posterior a la impresión.

Se realizó una prueba de fugas en el difusor, con la placa que presentó orificios de 2 mm de diámetro, en un tanque de vidrio lleno de agua. En primer lugar, se conectó la línea de aire al difusor permitiendo el ingreso de 2.5 m³/h. Por último, se verificó que no salieran burbujas del interior la estructura del equipo de aireación.

3.3.3 Recolección de la Información

Durante el periodo de aireación fue necesario recolectar información para posteriormente determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno. Para ello, la norma establece que se debe recolectar al menos 30 datos en intervalos de tiempo iguales.

Esta etapa se realizó con ayuda de un Oxímetro ProODO 1030 marca "YSI", que se colocó por debajo del difusor de aire. Se recolectaron datos cada 5

segundos. Obteniendo un total de 72 datos recolectados cada 5 segundos en el tiempo de aireación estimado.



Figura 23. Oxímetro ProODO. Equipo de medición de oxígeno disuelto en agua.



Figura 24. Sonda de medición. Sonda que se conecta directamente al equipo de medición.



Figura 25. Sensor óptico. Parte de la sonda, que mide la concentración de oxígeno disuelto en agua por el método luminiscente, ya que no presenta electrodos ni soluciones.

3.3.4 Altura de la columna de agua

Se dividió al tubo de PVC en 3 secciones iguales de 0.8 m cada una de ellas. Por lo cual, la columna de agua se llenó a: 0.8 m, 1.6 m y 2.4 m. Para determinar posteriormente la eficiencia del difusor en cada una de ellas.

Tabla 3

Alturas de llenado de la columna de agua.

Nomenclatura	Altura (m)
Altura 1	0.8
Altura 2	1.6
Altura 3	2.4

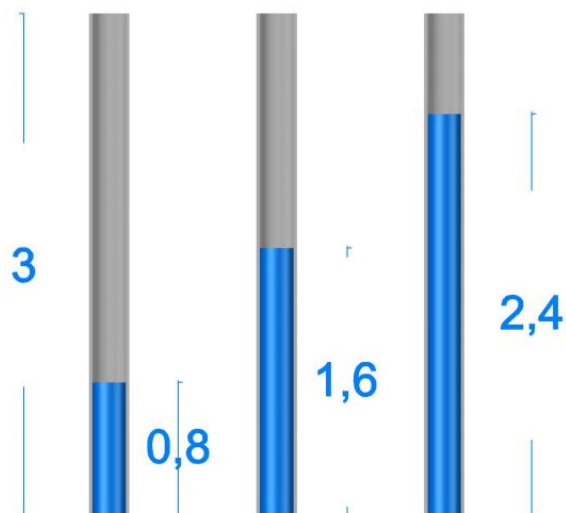


Figura 26. Altura de la columna de agua. Tres diferentes alturas a las que se puso a prueba el difusor. Representación de dimensiones en metros. Modelado en AutoCAD de la columna de PVC.

3.3.5 Caudal de aire

Se calculó el caudal con respecto a la potencia teórica de entrada (0.034 HP) desde el compresor hacia la línea de aire que ingresa al sistema (Alviz, 2012, p. 29). Tomando en cuenta además el cálculo de las presiones absolutas, atmosféricas y eficiencia del compresor.

(Ecuación 14)

$$Q = \frac{P * n}{\left[\left(\frac{P_{abs}}{P_{atm}} \right)^{0.283} - 1 \right] * 0.22}$$

Donde:

P = Potencia teórica (HP)

Q = Caudal de aire (cfm)

n = Eficiencia del compresor (0.8)

P_{abs} = Presión absoluta (psi)

P_{atm} = Presión atmosférica (psi)

3.4 Diseño Experimental

Se estableció para este proyecto un diseño experimental completamente al azar (DCA) con una confiabilidad del 95%. Se evaluó el difusor de aire con dos placas de acrílico, con respecto a la concentración de oxígeno disuelto y la tasa o coeficiente de transferencia de oxígeno en agua (K_La) a tres alturas diferentes.

Tabla 4

Variables del diseño experimental.

Variables de estudio	Variables de respuesta
Altura de agua	Concentración de oxígeno disuelto
Placa	K_La

El difusor de aire se evaluó con 2 placas presentando diferentes diámetros de orificios. La placa 1 (P1) con orificios de 2 mm de diámetro, mientras que la placa 2 (P2) 4 mm de diámetro. Estas, se evaluaron a 3 diferentes alturas de agua. La menor altura (H1) fue de 0.8 m con respecto al difusor, que se encontraba en el fondo del tanque. La siguiente altura (H2) 1.6 m y por último la mayor altura (H3) 2.4 m. Las dos primeras alturas se establecieron en base a (Metcalf y Eddy, 2014, p. 635). Mientras que la última altura, se utilizó en base a evidencia bibliográfica (Kemoun et al., 2013, p. 1198), donde se utilizó esta altura para el diseño de difusores de aire.

Tabla 5

Variables experimentales y niveles.

Variable	Niveles
Placa (P)	P1= 2mm P2= 4mm
Altura (H)	H1= 0.8 m H2= 1.6 m H3= 2.4 m

El diseño contó con 9 tratamientos, cada uno con 3 repeticiones. Se estableció un nulo, que fue la manguera con aireación. Se combinaron las variables de estudio al azar, como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 6

Detalle de los tratamientos a realizarse en el diseño experimental.

Tratamiento	Denominación	Número de Repeticiones	Descripción
Tratamiento 1	P1/H1	3	Se evaluó el difusor de aire con la placa 1 a una profundidad de 0.8 m.
Tratamiento 2	P1/H2	3	Se evaluó el difusor de aire con la placa 1 a una profundidad de 1.6 m.
Tratamiento 3	P1/H3	3	Se evaluó el difusor de aire con la placa 1 a una profundidad de 2.4 m.
Tratamiento 4	P2/H1	3	Se evaluó el difusor de aire con la placa 2 a una profundidad de 0.8 m.
Tratamiento 5	P2/H2	3	Se evaluó el difusor de aire con la placa 2 a una profundidad de 1.6 m.
Tratamiento 6	P2/H3	3	Se evaluó el difusor de aire con la placa 2 a una profundidad de 2.4 m.
Tratamiento 7	M3/H1	3	Se evaluó únicamente la manguera de aire a una profundidad de 0.8 m.
Tratamiento 8	M3/H2	3	Se evaluó únicamente la manguera de aire a una profundidad de 1.6 m.

Tratamiento 9	M3/H3	3	Se evaluó únicamente la manguera de aire a una profundidad de 2.4 m.
----------------------	-------	---	--

A continuación, se detalla la codificación tomada para cada tratamiento y unidades experimentales. En total se obtuvieron 27 unidades experimentales.

Tabla 7

Codificación tratamientos y unidades experimentales.

Placa 1		
P1/H1	P1/H2	P1/H3
R1= A1	R1= A2	R1= A3
R2= B1	R2= B3	R2= B5
R3= B2	R3= B4	R3= B6
Placa 2		
P2/H1	P2/H2	P2/H3
R1= C1	R1= C2	R1= C3
R2= D1	R2= D3	R2= D5
R3= D2	R3= D4	R3= D6
Manguera		
M3/H1	M3/H2	M3/H3
R1= M1	R1= M2	R1= M3
R2= X1	R2= X3	R2= X5
R3= X2	R3= X4	R3= X6

4. Resultados y Análisis

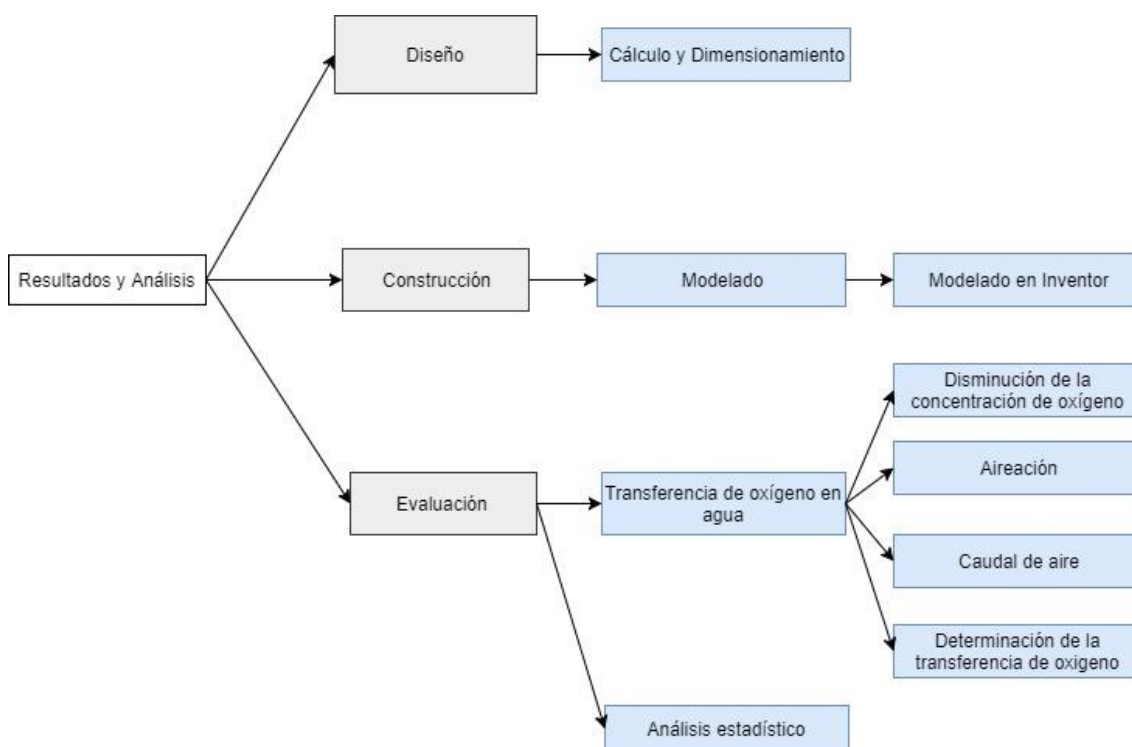


Figura 27. Resultado y Análisis. Etapas de los resultados y análisis a ser desarrolladas.

1. Diseño

1.1 Cálculo y Dimensionamiento

Para determinar las dimensiones de los difusores se calcularon previamente factores físicos: presión hidrostática del agua, presión absoluta, temperatura adiabática, temperatura de la salida del gas y densidad del mismo.

A partir de la ecuación 4 se determinó la presión hidrostática del agua. Con variables establecidas, como la densidad del agua (1000 kg/m^3), gravedad (9.8 m/s) y por último la altura de la columna de agua (2.4 m). Obteniendo una presión hidrostática de 23520 Pa (3.41 psi).

Posteriormente, con la presión hidrostática se determinó la presión absoluta que se encontró dentro de la tubería de PVC (ecuación 5). Con un total de 13.92 psi o 72 cm Hg, con una presión atmosférica de 10.51 psi en la ciudad de Quito registrada en la estación meteorológica de la Universidad de Las Américas sede Queri. Además se confirmó el dato previo en el atlas ambiental del Distrito Metropolitano de Quito (Secretaría del Ambiente DMQ, 2016, p. 10).

Para la obtención de la temperatura adiabática existente al ingreso del sistema (ecuación 6). Fue necesario tomar en cuenta la temperatura promedio del ambiente en la ciudad de Quito 15°C (Secretaría del Ambiente DMQ, 2016, p. 6). Así mismo, se estableció que la eficiencia del compresor de aire fuese del 80% (Alviz, 2012, p. 30). Tomando en cuenta también, las presiones previamente determinadas (P_{abs} y P_{atm}). Obteniendo un valor final de 29.81 °C.

La temperatura de salida del gas (ecuación 7) hacia el sistema de aireación, es el máximo valor al cual se puede llegar, siendo así una condición de borde necesaria para el sistema. Esta se determinó a partir de la temperatura promedio del ambiente y la temperatura adiabática. Obteniendo un valor de 44.81 °C, que puede disminuir en un rango de 5 a 10°C, antes de la salida de la línea de aire (Alviz, 2012, p. 50). Como también según (Metcalf y Eddy, 2014, p. 456), está llega adaptarse en contacto con el fluido. Una vez determinada la temperatura se calculó que la densidad del gas en el sistema (ecuación 8) que fue de 1.05 kg/m³.

Se establecieron las dimensiones estructurales de los difusores. Como son: diámetro del orificio de salida del gas, frecuencia de formación de burbujas y número de orificios presentes en cada placa.

Para el cálculo del diámetro de los orificios (ecuación 9), se estableció el diámetro de burbuja fina esperado de 2 mm (Fleming, 2014, p. 14; US EPA, 1989, p. 25). Además se tomó en cuenta la tensión superficial 0.087 N/m (Alviz, 2012, p. 35), gravedad, densidad del agua y del gas. Obteniendo un diámetro

de los orificios de 1.5 mm. Este valor, se aproximó al inmediato superior y se optó por un diámetro de 2 mm.

De igual manera, para el cálculo de la frecuencia de formación de burbujas (ecuación 10), se tomó en cuenta el diámetro de burbuja fina 2 mm y el caudal de aire al ingreso del difusor 2.5 m³/h (0.0007 m³/s). Presentado una frecuencia de formación de burbujas de 1.65×10^{-9} /s. El número de orificios presentes en cada una de las placas (ecuación 11), se calculó tomando en cuenta el diámetro de la tubería de todo el sistema 12 mm y el diámetro de los orificios 2 mm. Obteniendo un total de 19.76 orificios, lo que conlleva a que se establecieran un total de 20 orificios.

2. Construcción

Se cortaron a laser dos placas de acrílico de 5 mm de espesor y 120 mm de diámetro (figura 28), con un total de 20 orificios en cada una de ellas. Estas se diferencian por el diámetro de los orificios, como se puede observar en la tabla 8 que se presenta a continuación.

Tabla 8

Diámetro de los orificios presentes en las placas.

Nomenclatura	Diámetro de los orificios
Placa 1	2 mm
Placa 2	4 mm

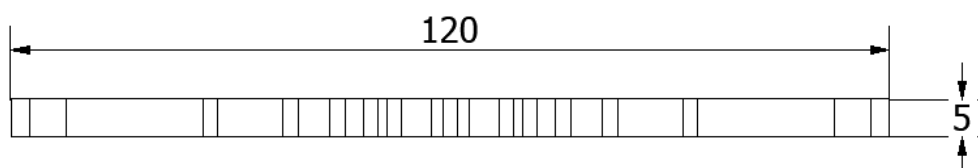


Figura 28. Acotamiento de la placa. Vista lateral. Representación de dimensiones en milímetros.

Para las dos placas, se cortaron 4 orificios de 5 mm de diámetro a los costados de la placa de tal forma que se encuentran a 109.86 mm de distancia uno de otro. Con el fin de unir a la cámara del difusor.

La placa 1 (figura 29) presenta una distribución helicoidal de tal manera que los orificios cubrieron en su mayoría el área total. Estos tienen 2 mm de diámetro y se encuentran separados entre sí 10.9 mm. De igual manera, existe una distancia de 21.8 mm entre los orificios en el centro de la placa. Así mismo estos, en relación con los de mayor tamaño se encuentran a 22.33 mm. Los orificios de 5 mm presentan 54.93 mm desde la mitad a su ubicación. Por último, prevalecen 65.4 mm de distancias entre los orificios de 2mm más alejados del centro (figura 30).

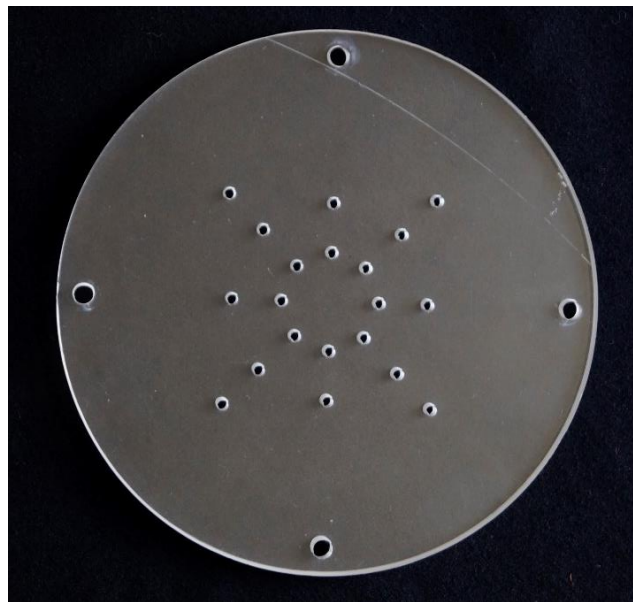


Figura 29. Placa 1 de acrílico con orificios de 2 mm de diámetro cortados a laser. Vista superior.

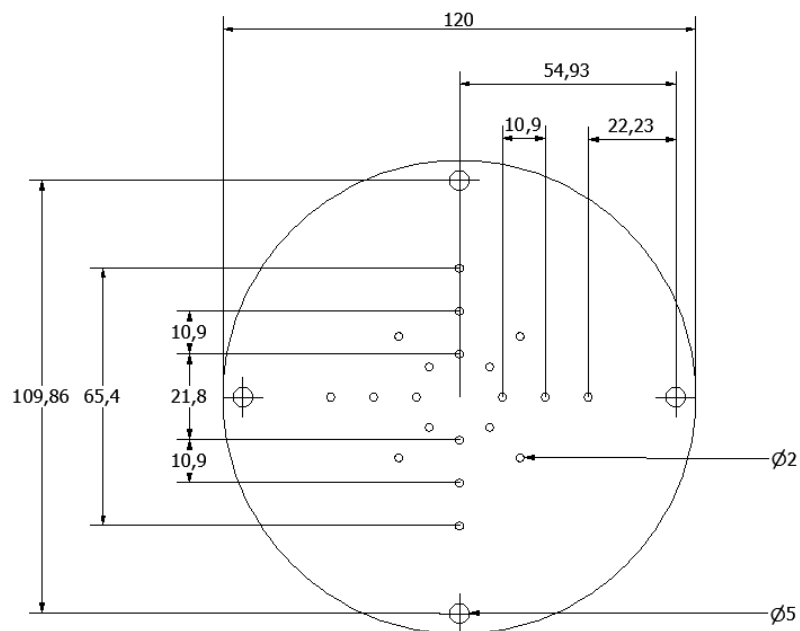


Figura 30. Diseño y acotamiento de la placa 1. Vista superior. Representación de dimensiones en milímetros. Distancia entre orificios, diámetro de la placa y diámetro de orificios.

Mientras que la placa 2 (figura 31) presenta una distribución simétrica de los orificios en base al diseño de Kemoun (2013, p. 1199). En ella existen orificios de 4 mm con una separación de 12.8 mm. Los 4 orificios, del diámetro antes mencionado, ubicados a los costados presentan 64 mm de distancia entre sí. Como también, existen 22.93 mm entre estos y los orificios de 5 mm de diámetro. A diferencia del resto de los orificios de 4 mm que se encuentra a 29.33 mm. Además, los orificios de 5 mm de diámetro con respecto al centro se encuentran a 54.93 mm. Por último, los orificios más pequeños, se ubican en el centro separados por 25,6 mm (figura 32).

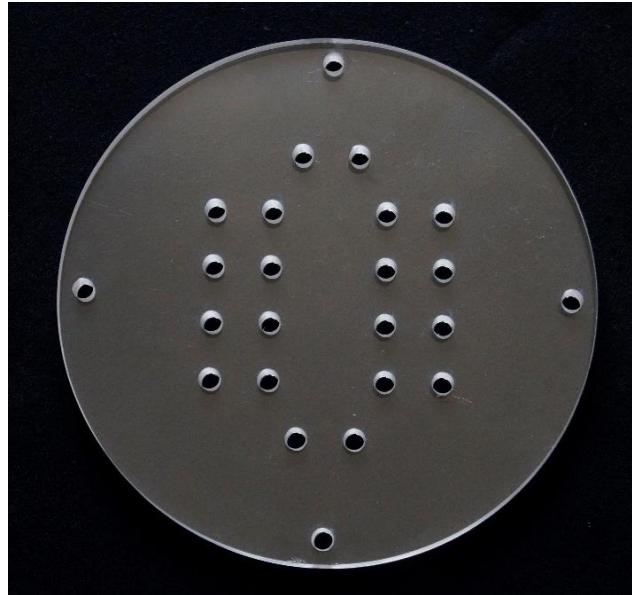


Figura 31. Placa 2 de acrílico con orificios de 4 mm de diámetro cortados a laser. Vista superior.

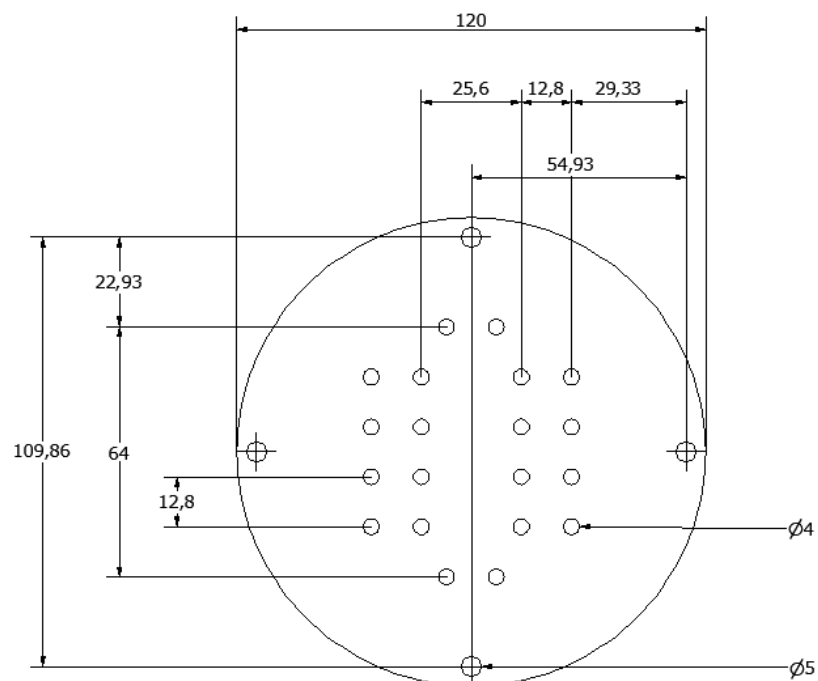


Figura 32. Diseño y acotamiento de la placa 2. Vista superior. Representación de dimensiones en milímetros. Distancia entre orificios, diámetro de la placa y diámetro de orificios.

Se realizó la comprobación del diámetro de los orificios con galgas de medición y patrones de alambre. Se obtuvo un radio de 0.98 mm (1.96 mm de diámetro) para la placa 1. Y 0.2 mm de radio (4 mm de diámetro) para la placa 2. Lo cual ratificó que los orificios cortados a laser, tenían las medidas requeridas de 2 y 4 mm de diámetro.

2.1 Modelado

Se optó por un diseño del difusor de tipo domo. Debido a que el caudal de entrada calculado, se encuentra dentro del rango para el funcionamiento de este tipo de difusor según (Metcalf y Eddy, 2014, p. 640). El modelado final se fundamentó en (Hanotu et al., 2017, p. 368), para determinar que la estructura.

2.1.1 Modelado en Inventor

Se seleccionaron los parámetros de diseño más importantes como son: cámara del difusor, entrada de aire y base del difusor. Teniendo en cuenta la hermeticidad de la cámara. En este modelado, se modificaron partes de la cámara para su posterior impresión, funcionamiento y evaluación. Se utilizó esta herramienta, ya que es más versátil para el diseño de piezas pequeñas a comparación con AutoCAD.

El modelado consistió básicamente en ultimar detalles, para que el difusor pueda funcionar de mejor manera. Por lo cual se diseñó en la parte superior una circunferencia de 120 mm de diámetro por 5 mm de ancho, que une a la cámara con las placas de acrílico mediante 4 orificios de 4 mm de diámetro. Estos se encuentran en un espacio de 15 mm de distancia entre el borde interior al borde exterior de la cámara.

Además, la cámara presenta una altura de 35 mm y una altura total de 45 mm. La entrada de aire en la parte inferior presenta un diámetro externo de 11 mm y un diámetro interno de 6 mm, por donde el aire ingresa. Fue necesario diseñar

con estas dimensiones, ya que las conexiones de aire presentan 12 mm de diámetro. Por último, el diámetro interior de la cámara es de 90 mm (figura 33-34).

En este último modelado, se diseñó la entrada de la manguera de aire en la parte inferior. Con una estructura adicional que aporta estabilidad y resistencia a la presión de ingreso (figura 34). Cabe mencionar que las paredes del difusor y la unión entre la entrada de aire y la cámara se modelaron de forma convexa, disminuyendo los puntos de presión y fugas que puedan existir.

Vista Frontal

A-A (1 : 1)

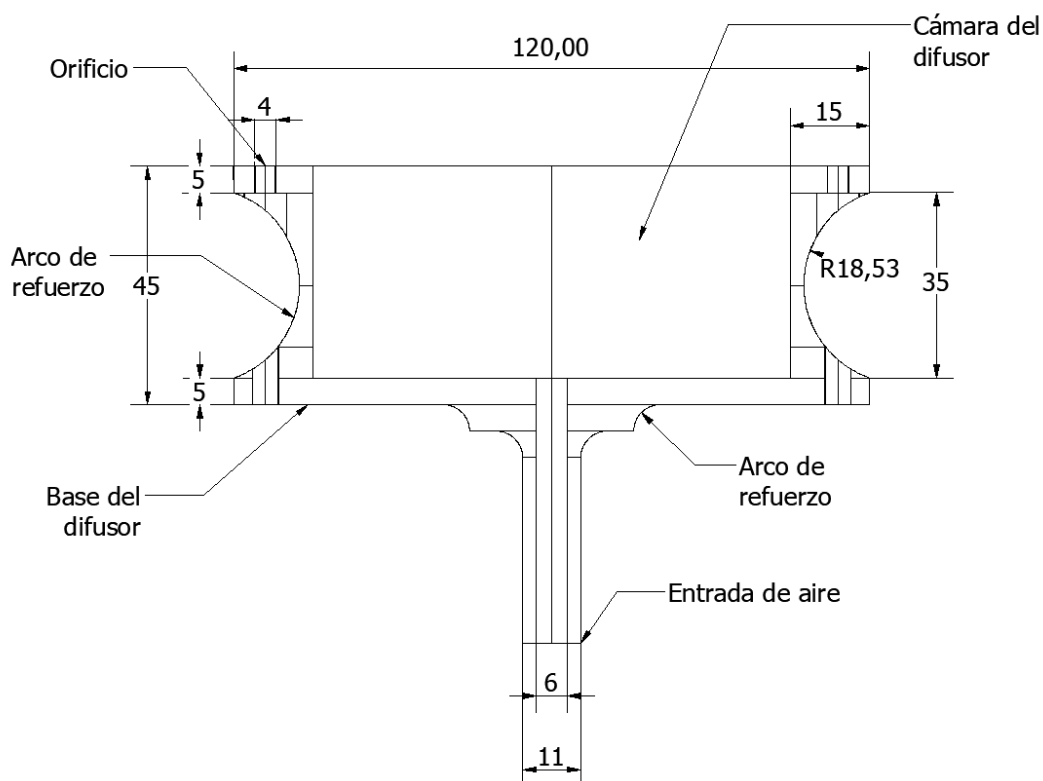


Figura 33. Acotamiento modelado del difusor. Vista lateral. Representación de dimensiones en milímetros. Modelado en Inventor de la cámara del difusor de aire.

Vista Superior

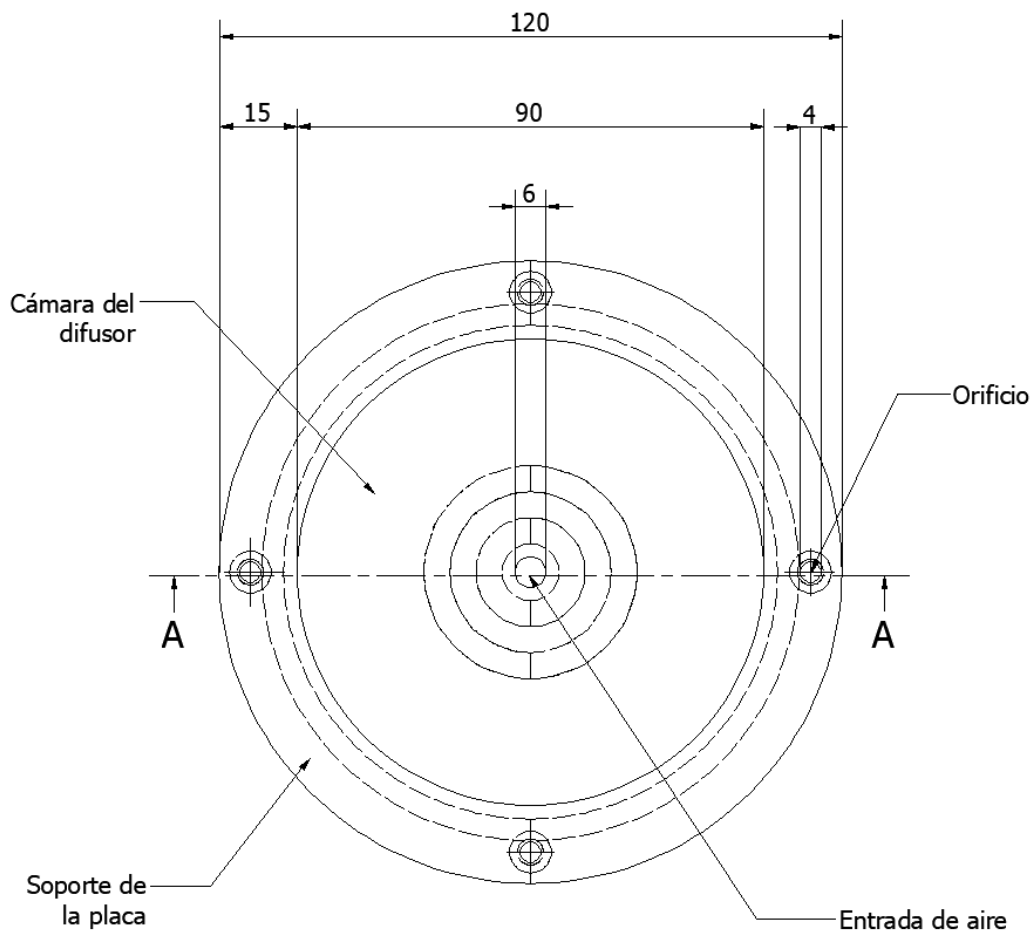


Figura 34. Acotamiento modelado del difusor. Vista superior. Representación de dimensiones en milímetros. Modelado en Inventor de la cámara del difusor de aire.

Como resultado de la etapa de construcción se obtuvo un difusor de aire de material PLA de color blanco. La facilidad que presenta este diseño es su intercambiabilidad de placas. Estas se ajustan en su totalidad a la cámara por medio de tornillos y tuercas. Para procurar que no existan fugas se instaló una lámina de caucho entre la placa y la superficie del difusor. En la salida de aire

se colocó un accesorio llamado racor que sirvió de conexión a la línea de aire (figura 35-37). A continuación, se puede evidenciar el difusor de aire impreso.

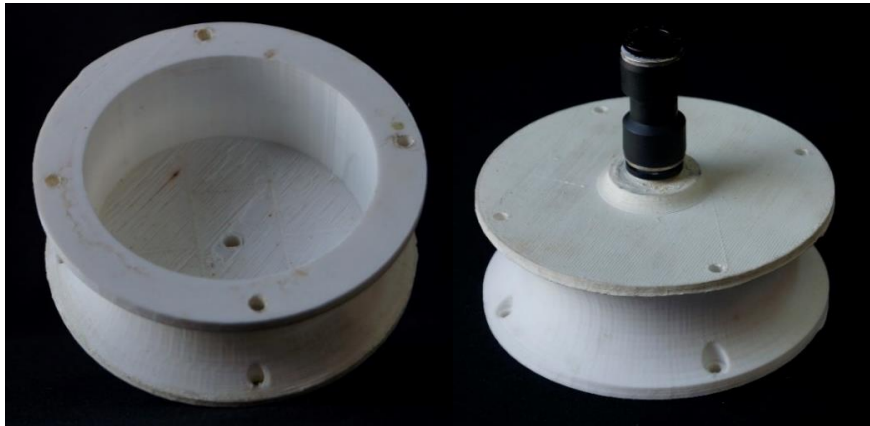


Figura 35. Difusor de aire impreso en 3D. Cámara del difusor y entrada de aire con racor. Vista superior.



Figura 36. Difusor de aire impreso con lámina de caucho. Cámara del difusor con tornillos. Vista lateral.



Figura 37. Difusor de aire impreso. Placas 1 y 2 con lámina de caucho ajustadas con tornillos y tuercas a la cámara del difusor. Vista superior

3. Evaluación

El tanque de aireación que se utilizó para esta etapa presentó una base de PVC como soporte para el difusor. Esta se colocó al fondo de la columna donde también se ubicada la purga para descargar el agua utilizada en cada tratamiento (figura 38).

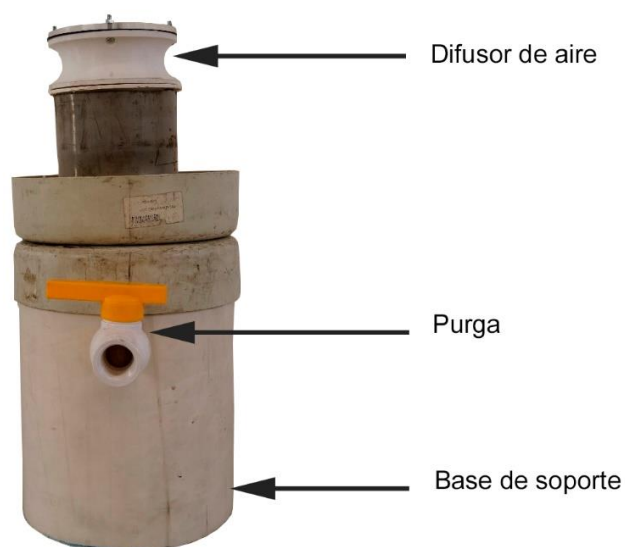


Figura 38. Soporte de PVC para difusor y purga. Ubicada en la parte inferior del tanque

Como se puede observar en la figura 39, el tanque de aireación cuenta con un medidor de columna de agua. También, con 3 ventanas de acrílico a 0.2 m, 1.5 m y 2 m de altura para poder observar el comportamiento del oxígeno en contacto con el agua. Además, se colocaron 3 vinchas de metal que ayudaron a estabilizar el tanque con respecto a la pared, para evitar que este pueda derrumbarse. Por último, la conexión a la línea de aire ingreso por la parte superior del tanque hasta llegar a la parte inferior donde se encontraba el difusor.

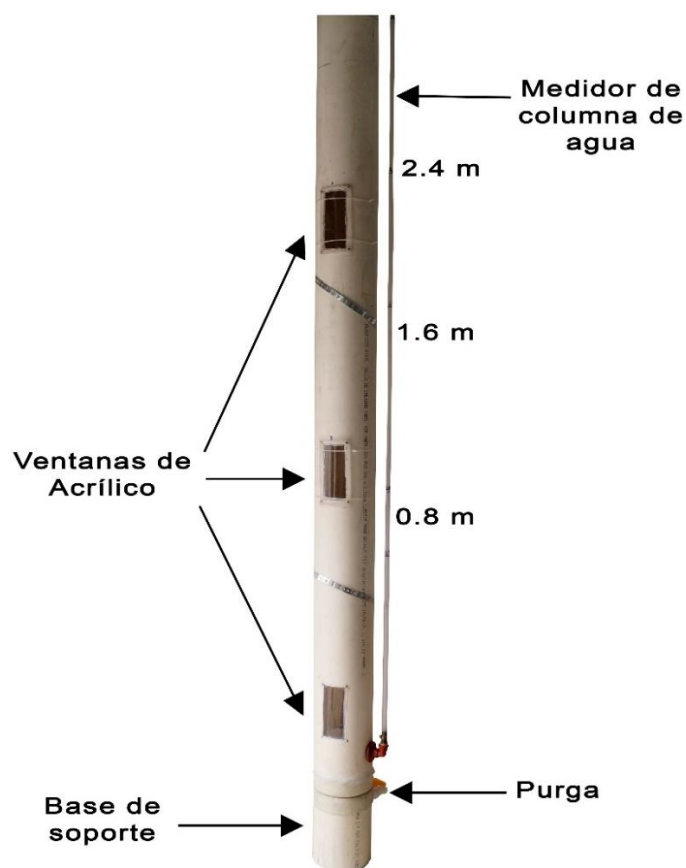


Figura 39. Tanque de aireación de PVC con conexiones; base de soporte para el difusor, purga, medidor de columna de agua y ventanas.

3.1 Transferencia de oxígeno en agua

3.1.1 Disminución de la concentración de oxígeno

La relación másica de sulfito sódico presente en la norma DIN EN 12555-15, 2003. No cumple con el requerimiento del diseño experimental. Ya que no alcanzó una concentración final cercana a 0 mg/l.

Se dio paso a encontrar experimentalmente, la cantidad del reactivo para disminuir la concentración de oxígeno. Así pues, se determinó que es necesario 0.4 gramos de sulfito de sodio por cada litro de agua. Luego, se esperó un periodo de 20 minutos para realizar la medición y verificar que la concentración se encuentre cercana a 0 mg/l. Para dar paso a la siguiente etapa de medición.

3.1.2 Aireación

Se obtuvo mediante experimentación con la placa con diámetro de orificios de 2 mm. Una concentración de 8.49 mg/l después de 7 minutos de aireación (420 segundos). El dato de concentración previamente mencionado es la saturación de oxígeno en agua a 17°C y a una presión de 72.6 Kpa en la ciudad de Quito (figura 40). Cabe mencionar que al realizar la experimentación se tomó como un sistema estacionario.

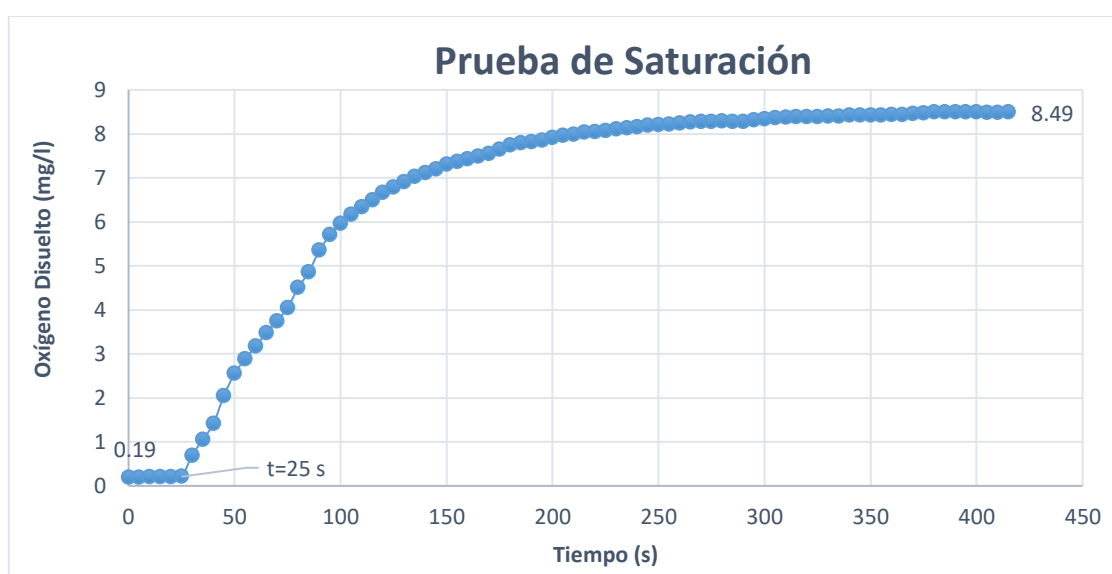


Figura 40. Prueba de saturación de oxígeno. A 72.6 Kpa, 17°C. Tiempo de aireación 420 segundos (7 min).

Comparado con la concentración de saturación de oxígeno (10.08 mg/l), a una presión de 101.32 Kpa (760 mm Hg) y 17°C, mencionado por Colt (2012, p. 67). Se puede apreciar que, a menor presión atmosférica el agua puede contener menor cantidad de oxígeno (Pulla y Chang, 2014, p. 23).

Existen estudios de saturación de oxígeno. Sin embargo, las condiciones que aplican en cada uno de estos generan nueva información al igual que este estudio.

En cuanto al tiempo de aireación, la norma establece que se debe tomar un valor cercano al hallado en experimentación (7 min). Por lo cual, se estableció 6 minutos de aireación para la etapa de evaluación.

Se constató por medio de una prueba que no existen fugas en toda la cámara del difusor como también en la unión entre esta y las placas de acrílico, vértices de las paredes internas del difusor y entrada de aire (figura 41).

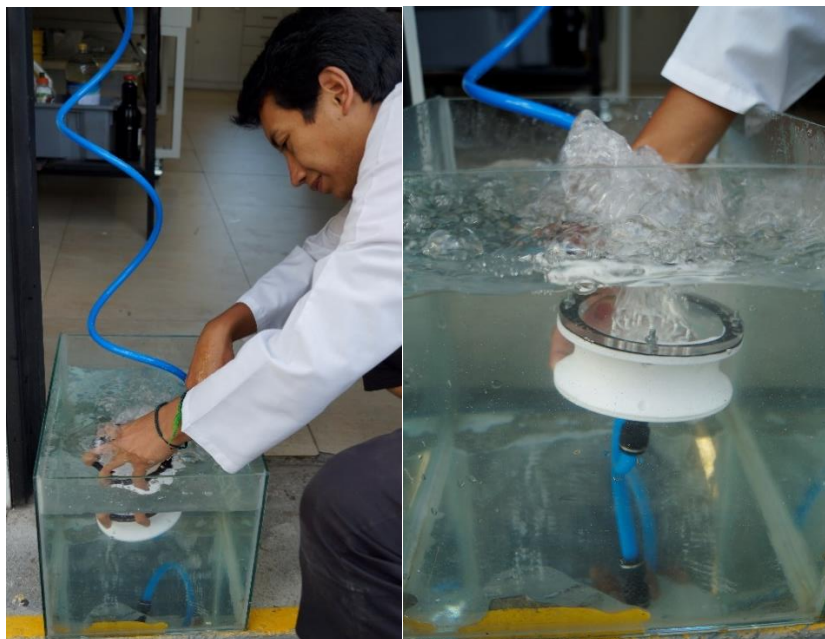


Figura 41. Prueba de fugas realizadas en el difusor de aire.

3.1.3 Caudal de aire

Se calculó el caudal de aire al ingreso del sistema de aireación a partir de la ecuación 14. Para ello, se ingresaron valores como la presión absoluta e hidrostática, previamente calculadas. Como también, la potencia teórica del compresor a la línea de aire (0.034 HP). Por último, se estableció un 80% de eficiencia del compresor (Alviz, 2012, p. 50). Obteniendo un caudal de 2.5 m³/h.

El valor antes determinado, se encuentra dentro del rango de caudal (0.85 – 4.24 m³/h), requerido para el ingreso a un sistema con un difusor tipo domo, cómo se puede ver en la tabla 9.

Tabla 9

Información de los caudales para varios tipos de difusores en agua limpia.

Tipo de difusor y disposición	Caudal de aire m³/h
Discos cerámicos – Malla	0.68 – 5.77
Domos cerámicos – Malla	0.85 – 4.24
Placas cerámicas – Malla	3.40 – 8.50
Tubos de plástico porosos rígidos	
• Malla	4.07 – 6.80
• Espiral doble	5.09 – 18.68
• Espiral simple	3.40 – 20.37
Tubos de plásticos porosos no rígidos	
• Espiral Simple	3.40 – 11.88
Aireación por Inyección	
• Ubicación en un lateral	91.69 – 509.4
Difusores no porosos	
• Espiral doble	5.60 – 16,98
• Eje longitudinal	7.13 – 76.41

-
- Espiral simple 16.98 – 59.43
-

Tomado de Metcalf y Eddy, 2014, p. 640.

3.1.4 Oxígeno Disuelto

Se recolectó información de la concentración de oxígeno disuelto en un lapso de 6 minutos (360 segundos). Posterior a ello se realizaron gráficas de los promedios de los tratamientos en función a la altura. No se tomó en cuenta en toda la fase experimental, el intercambio de gas entre la atmósfera y el medio. Debido a que es necesario una gran espejo de agua para que exista dicho evento, como lo menciona Muhammad (2014, p. 2).

Se determinó la diferencia máxima de tiempo que tardan las placas y la manguera, para alcanzar una misma concentración. De esta manera se estableció el tratamiento que alcanzó dicha concentración en el menor tiempo posible. Dependiendo de cada uno de los tratamientos, se fijó una denominación para las concentraciones como se puede observar en la tabla 10. Además, se realizó el cálculo de la diferencia desde la menor concentración (C1), hasta el punto de saturación. Ya que a partir de ello el comportamiento permanece lineal tal como lo menciona He, Petiraksakul, y Meesapya (2013, p. 16)

Tabla 10

Denominación de concentración de OD, diferencias máximas de tiempo.

Denominación	Concentración de OD (mg/l)
C1	1
C2	2
C3	3
C4	4
C5	5

C6	6
C7	7
C8	8

En primer lugar, se determinó el comportamiento de la concentración de oxígeno a una altura de 0.8 m (figura 42). Posteriormente, se calcularon las diferencias de tiempo entre las placas y la manguera.

Para alcanzar una concentración de 1 mg/l, la diferencia máxima de tiempo se encontró entre la placa 1 y la placa 2 con un total de 10 segundos. Sin embargo, en las cuatro siguientes concentraciones (C2, C3, C4 y C5), la mayor diferencia se encontró entre la placa 1 y la manguera (25 segundos). Por último, la manguera y la placa 2 llegan al mismo tiempo a la concentración C6. Mientras que las dos combinaciones restantes (P1-P2; P1-M3), presentan 10 segundos de diferencia.

Tabla 11

Diferencia máxima de tiempo a una altura de 0.8 m.

	Diferencia de tiempo (s)			
	P1-P2	P2-M3	P1-M3	Δ MAX
C1	10	3	7	10
C2	5	5	10	10
C3	11	15	25	25
C4	7	18	25	25
C5	10	15	25	25
C6	10	0	10	10

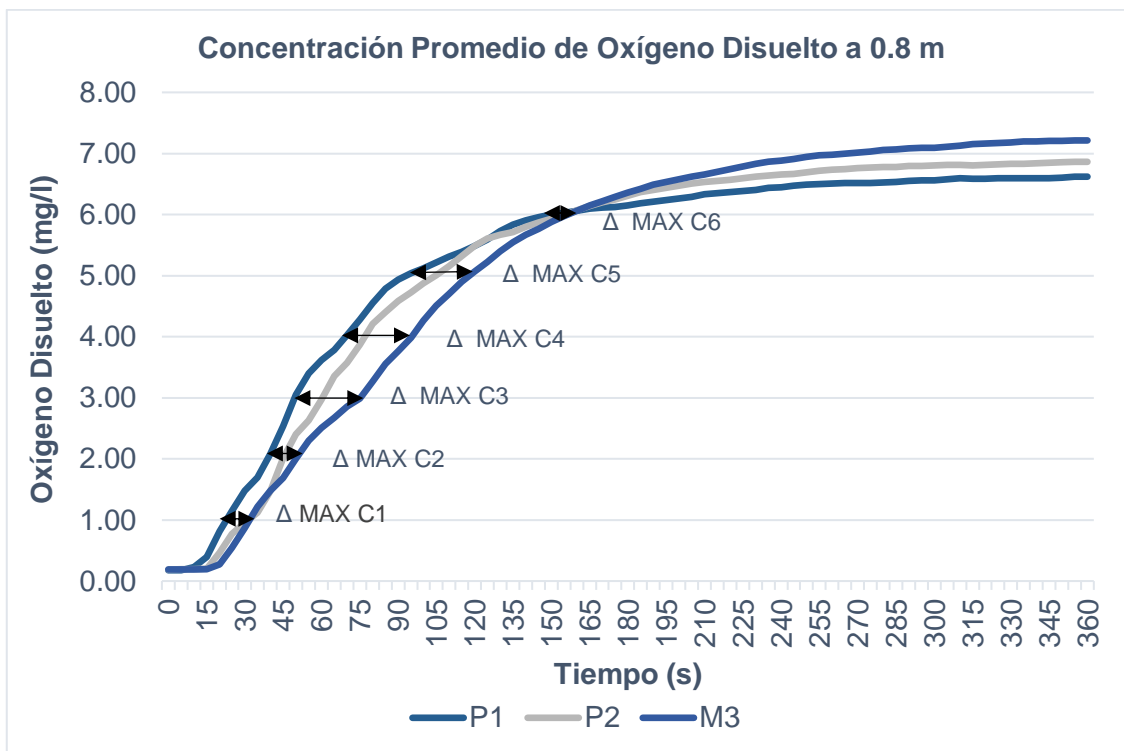


Figura 42. Comportamiento de Oxígeno Disuelto a 6 minutos de aireación. Comparación entre placa 1, placa 2, manguera una altura de 0.8 m. Datos obtenidos a partir del promedio entre las unidades experimentales de cada tratamiento.

Para el análisis de la diferencia máxima de tiempo, a una altura de 1.6 m. Fue necesario establecer 7 concentraciones (C1-C7). Debido a que esta prueba se satura aproximadamente a 7 mg/l. La placa 2 con respecto un sistema no controlado (manguera), alcanza en todas las concentraciones en un menor tiempo. Con diferencias que fluctúan desde los 10 hasta los 50 segundos. De igual manera, la placa 1 presenta diferencias máximas a comparación de la manguera (5 a 30 segundos). Finalmente, la combinación que presenta menores diferencias se encuentra entre las dos placas.

Tabla 12

Diferencia máxima de tiempo a una altura de 1.6 m.

Diferencia de tiempo (s)

	P1-P2	P2-M3	P1-M3	Δ MAX
C1	5	10	5	10
C2	5	20	14	20
C3	7	20	13	20
C4	1	20	19	20
C5	5	25	20	25
C6	5	30	25	30
C7	20	50	30	50

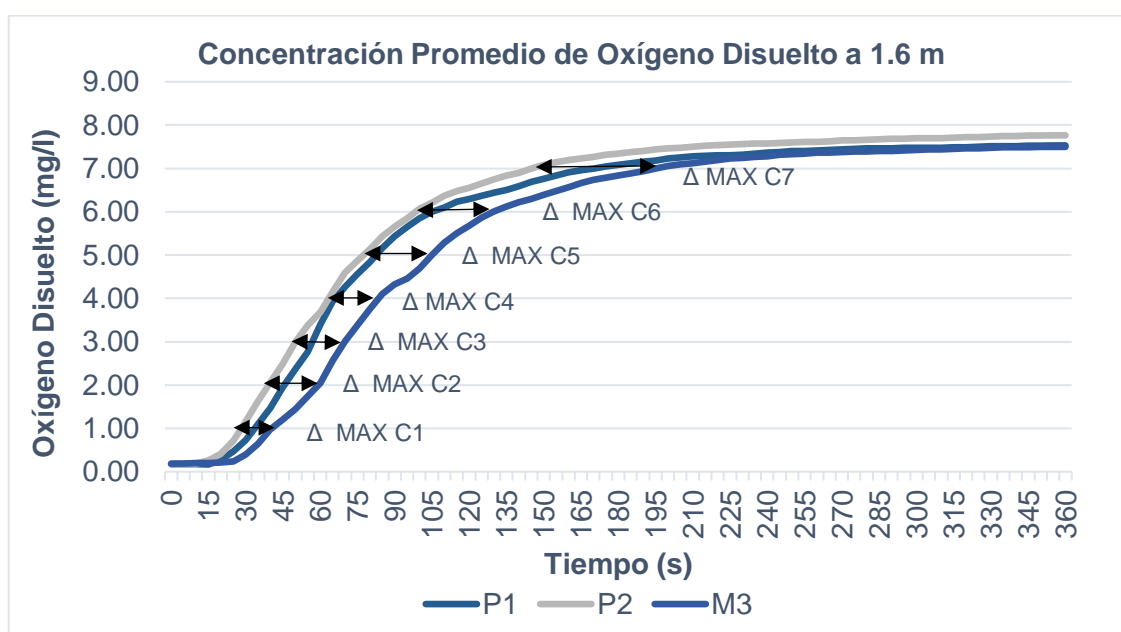


Figura 43. Comportamiento de Oxígeno Disuelto a 6 minutos de aireación. Comparación entre placa 1, placa 2, manguera una altura de 1.6 m. Datos obtenidos a partir del promedio entre las unidades experimentales de cada tratamiento.

Por último, se analizó el comportamiento del oxígeno disuelto a una altura de 2.4 m (figura 44), con un rango de concentraciones desde C1 hasta C8. Tanto la placa 1 como la placa 2 presentan comportamientos similares. Debido a que los datos obtenidos para las dos placas reflejan menores diferencias entre sí.

Por otra parte, la placa 1 con respecto a la manguera, llega a las concentraciones C1, C2, C3, C4 en un tiempo menor.

Las dos placas llegan a C5 en un mismo tiempo, por lo cual no existe diferencia máxima a esta concentración. Como también, el tiempo (20 segundos) que toma la manguera para alcanzar una concentración de 5 mg/l, es mayor que el de la placa 1 y placa 2. Este evento es similar en C7, no obstante, existe una mayor diferencia de tiempo (35 segundos) para alcanzar dicha concentración.

Por otro lado, la placa 2 presenta diferencias máximas en C6 y C8, con respecto a la manguera. En esta última, llegando a duplicar el tiempo, con respecto a la placa 1.

Tabla 13

Diferencia máxima de tiempo a una altura de 2.4 m.

Diferencia de tiempo (s)				
	P1-P2	P2-M3	P1-M3	Δ MAX
C1	0	5	10	10
C2	1	8	9	9
C3	3	6	9	9
C4	3	13	16	16
C5	0	20	20	20
C6	5	25	20	25
C7	0	35	35	35
C8	20	90	45	90

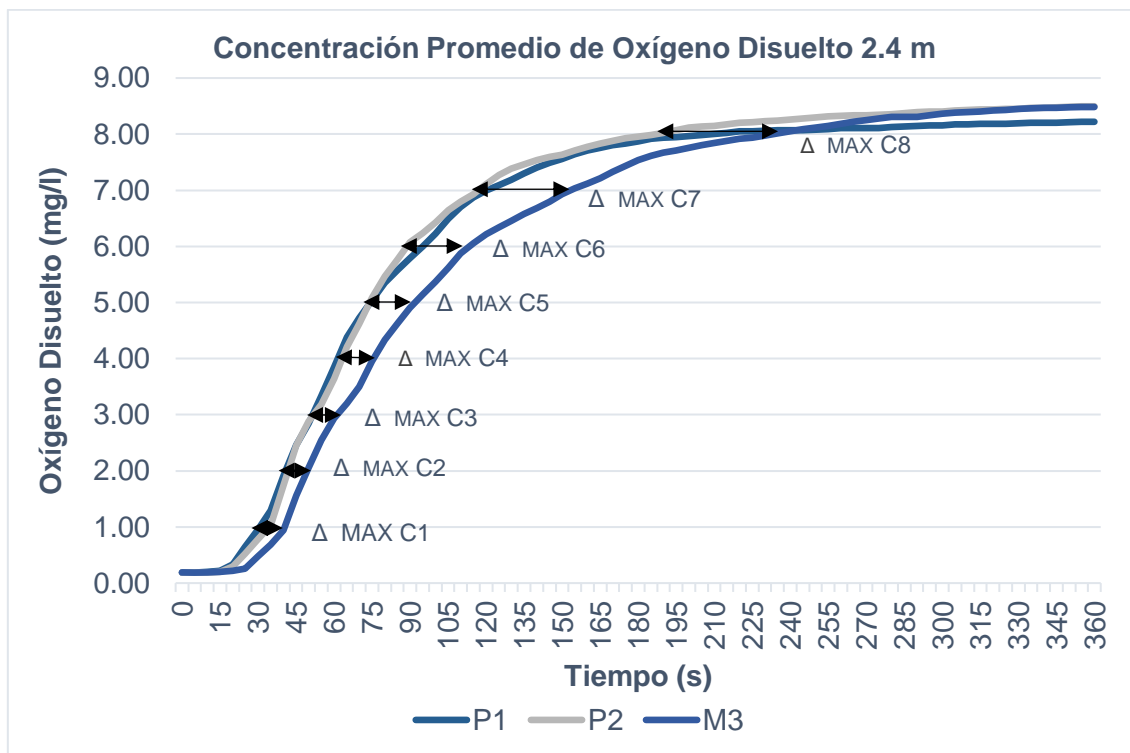


Figura 44. Comportamiento de Oxígeno Disuelto a 6 minutos de aireación. Comparación entre placa 1, placa 2, manguera una altura de 2.4 m. Datos obtenidos a partir del promedio entre las unidades experimentales de cada tratamiento.

Como se puede observar en las figuras 42, 43 Y 44. El comportamiento del oxígeno disuelto en agua, frente a un tiempo de aireación, presenta un crecimiento expo-lineal. Ya que comienza de forma exponencial hasta llegar a un punto de saturación.

A una altura de 0.8 m, la placa 1 presenta mayores diferencias de tiempo en un rango de concentraciones desde C2 hasta C5 con respecto a la manguera. Presentando los valores más altos en C3, C4 y C5 (25 segundos). Previo a llegar al tiempo donde la placa 2 y la manguera convergen ($\Delta \text{MAX}=0$). Además, una altura de 1.6 m, la placa 2 alcanza concentraciones desde 1 a 7 mg/l en menor tiempo (mayor diferencia de tiempo), que la manguera (P2-M3).

A mayor profundidad la placa 2 (2.4 m), toma menos tiempo que la manguera para alcanzar una concentración de 8 mg/l.

Además, a medida que el difusor se encontraba a mayor profundidad se puede observar que las concentraciones de oxígeno disuelto incrementaban. A comparación de las otras alturas (0.8 y 1.6 m). Ya que las burbujas presentan mayor tiempo de residencia por lo cual mayor transferencia gas-líquido (Serrat y Méndez, 2012, p. 371). Cabe mencionar que el agua con la que se realizó la experimentación provino de una cisterna, por lo cual la temperatura y por ende la concentración de oxígeno, pueden verse influenciadas.

3.1.5 Determinación de la tasa de transferencia de oxígeno en agua limpia

A partir de la ecuación 12 se determinó la tasa o coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$). Como también, $K_L a_{(20^\circ\text{C})}$ (ecuación 3) obteniendo un total de 27 datos, como se puede observar los datos en la tabla 14. Tomando en cuenta el factor de corrección de la temperatura para difusor de aire (1.024). Al igual que Hu (2006, p. 22), se asumió que la transferencia entre el líquido y la atmósfera es insignificante a comparación del aporte presentado por el sistema de aireación.

Se determinó $K_L a_{(20^\circ\text{C})}$ ya que es necesario estandarizar los valores obtenidos, a una temperatura de 20°C como lo reporta Xu (2017, p. 8). Sin embargo, este estudio no considera el análisis de éste, ya que mantienen una relación matemática directa con $K_L a$. Se generó esta información ya que es útil para aplicación en reactores biológicos, estimar costos energéticos por aireación y volumen de aire aportado por difusores (Peña, 2012, p. 85).

En relación a $K_L a$. La unidad experimental que aportó mayor cantidad de oxígeno hacia el fluido fue la número 26 (74.51 /h). A comparación de la unidad experimental 3, que presentó un mínimo de 56.07 /h.

Entre las dos placas, la que aporta mayor oxígeno es la placa 1 a una profundidad de 2.4 m, 71.93 /h (tratamiento 3). Seguido por la placa 2, a la misma profundidad, 71.17 /h (tratamiento 6). Confirmado así, que a mayor profundidad existe mejor transferencia de oxígeno entre el gas y el agua (ETSEIB, 2014, p. 23).

Un estudio realizado por Yanjun (2015, p. 6), presentó un valor máximo de K_La de 21.24 /h en un tiempo de aireación de 6 minutos. A comparación con el valor obtenido experimentalmente con la placa 1 (71.93 /h). Se observa que supera en un 238.65 %.

Tabla 14

Valores de K_La y $K_La_{(20^\circ C)}$ para cada unidad experimental

Tratamiento	Unidad Experimental	Temperatura (°C)	KLa (/h)	KLa20 (/h)
Tratamiento 1	1	18.97	68.33	70.02
	2	18.3	67.65	70.43
	3	18.6	56.07	57.96
Tratamiento 2	4	17.9	69.75	73.31
	5	17.6	68.87	72.90
	6	18	71.13	74.58
Tratamiento 3	7	17.20	71.93*	76.87
	8	17.8	69.82	73.56
	9	17.7	70.79	74.76
Tratamiento 4	10	19.4	68.67	69.66
	11	18.6	68.93	71.26

	12	17.8	68.01	71.65
Tratamiento 5	13	16.9	70.28	75.64
	14	16.7	69.26	74.90
	15	17.8	71.14	74.95
Tratamiento 6	16	17.2	71.07	75.94
	17	17	71.17	76.42
	18	16.4	63.08	68.70
Tratamiento 7	19	16.1	72.48	79.51
	20	15.7	69.47	76.93
	21	15.8	61.24	67.66
Tratamiento 8	22	17	69.79	74.94
	23	16.9	65.39	70.38
	24	16.7	73.07	79.02
Tratamiento 9	25	16.1	65.68	72.05
	26	16.1	74.51**	81.73
	27	15.9	62.95	69.38

Nota: *Máximo valor de la placa 1. **Máximo valor de la manguera.

El rango de $K_L a$ conseguido entre el máximo y mínimo presentado en la tabla 15. Se ratifica en lo mencionado por Buitrago H, Otálvaro A, y Duarte B (2013, p. 111), revelando que el coeficiente de transferencia de oxígeno se encuentra entre 18 y 90.36 /h. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta las condiciones ambientales y factores como: caudal de aire, temperatura del agua, presión, entre otros, que pueden llegar a influir en el resultado (González et al., 2014, p. 165).

Tabla 15

Media, mínimo y máximo de K_La y $K_La_{(20^\circ\text{C})}$.

	KLa (/h)	KLa_{20} (/h)
Media	68.54	73.15
Mínimo	56.07	57.96
Máximo	74.51	81.73

Como se puede apreciar en la figura 45. Los datos encontrados para una altura 1, se encuentran en un rango de K_La de 62 y 70 /h. Para la altura 2, se ubican entre 72 y 75 /h. La mayor dispersión de datos se encuentra en la última altura entre 63 y 75 /h. Lo que conlleva a mencionar que los datos obtenidos de K_La en base a la altura son uniformes.

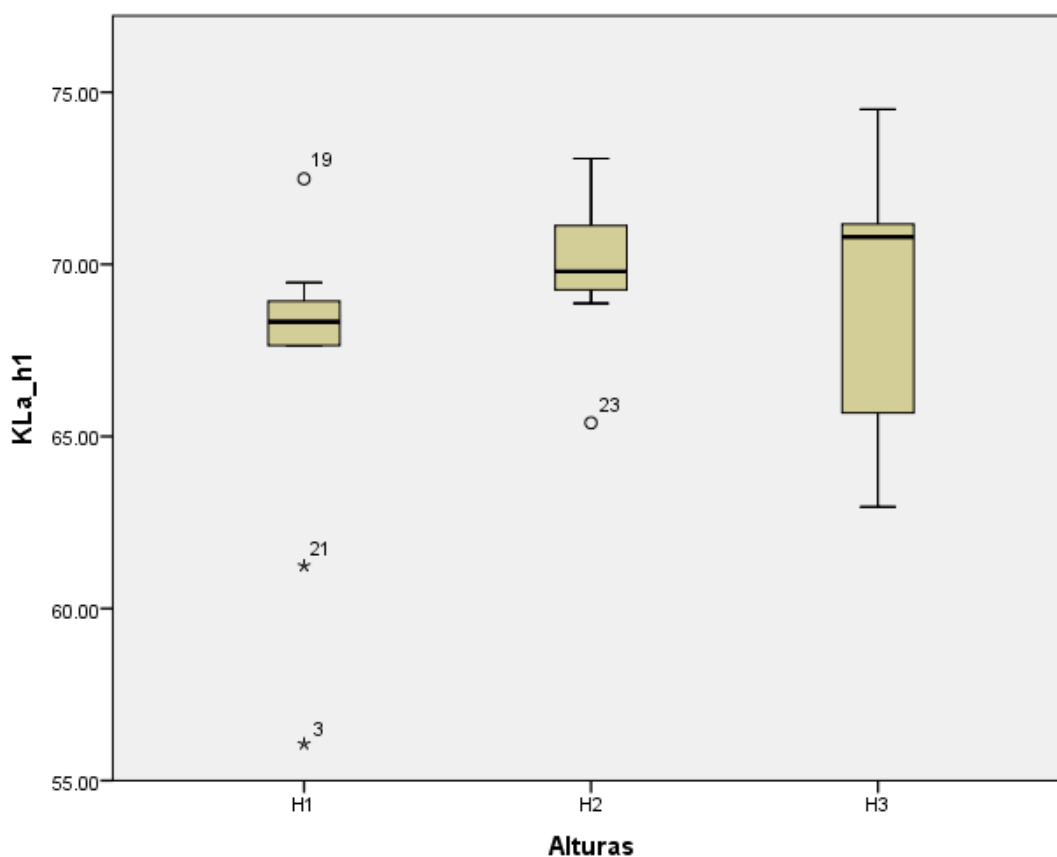


Figura 45. Diagrama de cajas. Comparación de los 9 tratamientos en función de las alturas y el coeficiente de transferencia de oxígeno K_La .

El comportamiento de uniformidad, se replica para los datos de K_La en función de las placas y el nulo como se puede observar en la figura 46.

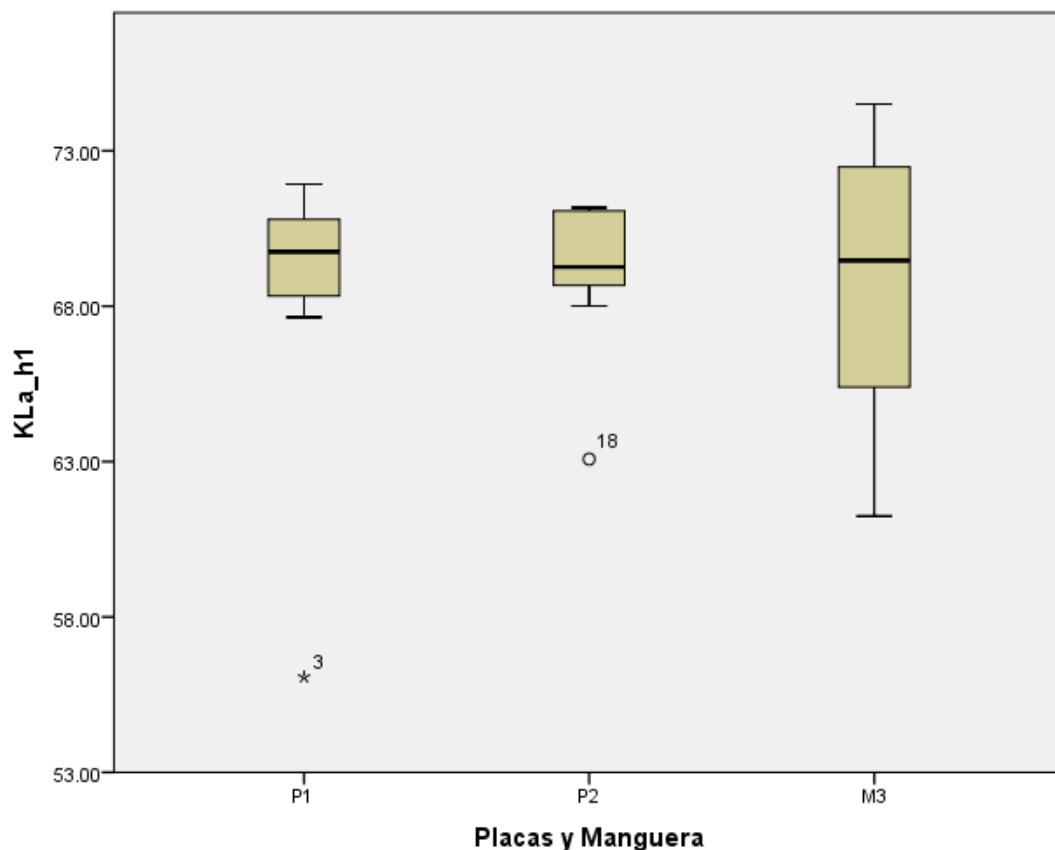


Figura 46. Diagrama de cajas. Comparación de los 9 tratamientos en función de las alturas y el coeficiente de transferencia de oxígeno K_La .

3.2 Análisis estadístico

3.2.1 Comprobación de supuestos para aplicación de pruebas paramétricas

Luego de aplicar la prueba de Shapiro-Wilks, a la variable de respuesta K_La con la finalidad de evaluar si los mismos siguen una distribución normal, se logró constatar que no se ajustan a la mencionada distribución.

Intentando transformar esta variable de respuesta, para poder verificar este supuesto dentro de las pruebas paramétricas. Se procedió a realizar las siguientes transformaciones con esta variable: Función Exponencial, Función Logaritmo base 10, Función Logaritmo Natural, Función Inversa, Función Cuadrado, Función raíz cuadrada y Función complemento de la raíz cuadrada. Como se puede observar en la tabla 16, ninguna de las transformaciones usadas permitió que se acepte la hipótesis nula. Ya que existe al menos un dato no significativo en todos los tratamientos (menor a 0.05).

Tabla 16

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilks) para $K_L a$

	Unidades experimentales	Shapiro-Wilks		
		Estadístico	gl	Sig.
KLa	P1H1	0.792	3	0.095
	P1H2	0.984	3	0.76
	P1H3	0.998	3	0.915
	P2H1	0.938	3	0.519
	P2H2	0.998	3	0.91
	P2H3	0.76	3	.021*
	M3H1	0.933	3	0.501
	M3H2	0.993	3	0.84
	M3H3	0.915	3	0.435
Ln_KLa	P1H1	0.788	3	0.086
	P1H2	0.985	3	0.768
	P1H3	0.998	3	0.923
	P2H1	0.937	3	0.517
	P2H2	0.997	3	0.902
	P2H3	0.759	3	.020*
	M3H1	0.924	3	0.468
	M3H2	0.99	3	0.811
	M3H3	0.924	3	0.467

Exp_KLa	P1H1	1	3	0.988
	P1H2	0.87	3	0.295
	P1H3	0.91	3	0.417
	P2H1	0.979	3	0.725
	P2H2	0.958	3	0.604
	P2H3	0.822	3	0.169
	M3H1	0.787	3	0.083
	M3H2	0.778	3	0.063
	M3H3	0.75	3	.000*
Lg10_KLa	P1H1	0.788	3	0.086
	P1H2	0.985	3	0.768
	P1H3	0.998	3	0.923
	P2H1	0.937	3	0.517
	P2H2	0.997	3	0.902
	P2H3	0.759	3	.020*
	M3H1	0.924	3	0.468
	M3H2	0.99	3	0.811
	M3H3	0.924	3	0.467
Inv_KLa	P1H1	0.785	3	0.078
	P1H2	0.986	3	0.777
	P1H3	0.999	3	0.931
	P2H1	0.937	3	0.514
	P2H2	0.997	3	0.895
	P2H3	0.758	3	.019*
	M3H1	0.915	3	0.436
	M3H2	0.987	3	0.781
	M3H3	0.933	3	0.5
Sqrt_KLa	P1H1	0.79	3	0.09
	P1H2	0.985	3	0.764
	P1H3	0.998	3	0.919
	P2H1	0.938	3	0.518

	P2H2	0.998	3	0.906
	P2H3	0.759	3	.021*
	M3H1	0.929	3	0.484
	M3H2	0.992	3	0.825
	M3H3	0.92	3	0.451
Sq_KLa	P1H1	0.795	3	0.104
	P1H2	0.983	3	0.751
	P1H3	0.998	3	0.907
	P2H1	0.939	3	0.522
	P2H2	0.998	3	0.917
	P2H3	0.76	3	.022*
	M3H1	0.942	3	0.535
	M3H2	0.995	3	0.87
	M3H3	0.906	3	0.405
inv_Sqrt_KLa	P1H1	0.786	3	0.082
	P1H2	0.986	3	0.772
	P1H3	0.999	3	0.927
	P2H1	0.937	3	0.515
	P2H2	0.997	3	0.899
	P2H3	0.759	3	.019*
	M3H1	0.92	3	0.452
	M3H2	0.989	3	0.796
	M3H3	0.929	3	0.484

Nota: *Datos no significativos.

Estos resultados son ratificados en el histograma de residuos (figura 47) y en el gráfico de probabilidades (figura 48). En ambos puede identificarse que los residuos generados no se ajustan a la distribución normal requerida para la aplicación de pruebas paramétricas. En el caso del histograma de residuos, los datos no adquieren una curva normal en forma de campana presentando una asimetría negativa (Campos, 2017, p. 14). Como también, en el gráfico de

probabilidades, donde los datos deben estar lo más cerca de línea recta que los divide (López y González, 2015, p. 121).

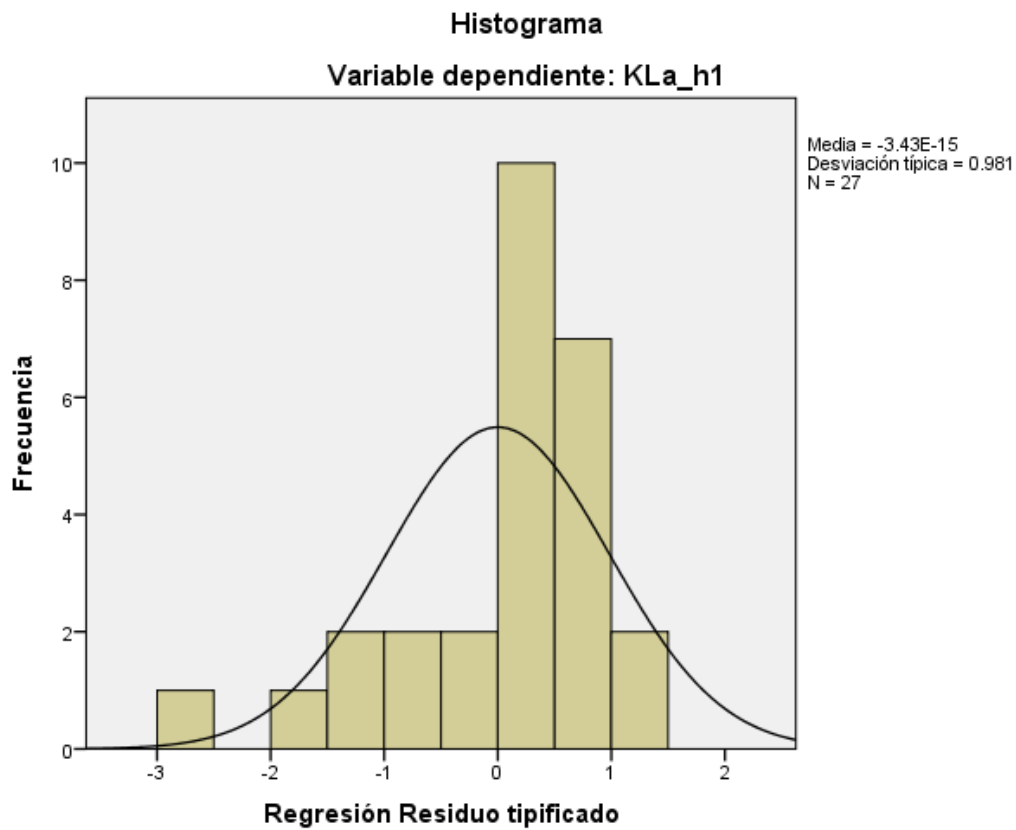


Figura 47. Gráfica de frecuencia de residuos generada a partir de los datos del proyecto. Se puede apreciar claramente que los datos difieren de la distribución normal esperada.

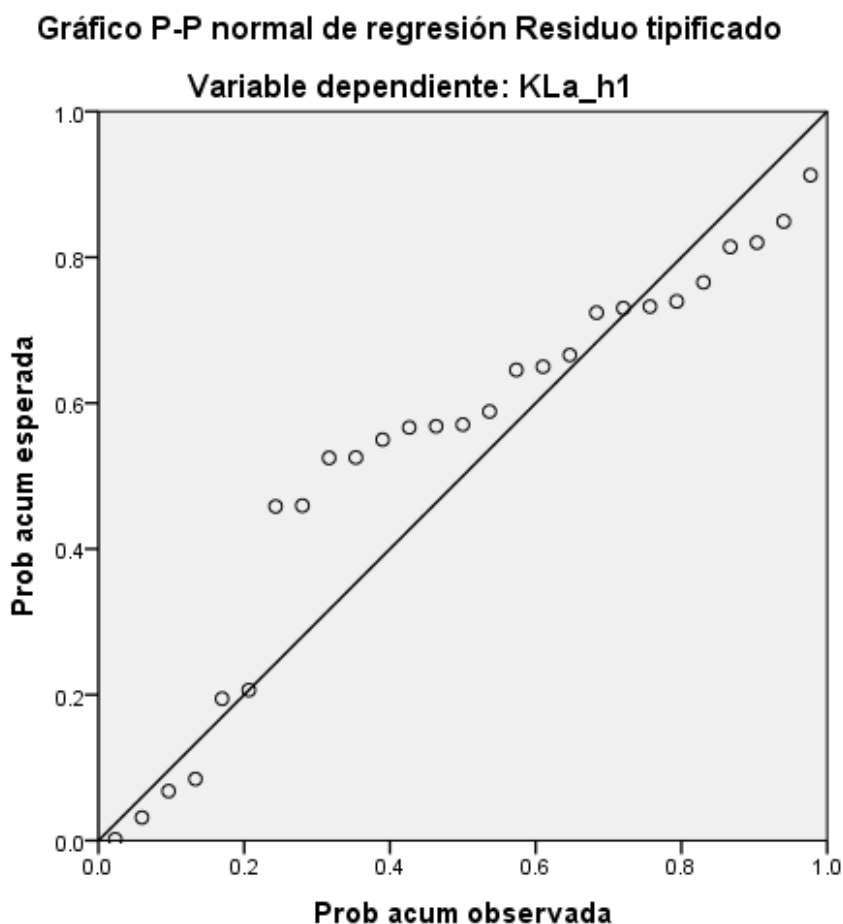


Figura 48. Gráfico de probabilidad de residuos. Se puede apreciar como los residuos generados no se ajustan al modelo de distribución normal propuesto.

Considerando la imposibilidad para comprobar el supuesto de distribución normal de los datos, requisito para la realización de análisis paramétricos, se opta por el uso de pruebas no paramétricas que permitan la identificación de diferencias significativas entre los datos generados (Sabiote, Pérez, y Llorente, 2014, p. 14).

3.2.2 Pruebas no paramétricas

Previo a la realización de las pruebas no paramétricas se corrió un análisis de frecuencias de los datos, por tratamiento para la variable de respuesta (figura

49), donde se puede apreciar que no existe un claro patrón para la distribución normal de la variable K_La presente en los diferentes tratamientos analizados.

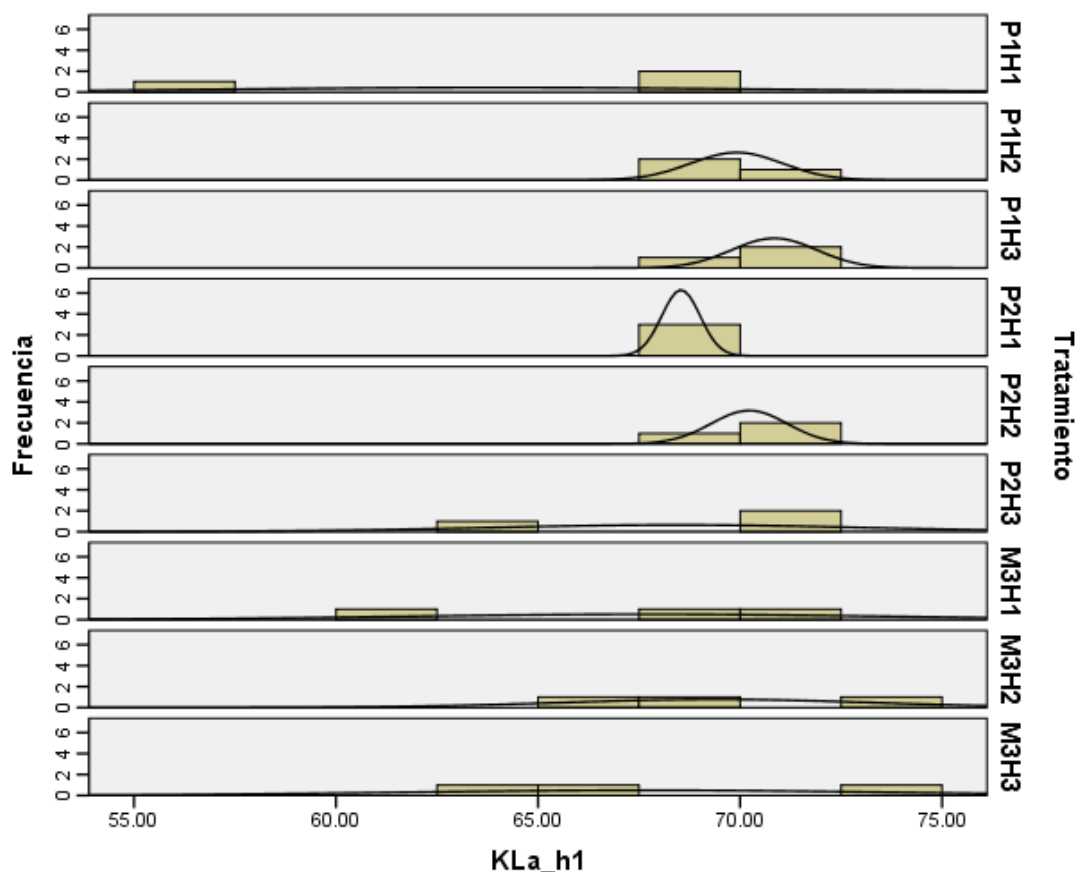


Figura 49. Gráfica de frecuencias para la variable K_La según tratamiento.

Se procedió a correr un análisis Kruskal Wallis, prueba no paramétrica para K tratamientos independientes, con el objetivo de identificar si existe una diferencia significativa entre los tratamientos analizados (Marin, Jiménez, y Hernández, 2015, p. 3). Los resultados de esta prueba están detallados en la tabla 17, en donde con una significancia de 0.535 se acepta la hipótesis nula para los tratamientos analizados, concluyendo que no existe diferencia significativa entre ellos y que cualquier diferencia detectada se debe al azar. Por lo cual se ratifica que los datos encontrados no son significativos, en relación con un estudio de aireación realizado por Alviz (2012, p. 87).

Tabla 17

Prueba no paramétrica Kruskal Wallis para K_{La} .

Prueba de Kruskal Wallis	
	KLa
Chi-cuadrado	7.016
gl	8
Sig. asíntota	0.535

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se demostró que, a partir del cálculo de variables atmosféricas y dimensiones estructurales, es posible obtener un difusor de aire tipo domo según lo planteado al inicio del proyecto. Con placas de acrílico que varían en la distribución física y diámetro de los orificios.

En la construcción del difusor, fueron notorios los avances progresivos presentados en el modelado final a comparación del modelo inicial. Se modeló una base en el difusor, que brindó estabilidad dentro del tanque de aireación. Presentando, además la capacidad de intercambiar las placas del difusor.

El material con el que se construyó el difusor (PLA), demostró ser resistente a los factores físicos y químicos. Ya que no presentó rupturas en la manipulación del difusor, gracias a la apariencia convexa que se estableció, tanto en las paredes de la cámara como en la entrada de aire. Como también la presencia de sulfito de sodio, no afectó a la estructura del difusor. Además, mediante las pruebas no se evidenciaron fugas de aire. Logrando que la cámara del difusor cumpla con la condición de hermeticidad establecida al inicio del proyecto.

En la experimentación realizada en la ciudad de Quito y en base a la norma DIN EN 12555-15, 2003. Se pudo determinar la concentración de sulfito de sodio y el tiempo de espera. Como también, el tiempo de saturación del agua en dicha ciudad. Se evidenció que, a una altura de 2800 m.s.n.m., existe poca información referente a la concentración de saturación de oxígeno en agua. La mayor parte de estudios se realizan a nivel del mar y la máxima altura a la cual se encontraron datos, fue a 1800 m.s.n.m. Por lo cual, esta información encontrada servirá para futuras investigaciones.

Para una altura de 0.8 m, la placa 1 presentó ser la más eficiente con respecto a la manguera, presentado una diferencia máxima de 25 segundos para

alcanzar una concentración de 3, 4 y 5 mg/l. Mientras que, para una concentración de 6 mg/l, no existió diferencia alguna entre la placa 2 y la manguera. Además, a 1.6 m de columna de agua, la placa 2 evidenció tener mejores resultados, a comparación de la placa 1 y la manguera. Debido a que en un rango de 1 a 7 mg/l, esta alcanza dichas concentraciones a menor tiempo.

Por último, a una altura de 2.4 m, el comportamiento de la concentración de oxígeno es similar entre la placa 1 y 2. Por lo cual existen diferencias mínimas entre estos dos. Pese a ello, se pueden evidenciar diferencias con respecto a la manguera. Se confirmó que, a menor altura de agua, presenta mejores resultados la placa 1 y a mayor altura la placa 2. Como también, a una concentración de 8 mg/l se encuentra una diferencia máxima de tiempo de 90 segundos entre P2-M3. Lo que llega a duplicar la diferencia existente entre P1-M3.

El mayor valor de $K_L a$ se encontró a una de 2.4 m. Por lo que, a mayor profundidad, existe mayor transferencia de oxígeno. Debido a que las burbujas presentan mayor tiempo de residencia en el líquido.

Se confirmó a partir del análisis de Shapiro-Wilks, histograma de residuos y en el gráfico de probabilidades. Que los valores de la tasa de transferencia de oxígeno $K_L a$, presentan una distribución uniforme por lo que, estadísticamente no son significativos. Por ende, no se puede aplicar pruebas paramétricas. Por otro lado, se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y se concluyó que no existe una diferencia significativa por lo que cualquier diferencia se debe al azar.

5.2 Recomendaciones

El proyecto obtuvo datos con una distribución uniforme por lo que, en futuras aplicaciones, se recomienda cambiar las variables de diseño del difusor de aire para observar cambios en la transferencia de gas-líquido. Además, los coeficientes o tasas de transferencia de oxígeno $K_L a$ y $K_L a_{(20^\circ\text{C})}$, hallados en este estudio se pueden utilizar para futuras experimentaciones con aguas residuales.

Se sugiere el análisis de la concentración de oxígeno y $K_L a$, en un tanque de aireación, con profundidades mayores que las propuestas en este documento. Como también, se puede variar en las dimensiones y geometría del mismo para observar su influencia directa en las variables de estudio.

Se aconseja, la recolección de datos con un mayor número de oxímetros a diferentes profundidades, para poder apreciar el comportamiento de las concentraciones. Por último, en un estudio posterior se aconseja realizar el análisis del tamaño de burbuja y tiempo de residencia de esta en agua.

REFERENCIAS

- Abergeldie. (2014). *Aeration control for medium sized continous actived sludge plant*. Recuperado el 20 de septiembre del 2017 de http://abergeldie.com.au/wpcontent/uploads/2015/10/Aeration_Contr ol_for_Continuous_Activated_Sludge_Plant.pdf
- Aerzen. (2012). *Aeration Blowers in the Wastewater Industry in North America*. Recuperado el 24 de septiembre del 2017 de <http://vertassets.blob.core.windows.net/download/116613d5/116613d5d2a242c3b3a5a17700a0d648/whitepaperaerationblowerwastwatern dustry2.pdf>
- Al-Ahmady, K. K. (2012). *Analysis of oxygen transfer performance on sub-surface aeration systems. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 3(3), 301-308. Recuperado el 23 de septiembre del 2017 de <https://doi.org/10.3390/ijerph2006030037>
- Alkhalidi, A. A. T., Al Ba'ba'a, H. B., & Amano, R. S. (2016). *Wave generation in subsurface aeration system: a new approach to enhance mixing in aeration tank in wastewater treatment. Desalination and Water Treatment, (April)*, 1-8. Recuperado el 30 agosto del 2017 de <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1172263>
- Alliance. (2014). *Dissolved Oxygen. Chesapeake Bay's River Trends Manual*. Recuperado el 2 de septiembre del 2017 de http://www.paesta.psu.edu/sites/default/files/paestaidea/water_qualit y_parameter_info_acb.pdf
- Alviz, A. (2012). *Diseño de un sistema de aireación para una planta de lodos activados en zofranca mamonal*. Recuperado el 10 de agosto del 2017 de <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/131/1/DISEÑO DE UN SISTEMA DE AIREACIÓN PARA UNA PLANAT DE LODOS ACTIVADOS EN ZOFRANCA MAMONAL.pdf>
- Amano, R. S., Alkhalidi, A., Bryar, P., & Alwayel, W. (2012). *Water Aeration in Wastewater Treatment. Volume 5: 6th International Conference on*

- Micro- and Nanosystems; 17th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, (April 2016)*, 881. Recuperado el 7 de octubre del 2017 de <https://doi.org/10.1115/DETC2012-71524>
- Araujo, G., Tresmondi, Ana Camargo, C., Pimentel, B., Hashimoto, F., Rosa, A. H., Fialho, J. M., ... Ribeiro, A. I. (2017). *Water quality, pollutant loads, and multivariate analysis of the effects of sewage discharges into urban streams of Southeast Brazil. Energy, Ecology and Environment, (June)*. Recuperado el 1 de agosto del 2017 de <https://doi.org/10.1007/s40974-017-0062-y>
- Atia, D. M., Fahmy, F. H., Ahmed, N. M., & Dorrah, H. T. (2012). *Design and Control Strategy of Diffused Air Aeration System. World Academy of Science, Engineering and Technology, 6(3)*, 666-670. Recuperado el 4 de noviembre del 2017 de <http://infomesr.org/attachments/JO - 0015.pdf>
- Buitrago H, G., Otálvaro A, Á. M., & Duarte B., P. G. (2013). Evaluación de la transferencia de oxígeno en un biorreactor convencional con aireador externo. *Revista Colombiana de Biotecnología, 15(2)*, 106-114. Recuperado el 30 de noviembre del 2017 de <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v15n2.41272>
- Campos, B. (2017). *Distribuciones Teóricas de Probabilidad, (18)*. Recuperado el 4 de diciembre del 2017 de <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/116184/1/Distribución-apuntes-DD.pdf>
- Chavez, M. P. (2014). *Determinación Del Coeficiente De Transferencia De Oxígeno En Aguas Residuales Como Parámetro Para El Dimensionamiento Del Equipo De Aireación De Un Biodigestor Aeróbico*, 66.
- Chemtronics. (2013). *Fine Bubble Titanium Dome Diffuser*. Recuperado el 27 de noviembre del 2017 de <http://www.chemtronicsindia.com/pdf/Fine Bubble Titanium Dome Diffuser.pdf>
- Colt, J. (2012). *Dissolved Gas Concentration in Water: Computation as Functions of Temperature, Salinity, and Pressure*. Recuperado el 7

de agosto del 2017 de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415916-7.X0001-0>

- CRD. (2016). *CRD Core Area Wastewater Treatment Program Business Case*. Recuperado el 10 de noviembre del 2017 de <https://www.crd.bc.ca/docs/default-source/Wastewater-Planning-2014/Project-Board/appendix1crdbusinesscasefinal.pdf?sfvrsn=0>
- Dalida, M. L. P. (2015). *Types o biological waste water treatments, 1, 10-13*. Recuperado el 2 de diciembre del 2017 de http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/civil_engineering/Types_of_Biological_Waste_Water_Treatments.pdf
- DEC. (2015). Design standards for wastewater treatment works in the lake George basin. Recuperado el 22 de agosto del 2017 de http://www.dec.ny.gov/docs/water_pdf/dstdwwtlkgeorge.pdf
- Dramm. (2015). *What is Dissolved Oxygen*. Recuperado el 13 de octubre del 2017 de http://www.dramm.com/media/Dissolved_Oxygen_in_the_Greenhouse.pdf
- Drechsel, P., Qadir, M., & Wichelns, D. (2015). *Wastewater: Economic asset in an urbanizing world. Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World, 1-282*. Recuperado el 16 de septiembre del 2017 de <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6>
- EPA. (2015). *Urban Waste Water Treatment in 2015*. Recuperado el 26 de octubre del 2017 de https://www.epa.ie/pubs/reports/water/wastewater/2015_urban_waste_water_report_Web_Version.pdf
- ETSEIB. (2014). Diseño de una EDAR transportable, compacta y modular. Recuperado el 3 de agosto del 2017 de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22640/Memora-EDAR_transportable_compacta_y_modular.pdf?sequence=1
- Fleming, G. (2014). *Wastewater Treatment Plant Operator Certification Training Module 15: The Activated Sludge Process*. Recuperado el 5 de octubre del 2017 de <http://files.dep.state.pa.us/Water/BSDW/OperatorCertification/Trainin>

gModules/ww15_act_sludge_1_wb.pdf

- González, N., Zamora, J., Ramos, L., Pérez, E., Pérez, C., & Salazar, E. (2014). Transferencia y consumo de oxígeno en el cultivo de alta densidad del microorganismo con actividad bionematicida *Tsukamurella paurometabola*, c924. *Tecnología Química*, 162-168. Recuperado el 27 de octubre del 2017 de <http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543761020.pdf>
- Hanotu, J. O., Bandulasena, H., & Zimmerman, W. B. (2017). *Aerator design for microbubble generation. Chemical Engineering Research and Design*, 123, 367-376. Recuperado el 22 de noviembre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.034>
- HDHS, & Ed. (2014). *Chapter 2 - Waste water treatment*. Recuperado el 3 de septiembre del 2017 de [http://www.defence.gov.au/jlc/Documents/DSCC/ADF Health Manual Vol 20, part8, chp2.pdf](http://www.defence.gov.au/jlc/Documents/DSCC/ADF%20Health%20Manual%20Vol%2020,%20part8,%20chp2.pdf)
- He, Z., Petiraksakul, A., & Meesapya, W. (2013). *Oxygen-Transfer Measurement in Clean Water. Journal of KMITNB*, 13(1), 14-19. Recuperado el 25 de noviembre del 2017 de <https://pdfs.semanticscholar.org/70d3/be3cd8557e00064853baa42d49e2e04f1a72.pdf>
- Hebert, J. (2017). *Process Aeration*. Recuperado el 14 de octubre del 2017 de [http://www.mi-wea.org/docs/Session 4 - Microbubble aeration session.pdf](http://www.mi-wea.org/docs/Session%204%20-%20Microbubble%20aeration%20session.pdf)
- Henkel, J. (2012). *Oxygen Transfer Phenomena in Activated Sludge*. Recuperado el 29 de noviembre del 2017 de http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3008/1/Henkel-2010-Oxygen_Transfer_Phenomena_in_Activated_Sludge.pdf
- Hu, J. (2006). *Evaluation of Parameters influencing oxygen transfer efficiency in MBR, (December)*. Recuperado el 2 de septiembre del 2017 de [https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/20477/2/M.S.Q111.H3_4125 DEC 2006_r.pdf](https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/20477/2/M.S.Q111.H3_4125_DEC_2006_r.pdf)
- Jenkins, T. (2014). *Aeration Control System Design*.

- Kemoun, A., Rados, N., Li, F., Al-Dahhan, M. H., Dudukovic', M. P., Mills, P. L., ... Lerou, J. J. (2013). *Gas holdup in a trayed cold-flow bubble column. Chemical Engineering Science*, 56(3), 1197-1205. Recuperado el 11 de octubre del 2017 de [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00340-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00340-7)
- Kiefer, J. R. (2016). *Wastewater Treatment and Disposal*, 2016(70), 1-12. Recuperado el 24 de octubre del 2017 de https://www.water.wa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/4845/9368.pdf
- Kollmann, R., Neugebauer, G., Kretschmer, F., Truger, B., Kindermann, H., Stoeglehner, G., ... Narodoslowsky, M. (2017). *Renewable energy from wastewater - Practical aspects of integrating a wastewater treatment plant into local energy supply concepts. Journal of Cleaner Production*, 155, 119-129. Recuperado el 1 de diciembre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.168>
- Kordrostami, S. (2015). *Waste-water treatment plant : Design*, (July).
- Kujawa-roeveland, K. (2012). *Wastewater characterization Origin of wastewater, (March)*, 23-25. Recuperado el 5 de octubre del 2017 de https://ocw.unihe.org/pluginfile.php/462/mod_resource/content/1/Urban_Drainage_and_Sewerage/5_Wet_Weather_and_Dry_Weather_Flow_Characterisation/DWF_characterization/Notes/Wastewatercharacterization.pdf
- Kulkarni, A. V., Badgandi, S. V., & Joshi, J. B. (2012). *Design of ring and spider type spargers for bubble column reactor: Experimental measurements and CFD simulation of flow and weeping. Chemical Engineering Research and Design*, 87(12), 1612-1630. Recuperado el 29 de septiembre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.06.003>
- Kumar, S. R. (2012). *Efficiency of aeration system in wastewater treatment plants*. Recuperado el 15 de noviembre del 2017 de <http://eprints.utm.my/6423/1/SriRuthiraKumarMFKA2007TTT.pdf>
- Kutty, S. R. M., Winarto, F. E. W., Gilani, S. I. U., Anizam, A. A., Karimah, W.

- W. Z., & Isa, M. H. (2012). *Degradation of organic matter using a submerged micro bubble diffuser in a biological wastewater treatment system. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 140*(June 2010), 415-423. Recuperado el 1 de septiembre del 2017 <https://doi.org/10.2495/WM100371>
- Larson, L. (Southern C. E. (2012). *A digital control system for optimal oxygen transfer efficiency*. Recuperado el 26 de septiembre del 2017 de <http://www.energy.ca.gov/2009publications/CEC-500-2009-076/CEC-500-2009-076-APB.PDF>
- Lewis, M. E. (2012). *Dissolved Oxygen*. <https://doi.org/10.1094/ASBCMOA-Beer-34>
- Li, F., Wei, Y., Chen, Y., Li, D., & Zhang, X. (2015). *An intelligent optical dissolved oxygen measurement method based on a fluorescent quenching mechanism. Sensors (Switzerland), 15*(12), 30913-30926. Recuperado el 3 de diciembre del 2017 de <https://doi.org/10.3390/s151229837>
- Liu, C., Li, S., & Zhang, F. (2012). *The oxygen transfer efficiency and economic cost analysis of aeration system in municipal wastewater treatment plant. Energy Procedia, 5*, 2437-2443. Recuperado el 22 de octubre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.419>
- López, E., & González, B. (2015). *Estadística. Fundamentos y aplicaciones en agronomía y ciencias afines*. Recuperado el 3 de diciembre del 2017 de http://fausac.usac.edu.gt/GPublica/images/2/27/Estadística_V-1.1-2015.pdf
- Lozano, S., Garrett, M. J., Zhang, Y., Mosoke, E. V., Steinfeld, C., Del Porto, D., ... Lukoyaa, N. B. (2014). *Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems. Master thesis, 22*(January), 55. Recuperado el 7 de noviembre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.154>
- Magnus Arnell. (2016). *Performance Assessment of Wastewater Treatment Plants. Multi-Objective Analysis Using Plant-Wide Models*.
- Mamani, E. L. (2015). Universidad nacional del altiplano. Tesis UNA, 1-84.

- Recuperado el 3 de octubre del 2017 de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/5302/Condori_Mamani_Meyner_Uriel_Ruelas_Yanque_Julio.pdf?sequence=1
- Marin, D., Jiménez, E., & Hernández, F. (2015). Comparación de pruebas paramétricas y no paramétricas vía simulación, 1-12. Recuperado el 6 de agosto del 2017 de http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/eventos/simposestadistica/documentos/memorias/MEMORIAS_2015/ComunicacioMdelamiento/Marin_Jimenez___Hernandez_Comparacion_prubasametricas_no_parametricas.pdf
- Mendez, E., & Rodriguez, G. (2014). Componentes y sistemas para el tratamiento biológico de las aguas residuales. Ingeniería de tratamiento de aguas residuales, 1-13. Recuperado el 1 de agosto del 2017 de <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lodosactivados5.pdf>
- Metcalf & Eddy. (2014). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*.
- Miletta, B. A., Amano, R. S., Alkhalidi, A. A. T., & Li, J. (2012). *Study of Air Bubble Formation for Wastewater Treatment. Volume 2: 31st Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B, (April 2016), 275-280*. Recuperado el 8 de agosto del 2017 de <https://doi.org/10.1115/DETC2011-47065>
- Mohammed, A. N., & Elbably, M. A. (2016). *Technologies of Domestic Wastewater Treatment and Reuse: Options of Application in Developing Countries. JSM Environ Sci Ecol, 4(3)*. Recuperado el 27 de octubre del 2017 de <https://www.jscimedcentral.com/EnvironmentalScience/environmental-science-4-1033.pdf>
- Moradian, A., Delijani, F., & Koshky, F. E. (2013). *The Effect of Different Parameters on the Efficiency of the Catalytic Reduction of Dissolved Oxygen*. Recuperado el 14 de octubre del 2017 de <http://www.intechopen.com/books/thermal-power-plants-advanced->

applications

- Muhammad, A. (2014). *Flexible Link Aerator for Dissolved Oxygen Generation*. Recuperado el 12 de septiembre del 2017 de http://eprints.uthm.edu.my/6319/1/MUHAMMAD_AMIR_BIN_MAT_S_HAH.pdf
- Mulinix, S. (2014). *Aeration 101 – Back to Basics*. Recuperado el 5 de septiembre del 2017 de http://aweaar.org/images/downloads/2012_Specialty_Conference_Presentations/aeration101_scott_mulinix_presentation_rev1.pdf
- Nadayil, J., Mohan, D., Dileep, K., Rose, M., Rose, R., & Parambi, P. (2015). A Study on Effect of Aeration on Domestic Wastewater, 3(2), 10-15.
- Naidoo, S., & Olaniran, A. O. (2013). *Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water resources. International Journal of Environmental Research and Public Health*. Recuperado el 5 de agosto del 2017 de <https://doi.org/10.3390/ijerph110100249>
- Nesc. (2013). *Explaining the Activated Sludge Process. Pipeline*, 14(2), 1-8. Recuperado el 2 de diciembre del 2017 de http://www.nesc.wvu.edu/pdf/ww/publications/pipline/pl_sp03.pdf
- Noble, P. A., Park, H. D., Olson, B. H., Asvapathanagul, P., Hunter, M. C., Garrido-Baserba, M., ... Rosso, D. (2016). *A survey of biofilms on wastewater aeration diffusers suggests bacterial community composition and function vary by substrate type and time. Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(14), 6361-6373. Recuperado el 2 de agosto del 2017 de <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7604-7>
- NYWEA. (2014). *Introduction to Wastewater Management*, 1-18. Recuperado el 3 de agosto del 2017 de <http://efc.syr.edu/wp-content/uploads/2015/03/Chapter1-web.pdf>
- OVIVO. (2012). *Packaged Wastewater Treatment A New Global Force in Water*. Recuperado el 9 de octubre del 2017 de http://www.ovivowater.com/wp-content/uploads/2015/06/Municipal-Wastewater_Brochure_2.pdf
- Peña, A. (2012). Control de oxígeno disuelto en un tanque de aireación de una

- planta piloto de lodos activados. Recuperado el 3 de agosto del 2017 de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/2104/PenaGuzmanCarlosAndres2012.pdf?sequence=1>
- PHED. (2014). *Sewage Treatment facilities*. Recuperado el 28 de agosto del 2017 de <http://wss.hry.nic.in/WriteReadData/Notice/SewageTreatmentProcesses.pdf>
- Pulla, E., & Chang, J. (2014). Calidad de agua trabajo de investigación oxígeno disuelto (OD). Recuperado el 1 de septiembre del 2017 de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>
- Rao, A. R., Kumar, B., & Patel, A. K. (2007). *Relative Performance of Different Shaped Surface Aeration Tanks*. *Water Qual. Res. J. Canada*, 42(1). Recuperado el 6 de octubre del 2017 de <https://www.cawq.ca/journal/temp/article/337.pdf>
- Regional District of Nanaimo. (2017). *Bowser Village Centre Wastewater Servicing Project*. Recuperado el 2 de septiembre del 2017 de http://www.rdn.bc.ca/dms/documents/wastewater-services/bowser-village-wastewater-study/wastewater_treatment_system_faq.pdf
- Roman, M.-D. (2015). *Process Optimization of Aeration in the Biological Treatment using Fine Bubble Diffusers, (May), 18-21*. Recuperado el 15 de septiembre del 2017 de https://ie.utcluj.ro/files/acta/2015/Number3/MPS2015_Roman.pdf
- Sabiote, C. R., Pérez, J. G., & Llorente, T. P. (2014). Fundamentos conceptuales de las principales pruebas de significación estadística en el ámbito educativo. Grupo Editorial Universitario, 14-17. Recuperado el 4 de septiembre del 2017 de <http://www.ugr.es/~erivera/PaginaDocencia/Posgrado/Documentos/ClementeCuadernoInferencial.pdf>
- SANITAIRE. (2013). *Aeration Systems and Efficient Oxygen Transfer*. Recuperado el 27 de octubre del 2017 de <http://scv.cwea.org/wp-content/uploads/2014/09/CWEA-Sanitaire-Aeration-Systems->

7.17.14-for-distr.pdf

Saunders, M., & Visser, B. (2015). Bottom Aeration. Recuperado el 25 de noviembre del 2017 de http://www.hmgawater.ca/uploads/1/7/2/8/17281360/011_bottom_aeration.pdf

Secretaría del Ambiente DMQ. (2016). *Sustainable quito*.

Seif, H., & Malak, M. (2013). *Textile wastewater treatment. Sixth International Water Technology Conference*. Recuperado el 11 de septiembre del 2017 de <http://konarkgroup.com/wp-content/uploads/2014/02/single1.pdf>

Sekizawa, A. T., Fujie, K., Kubota, H., Kasakura, T., Mizuno, A., Sekizawa, T., ... Mizuno, A. (2016). *All use subject to JSTOR Terms and Conditions Air diffuser performance tanks aeration sludge in activated, 57(1), 53-59*.

Serrat, M., & Méndez, A. (2012). Construcción y Validación Experimental de un Biorreactor Artesanal Tipo Tanque Agitado para Fermentaciones Sumergidas a Escala de Laboratorio Construction and Experimental Validation of a Homemade Stirred Tank Bioreactor for Lab-scale Submerged, 362-375. Recuperado el 30 de septiembre del 2017 de <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v35n3/rtq10315.pdf>

Skoczko, I., Piekutin, J., & Malinowski, L. (2015). Environmental enineering-throught young eye, 18.

Surti, H. S. (2016). *Physico-Chemical and Microbial Analysis of Waste Water from different Industry and Cod Reduction Treatment of Industrial Waste Water by using Selective Microorganisms. Int.J.Curr.Microbiol. App.Sci, 5(6), 707-717*. Recuperado el 3 de diciembre del 2017 de <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.506.077>

Syazwan. (2015). *Design and develop an efficient aeration system for Tasik UTEM- Aeration Device*. Recuperado el 3 de octubre del 2017 de [http://eprints.utem.edu.my/16591/1/Design And Develop An Efficient Aeration System For Tasik UTeM-Aeration Device.pdf](http://eprints.utem.edu.my/16591/1/Design%20And%20Develop%20An%20Efficient%20Aeration%20System%20For%20Tasik%20UTeM-Aeration%20Device.pdf)

UADC. (2015). Componentes y sistemas para el tratamiento biológico de las

- aguas residuales. Recuperado el 1 de diciembre del 2017 de http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/sistemas_aireacion.pdf
- Ugya, A., & Ajibade, F. (2016). *Convectonal and Advanced Method of Industrial Wastewater Treatment*. Recuperado el 11 de noviembre del 2017 de https://www.researchgate.net/profile/Ugya_Ay/publication/310184711_Convectonal_and_Advanced_Method_of_Industrial_WastewaterTreatment/links/5842e46308ae61f75dd32769/Convectonal-and-Advanced-Method-of-Industrial-WastewaterTreatment.pdf
- UN-WWAP. (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Recuperado el 8 de noviembre del 2017 de <https://doi.org/978-92-3-100071-3>
- US EPA. (1989). *Design Manual - Fine Pore Aeration Systems*. Recuperado el 23 de octubre del 2017 de <file:///C:/Users/Manel/Dropbox/UCI/Papers/Linking/References/US EPA 1983.pdf>
- Viegas, S. (2016). *Activated sludge modeling of Vale Faro Waste Water Treatment Plant*. Recuperado el 12 de septiembre del 2017 de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090415128/Artigo Sandra Viegas.pdf>
- Vogelaar, J. C. T., Klapwijk, A., Van Lier, J. B., & Rulkens, W. H. (2000). *Temperature effects on the oxygen transfer rate between 20 and 558 °C*. *Water Research*, 34(3), 1037-1041. Recuperado el 8 de octubre del 2017 de [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00217-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00217-1)
- Wason, M., Purhoit, S., Dehon, D., & Magee, M. (2012). *The Wastewater Treatment Process*. *Aquaculture*, (3340), 5-20. Recuperado el 1 de diciembre del 2017 de <http://dcomm.cxc.lsu.edu/portfolios/08spr/spuroh1/requirements/processfinal.pdf>
- Wiggins, B., & Manager, W. (2015). *Energy efficient wastewater lagoon mixing/aeration*. *Bendigo Exhibition Centre*, 1. Recuperado el 5 de diciembre del 2017 de http://www.wioa.org.au/conference_papers/2015_vic/documents/Bre

e_Wiggins.pdf

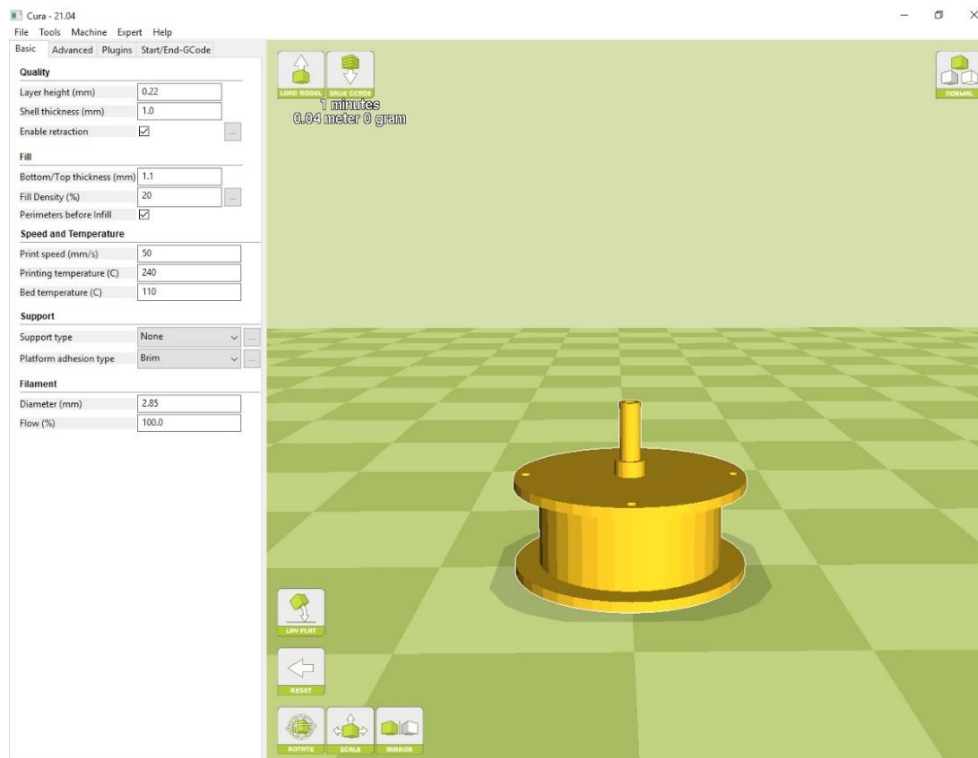
- Wisconsin Department of Natural Resources. (2016). *Basic General Wastewater Study Guide*. Recuperado el 7 de noviembre del 2017 de <http://dnr.wi.gov/regulations/opcert/documents/StudyGuideBasicGeneral.pdf>
- WWAP. (2016). *The United Nations World Water Development Report 2016: Facts and Figures*. Recuperado el 5 de octubre del 2017 de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Xu, Y., Zhu, N., Sun, J., Liang, P., Xiao, K., & Huang, X. (2017). *Evaluating oxygen mass transfer parameters for large-scale engineering application of membrane bioreactors*. *Process Biochemistry*, 60, 13-18. Recuperado el 22 de septiembre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.05.020>
- YanJun, J. (2015). *An Alternative Mathematical Model for Oxygen Transfer Evaluation in Clean Water*, (1), 1-10. Recuperado el 17 de noviembre del 2017 de [https://www.wwdmag.com/sites/wwdmag.com/files/A New Model for Oxygen Transfer Model in Clean Water-JH-Water online \(1\).pdf](https://www.wwdmag.com/sites/wwdmag.com/files/A%20New%20Model%20for%20Oxygen%20Transfer%20Model%20in%20Clean%20Water-JH-Water%20online%20(1).pdf)

ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de parámetros de diseño

Datos Iniciales	Valor	Unidad
ρ_{H2O}	1000	kg/m ³
Patm	10.51	psi
n	0.8	-
gravedad	9.8	m/s
h	2.4	m
Tamb	15	°C
db	0.002	m
σ	0.087	N/m
Q	2.5	m ³ /h
	0.042297248	m ³ /min
	1.49	cfm
PH ₂ O	23520	Pa
	3.41	psi
Pabs	13.92	psi
	72.00	cm Hg
Tad	29.81	°C
Tg	44.81	°C
ρ_g	1.05	kg/m ³
do	1.50E-04	m
	1.5E-01	mm
f	605881321.96	h ⁻¹
	168300.37	s ⁻¹
	1.65049E-09	s ⁻¹
N	19.76	

Anexo 2. Visualización del difusor de aire, previo a la impresión en 3D



Anexo 3. Tanque de aireación con el sistema de aireación.



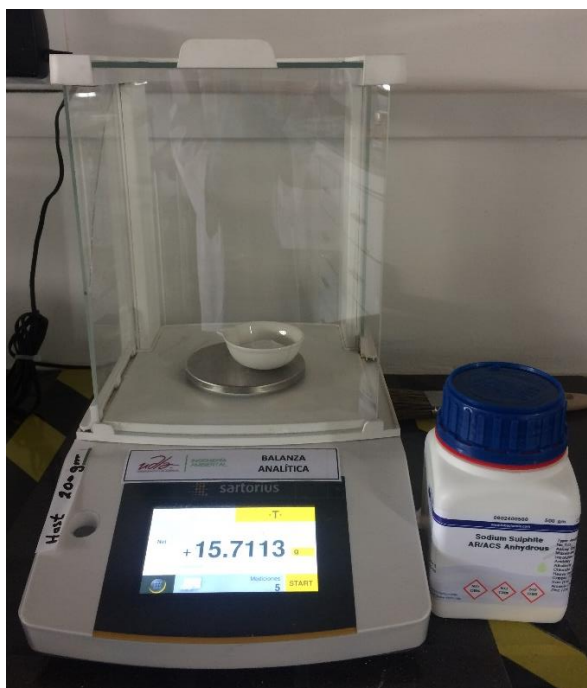
Anexo 4. Cambio de placa del difusor previo a la etapa de experimentación



Anexo 5. Vista superior del tanque de aireación con el difusor de aire



Anexo 6. Peso del sulfito de sodio previo a la adición en el tanque de aireación



Anexo 7. Formación de burbujas de aire en el líquido a 2.5 m³/h



Anexo 7. Medición de la tasa de transferencia de oxígeno con ayuda del Oxímetro.



Anexo 8. Datos obtenidos en la etapa de experimentación.

Unidades experimentales	P. Barométrica Kpa	DO mg/L	Temperatura C	Cs-C0 mg/l	KLa h-1	KLa20 h-1
1	72.57	0.19	18.97	6.34	68.33	70.02
2	72.79	0.15	18.3	6.53	67.65	70.43
3	72.72	0.19	18.6	6.46	56.07	57.96
4	72.48	0.18	17.9	7.25	69.75	73.31
5	72.5	0.17	17.6	7.34	68.87	72.90
6	72.63	0.17	18	7.48	71.13	74.58
7	72.52	0.19	17.20	8.06	71.93	76.87
8	72.4	0.19	17.8	8.04	69.82	73.56
9	72.8	0.18	17.7	8.00	70.79	74.76
10	72.75	0.18	19.4	6.55	68.67	69.66
11	72.7	0.19	18.6	6.72	68.93	71.26
12	72.61	0.19	17.8	6.76	68.01	71.65
13	72.56	0.18	16.9	7.62	70.28	75.64

14	72.61	0.19	16.7	7.62	69.26	74.90
15	72.59	0.18	17.8	7.50	71.14	74.95
16	72.43	0.18	17.2	8.21	71.07	75.94
17	72.48	0.2	17	8.29	71.17	76.42
18	72.58	0.18	16.4	8.43	63.08	68.70
19	72.64	0.19	16.1	6.94	72.48	79.51
20	72.64	0.19	15.7	7.06	69.47	76.93
21	72.66	0.19	15.8	7.07	61.24	67.66
22	72.67	0.19	17	7.28	69.79	74.94
23	72.64	0.18	16.9	7.33	65.39	70.38
24	72.72	0.19	16.7	7.32	73.07	79.02
25	72.73	0.19	16.1	8.23	65.68	72.05
26	72.41	0.19	16.1	8.32	74.51	81.73
27	72.45	0.19	15.9	8.33	62.95	69.38

